

جامعة محمد خيضر  
- بسكرة -

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie Mécanique  
Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الميكانيكية  
المرجع: .....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat LMD en Génie Mécanique**

**Spécialité (Option) : Génie Mécanique**

**Intitulé**

**Comportement thermo-physique d'un puits canadien :  
application aux sites de l'oasis algérien.**

Présentée par :

**Charaf-eddine MEHDID**

Soutenue publiquement le 17/06/2021

**Devant le jury composé de :**

Dr. Rachid Atmani	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. Nouredine Moummi	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. Abdelhafid Brima	Professeur	Examineur	Université de Batna
Dr. Yamina Harnane	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université d'Oum El Bouaghi

A ma mère, A mon père,

A ma femme,

A Lina, Malak et Amir.

A mon frère et à ma sœur.

# REMERCIEMENTS

Je dois tout d'abord remercier ALLAH, pour m'avoir donné la santé et la force pour accomplir ce travail.

Le moment est venu d'exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Noureddine MOUMMI, Professeur à l'Université de Biskra, qui est à l'origine de cette thèse, qui m'a fait confiance en me proposant ce sujet et surtout sa patience tout au cours ce travail. Ses remarques et son esprit de synthèse m'ont permis d'apporter une nouvelle vision sur la problématique.

Je voudrais remercier tout particulièrement le Professeur Abdelhafid BRIMA pour son soutien et ses encouragements indéfectibles tout au long de la réalisation de ce travail. Je voudrais également saluer ses qualités "humaines" de co-directeur de thèse, son humour et aussi sa compréhension.

Je tiens à remercier chaleureusement le Professeur Adel BECHABANE qui fut pour moi le grand frère attentif et disponible malgré ses nombreuses préoccupations. Ses idées stratégiques, ses conseils, sa rigueur scientifique m'ont permis d'obtenir des résultats de haute qualité. Je n'oublie pas de remercier mon frère le docteur Amar ROUAG. J'estime avoir énormément appris via sa relation scientifique durant la réalisation de cette thèse. Son dévouement et sa rigueur scientifique resteront pour moi des modèles.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ceux qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail. Monsieur Rachid ATMANI, qui a bien voulu présider le jury de soutenance, Monsieur Abdelhafid BRIMA, Professeur à l'Université de Batna et Madame Yamina HARNANE Maître de conférences « A » à l'Université d'Oum El-Bouaghi qui ont accepté de rapporter et examiner cette thèse.

Parmi les enseignants du département de génie mécanique, je tiens à remercier plus particulièrement mes enseignants le Professeur Abdelhafid MOUMMI et le Professeur Mabrouk HECINI pour leurs aides et orientations.

Je tiens également à remercier mes collègues, mes amis et mes frères Sadam-Houcine SELLAM, Fouad MAUCHE et Mohammed-Amin MELHEGUEG.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à la famille des départements de Génie Mécanique et de l'Agronomie de l'Université de Biskra, tous les directeurs et les membres des laboratoires LGM et LGEM.

Je réserve le meilleur remerciement à ma femme pour sa patience, son soutien, son encouragement et son support inconditionnel. Quelle trouve ici ma reconnaissance de ne pas m'avoir tenu rigueur de passer plus de temps avec mon manuscrit qu'avec elle et avec mes enfants.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>II</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>XI</b>
<b>NOMENCLATURE</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUME</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XVI</b>
<b>المخلص</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>4</b>
<b>CHAPITRE 1. ENERGIE GEOTHERMIQUE</b>	<b>5</b>
1 Introduction à l'énergie géothermique	5
2 Caractéristiques de l'énergie géothermique	6
3 Le statut mondial de l'utilisation de ressources géothermiques	8
4 Classification des ressources géothermiques	14
4.1 Température & exergie	14
4.2 Profondeur	16
4.2.1 Les systèmes géothermiques profonds	17
4.2.2 Les systèmes géothermiques proche de la surface (peu profonde)	19
4.3 Contrôle géologique	27
4.4 Potentiel	32
5 Discussion	35
6 Conclusion	38
<b>CHAPITRE 2. ECHANGEURS DE CHALEUR SOUTERRAINS HORIZONTAUX</b>	
<b>AIR-SOL : COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE</b>	<b>40</b>
1 Description du système passif horizontal	41

2	Synthèse des études relatives à l'évaluation des performances des ECSHASs	44
2.1	Etudes basées sur des algorithmes	44
2.2	Etudes analysant les modèles d'ECSHAS	48
2.3	Etudes expérimentales	50
3	Effet des paramètres de conception sur les performances des systèmes d'ECSHAS	53
3.1	Effet de conditions géographiques et climatiques	53
3.1.1	Température du sous-sol et effet des traitements de surface	54
3.2	Effet des propriétés de sol	56
3.2.1	Diffusivité thermique du sol	57
3.2.2	Conductivité thermique du sol	59
3.2.3	Composition du matériau de remblayage	63
3.3	Effet des paramètres thermiques et du débit d'air	64
3.4	Effet des propriétés du conduit	66
3.5	Effet de l'interférence thermique entre les conduits (tubes) adjacents	68
3.6	Effet de la durée de fonctionnement et mode de fonctionnement	71
4	Discussion	74
5	Conclusion	77
	<b>PARTIE II. MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT THERMIQUE DES ECSHASs</b>	<b>79</b>
	<b>CHAPITRE 3. MODELISATION MATHEMATIQUE DES ECSHASs</b>	<b>80</b>
1	Bases analytiques du modèle proposé	81
1.1	Développement analytique	81
1.2	Estimation du rayon du sol par le modèle basique (RBM)	84
1.3	Vérification du modèle basique	86
2	Description du modèle proposé (GRBM)	88
2.1	Estimation de la température de l'air	89
2.2	Estimation de la résistance thermique du sol	90
2.3	Organigramme du modèle GRBM	94

2.4	Validation expérimentale	96
3	Conclusion	99
<b>CHAPITRE 4. DIMENSIONNEMENT DES AERO-REFROIDISSEURS GEOETHERMAUX : APPLICATION DES MODELES PROPOSES</b>		<b>101</b>
1	Description du système	103
2	Formulation mathématique	104
2.1	Paramètres du mélangeur d'air	104
3	Etude de cas d'application de l'aéro-refroidisseur géothermal à la région de Biskra	105
3.1.1	Hypothèses	105
3.1.2	Calcul du rayon de sol	106
3.1.3	Calcul de la longueur de l'échangeur par GRBM	108
4	Conclusion	111
<b>PARTIE III : ANALYSE DE DONNEES EXPERIMENTALES</b>		<b>113</b>
<b>CHAPITRE 5. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL DE L'UNIVERSITE DE BISKRA</b>		<b>114</b>
1	Méthode expérimentale	114
1.1	Description de la configuration expérimentale de l'ECSHAS	114
1.2	Mesures expérimentales	117
1.3	Caractérisation du sol	119
2	Données météorologiques	120
2.1	La température	120
2.2	Humidité relative	122
3	Conclusion	123
<b>CHAPITRE 6. DISCUSSION SUR LE PHENOMENE DE SATURATION DU SOL AUTOUR DES ECSHASs</b>		<b>124</b>
1	Analyse énergétique de l'ECSHAS	124
2	Analyse thermique de l'ECSHAS	125
2.1	Saturation thermique du sol	125

2.2 Effet du débit massique d'air et du temps de fonctionnement sur la saturation du sol	130
3 Conclusion	132
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>134</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>138</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>154</b>

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1.</b> Croissance de la capacité installée d'énergie électrique produite à partir de ressources énergétiques géothermiques dans le monde entier au cours de la période 1975-2005.	10
<b>Figure 1.2.</b> Puissance électrique et thermique produite à partir de sources d'énergie géothermique à l'échelle mondiale depuis 1975.	10
<b>Figure 1.3.</b> Evolution des utilisations géothermiques directes en TJ/an depuis 1995 à 2015.	12
<b>Figure 1.4.</b> Applications géothermiques directes dans le monde entier en 2015, réparties en pourcentage de la capacité totale installée ( $MW_{th}$ ).	12
<b>Figure 1.5.</b> Carte de classification des ressources géothermiques par IExS sur le diagramme de Mollier haute exergie : $IExS > 0.5$ ; moyenne exergie : $0.05 < IExS < 0.5$ ; basse exergie: $IExS < 0.05$ .	15
<b>Figure 1.6.</b> Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température.	17
<b>Figure 1.7.</b> Différents types de centrales d'énergie électrique géothermale.	18
<b>Figure 1.8.</b> Différentes technologies géothermiques en boucles fermées.	21
<b>Figure 1.9.</b> Schématisation du système ouvert.	22
<b>Figure 1.10.</b> Taxonomie des pompes à chaleur géothermiques.	26
<b>Figure 1.11.</b> Représentation schématique des différents gisements et systèmes géothermiques selon la typologie géologique.	28
<b>Figure 1.12.</b> Représentation schématique des différentes catégories de la géothermie.	32
<b>Figure 1.13.</b> Classification des ressources et des réserves géothermiques par potentiel.	33
<b>Figure 1.14.</b> Classification-cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile, les réserves et ressources minérales (CCNU 2009).	34
<b>Figure 1.15.</b> Cartographie des classes de Rybach (2010) dans le cadre 3D de la CCNU-2009.	35
<b>Figure 2.1.</b> Principe de fonctionnement d'ECSHAS.	41
<b>Figure 2.2.</b> Différentes configurations de conduits sous le niveau du sol.	41
<b>Figure 2.3.</b> Système en boucle ouverte :a) Intégration avec plancher creux ;b) Intégration avec mur de bâtiment creux.	42
<b>Figure 2.4.</b> Système en boucle fermée :a) Intégration avec plancher creux ;b) Intégration avec mur de bâtiment creux.	42
<b>Figure 2.5.</b> Système de boucle horizontale et de boucle verticale.	43
<b>Figure 2.6.</b> Système à un conduit et conduits parallèles.	43
<b>Figure 2.7.</b> a) Boucles sinueuses ; b) Boucle verticale en spirale.	43
<b>Figure 2.8.</b> Représentation graphique par année du nombre d'études de recherche expérimentale pour les ECSHASs.	50
<b>Figure 2.9.</b> Représentation graphique du nombre de papiers en fonction du type d'étude.	51
<b>Figure 2.10.</b> a) Energie de refroidissement cumulée; b) Energie de chauffage cumulée (du 13-07-2014 au -07-13-2017).	61

<b>Figure 2.11.</b> La température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour les systèmes sec et humide après 10 heures de fonctionnement pour le mois d'avril 2017.	62
<b>Figure 2.12.</b> Conductivité thermique en fonction de la densité du sol à trois teneurs d'humidité différents: a) Sable (1.4, 2.5, 3.3%) ; b) Limon argileux (9.3, 14.2, 18.3%).	63
<b>Figure 2.13.</b> Performances d'ECSHAS sous différentes conditions de température de l'air à l'entrée.	65
<b>Figure 2.14.</b> Performances d'ECSHAS sous différentes conditions d'humidité relative à l'entrée.	65
<b>Figure 2.15.</b> Performances d'ECSHAS sous différentes conditions de vitesse de l'air.	66
<b>Figure 2.16.</b> Variation horaire du facteur de détérioration pour deux sols différents le long du conduit sous des conditions transitoires.	67
<b>Figure 2.17.</b> Variation horaire du facteur de détérioration pour deux sols différents le long du conduit sous des conditions transitoires pour différents diamètres.	67
<b>Figure 2.18.</b> Evolution de l'efficacité moyenne et du coefficient de performance (COP) en fonction: a) de la longueur du conduit; b) du diamètre du conduit.	68
<b>Figure 2.19.</b> Variation de la puissance thermique d'un ECSHAS en fonction d'espacement des conduits (tubes) à différents débits: (1)100 m <sup>3</sup> /h; (2)407 m <sup>3</sup> /h; (3)1500 m <sup>3</sup> /h.	69
<b>Figure 2.20.</b> Effet des paramètres de conception ECSHAS sur le rapport du taux de chaleur.	70
<b>Figure 2.21.</b> Température radiale du sol à l'entrée de l'ECSHAS pour différentes durées de fonctionnement continu.	70
<b>Figure 2.22.</b> Température radiale du sol à l'entrée de l'ECSHAS pour différentes conductivités thermiques après 12 heures de fonctionnement continu.	71
<b>Figure 2.23.</b> Température de l'air à la sortie en fonctionnement intermittent (mode 2) et continu avec : a) sol-1 ; b) sol-2; c) sol-3; d) Température de l'air à la sortie en fonctionnement intermittent (mode 2) des différents sols.	72
<b>Figure 2.24.</b> Différence en température du sol et de l'air sortant entre modes de fonctionnement continu et intermittent.	73
<b>Figure 2.25.</b> Différence en capacité de refroidissement entre modes de fonctionnement continu et intermittent.	74
<b>Figure 2.26.</b> Variation de la température du sol sur une année.	74
<b>Figure 3.1.</b> Schéma du cylindre creux semi infini étudié.	82
<b>Figure 3.2.</b> Organigramme du modèle RBM.	85
<b>Figure 3.3.</b> Vérification du modèle RBM avec le travail de Barakat et al.	87
<b>Figure 3.4.</b> Schéma illustratif de la subdivision du conduit d' EAHE et du sol en plusieurs couches selon le modèle GRBM, où i, j et k sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon	89
<b>Figure 3.5.</b> Schéma illustratif de l'épaisseur du sol perturbé, $\delta$ , et le rayon du sol, $r_\delta$ .	91

<b>Figure 3.6.</b> Vues axiale et radiale du conduit et du sol environnant à la $j^{\text{ème}}$ couche où le sol est considéré comme un cylindre creux semi-infini, où $i$ , $j$ et $k$ sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon.	92
<b>Figure 3.7.</b> Organigramme détaillé du modèle GRBM.	95
<b>Figure 3.8.</b> Validation du modèle GRBM avec les résultats expérimentaux réalisés après différentes heures de fonctionnement.	98
<b>Figure 4.1.</b> Schéma du nouveau Aéro-Refroidisseur Géothermal (GAC).	103
<b>Figure 4.2</b> Schéma du mélangeur d'air du GAC.	105
<b>Figure 4.3.</b> Rayon du sol $r_0$ utilisé dans le calcul du flux thermique.	107
<b>Figure 4.4.</b> Température radiale du sol à l'entrée de l'ECSHAS pour différentes durées de fonctionnement continu.	108
<b>Figure 4.4.</b> Résultats de dimensionnement l'ECSHAS.	109
<b>Figure 4.5.</b> Effet de la température ambiante $T_1$ sur la température du mélange d'air $T_3$ pour différents débits massiques d'air.	111
<b>Figure 5.1.</b> Photos de l'installation expérimentale de l'ECSHAS à l'Université de Biskra, sud de l'Algérie $34^{\circ} 47'N-005^{\circ} 43'E$ : (a) un trou en forme de serpent; (b) Conduit horizontal en PVC enterré avec thermocouples.	114
<b>Figure 5.2.</b> Position des thermocouples mesurant les températures d'écoulement d'air ( $T_{ent}$ , $T_1$ , $T_2$ ,..... $T_{14}$ ) avec les distances suivantes (depuis l'entrée EAHE) : 63, 469, 872, 1089,1304, 1707, 2337, 2607, 3010, 3400, 3589, 3782, 4210, 4700 cm.	115
<b>Figure 5.3.</b> Température mensuelle maximale, moyenne et minimale dans la région de Biskra (2004-2013).	122
<b>Figure 5.4.</b> Humidité relative annuelle moyenne dans la région de Biskra (2001-2014).	122
<b>Figure 6.1.</b> Température de l'air ambiant à Biskra (2 mai 2013).	126
<b>Figure 6.2.</b> Evolution de la température de l'air le long du tuyau de l'ECSHAS.	126
<b>Figure 6.3.</b> Température d'entrée d'air et température du sol à quatre sections de l'échangeur de chaleur (~ 55 mm près de la paroi du conduit d'ECSHAS) avec fonctionnement à temps continu. Les symboles et les lignes droites illustrent respectivement les résultats expérimentaux et semi-analytiques.	127
<b>Figure 6.4.</b> Evolution de l'efficacité moyenne avec le temps de fonctionnement.	128
<b>Figure 6.5.</b> Evolution du coefficient global moyen du transfert de chaleur (CGMTC) et de la température de l'air à différentes sections en fonction du temps de fonctionnement.	129
<b>Figure 6.6.</b> Température de l'air ambiant.	131
<b>Figure 6.7.</b> Variation du CGTC par unité de température en fonction de la durée de fonctionnement pour différents débits massiques à différentes sections de l'ECSHAS.	132

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1.</b> Les pays dans lesquels la capacité électrique géothermique installée est limitée environ 100 MW <sub>e</sub> ou plus.	11
<b>Tableau 1.2.</b> Schéma de catalogue des ressources géothermiques en fonction de la température selon les différents auteurs .	15
<b>Tableau 1.3.</b> Classification de systèmes géothermiques par le contrôle géologique.	29
<b>Tableau 1.4.</b> Modèles d'occurrence géothermique de Brophy.	31
<b>Tableau 1.5.</b> Evaluation de la classification par potentiels en termes de catégories (CCNU 2009).	34
<b>Tableau 2.1.</b> Modèles de transfert de chaleur au sein des ECSHASs.	45
<b>Tableau 2.2.</b> Les algorithmes permettant de prédire les performances des ECSHASs.	46
<b>Tableau 2.3.</b> Logiciels de modélisation et simulation des ECSHASs.	49
<b>Tableau 2.4.</b> Classification des études expérimentales dans le monde par ordre chronologique.	51
<b>Tableau 2.5.</b> Résumé des travaux relatifs aux effets des conditions géographiques et climatiques.	53
<b>Tableau 2.6.</b> Travaux relatifs à l'estimation de la température du sol en fonction de la profondeur.	54
<b>Tableau 2.7.</b> Modèles empiriques estimant la température du sous-sol.	55
<b>Tableau 2.8.</b> Effets de traitements de surface sur la température du sous-sol.	56
<b>Tableau 2.9.</b> Propriétés thermo-physiques des sols.	57
<b>Tableau 2.10.</b> Résumé sur les performances thermiques en termes de chute de température, de température du sol, de taux d'échange thermique et de COP.	58
<b>Tableau 2.11.</b> Modèles d'estimation de la conductivité thermique de différents sols $\lambda$ .	60
<b>Tableau 2.12.</b> Effet du matériau de remblayage sur les performances des échangeurs de chaleur souterrains.	64
<b>Tableau 2.13.</b> Effets des propriétés thermiques et du débit d'air sur les performances des ECSHASs.	65
<b>Tableau 2.14.</b> Effets des propriétés du conduit sur les performances des ECSHASs.	67
<b>Tableau 2.15.</b> Effet des matériaux du conduit sur les potentiels de refroidissement et du chauffage de ECSHASs.	68
<b>Tableau 3.1.</b> Paramètres d'entrée considérés de comparaison avec Barakat et al.	86
<b>Tableau 3.2.</b> Paramètres d'entrée pour la comparaison avec Mathur et al.	88
<b>Tableau 3.3.</b> Vérification de la température du sol estimée par le modèle RBM par rapport aux données numériques de Mathur à 10 m de distance.	88
<b>Tableau 3.4.</b> Propriétés physiques et thermiques (de l'air, PVC et du sol environnant) utilisées dans la validation du modèle GRBM.	96
<b>Tableau 3.5.</b> Comparaison des températures de l'air prédites par le modèle GRBM avec les mesures expérimentales.	97

<b>Tableau 4.1.</b> Paramètres d'entrée utilisés dans l'application d'ECSHAS dans la région de Biskra (Algérie).	106
<b>Tableau 4.2.</b> Exemple d'application d'un Aéro-refroidisseur géothermal (GAC): détails des ECSHAS, tour de refroidissement sèche et mélangeur d'air.	109
<b>Tableau 5.1.</b> Caractéristiques principales et spécifications techniques des équipements de mesure utilisés dans la configuration expérimentale d'ECSHAS.	115
<b>Tableau 5.2.</b> Température de l'air mesurée à différentes longueurs horizontal d'ECSHAS.	118
<b>Tableau 5.3.</b> Résultats de la caractérisation du sol de Biskra.	120
<b>Tableau 5.4.</b> Températures mensuelles moyennes (° C) pour la période 2004-2013.	121
<b>Tableau 5.5.</b> Moyennes annuelles d'humidité relative (%) pour la période 2001-2014.	122

# NOMENCLATURE

Symboles	Définitions	Unités
C <sub>p</sub>	Chaleur massique	J / Kg K
e <sub>c</sub>	Energie cinétique	J / kg
e <sub>p</sub>	Energie potentiel	J / kg
d	Diamètre interne de tube	M
g	Gravité	m/s <sup>2</sup>
P <sub>th</sub>	Puissance thermique	J / s
P <sub>u</sub>	Puissance utile	J / s
r	Rayon	M
q'	Flux de chaleur par unité de longueur	W / m
H	Enthalpie spécifique	J /kg
h	Coefficient d'échange de chaleur par convection	W/m <sup>2</sup> K
K	Coefficient d'échange de chaleur global	W/m <sup>2</sup> K
L	Longueur du conduit	M
ṁ	Débit massique	Kg / s
Q <sub>e</sub>	Taux d'échange de chaleur	W
S	Section du conduit	m <sup>2</sup>
U	Coefficient d'échange de chaleur global	W/m <sup>2</sup> K
T	Température	°C
t	Temps	s
V	Vélocité	m/s
S	Section du conduit	m <sup>2</sup>
R	Résistance thermique	m <sup>2</sup> K / W
J <sub>0</sub>	fonction de Bessel de première espèce d'ordre zéro	-
J <sub>1</sub>	fonctions de Bessel de première espèce d'ordre un	-
β <sub>n</sub>	Racine de la fonction J <sub>0</sub> (x)	-
x	Longueur	m

Symbole grecque	Définition	Unité
N	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]
Λ	Conductivité thermique	[W/m K]
M	Viscosité dynamique	[Pas.s]
P	Masse volumique	[kg / m <sup>3</sup> ]
Δ	Epaisseur	m
α	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> /s
Δ	Ecart	-
H	Efficacité énergétique	-

Indices	Définitions
0	Initiale
a	Air
am, 1	Ambiant
2	Air géothermique
3	Mélange d'air de 1 et 2
cv	Convective
e	Externe
exp	Expérimentale

H	Hydraulique
int	Interne
ent	Entrée
i	Indice du temps
j	Indice de couche
K	Indice de rayon
n	Indice
m	Indice du temps
moy	Moyenne
max	Maximum
c	Conduit
s	Sol
sort	Sortie
m	Moyenne
tot	Total

### Nombres adimensionnels

Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandlt
Re	Nombre de Reynolds

### Abréviations

CC	Centrales de cogénération
CCRO	Centrales à Cycle Rankine Organique
CCNU	Classification-cadre des Nations Unies
COP	Coefficient de performance
CGTC	Coefficient global de transfert de chaleur
CGMTC	Coefficient global moyen de transfert de chaleur
DFN	Dynamique des fluides numérique (Computational fluid dynamics "CFD")
DD	Détente directe
ECS	Echangeur de chaleur souterrains
ECSHAS	Echangeur de la chaleur souterrain horizontal air-sol
EAHE	Echangeur géothermal air-sol (Earh to Air Heat Exchanger)
EATHE	Echangeur géothermal tunnel air-sol ( Earth-To-Air-Tunnel heat Exchanger)
EWHE	Echangeur géothermal eau-sol (Earth-To-Water-Heat-Exchanger)
IExS	Indice d'exergie spécifique
MOG	Modèle d'occurrence géothermique
NUT	Nombre d'unités de transfert thermique
PEHD	Polyéthylène haute densité
PCCS	Pompe à chaleur couplée avec le sol
PCES	Pompe à chaleur des eaux souterraines
PCESU	Pompe à chaleur pour eaux de surface
PCG	Pompes à chaleur géothermique
SGS	Système géothermique stimulé (Enhanced Geothermal System "EGS")
RSC	Roches sèches chaudes (Hot Dry Rock "HDR")
TRG	Test de réponse géothermique
DTML	Différence de Température Moyenne Logarithmique
ZIT	Zone d'influence thermique

# RESUME

L'étude des phénomènes de transfert thermique dans les échangeurs de la chaleur souterrains horizontaux air-sol (ECSHASs) destinés aux applications de rafraîchissement / préchauffage permet la compréhension du fonctionnement de ces systèmes, ce qui nous permettra d'améliorer davantage leurs performances. Cette idée s'impose comme la problématique centrale à aborder dans cette thèse. La première partie vise à offrir au lecteur un aperçu général de nombreux aspects différents de l'énergie géothermique tel que ses caractéristiques, le statut mondial de l'utilisation de ressources géothermiques ainsi que la classification des différents types de systèmes géothermiques. Par la suite, nous nous sommes principalement intéressés à centrer notre analyse bibliographique sur les échangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol, ECSHASs, appropriés aux régions arides et semi-arides. Dans cette perspective, nous découvrons soigneusement l'organisation des approches relatives à l'évaluation des ECSHASs, de même, les effets des paramètres de conception sur les performances de ces systèmes.

La deuxième partie retrace précisément le sujet de la saturation lié au fonctionnement continu des ECSHASs, en présentant de nouveaux modèles semi-analytiques. Dans cette direction, nous mettons l'accent sur la mise en œuvre des modèles développés en matière de dimensionnement des ECSHASs intégré au sein des aéro-refroidisseurs géothermaux.

La troisième partie arrive après avoir touché conjointement l'interdisciplinarité entre la solution analytique et la simulation numérique. Des lors, cette partie réservée à l'expérimentation, décrit minutieusement l'installation pilote accompagnée par la caractérisation du sol et une analyse climatologique appropriée à la région de Biskra. L'analyse spatio-temporelle de la saturation du sol fait la clôture de cette partie.

**Mot clés :** géothermie peu profonde, échangeurs de chaleurs souterrains horizontaux air-sol, approche semi-analytique, saturation du sol, Aéro-refroidisseur géothermal.

# ABSTRACT

The study of heat transfer phenomena in earth-to-air heat exchanger (EAHE) intended for cooling/preheating applications allows the understanding of the functioning of these systems, which will allow us to further improve their performance. The latter stands out as the central issue to be addressed in this thesis. The first part aims to provide the reader with a general overview of many different aspects of geothermal energy such as its characteristics, the global status of the use of geothermal resources as well as the classification of different types of geothermal systems. Subsequently, we were mainly interested in focusing our analysis on the horizontal underground air-to-earth heat exchangers, EAHE, suitable for arid and semi-arid regions. In this perspective, we carefully discover the organization of approaches relating to the evaluation of EAHEs, as well as the effects of design parameters on the performance of these systems.

The second part precisely retraces the subject of saturation linked to the continuous functioning of EAHEs, by presenting new semi-analytical models. The second part precisely retraces the subject of saturation linked to the continuous functioning of EAHEs, by presenting new semi-analytical models. In this direction; we are emphasizing the implementation of the models developed in terms of sizing of EAHEs integrated within geothermal air coolers.

The third part comes after having jointly touched on the interdisciplinary between the analytical solution and numerical simulation. From then on, this part of the experimentation described amply the pilot installation accompanied by the characterization of the soil and a climatological analysis appropriate to the region of Biskra. The space-time analysis of the soil saturation closes this part.

**Key words:** shallow geothermal energy, air-soil heat exchangers, semi-analytical approach, soil saturation, geothermal air cooler.

# الملخص

تسمح دراسة ظواهر النقل الحراري في المبادلات الحرارية الأفقية بين الهواء و الأرض (م ح أ ه أ) والمخصصة لتطبيقات التبريد / التسخين المسبق بفهم عمل هذه الأنظمة، مما سيسمح لنا بتحسين أدائها. هذا الأخير يعتبر الفكرة المركزية التي سيتم تناولها في هذه الأطروحة. يهدف الجزء الأول إلى تزويد القارئ بنظرة عامة عن العديد من الجوانب المختلفة للطاقة الحرارية الأرضية مثل خصائصها، والوضع العالمي لاستخدام موارد الطاقة الحرارية الأرضية، فضلاً عن تصنيف الأنواع المختلفة من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية. بعد ذلك، شمل إهتمامنا بالتركيز على تحليل المبادلات الحرارية الأفقية بين الهواء و الأرض، (م ح أ ه أ)، المناسبة للمناطق الجافة وشبه الجافة. في هذا المنظور، نكتشف بعناية تنظيم المناخات المتعلقة بتقييم (م ح أ ه أ)، وكذلك تأثير إعدادات التصميم على أداء هذه الأنظمة. يتتبع الجزء الثاني بدقة موضوع التشعب المرتبط بالعمل المستمر للمبادلات الحرارية الأفقية بين الهواء و الأرض، من خلال تقديم نماذج نصف تحليلية جديدة. في هذا الاتجاه سنركز على تنفيذ النماذج المقدمة من حيث التحجيم. يقدم الجزء الثالث وصفاً للتركيب التجريبي، مصحوباً بتوصيف التربة وتحليل مناخي مناسب لمنطقة بسكرة. التحليل الزمني و المكاني لظاهرة تشعب التربة يمثل الجزء الأخير للأطروحة.

**الكلمات المفتاحية:** نظام جيوحراري، مبادل جيوحراري أفقي من نوع هواء/أرض، نهج نصف تحليلي، تشعب التربة، مبرد الهواء الجيوحراري.

# INTRODUCTION GENERALE

L'énergie géothermique est une source inépuisable d'énergie thermique et électrique (24h / 24 et 7j / 7) sur une échelle de temps humaine. La particularité de cette source est toutefois de ne pas dépendre à priori aux conditions météorologiques. Egalement, son utilisation abordable est respectueuse de l'environnement et soulage davantage la dépendance aux combustibles fossiles, aidant ainsi à conserver les précieuses ressources chimiques pour l'avenir.

En effet, on distingue les ressources géothermiques profondes qui fournissent de l'énergie thermique et électrique (thermique convertie) d'une part, et, d'autre part l'utilisation de l'énergie géothermique à partir de ressources peu profondes pour la production d'énergie à basse température pour les applications de chauffage et de refroidissement. Ces systèmes à basse enthalpie sont de plus en plus appliqués et représentent une technologie qui soutient l'utilisation durable de l'énergie depuis plus de 40 ans telles que les pompes à chaleur géothermiques, les puits canadiens (préchauffage/rafraîchissement du renouvellement d'air) ou encore le stockage/ le délestage d'énergie thermique (à court ou moyen terme). Plus récemment, ces composants des systèmes d'énergie géothermique suscitent un regain d'intérêt dans le milieu énergétique et font également l'objet de recherches d'où leurs amélioration en permanence.

Cette thèse se situe dans la perspective du développement des échangeurs horizontaux air-sol, et qui rentre en concordance avec la lignée du mode des projets CNEPRU soutenus par le ministère algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Or, les études antérieures réalisées par l'équipe de Pr N. Moumami et Pr A. Benchabane nous poussèrent vigoureusement vers cette thématique.

En faite, c'est sur la base des mesures expérimentales récoltées du banc d'essai pilote implanté à l'université de Biskra, ainsi que l'analyse de la revue de la littérature et au cours de discussions avec les thermiciens et les énergéticiens du département de génie mécanique de l'université de Biskra, que nous nous sommes rendus compte très rapidement du manque de compréhension des phénomènes physiques sous-jacents à la saturation du sol avoisinant les échangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol (ECSHASs) durant la période de refroidissement.

## Introduction générale

Ce dernier constitue quasiment tout le temps, l'axe sensible et fragile de l'opérationnalité des ECSHASs et élucidait notamment l'origine de l'implantation d'échangeurs surdimensionnés. Rejoignant à cela l'hégémonie des logiciels de simulation sur l'aspect analytique dans le contexte de règles de dimensionnement simplifiées des ECSHASs.

Egalement, la mise en œuvre des ECSHASs présente une fenêtre étroite et un cadre incomplet au chapitre des applications, en d'autres termes, une prestation thermique qui se contente et se limite d'un différentiel de température entrée/sortie. Or, cette fenêtre est plus large pour l'intégration des ECSHASs dans un système complexe à caractère renouvelable.

Nous attirons votre attention sur l'appellation de ce type d'échangeurs ou la communauté anglo-saxonne utilise Earth to Air Heat Exchanger (EAHE) et insiste sur l'ordre sol-air, tandis que la communauté francophone inverse l'ordre (air-sol) dans leurs appellations. Dans ce manuscrit, nous proposons une nouvelle appellation exhaustive relative à ce type d'échangeur ou nous conservons et respectons l'ordre air-sol vu que le manuscrit est rédigé en langue française ainsi d'éviter tous types de confusion.

Dans ce contexte, ce travail de thèse s'est donné pour objectif d'évaluer finement la prestation énergétique des échangeurs horizontaux air/sol dans la région de Biskra avec des modèles semi-analytiques RBM & GRBM [1, 2], développés à cet effet. Par la suite, nous avons entrepris l'application des modèles proposés dans le dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermiques (GAC) [3] voire leurs mises en œuvre. Ainsi, après la compréhension acquise notamment des règles de dimensionnement et en parallèle des travaux expérimentaux antérieurs, il nous importe de mettre en lumière expérimentalement les aspects essentiels du phénomène de la saturation du sol.

Cette thèse se divise en trois grandes parties de deux chapitres chacune dont les préoccupations sont assez distinctes, précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale. La première partie se consacre à la recherche bibliographique composée du chapitre I et du chapitre II. Le premier chapitre (1) décrit l'énergie géothermique sous différents aspects, ses caractéristiques, son statut mondial et notamment la classification des différents types de systèmes géothermiques. Dans le chapitre deux (2), nous résumons un tour de force, donner dans un cadre étroit une image aussi complète et diversifiée que possible des travaux sur les ECSHASs.

## Introduction générale

La seconde partie redynamise l'aspect analytique en présentant de nouveaux modèles semi-analytiques dans le cadre de dimensionnement des ECSHASs (chapitre 3) quant au chapitre 4, la mise en œuvre des modèles développés est inscrite dans une dimension conceptuelle.

Retrouvant ensuite l'expression expérimentale dans les chapitres conclusifs où nous trouvons les détails et la description de l'installation pilote implantée à l'université de Biskra, augmenté par une analyse climatologique de la région de Biskra (chapitre 5). Suivra une analyse systémique (chapitre 6) qui nous permet de mettre en exergue un phénomène à notre connaissance inexploité à l'heure actuelle (la saturation du sol). Dans cette analyse, nous nous focalisant alors à une utilisation en boucle ouverte, à savoir celle des puits canadiens (ECSHASs), utilisés pendant le rafraîchissement estival. Finalement, une conclusion générale englobant l'intérêt de l'ensemble des résultats obtenus lors de l'étude entreprise.

## Partie I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.

*« Cette première partie de thèse vise à offrir au lecteur un aperçu général de nombreux aspects différents de l'énergie géothermique tel que ses caractéristiques, le statut mondial de l'utilisation de ressources géothermiques ainsi que la classification des différents types de systèmes géothermiques (chapitre 1). Après un important premier chapitre appréhendant la définition de la science géothermique, l'émergence de ses classifications et ses niveaux d'intégration dans le monde des énergies renouvelables, nous nous sommes principalement intéressés à centrer notre analyse sur les échangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol, ECSHASs, appropriés aux régions arides et semi- arides telle que la région de Biskra. Dans cette perspective, l'authenticité du deuxième chapitre réussit un tour de force, nous faire soigneusement découvrir l'organisation des approches relatives à l'évaluation des ECSHASs, de même, les effets des paramètres de conception sur les performances de ces systèmes. Le fond de ce chapitre forme essentiellement le cœur de la deuxième partie de cette thèse.*

# CHAPITRE 1. ENERGIE GEOTHERMIQUE

Ce chapitre contient une introduction à l'énergie géothermique en tant que source d'énergie et aux diverses technologies permettant de l'exploiter. Certaines caractéristiques clés des systèmes d'énergie géothermique, telles que leur capacité de renouvellement et leur durabilité, ainsi que certains de ses avantages sont brièvement décrites. Dans ce qui suit, nous décrirons succinctement une perspective des applications mondiales de l'énergie géothermique ainsi que leur statut d'utilisation au cours des dernières années. En marge du scénario globale d'utilisation, les approches de classification des ressources géothermiques sont passées en revue, accompagnée d'une discussion axée essentiellement sur leurs limites d'application.

## 1 Introduction à l'énergie géothermique

Les systèmes d'énergie géothermique sont une option pour fournir des services énergétiques. Ils profitent du sol et de l'énergie qu'il contient. Parfois, l'énergie du sol réside à sa température naturelle, qui est principalement affectée par les conditions ambiantes. A d'autres moments, c'est le sol à une température élevée. Considérant le niveau actuel d'utilisation de l'énergie géothermique et des indigences énergétiques futures, les sources d'énergie géothermique offrent un potentiel considérable pour répondre à une plus grande part des besoins énergétiques mondiaux [4].

Des preuves archéologiques montrent que l'énergie géothermique a été utilisée pour la première fois par les peuples anciens, y compris les Romains, les Chinois et les Amérindiens. Ils utilisaient des sources d'eau minérale chaudes comme source de chaleur pour se baigner, cuisiner et se chauffer. Les minéraux dans l'eau de ces sources ont également servi de source de guérison. Bien que ces utilisations des sources thermales aient évolué au fil du temps, elles sont toujours utilisées comme source de chaleur pour plusieurs centres d'hydrothérapies. Avec les progrès technologiques, l'utilisation de l'énergie géothermique s'est étendue à des niveaux plus profonds de la croûte terrestre, ce qui peut être utilisé pour un plus large éventail d'applications telles que le chauffage, le refroidissement domestiques, les processus industriels et la production d'électricité. Cependant, seulement une petite fraction de l'énergie géothermique disponible est actuellement commercialisable pour produire de l'électricité ou fournir un chauffage utile, en partie à cause de l'état actuel de la technologie [4].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Les systèmes d'énergie géothermique qui exploitent les réservoirs chauds dans le sol (par exemple, les sources thermales, les geysers, le sol chauffé par du magma chaud) sont principalement utilisés pour générer de l'électricité et fournir du chauffage. De tels systèmes sont courants dans des pays tels que l'Islande, la Turquie et d'autres. La capacité opérationnelle globale d'exploitation pour la production d'électricité géothermique à partir de telles ressources géothermiques est d'environ 12,8 GWe en janvier 2015, répartie sur 24 pays, et devrait atteindre entre 14,5 GWe et 17,6 GWe d'ici 2020 et à environ 25 GWe à l'horizon 2030 [5]. Il existe un autre type de système d'énergie géothermique, qui assure le chauffage et la climatisation à l'aide du sol. De tels systèmes d'énergie géothermique tirent parti de l'énergie contenue dans le sol à l'état naturel. Cette énergie souterraine est liée à la température du sol et inclut les propriétés thermo-physiques du sol lui-même ainsi que les eaux souterraines [4].

### 2 Caractéristiques de l'énergie géothermique

L'énergie emmagasinée dans le sol peut être utilisée en toutes saisons, elle peut fournir un chauffage directement en hiver vu que le sol sous la surface est souvent plus chaud que l'air ambiant. Ces applications comprennent le chauffage des locaux, le chauffage des serres, le chauffage des étangs d'aquaculture, le séchage agricole, les utilisations de chauffage industriel. Parfois, la température du sol n'est suffisante que pour assurer le préchauffage. Dans ce cas, la température du sol peut également être boostée via des dispositifs tels que des pompes à chaleur, permettant à l'énergie du sol de fournir de la chaleur à des températures plus élevées. L'utilisation de l'énergie géothermique via des pompes à chaleur géothermiques a considérablement augmenté comparativement aux autres applications. Principalement en raison que sa capacité technologique atteint un rendement élevé et exploite les eaux souterraines et / ou la température du sol dans n'importe quel coin du monde [4]. En revanche, l'énergie provenant du sol peut aussi fournir un refroidissement direct en été étant donné que le sol sous la surface est souvent plus froid que l'air extérieur. Du moment que la température du sol n'assure que le pré-refroidissement, la production du froid à des températures plus basses fait appel aux pompes géothermiques fonctionnant en mode refroidissement à dessein d'abaisser la température du sol. Bien que l'ultime potentiel énergétique géothermal de la terre ne puisse être estimé sur la base de notre niveau de connaissances actuelles et l'imprévisibilité du développement technologique, l'ensemble des types de systèmes d'énergie géothermique sont généralement classés comme formes d'énergie renouvelable. [4].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Deux concepts, renouvelable et durable sont d'importance dans cette discussion. Comme il semble y avoir une certaine confusion quant à la signification de ces deux concepts, il convient de clarifier la compréhension de ces deux concepts. Renouvelable décrit une propriété de la ressource énergétique, alors que durable décrit comment la ressource est utilisée. Les discussions sur la possibilité de renouvellement des différentes sources de chaleur varient selon les technologies utilisant cette source d'énergie. D'une manière ou d'une autre, ces technologies sont liées à certains processus énergétiques continus dans la nature, conditionnées par le fait que l'action d'extraire de l'énergie du processus naturel n'influencera pas le processus de régénération. En outre, les technologies utilisant le sol à des températures affectées par les conditions ambiantes peuvent être considérées comme renouvelables pourvue que les conditions ambiantes soient maintenues. L'apport de chaleur constant provenant du rayonnement solaire et la durabilité du cycle hydrologique (infiltrations et précipitations) garantissent un flux de chaleur constant au sol ainsi que la possibilité de renouvellement de telles sources géothermiques.

L'utilisation durable de l'énergie géothermique fait souvent référence à la manière d'exploiter cette ressource énergétique pour répondre aux besoins énergétiques sans compromettre son utilisation future. L'estimation à long terme des sources d'énergie géothermiques aux utilisations actuelles ainsi que les niveaux de capacité de production joue un rôle significatif dans la parfaite compréhension de leurs contributions potentielles au développement durable [4, 6]. L'expérience des Geysers aux États-Unis pourrait être une bonne illustration du cas échéant. L'exploitation des centrales de capacité 2000 MWe pendant un certain temps a révélé que le système géothermique ne pourrait pas supporter cette production pendant longtemps. La solution adaptée à cette situation est de limiter la production environ 1500 MWe de sorte que l'utilisation soit durable. A ce titre, il est clair que le fonctionnement durable est caractérisé par une sorte d'équilibre entre la quantité d'énergie reçue et l'énergie extraite au sein du système, entre autre, l'échelle de temps de renouvellement est similaire à celle d'extraction. Dès lors, une exploitation durable ne peut être obtenue qu'à partir de sources d'énergie renouvelables [6]. En tant que source d'énergie renouvelable, l'énergie géothermique est souvent considérée comme un participant principal au développement durable de même qu'objectif plus large de durabilité conditionnée par une bonne conception. Être durable va au-delà de renouvelable, et comprend un bon nombre de ses autres caractéristiques :

## Chapitre 1. Energie géothermique

**Disponibilité:** L'énergie géothermique à température élevée est disponible dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les régions à activité sismique et volcanique. Par ailleurs, l'énergie géothermique sous forme de sol à la température ambiante est disponible presque partout, bien que sa température dépend de l'emplacement et du climat. L'énergie géothermique est disponible jour et nuit, tous les jours de l'année de telle sorte qu'elle peut couvrir les besoins énergétiques à caractère de charge base et également comme complément aux sources d'énergie intermittentes. Comparativement aux autres formes d'énergie renouvelable intermittentes telles que le solaire et le vent, les caractéristiques de disponibilité sont très différentes.

**Compatibilité.** Les systèmes exploitant l'énergie géothermique sont souvent compatibles à la fois avec la génération d'énergie centralisée et distribuée.

**Abordabilité.** L'énergie géothermique est souvent exploitable pour le chauffage et le refroidissement, ainsi que pour la production d'électricité, à un prix abordable. Bien sûr, certains systèmes géothermiques ne sont pas économiquement viables. Tandis que plusieurs travaux sont en cours pour améliorer les perspectives commerciales.

**Acceptabilité.** La plupart des gens sont en faveur de l'énergie géothermique pour la bonne raison qu'elle est renouvelable et souvent économiquement viable. En outre, les systèmes d'énergie géothermique ne sont pas intrusifs et sont généralement invisibles. Ce qui n'est pas le cas pour beaucoup d'autres formes d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien.

Les obstacles au déploiement comprennent les coûts d'investissement élevés, les risques de développement des ressources, le manque de sensibilisation à l'énergie géothermique et les problèmes environnementaux perçus ou réels.

### 3 Le statut mondial de l'utilisation de ressources géothermiques

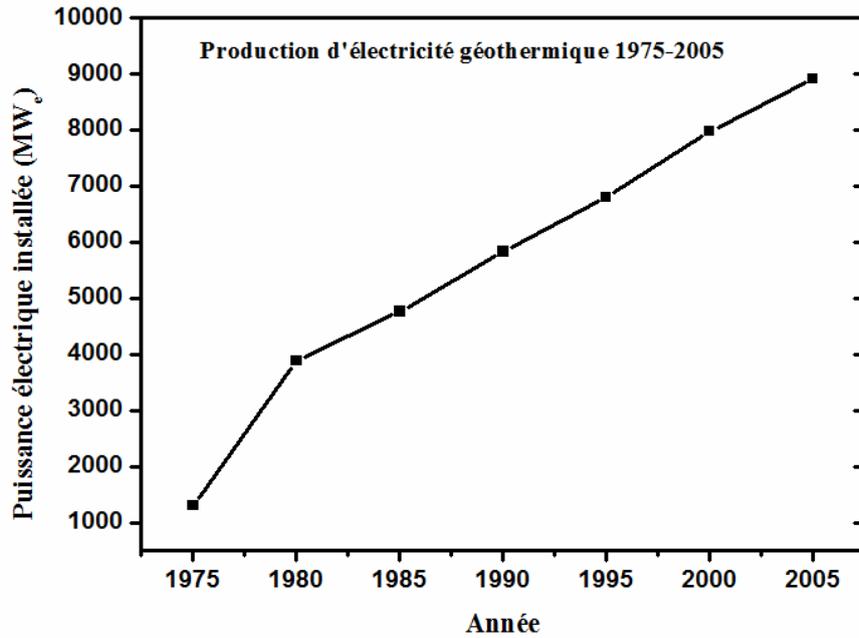
L'utilisation des ressources en énergie géothermique pour la production d'électricité ainsi que pour l'utilisation directe des eaux souterraines est devenue un impératif compte tenu de la demande croissante en énergie et des coûts de l'énergie dans la société moderne. Les ressources à haute enthalpie, limitées à certaines provinces tectoniques spécifiques, sont exploitées pour produire de l'énergie électrique. Même des ressources relativement à basse enthalpie sont en cours de développement pour la production d'énergie à l'aide de cycles binaires et pour d'autres utilisations directes. L'utilisation de centrales de cogénération (CC) est actuellement encouragée dans plusieurs sites géothermiques à basse enthalpie.

## Chapitre 1. Energie géothermique

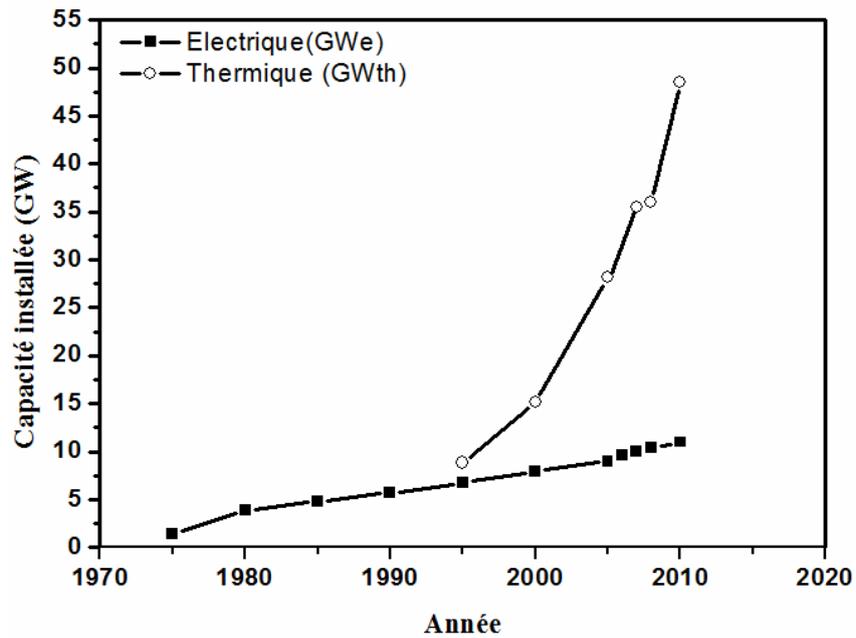
Dans ces centrales, les eaux chaudes jusqu'à 100°C sont d'abord utilisées pour la production d'énergie électrique à l'aide de systèmes binaire tel que les centrales à Cycle Rankine Organique (CCRO) et ensuite en cascade pour des applications à basse température et à utilisation directe telles que le chauffage de serre, l'aquaculture et les complexes aquatiques. Les pompes à chaleur géothermiques sont maintenant largement utilisées pour le chauffage et le refroidissement domestique aux États-Unis, en Europe du Nord et en Chine. Bien que l'énergie accumulée réellement générée par l'utilisation de pompes à chaleur semble être infime, l'impact de leur utilisation sur les besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement est considérable [7].

Après l'année 1975, l'utilisation de l'énergie géothermique a augmenté de façon continue et remarquable. En matière de production d'énergie électrique, la capacité mondiale installée a connu une croissance régulière d'environ 200 MW<sub>e</sub> par an, quoique modeste, au cours des trois dernières décennies (Figure 1.1). Après 2005, la croissance annuelle est boostée à 500 MW<sub>e</sub> (Figure 1.2). Au cours de la période (2001-2005), les statistiques révèlent que vingt quatre (24) pays différents sont engagés dans la production d'électricité à partir de ressources géothermiques où la capacité totale installée atteignait d'environ 8900 MW<sub>e</sub> provenant de 468 unités de production [8]. A l'heure actuelle, l'énergie électrique annuelle produite à partir de ressources géothermiques s'élève à environ 57 000 GWh/an, soit moins de 0,4% de la production totale d'électricité mondiale. Par conséquent, une modeste contribution à la production mondiale d'électricité. D'après les statistiques de 2005 présentés dans le tableau 1.1, les Etats Unis et le Philippines représentent 51% de la production mondiale de l'énergie électrique à partir de l'énergie géothermique dès lors ils sont considérés comme les leaders mondiaux, suivis par le Mexique, l'Indonésie, l'Italie, le Japon, la Nouvelle-Zélande, l'Islande, l'Amérique centrale ainsi que la Russie. En 2012, le chiffre pour les États-Unis est de l'ordre 3187 MW<sub>e</sub> [9]. Du moment que la situation varie d'un pays à l'autre en fonction des ressources géothermiques naturelles disponibles et de la technologie utilisée pour les exploiter, notons à titre comparatif, la production d'énergie électrique par les Etats Unis à partir des systèmes géothermiques est pratiquement deux fois d'autant plus que le continent européen entier 1400 MW<sub>e</sub> [10].

## Chapitre 1. Energie géothermique



**Figure 1.1.** Croissance de la capacité installée d'énergie électrique produite à partir de ressources énergétiques géothermiques dans le monde entier au cours de la période 1975-2005[8].



**Figure 1.2.** Puissance électrique et thermique produite à partir de sources d'énergie géothermique à l'échelle mondiale depuis 1975 [11].

## Chapitre 1. Energie géothermique

**Tableau 1.1.** Les pays dans lesquels la capacité électrique géothermique installée est limitée environ 100 MW<sub>e</sub> ou plus [7].

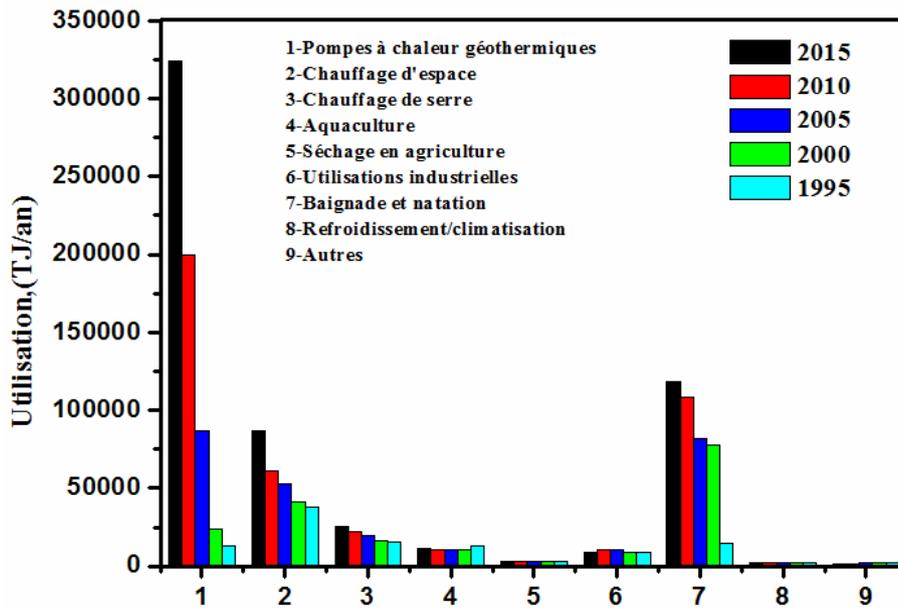
Pays	Capacité installée(MW <sub>e</sub> )	Références	
Etats Unis	2534	[12]	
Philippines	1930.9	[13]	
Mexique	953	[14]	
Indonésie	807	[15]	
Italie	790.5	[16]	
Japon	534.45	[17]	
Nouvelle-Zélande	435.5	[18]	
Islande	200.7	[19]	
Amérique centrale	Costa Rica	162.5	[20]
	Salvador	151	[21]
	Nicaragua	77.5	[22]
	Guatemala	33	[23]
Russie	79	[24]	

En revanche, l'utilisation directe des ressources énergétiques géothermiques double tous les cinq ans (figure 1.2) et joue aussi un rôle important dans plusieurs pays, l'estimation de sa capacité mondiale installée s'élève à 70 329 MW<sub>th</sub> à la fin de 2014, soit une augmentation de 45,0% par rapport aux statistiques de 2010, affichant une croissance annuelle composée de 7,7%. Cela équivaut à une économie d'énergie annuelle aux alentours de 63 millions de tonnes de pétrole et une réduction de 60 millions de tonnes des émissions de carbone. En matière de consommation annuelle, une augmentation de 38,7% (587 786 TJ) par rapport à 2010 de même un taux de croissance annuel composé de 6,8%. Le facteur de capacité mondial est de 0,265, en baisse par rapport à 0,28 en 2010 et à 0,31 en 2005 et 0,40 en 2000. Cette baisse est due à l'augmentation du nombre d'installations de pompes à chaleur géothermiques ayant un faible facteur de capacité [25]. La notoriété grandissante et la popularité des pompes à chaleur géothermiques ont eu l'impact le plus significatif sur l'utilisation directe de l'énergie géothermique, 72 pays différents l'utilisaient pour le chauffage en 2005 [11]. A cet égard, la consommation annuelle d'énergie a été multipliée par 1,6 à un taux composé de 10,3% par rapport à 2010.

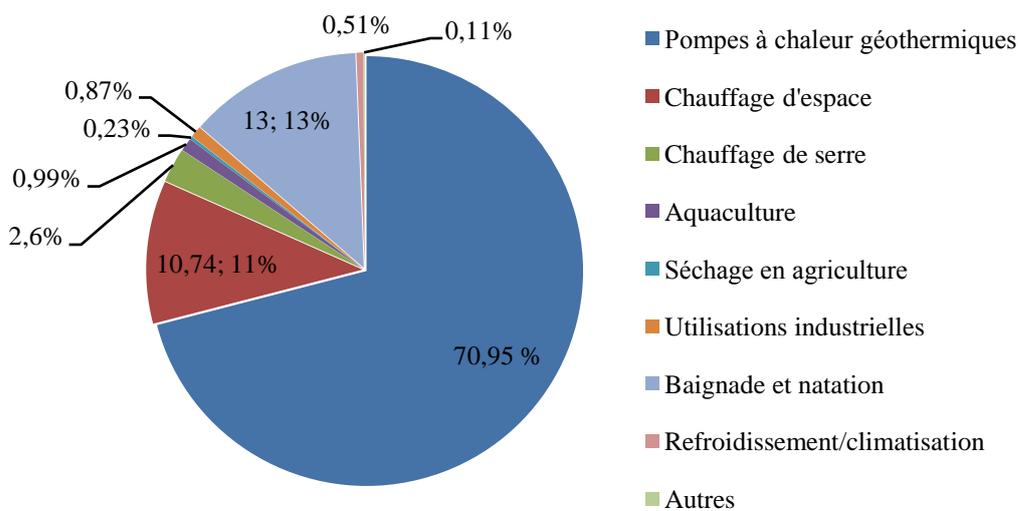
## Chapitre 1. Energie géothermique

La capacité installée a augmenté 1,51 fois à un taux annuel composé de 8,65%. Cela est dû en partie à l'amélioration des rapports de même la capacité des pompes à chaleur géothermiques utilisant les eaux souterraines ou les températures couplées au sol partout dans le monde (voir la figure 1.3) [25].

Les pompes à chaleur géothermiques ont à la fois la plus grande consommation d'énergie et la plus grande capacité installée au monde, représentant 70,95% de la capacité installée et 55,30% de la consommation annuelle d'énergie (voir la figure 1.4).



**Figure 1.3.** Evolution des utilisations géothermiques directes en TJ/an depuis 1995 à 2015 [26].



**Figure 1.4.** Applications géothermiques directes dans le monde entier en 2015, réparties en pourcentage de la capacité totale installée ( $MW_{th}$ ) [25].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Les cinq pays leader en termes de capacité installée ( $MW_{th}$ ) sont : les États-Unis, la Chine, la Suède, l'Allemagne et la France, et en termes d'utilisation annuelle d'énergie (TJ/an) sont : la Chine, les États-Unis, la Suède, la Finlande et le Canada. Entre autre, les cinq pays ayant la plus grande capacité installée ( $MW_{th}$ ) à utilisation directe (avec pompes à chaleur) sont : la Chine, les États-Unis, la Suède, la Turquie et l'Allemagne représentent 65,8% de la capacité mondiale et les cinq pays ayant la plus grande consommation d'énergie annuelle (avec pompes à chaleur) La Chine, les États-Unis, la Suède, la Turquie et le Japon représentent 63,6% de l'utilisation mondiale [25]. Cependant, une analyse des données en termes de superficie ou population montre que les pays les plus petits dominant, en particulier les pays nordiques. Dès lors, Les «cinq premiers» deviennent : Islande, Suède, Finlande, Norvège et Suisse en terme de capacité installée ( $MW_{th}$  / population); et pour la consommation d'énergie annuelle (TJ / an / population): Islande, Suède, Finlande, Nouvelle-Zélande et Norvège[25]. Par ailleurs, la Thaïlande, l'Égypte, l'Inde, la Corée du Sud et la Mongolie ont enregistré le plus fort taux de croissance en matière de puissance installée ( $MW_{th}$ ) au cours des cinq dernières années concerne; et en termes de consommation d'énergie annuelle (TJ/an) au cours des cinq dernières années: Thaïlande, Égypte, Philippines, Albanie et Biélorussie [25]. La plupart de ces augmentations sont dues aux installations de pompes à chaleur géothermiques, représentant 70,95% de la capacité installée au monde ou bien ayant de meilleurs rapports sur l'utilisation de la baignade et de la natation (voir figure 1.4) [25].

A vrai dire, l'évaluation de l'utilisation des ressources géothermiques a également été envisagée dans plusieurs autres pays. Celles-ci sont trop nombreuses pour être citées, toutefois, il peut être fait mention d'Ethiopie, Papouasie Nouvelle Guinée et Portugal, qui ont rejoint à la fin des années 1990 et plus tard. Une mention spéciale devrait être attribuée à l'Australie méridionale dans ces champs géothermaux, des projets de roches chaudes-sèches (RCS) qui reposent sur des forages profonds atteignant 4–5 km, ont été planifiés dans le bassin de Cooper dans un proche futur [7]. Sans doute, l'économie à long terme ainsi que les avantages environnementaux de l'utilisation des ressources géothermiques à basse et moyenne enthalpie pour des fins non électriques s'avèrent plus attrayants que ceux des ressources en combustibles classiques dans les régions ayant un potentiel géothermique, en particulier dans les régimes climatiques froids des ceintures des latitudes moyennes et élevées.

## Chapitre 1. Energie géothermique

Cependant, l'une des majeures difficultés du volet de l'usage thermique est le fait que les eaux géothermiques à basse température (basse enthalpie) ne peuvent pas être transportées sur de grandes distances sans perte de chaleur substantielle [22].

Selon le scénario global supra présenté, les chiffres varient d'un pays à l'autre et dépendent fortement des conditions géologiques. Par exemple, en Allemagne l'utilisation de l'énergie géothermique profonde est à ses débuts par rapport à l'Islande, aux États-Unis ou à la Nouvelle-Zélande, en raison de l'absence de champs de haute enthalpie en Europe centrale. Néanmoins, en Allemagne et dans d'autres pays moins favorisés sur le plan géologique, l'énergie géothermique est de plus en plus utilisée et prometteuse. A cet égard, les estimations du gouvernement allemand prévoient que l'énergie géothermique contribuera de 0,5% à la production d'électricité et de 0,9% à la production de chaleur utile d'ici 2020 et que ces portions atteignent respectivement 3,1 à 7,7% dans l'horizon 2050 [11].

### 4 Classification des ressources géothermiques

Les ressources géothermiques sont classifiées de diverses manières : en fonction de la source de chaleur, du type de transfert de chaleur, de la température de la source, la profondeur du réservoir, de l'état physique, de l'utilisation et des caractéristiques géologiques. Cette section va être orientée principalement sur l'analyse, l'évaluation des différents catalogues de classification des ressources géothermiques ainsi de mettre en exergues les différentes technologies associées à l'exploitation de ces ressources.

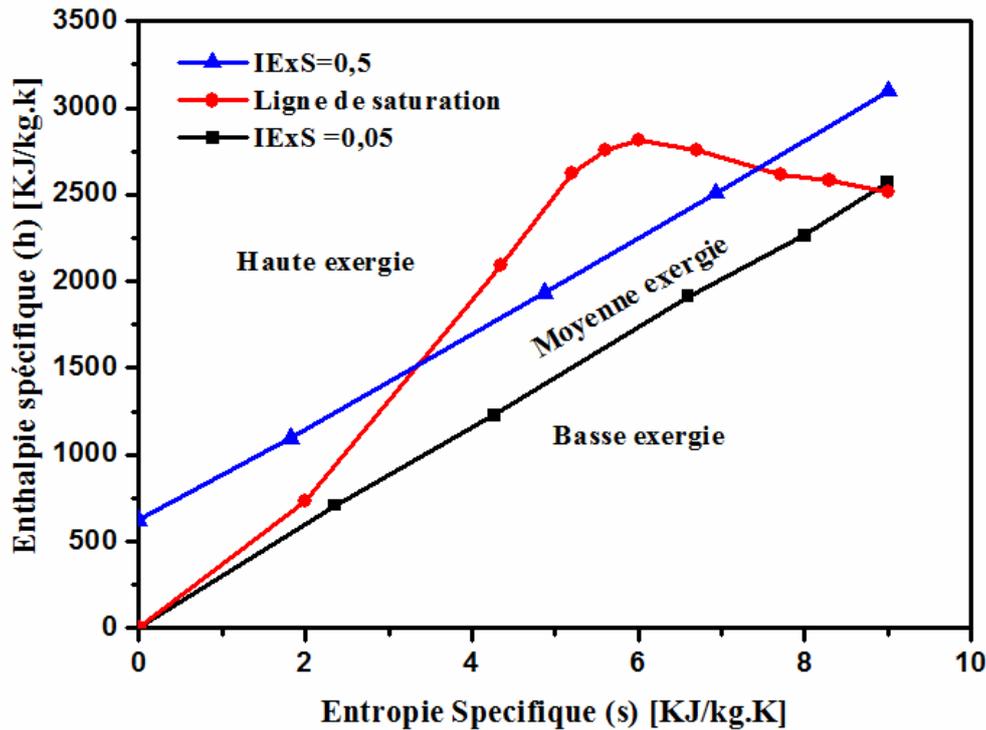
#### 4.1 Température & exergie

Au cours des 30 dernières années, de nombreux schémas de catalogues et définitions des ressources géothermiques ont été publiés, principalement sur la base de température et des propriétés thermodynamiques ainsi que la profondeur du système géothermique. La température a été la mesure essentielle de la qualité de la ressource ce qui a induit la division des systèmes géothermiques en trois différents types de température (ou d'enthalpie): basse température, température modérée et haute température [26-31]. Cependant, il n'existe pas d'échelle de température uniforme pour ces types (Tableau 1.2) [32]. Lee a expliqué amplement que la température et l'enthalpie seules sont incompatibles et insuffisants pour cataloguer les systèmes géothermiques du fait que deux propriétés indépendantes (température et pression) sont requises pour définir l'état thermodynamique du fluide [33]. De plus, il n'y a pas d'accord général sur les plages de température arbitraires utilisées[33].

## Chapitre 1. Energie géothermique

**Tableau 1.2.** Schéma de catalogue des ressources géothermiques en fonction de la température selon les différents auteurs [32].

	Muffler [27] (°C)	Hochstein [28] (°C)	Benderitter and Cormy [30] (°C)	Haenel et al. [29] (°C)		
Basse Enthalpie	<90	<125	<100	<150		
Moyenne Enthalpie	90-150	125-225	100-200	-		
Haute Enthalpie	>150	>225	>200	>150		
Sanyal[31]	Non-électrique <50-100	Très basse 100-150	Basse 150-180	Moyenne 180-230	haute 230-300	Ultra haute >300



**Figure 1.5.** Carte de classification des ressources géothermiques par IExS sur le diagramme de Mollier haute exergie :  $IExS > 0.5$  ; moyenne exergie :  $0.05 < IExS < 0.5$  ; basse exergie :  $IExS < 0.05$  [33].

A ce titre, Lee suggère un schéma de classification par l'indice d'exergie spécifique (IExS) du fluide géothermique (figure 1.5) Cependant, il ne tient pas compte des aspects géologiques et hydrogéologiques tels que le cadre géologique, le contrôle de l'écoulement des fluides, la chimie des fluides et les précipitations minérales possibles au sein des réservoirs de roche ou des installations techniques situées au-dessous et au-dessus de la surface du sol. Tous ces facteurs peuvent nuire à la production d'énergie et à l'utilisation économique globale d'une ressource géothermique.

## Chapitre 1. Energie géothermique

Le concept de Lee requiert l'accès aux estimations réelles de la température et de la pression au niveau de la tête de puits; ainsi, son schéma de catalogue ne peut être appliqué qu'après le forage du premier puits [34]. En effet, un catalogue de systèmes géothermiques et un schéma d'évaluation devrait cependant également être applicable avant le forage aux fins d'évaluation et de développement du champ spécifique au site. Néanmoins, ce catalogue exergétique présente certains avantages du fait qu'il est directement lié aux propriétés pertinentes du fluide thermique produit à la tête du puits [34]. Par ailleurs, Williams et al. soulignent qu'il s'agit toujours d'une exigence substantielle que l'évaluation des ressources fournit un cadre logique et cohérent suffisamment simplifié pour permettre la communication d'importants aspects du potentiel d'énergie géothermique à la fois aux non-experts et au grand public [34]. Une solution possible pourrait être d'éviter de cataloguer les systèmes géothermiques par température et d'indiquer simplement la plage de températures sur chaque site [34].

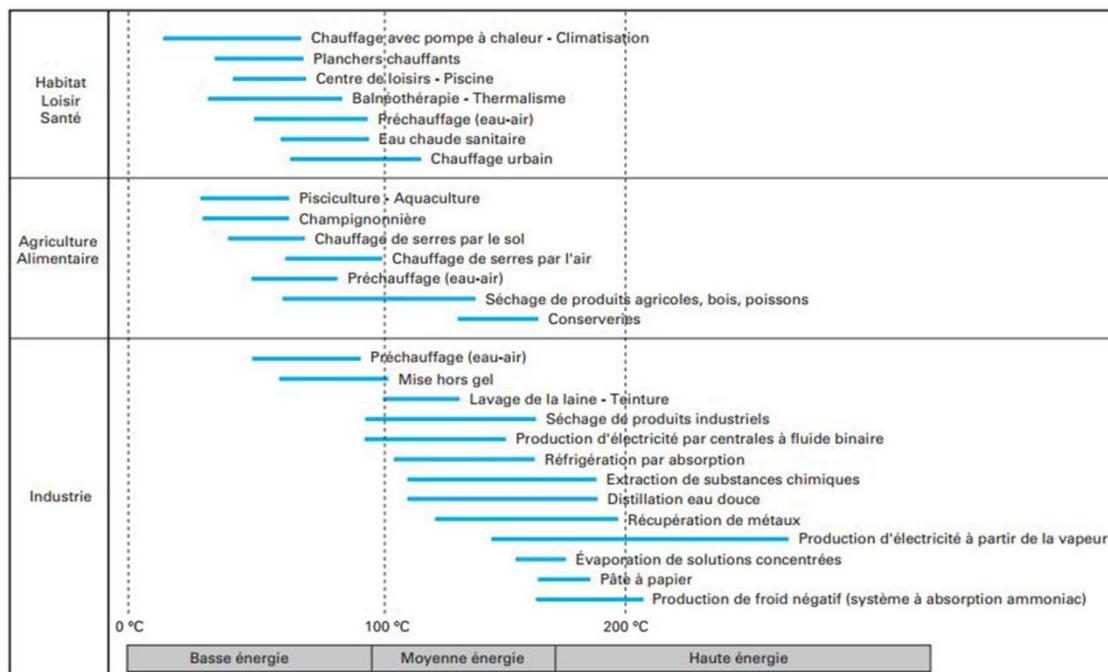
### 4.2 Profondeur

L'industrie géothermique établit une distinction entre l'utilisation de l'énergie géothermique proche de la surface et profonde. Une limite théorique à 400 m de profondeur et 200°C sépare les deux domaines de très différentes d'utilisation de l'énergie géothermique. L'utilisation de l'énergie géothermique profonde distingue également les réservoirs à haute enthalpie et à basse enthalpie. La distinction entre les deux types de réservoirs réside à une température de séparation imaginaire de 200°C [11]. Cette distinction découle bien encore des différents niveaux de profondeur des réservoirs géothermiques et des différentes techniques d'utilisation. Il est utile de distinguer les deux principaux domaines d'utilisation de l'énergie géothermique. Notamment du fait que leurs techniques spécifiques de production d'énergie nécessitent des paramètres géologiques et géophysiques différents pour la description des systèmes [11]. L'utilisation de ressources géothermiques est fortement influencée par la nature du système qui les produit. D'une manière générale, les ressources des systèmes volcaniques chauds sont utilisées principalement pour la production d'énergie électrique, tandis que les ressources des systèmes à températures moins élevées sont utilisées surtout pour le chauffage d'espaces et autres usages directs. A l'issue, il est nécessaire de prendre en considération un certain nombre de facteurs pour déterminer l'utilisation optimale d'un type de ressources géothermiques. Il s'agit du type (eau chaude ou vapeur), du débit, de la température, de la composition chimique et de la pression du fluide géothermique, ainsi que de la profondeur du réservoir géothermique [35].

## Chapitre 1. Energie géothermique

### 4.2.1 Les systèmes géothermiques profonds

Les champs de haute enthalpie de la planète sont généralement situés le long des ceintures volcaniques liées aux limites des plaques tectoniques mais également aux champs volcaniques intra plaques. Certains champs d'enthalpie élevée sont également reliés à la convection hydrothermale liés aux chambres magmatiques peu profondes et aux intrusions ignées proches de la surface de la croûte [11]. Les gradients géothermiques dans ces régions peuvent être extrêmement élevés et des températures pouvant atteindre 400°C toutefois elles peuvent être atteintes à très faible profondeur, à quelques centaines de mètres sous la surface [11]. En effet, les systèmes géothermiques profonds exploitent l'énergie géothermique via de forages profonds ou l'énergie thermique extraite peut être utilisée directement sans aucune nécessité de transformation supplémentaire. Il faut ajouter que la température de la ressource est l'élément déterminant pour les applications envisageables à partir de la chaleur géothermale. Le diagramme de la figure 1.6 distingue, entre 20 et 200°C, deux grandes catégories d'applications, les applications thermiques jusqu'à environ 110 à 120°C et la production d'électricité à partir de 120°C [36].

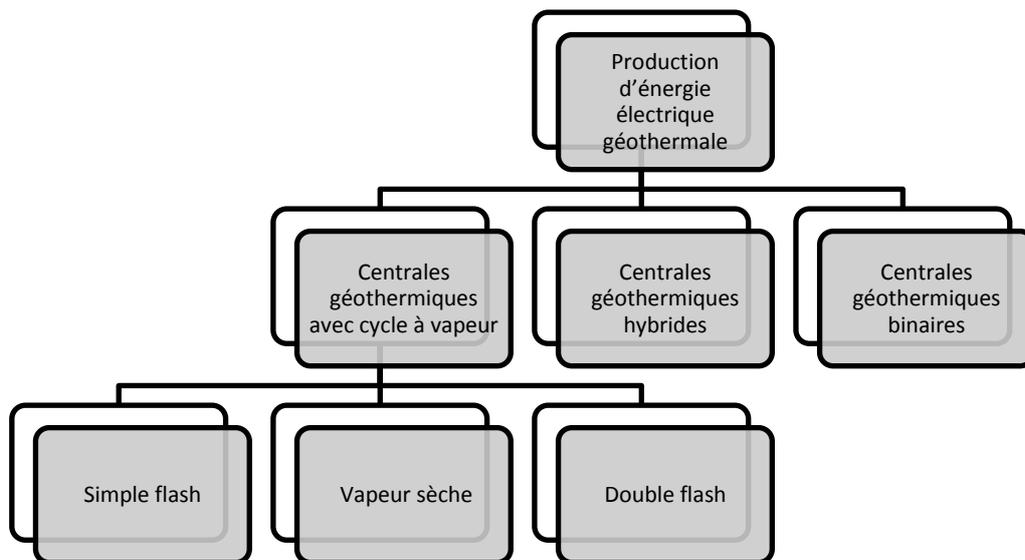


**Figure 1.6.** Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température [36].

## Chapitre 1. Energie géothermique

En matière de ressources géothermiques, les systèmes profonds peuvent être dominés par des ressources sèches, principalement sous forme de vapeur ( $H_2O$ ), caractéristique des champs de haute enthalpie, d'un mélange de vapeur et d'eau ou encore uniquement d'eau liquide dans une plage de température de 125 à 225°C. Sans doute, l'énergie électrique peut être produite avec un rendement élevé directement à partir de turbines à vapeur où la vapeur est émanant de réservoirs à haute enthalpie de température plus de 200°C. Cependant, produire de l'énergie électrique à partir de réservoirs à basse enthalpie à l'aide de systèmes binaires n'est possible qu'avec des substances de transfert de chaleur présentant une pression de vapeur supérieure telles que les mélanges d'ammoniac. L'efficacité électrique de telles installations varie entre 10 et 15% en fonction du matériau de transfert ainsi que la température de fonctionnement [11].

A ce titre, la production d'électricité d'origine géothermale s'effectue selon trois modes (figure 1.7). On distingue ainsi les centrales géothermiques avec cycle à vapeur d'eau, le fluide géothermal est directement utilisé pour produire de l'électricité par détente dans une turbine de sa fraction vapeur. Ces centrales sont réservées à l'exploitation de ressources géothermales dont la température au réservoir est supérieure à moins de 200°C. Elles font appel à deux techniques différentes : i) l'échappement libre, ii) la condensation qui englobent à leur tour trois principaux types de centrales géothermiques à vapeur, à savoir des centrales à vapeur sèche, à flash simple, et à double flash [36, 37]. Cependant, les centrales à vapeur sèche et à flash simple sont techniquement très similaires. Il est possible qu'un système de génération à flash simple soit converti en vapeur sèche lorsque les champs géothermiques procurent de la vapeur chaude pure [37].



**Figure 1.7.** Différents types de centrales d'énergie électrique géothermale [36].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Par ailleurs, à fin de valoriser les ressources de moindre température (température de réservoir d'au moins 120°C), on a donc recours à une autre technologie : celle utilisant le principe du cycle de Rankine à fluide organique ou technologie à fluide binaire, technique par laquelle le fluide géothermal cède préalablement son contenu énergétique à un second fluide qui est ensuite utilisé pour assurer la conversion thermoélectrique de l'énergie reçue [36]. En parallèle, l'association des deux technologies sus-indiquées donne naissance aux centrales hybrides/combinées, où les effluents des centrales géothermiques avec cycle à vapeur sont valorisés par une centrale à fluide binaire. Cette combinaison des deux techniques permet d'épuiser thermiquement au mieux la ressource géothermale exploitée [36]. Avec cette définition de la limite entre les systèmes peu profonds et profonds, des méthodes géothermiques profondes sont utilisées à des profondeurs de 400 m et inférieures. Cependant, les systèmes géothermiques profonds à basse enthalpie au sens propre et réel sont ceux situés à une profondeur supérieure à 1000 m et une température supérieure à 60°C. Il faut toutefois garder à l'esprit que dans les champs à haute enthalpie, des fluides à haute température peuvent être produits à partir de forages de centaines de mètres plutôt que de milliers de mètres comme dans les champs géothermiques profonds de basse enthalpie.

### 4.2.2 Les systèmes géothermiques proche de la surface (peu profonde)

Tandis que, la géothermie proche de la surface, l'extraction de l'énergie thermique se fait au niveau de la couche la plus élevée de la croûte terrestre ou bien dans les régions avec des gradients géothermiques normaux ou légèrement élevés. Les techniques géothermiques proches de la surface distinguent les systèmes ouverts des systèmes fermés par rapport au sol environnant. Ces systèmes vont de quelques mètres à une dizaine de mètres, rarement plus de 150 m de profondeur. Dans la plupart des cas, la profondeur de 150 m présente un intérêt, comme elle peut s'étendre jusqu' à un maximum de 400 m [11]. Eu égard de l'usage thermique, la chaleur ne supportant pas le transport lointain sur le plan économique, cette production énergétique s'adresse à des usages devant être localisés à proximité de la source (quelques kilomètres au plus). Au chapitre des applications et technologies géothermiques, il existe une diversité de systèmes typiques pour l'utilisation thermique souterraine en liaison avec ou sans pompes à chaleur géothermales. En effet, on distingue deux modes en terme d'exploitation i) direct (systèmes passifs), ii) indirecte nécessitant une conversion via des pompes à chaleur (systèmes actifs).

## Chapitre 1. Energie géothermique

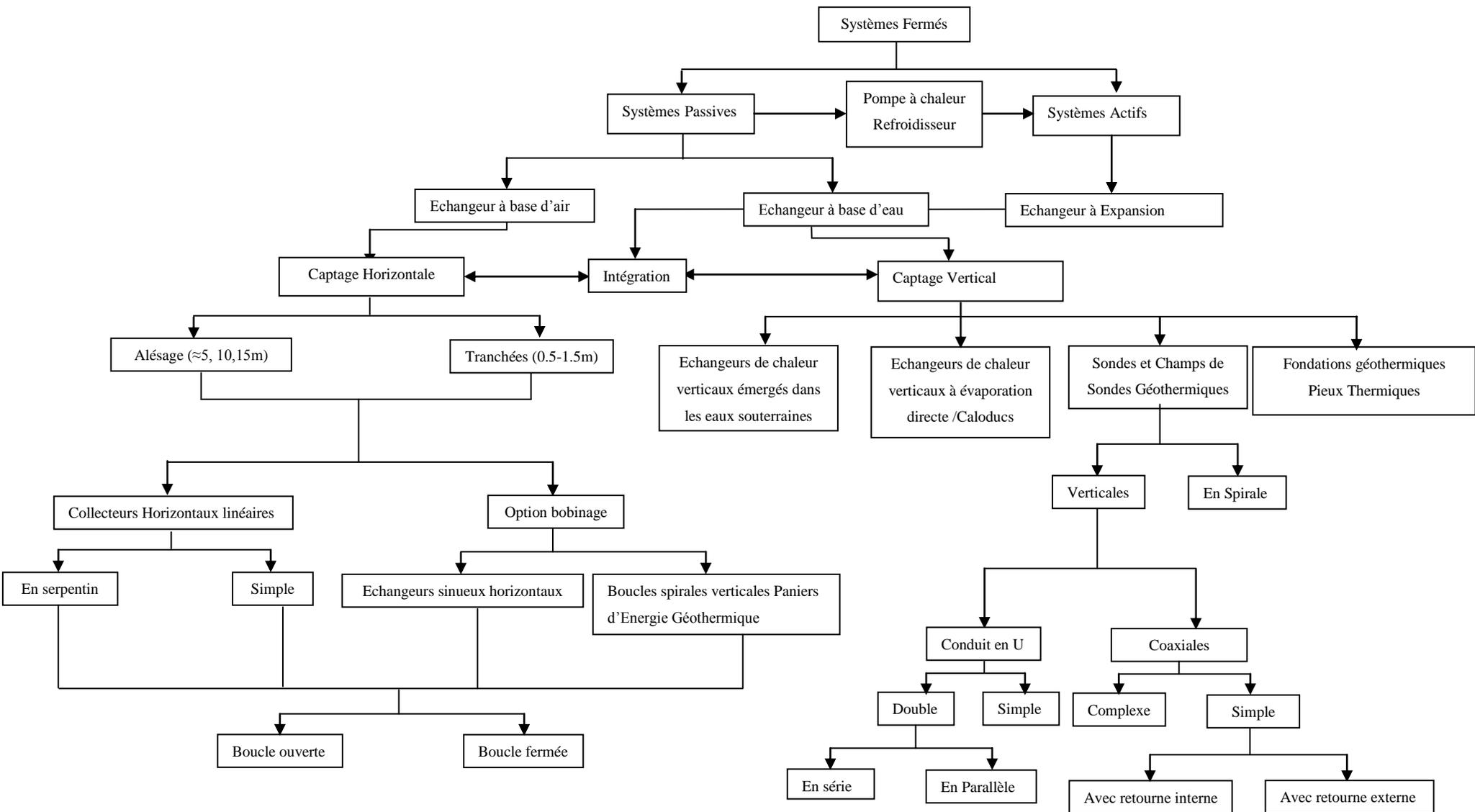
### 4.2.2.1 Systèmes passifs “ application directe “

Les systèmes directs font principalement référence à l'utilisation directe de l'énergie froide ou thermique stockée sous terre via des échangeurs de chaleur souterrains (ECS) dans le sol. Ces échangeurs peuvent être utilisés indépendamment ou associés à des systèmes de chauffage et de refroidissement mécaniques. Dans l'application passive d'ECS, la consommation d'énergie des systèmes de chauffage et de refroidissement mécaniques peut être réduite ou même éliminée [38]. D'une part, on trouve les systèmes en boucle fermée en liaison avec une pompe à chaleur, d'autre part, les systèmes ouverts avec extraction des eaux souterraines et puits d'injection avec ou sans pompe à chaleur[39].

#### 4.2.2.1.1 Les systèmes en boucles fermés

En ce qui concerne les systèmes en boucles fermés, qui résident notamment en réseau de tuyaux souterrains jouant le rôle d'un échangeur de chaleur, différents matériaux sont utilisés pour ces tuyaux, on trouve principalement du polyéthylène haute densité (PEHD), de l'acier et du cuivre [40]. Ils peuvent être classés en trois catégories en fonction du fluide caloporteur: à base d'eau, à base d'air et à expansion directe [38]. En terme de captage de chaleur, on distingue ceux installés horizontalement sous terre à une profondeur de 1 à 2 m (le captage horizontal) et ceux placés verticalement à une profondeur de quelques dizaines de mètres jusqu'à 400 m environ (le captage vertical) [39]. A titre d'intention, il y a de grandes différences entre ces systèmes en matière de configurations, exigences d'espace ainsi que les profondeurs d'installation ou d'emplacement. Je tiens à souligner que les systèmes passifs à captage horizontale peuvent se retrouver sous la configuration de boucle ouverte. La figure 1.8 englobe les différents types de technologies géothermales en boucles fermées.

# Chapitre 1. Energie géothermique



**Figure 1.8.** Différentes technologies géothermiques en boucles fermées.

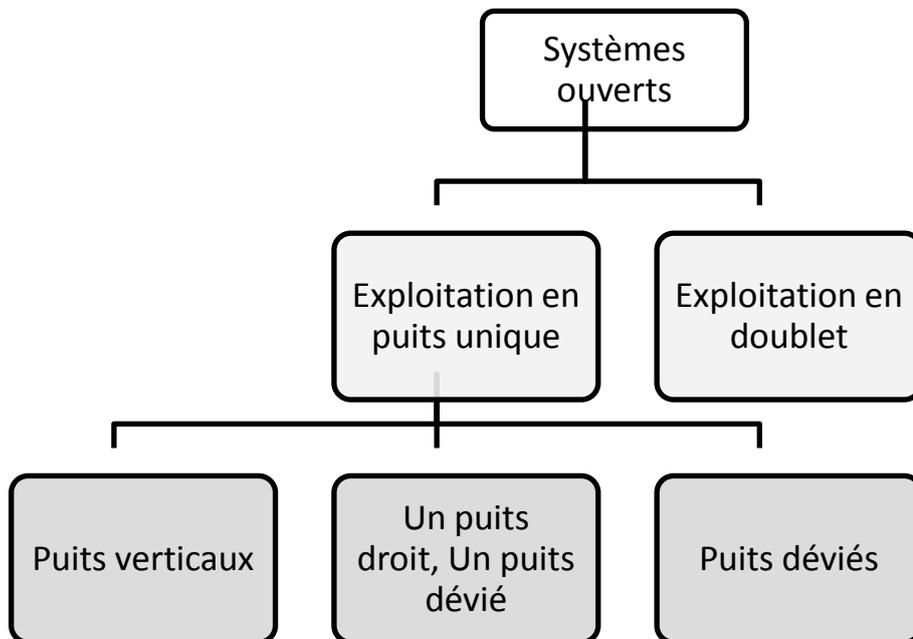
## Chapitre 1. Energie géothermique

### 4.2.2.1.2 Systèmes en boucle ouverts (utilisation directe des eaux souterraines) :

Les systèmes ouverts au sein des aquifères peu profonds consistent souvent en un ou plusieurs puits d'extraction et des installations d'injection dans des champs à flux plus ou moins uniformes [39]. En termes d'exploitation d'un gisement géothermique, Il existe deux modes (figure 1.9) i) Boucle géothermale utilisée lorsque l'eau de l'aquifère exploitée est chargée en sels minéraux ainsi que son rejet en surface n'est pas compatible avec les normes environnementales. En effet, il est nécessaire de réinjecter le fluide dans sa nappe d'origine après avoir prélevé son énergie calorifique. Dès lors, son exploitation nécessite deux forages, un forage de production et un forage de réinjection ; c'est la technique du doublet ; ii) l'exploitation en un puits unique peut être envisagée lorsque l'eau est peu chargée en sels dissous ainsi son évacuation en surface ne représente pas un gêne pour l'environnement , ou mieux, utilisée à des fins d'eau potable [36].

Cependant, la mise en œuvre des ressources géothermales s'articule selon deux phases majeures :

a) Exploration qui consiste à l'évaluation des ressources géothermales visant à délimiter les zones apparaissant a priori les plus favorables. Cette phase de reconnaissance préliminaire s'appuie notamment sur les données déjà disponibles lors de forages réalisés dans le cadre de recherches géologiques, pétrolières ou d'eau [36].



**Figure 1.9.** Schématisation du système ouvert [36, 37].

## Chapitre 1. Energie géothermique

De ce fait, pour déterminer plus précisément les principaux paramètres caractérisant la ressource géothermale (porosité, perméabilité, transmissivité pression statique du gisement, température, caractéristiques physico-chimiques du fluide de l'aquifère), on fait généralement appel aux disciplines suivantes : la géologie, l'hydrogéologie, la géochimie, la géophysique. A noter qu'on peut également réaliser des forages de reconnaissance spécifiques [36].

Le pompage et la réinjection d'eaux souterraines dans des systèmes ouverts exigent que la conductivité hydraulique de l'aquifère soit suffisamment grande pour être efficace. D'autres conditions hydrologiques importantes sont la direction du flux local, les conditions de recharge, la localisation des masses d'eau de surface, la profondeur de la nappe phréatique et la fluctuation de la nappe phréatique. Tandis que, les conditions hydrothermales comprennent la température du sol et de l'eau ainsi que leurs fluctuations. Les propriétés hydrothermales pertinentes des sols sont leur conductivité et capacité thermique dont la première propriété peut être déterminée par un test de réponse thermique [39]. Avant de commencer l'exploitation, le rendement des deux puits doit être évalué à l'aide d'essais de pompage appropriés afin de garantir une utilisation durable. Quitte à ce que le rendement mesuré est insuffisant pour répondre aux besoins d'extraction de chaleur prévus, les puits peuvent être approfondis ou leur diamètre augmenté. Les profondeurs de la boucle géothermale à utilisation directe sont généralement comprises entre 5 et 15 m [7].

### b) Exploitation

En dehors des sources hydrothermales naturelles, l'accès à la ressource nécessite la réalisation de forages. Plusieurs méthodes sont utilisées. Elles dépendent d'une part du type de terrain à traverser et, d'autre part de la profondeur à forer. La technique du forage Rotary est celle la plus fréquemment utilisée en géothermie, notamment en forages profonds. C'est aussi la technique la plus utilisée pour les forages pétroliers [36]. D'autres techniques de forage peuvent être mises en œuvre tels que le forage hors et fond de trou, le battage, le forage à la tarière qui est envisagé lorsque la profondeur à atteindre est assez faible et les terrains non bouillants (limons, argiles, marnes, craie, etc.) [36]. Lors du forage ou installation de puits, il est possible de créer de nouvelles connexions et voies d'écoulement, il convient donc de porter une attention particulière afin d'éviter tout écoulement entre aquifères contaminés et immaculés [39]. Au titre d'extraction de chaleur des eaux souterraines des puits, le pompage direct influence les conditions hydrauliques des aquifères et une planification adéquate nécessite une analyse hydrogéologique [39].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Cette analyse s'inscrit ainsi dans l'élaboration d'un cadre de tests hydrauliques plus vaste fournissant les données clés sur la conductivité hydraulique de la formation du réservoir et la structure de perméabilité du réservoir. Cela inclut des tests à long terme, des expériences de circulation ou des tests de traçage [7].

Les limites de l'utilisation directe des eaux souterraines sont imposées par la disponibilité de volumes suffisants d'eaux souterraines, de propriétés aquifères appropriées, ainsi par l'impact thermique admissible du système de puits sur les eaux souterraines et l'aquifère. De plus, il est important que les deux puits ne s'influencent pas hydrauliquement, ni s'interfèrent thermiquement [7]. Bien entendu, la réinjection appauvrit thermiquement, assure un bilan de masse quantitatif et préserve les ressources en eaux souterraines, tout en devant tenir compte du contexte de la réglementation sur la protection des eaux souterraines, qui impose une différence de température de départ / retour limitée à 3–6 K [40]. Pour venir en réponse à cette question, la réinjection de l'eau refroidie ne doit pas se faire en amont du puits de production [11, 39]. Idéalement, si l'espace le permet, le puits d'injection est placé perpendiculairement au gradient hydraulique (perpendiculaire au sens d'écoulement des eaux souterraines) ou, en deuxième position, à la géométrie optimale, en aval du puits de production. En outre, la composition chimique est importante car certaines eaux ont tendance à précipiter les écailles et à devenir excessivement saturées en certains minéraux lorsqu'elles sont refroidies. Les effets chimiques du refroidissement doivent être soigneusement pris en compte lors de la planification du projet [11]. Par ailleurs, une attention particulière doit être accordée à une distance suffisante entre puits de production et d'injection à fin d'éviter les interférences thermiques indésirables au niveau du puits de production pendant le fonctionnement. En règle générale, la distance entre les deux puits est de quelques dizaines de mètres, mais des distances plus courtes sont possibles en fonction des conditions du lieu spécifié. Les éventuels effets thermiques à long terme sur les eaux souterraines du fait du fonctionnement d'un système à deux puits doivent également être pris en compte et doivent être évités [11]. Entre autre, cette exigence peut imposer pour la plupart des contraintes à l'utilisation d'un système de doublet, bien que, en règle générale, le chauffage des eaux souterraines soit considéré plus critique que le refroidissement. Une valeur spécifique pour la différence de température autorisée est toutefois toujours incluse dans la législation sur les eaux pour chaque cas individuel [39].

## Chapitre 1. Energie géothermique

A cela s'ajoute le fait que, les puits d'injection vieillissent plus rapidement que les puits de production, si bien que le tuyau de retour doit être placé et connecté au puits d'injection, au-dessous de la nappe phréatique non perturbée [11]. Dans le cadre des systèmes adjacents, la rétroaction thermique entre les puits est une préoccupation majeure [41]. Cela peut être évité ou atténué en augmentant la distance entre les puits ou par un réaménagement spatial général, en abaissant les vitesses de pompage [42].

En marge du contexte de l'exploitation, les aspects environnementaux sont également présents du fait que les gradients thermiques induits influencent les processus de mélange, accélèrent les réactions chimiques, modifient l'équilibre géochimique des minéraux. Cela peut notamment affecter directement les écosystèmes dépendants des eaux souterraines (les microbes et les invertébrés) ou leur diversité, leur composition et leur fonctionnalité qui sont influencées par la variation de température [39].

### 4.2.2.2 Systèmes actifs "Application indirectes"

Quant aux systèmes indirects, les pompes à chaleur géothermique (PCG) est un terme inclusif pour une variété de systèmes utilisant le sol, les nappes phréatiques peu profondes ou les nappes superficielles comme source de chaleur et puits. Les PCGs sont à l'origine du jumelage entre les différentes technologies passives sus-indiquées dans les figures (1.8 et 1.9) et les différentes pompes à chaleur. A cette occasion, l'unité la plus largement utilisée est une pompe à chaleur eau-air, tandis que les pompes à chaleur eau/eau sont aussi couramment utilisées et peuvent être particulièrement efficaces lorsque la température de la boucle d'eau du bâtiment n'est pas extrême. Un troisième type de PCG est le PCG à détente directe (DD) utilisant un réseau de tuyauterie en cuivre enterré comme l'un des serpentins de la pompe à chaleur à travers lequel le réfrigérant circule [43]. En effet, les progrès récents dans l'application des pompes à chaleur géothermiques ont ouvert de nouvelles possibilités d'exploitation de l'énergie géothermique. A noter en particulier que les ressources géothermales dont la température est inférieure à 30°C (cas des nappes superficielles ou nappes phréatiques peu profondes), s'apparentent désormais davantage à l'emploi de pompes à chaleur [32]. Outre, les aspects économiques de ces systèmes géothermiques peuvent être très intéressants dans le secteur bâtiment, pour vue qu'ils ne nécessitent ni équipements sophistiqués pour assurer un confort et une efficacité élevée [43].

## Chapitre 1. Energie géothermique

La subdivision des PCGs est en fonction du type de système d'échange de chaleur extérieure. Cela comprend : i) les pompes à chaleur couplées avec le sol (PCCS) qui sont souvent référées à des pompes à chaleur géothermiques en boucle fermée. Un PCCS est un système constitué d'un réseau de pompes à chaleur reliées à un échangeur de chaleur en boucle fermée enfoui dans le sol. Les PCCSs sont en outre subdivisées selon la conception de l'échangeur de chaleur du sol. ii) Le deuxième sous-ensemble de pompes à chaleur géothermiques est les pompes à chaleur des eaux souterraines (PCES) qui résident à des systèmes de tuyauterie en boucle ouverte avec des puits d'eau. iii) Les pompes à chaleur pour eaux de surface (PCESU) ont été incluses en tant que sous-ensemble de pompes à chaleur géothermiques en raison des similitudes dans les applications et les méthodes d'installation. Les PCESUs peuvent être des systèmes sous forme de bobines en boucle fermée similaires aux PCCSs ou des systèmes en boucle ouverte connectés à des lacs, des ruisseaux d'eau ou d'autres réservoirs similaires aux PCESs. Cependant, les caractéristiques thermiques des masses d'eau de surface sont assez différentes de celles du sol [43]. Au risque d'allonger, la figure 1.10 récapitule la taxonomie des pompes à chaleur géothermique.

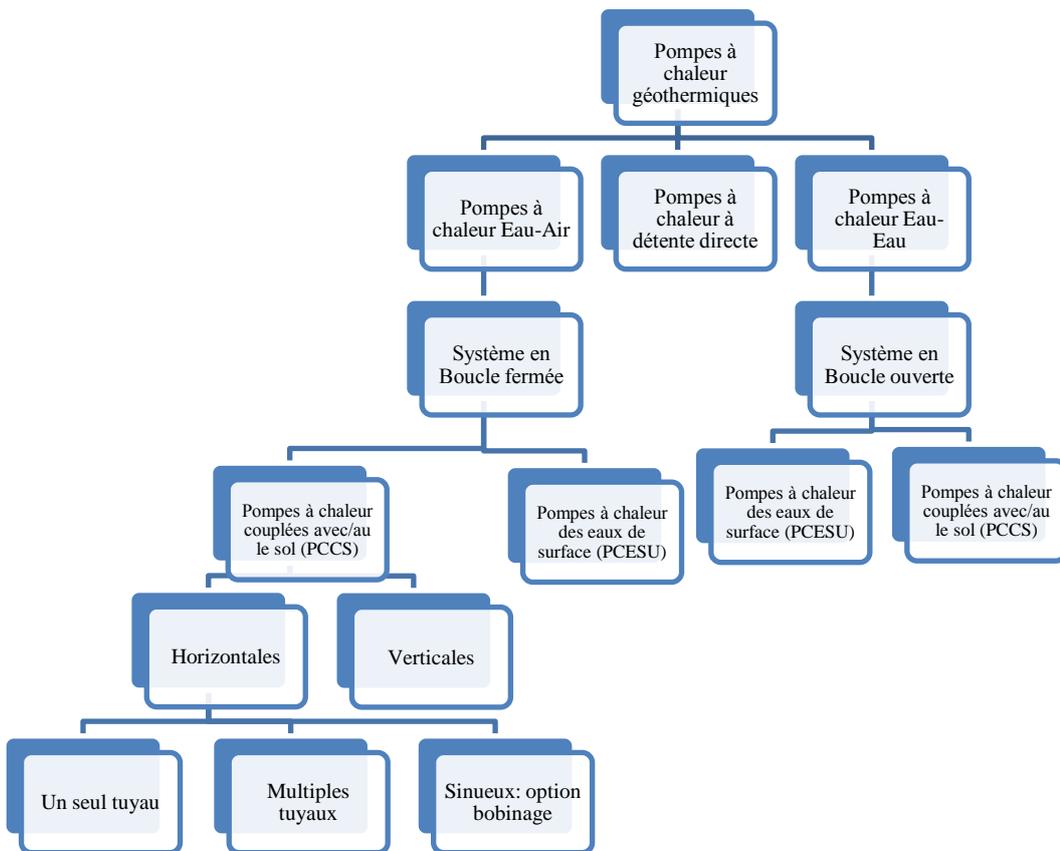


Figure 1.10. Taxonomie des pompes à chaleur géothermiques [43].

## Chapitre 1. Energie géothermique

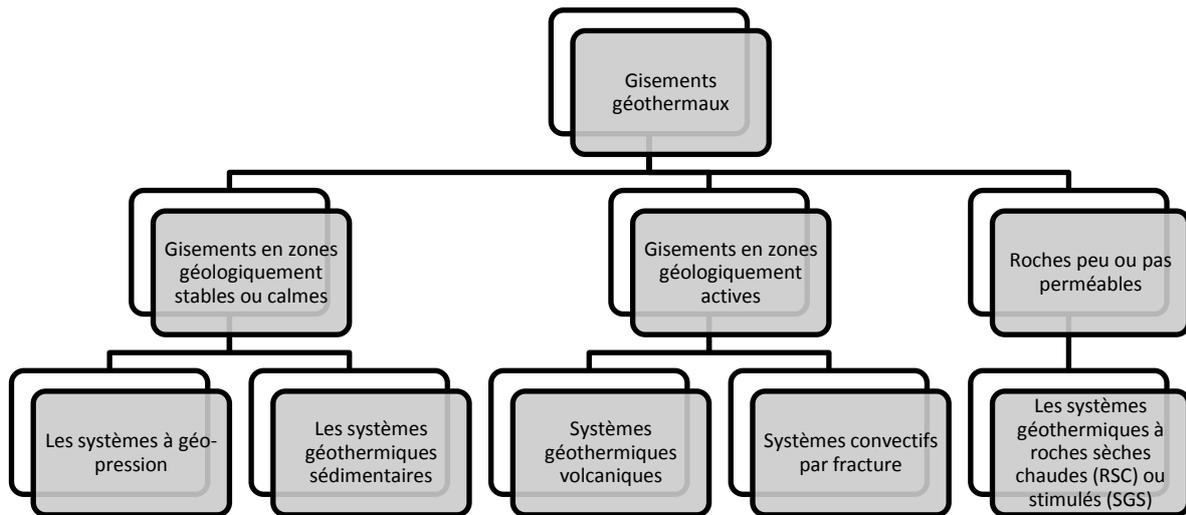
### 4.3 Contrôle géologique

Il existe une série de conditions géologiques qui pourraient donner lieu à une variété de systèmes géothermiques. En conséquence, tous les champs géothermiques diffèrent les uns des autres. Toutefois, en fonction de certaines caractéristiques communes, ceux-ci peuvent d'une façon générale être classés dans les catégories suivantes: (1) à vapeur prédominante, (2) eau chaude, (3) géo-pressurisée, (4) roches chaudes et sèches (Hot Dry Rock "HDR") et (5) magma [7]. Entre autre, lorsque les ressources géothermiques sont définies en fonction de la typologie géologique où elles prennent source (figure 1.11), les différentes catégories sont les suivantes : systèmes géothermiques volcaniques, les systèmes convectifs par fracture, les systèmes géothermiques sédimentaires, Les systèmes à géo-pression, les systèmes géothermiques à roches sèches chaudes (RSC) ou stimulés (SGS) [35].

A l'instar des ressources géothermiques naturelles, en accordant une attention spéciale au concept de systèmes géothermiques stimulés (SGS) qui a considérablement augmenté le potentiel géothermique mondial grâce aux réservoirs technologiques dans lesquels l'énergie thermique stockée peut être extraite du sous-sol, même dans des zones de flux de chaleur faible ou modéré [29]. En fait, Les SGSs présentent une faible perméabilité ou sont presque imperméables. De ce fait, que ces systèmes ne peuvent pas être exploités de manière conventionnelle. Toutefois, des expériences ont été réalisées sur plusieurs sites pour utiliser la fracturation hydraulique, aussi appelée "hydro-fracturation", dans le but de créer des réservoirs artificiels au sein de tels systèmes ou pour valoriser des réseaux de fractures existants [32]. A ce titre, un accent particulier est mis sur l'exploration géothermique, qui fournit des directives spécifiques à chaque site pour les systèmes géothermiques, en particulier les SGSs [29].

A vrai dire, jusqu'à ce stade, il n'y avait pas d'approche globale normalisée dans l'évaluation des ressources géothermiques. A cette occasion, Moeck et Beardsmore ont donné naissance à une nouvelle classification "type de groupe de gisement géothermique" inspirée d'une approche appropriée au processus d'évaluation standard des ressources en hydrocarbures (tableau 1.3) [44]. Ce nouveau catalogue est étroitement lié au type de ressource, les effets du contrôle géologique ainsi que les positions tectoniques des plaques structurales sur le régime et le flux thermique, le régime hydrogéologique, la dynamique et la chimie des fluides, failles et fractures ainsi que la capacité de stockage d'énergie thermique [32, 44].

## Chapitre 1. Energie géothermique



**Figure 1.11.** Représentation schématique des différents gisements et systèmes géothermiques selon la typologie géologique [35, 36].

## Chapitre 1. Energie géothermique

**Tableau 1.3.** Classification de systèmes géothermiques par le contrôle géologique [32, 45].

	Type	Cadre géologique	Source de chaleur	Mécanisme de transport de chaleur dominant	
Convection	CV-1 : Magmatique	CV-1a: Extrusive CV-1b: Intrusive	Arcs magmatiques, crêtes mi-océaniques, Points chauds	Volcanisme actif, chambre magmatique peu profonde	Magmatique-Circulation hydrothermale
	CV-2 : Plutonique	CV-2a: Volcanisme récent ou actif	Marges convergentes avec plutonisme récent (<3 Ma), Jeunes orogènes, Phase post-orogénique	Jeune Intrusion + Extension, Pluton Felsique	Magmatique-Circulation hydrothermale-control par faille
		CV-2b: Volcanisme inactif		Jeune Intrusion + Extension, Pluton Felsique Élément de production de chaleur Dans la roche	
	CV-3 : Domaine extensionnel		Complexes métamorphiques, Extension de l'arc arrière, Bassins démontables, Rifts Intracontinentaux	croûte amincie+ Flux de chaleur élevé, domaines d'extension récents	Circulation hydrothermale- contrôle par faille
Conduction	CD-1: Bassin Intracratonique	Intracratonique Rift Basins, Bassins de Marge Passifs	Amincissement lithosphérique et Affaissement	Contrôle par Litho/Biofaciès	
	CD-2: Ceinture orogénique	Bassins dans les ceintures plissées	Chargement crustal et affaissement adjacents à la croûte épaissie	Contrôle par Litho/Biofaciès, control de faille /fracture	
	CD-3: Roche cristalline - sous-sol	Intrusion dans un terrain plat	Élément producteur de chaleur dans la roche, Roche chaude Intrusive	Roche sèche chaude, contrôle par faille /fracture	

## Chapitre 1. Energie géothermique

A l'égard de cette classification, les éléments clés définissant ce nouveau catalogue sont étudiés à fin de savoir si le transfert de chaleur est dominé par la conduction ou la convection, les caractéristiques à l'échelle régionale de la source de chaleur, du réservoir et de la roche hôte, de la structure de perméabilité-porosité et des types de fluide [32]. Cette nouvelle classification n'est pas explicitement basée sur la température, la profondeur ou l'enthalpie, car ces critères ne peuvent pas être connus de manière fiable avant l'exploration, bien que de nouvelles modifications et ajouts soient nécessaires à l'avenir [32]. La chose la plus intrigante est le fait que Moek a assigné à chaque type de groupe de gisement géothermique relatif à un système géothermique les propriétés géologiques ainsi que le gradient de température en fonction de la profondeur [32].

Dans le même contexte, Brophy et al. étaient les premiers à mettre en œuvre un modèle d'occurrence géothermique (MOG) à dessein de classifier les zones géothermiques en fonction de leur propriétés géologiques telles que le réglage tectonique, les structures de contrôle et les propriétés des fluides [46]. Ce dernier est connu sous le nom de modèle d'occurrence géothermique de Brophy (tableau 1.4) qui a été appliqué à chaque zone géothermique opérationnelle. Terry et al. ont développé des fonctions de distribution de probabilité pour les deux fameux modèles de classification à partir des données collectées de 136 champs géothermiques en exploitation dans le monde, avec 460 centrales en exploitation. Cette modélisation sert comme outil pour estimer le potentiel des ressources géothermiques [47]. En effet, l'analyse de sondage géologique des USA "USGS" a signalé qu'aucune tendance significative n'a été observée lors de la comparaison entre les estimations de pré-développement délivrées par ces deux fameux modèles quant aux données du post-développement. Par conséquent, aucune méthodologie n'a pu être suggérée pour altérer les calculs utilisés pour les données estimées. À mesure que les champs géothermiques se développent d'avantage, une tendance peut être observée, mais pas la taille de l'échantillon utilisé actuellement [47]. En résumé, la figure 1.12 permet de visualiser ce qui vient d'être présenté. Elle traduit toute la diversité que recouvre l'exploitation de la chaleur contenue dans le sous-sol : diversité des ressources exploitables, diversité des applications [36].

## Chapitre 1. Energie géothermique

**Tableau 1.4.** Modèles d'occurrence géothermique de Brophy [46].

Type	Climat	Profondeur de la ressource(m)	Perméabilité
A- Magma chauffé, Ressource de vapeur sèche	Variable	2500-4000	Faible à modérée
B- Ressource volcanique andésitique	Variable- Forte précipitation	Profonde à modérée	Faible à modérée, souvent élevé
C- Ressource de caldera	Variable	Modérée à peu profonde (<2500)	Faible
D- Sédimentaire-hébergé, Ressource liée au volcan	Aride- Faible précipitation	Intermédiaire (2000-3500)	Variable
E- Tectonique extensionnel, contrôle de la ressource par faille	Généralement sec avec faible précipitation	Profonde (2500-3000)	Dominée par le contrôle de faille
F- Crête océanique, Ressource basaltique	Ile- Forte précipitation	Peu profonde (1000-2000)	- Elevée horizontalement - Variable verticalement

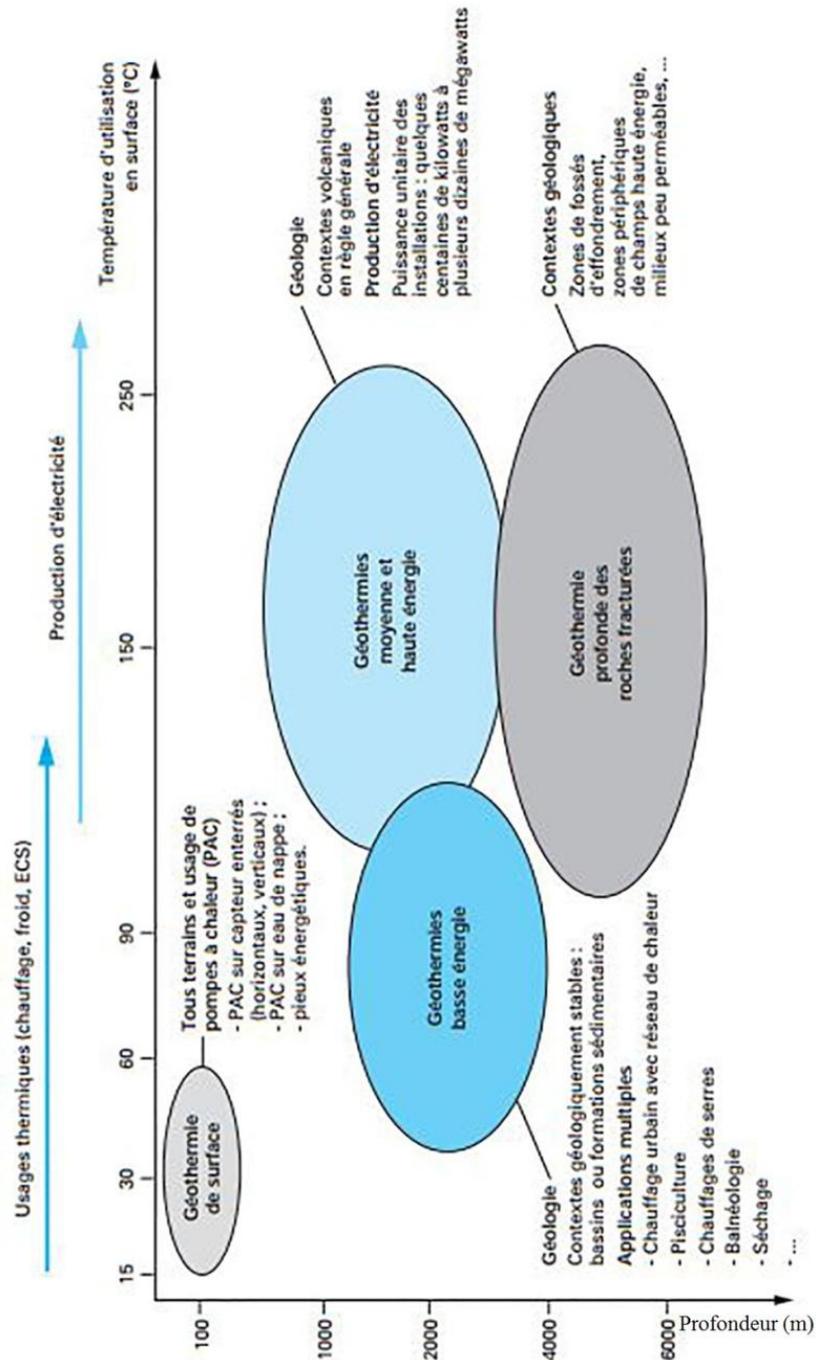


Figure 1.12. Représentation schématisée des différentes catégories de la géothermie [36].

#### 4.4 Potentiel

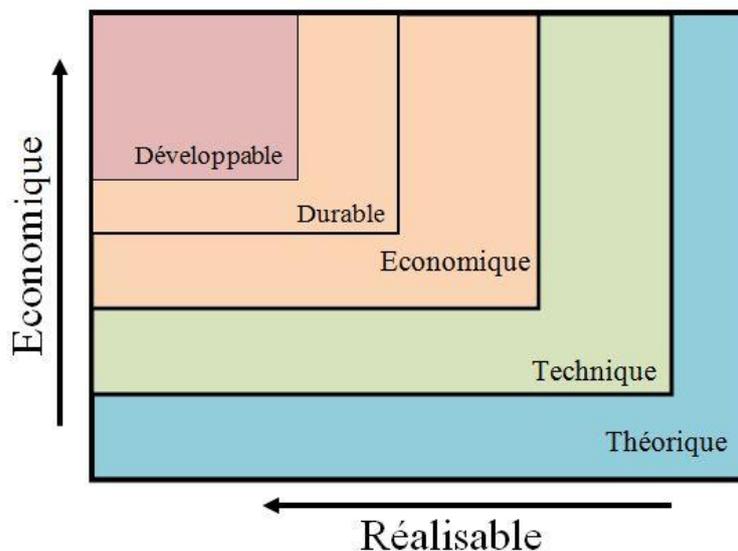
Entre autre, Ryback a signalé que lors de l'évaluation des ressources, l'expression «potentiel géothermique» est souvent utilisée sans indiquer clairement le type de potentiel visé (théorique, technique, économique, durable ou développable). Du ce fait, l'émergence d'une nouvelle classification par potentiel s'est installée comme une sorte de modèle général pour les futurs rapports sur les ressources d'énergie géothermique.

## Chapitre 1. Energie géothermique

La figure 1.13 illustre la hiérarchie et les interrelations entre les différents potentiels qui sont progressivement plus petits en matière économique de même pour la réalisation. Chaque potentiel est une fraction du précédent (sauf le potentiel théorique qui est le plus grand et le moins économique). En d'autres termes, les potentiels forment une série de sous-ensembles imbriqués [48].

Suite à cette définition du potentiel instauré par Ryback, Beardsmore et al. ont proposé un protocole d'estimation et de cartographie du potentiel global spécifiquement pour les systèmes Géothermiques stimulés (SGS) [49]. De ce qui précède en matière de potentiel, Goldstein et al. ont adopté l'approche de classification par potentiels et l'ont complétée par des estimations pour tenter de catégoriser les ressources géothermiques mondiales en vue de la production d'électricité de même l'utilisation directe [50].

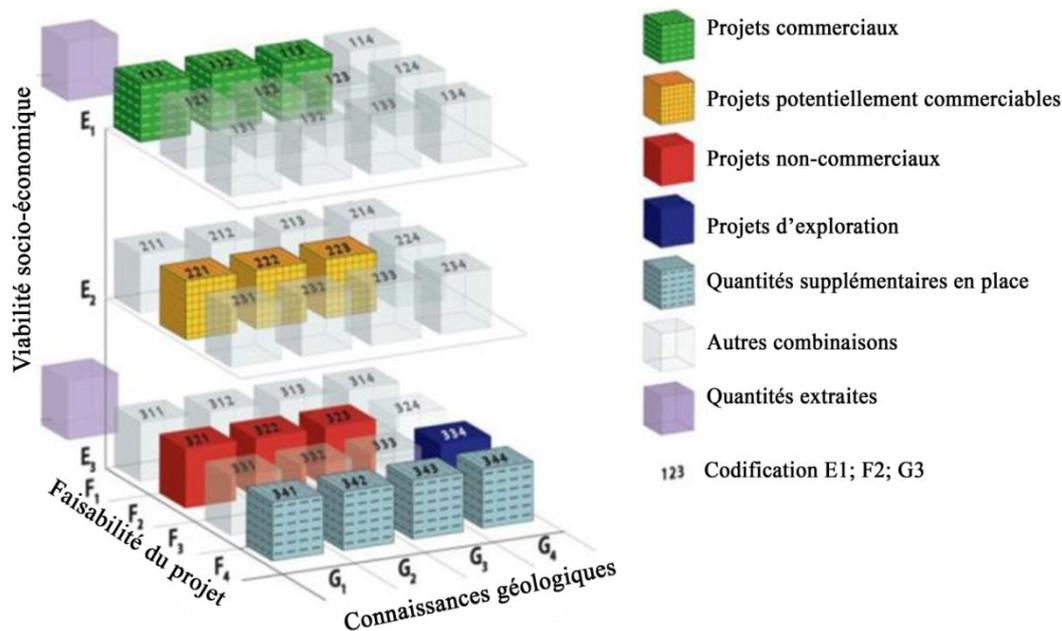
Récemment, les experts du groupe de travail sur les réserves d'énergie renouvelable ont discuté la nécessité d'évaluer et de quantifier les ressources en énergie renouvelable, de manière commune et transparente, afin de garantir les investissements indispensables pour le secteur des énergies renouvelables. Suite à une revue des systèmes de classification existants, les experts sont convenus que la Classification-cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile, les réserves et ressources minérales (CCNU 2009) pourrait fournir également une base possible pour un cadre de classification générique pour la géothermie [51, 52]. Segneri et al. ont déjà mentionné la possible mise en œuvre du cadre de la CCNU pour inclure la classification géothermique [53].



**Figure 1.13.** Classification des ressources et des réserves géothermiques par potentiel [48].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Les quantités figurant dans la CCNU-2009 sont classées selon trois critères fondamentaux : économique et viabilité sociale (E), faisabilité et statut du projet sur le terrain (F) et connaissances géologiques (G). La combinaison de ces critères crée un système de cadre en trois dimensions (figure 1.14). De plus, le déploiement de la CCNU-2009 pour englober les énergies renouvelables permettrait une comparaison significative des ressources en énergies renouvelables avec des ressources non renouvelables [48,49]. En outre, Au nom de l'Agence internationale de l'énergie, Beardsmore et al. ont entrepris d'évaluer l'applicabilité du schéma (CCNU 2009) sur l'approche de classification des ressources et des réserves géothermiques par potentiel. Les résultats obtenus sont illustrés par le tableau 1.5 et la figure 1.15 [48].

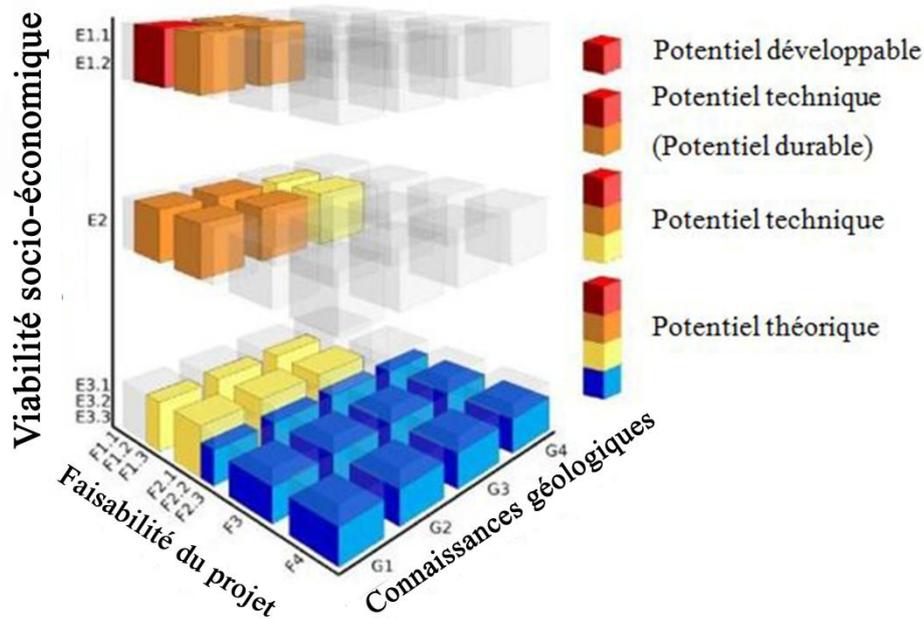


**Figure 1.14.** Classification-cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile, les réserves et ressources minérales (CCNU 2009) [52].

**Tableau 1.5.** Evaluation de la classification par potentiels en termes de catégories (CCNU 2009) [48].

Classes Rybach(2010)	Catégories (CCNU 2009)		
	E	F	G
Potentiel théorique	3.2–3.3	2.3–4	1–4
Potentiel technique	2–3.3	1.3–2.2	1–3
Potentiel économique	1.1–2	1.2–2.2	1–2
Potentiel durable	1.1–2	1.2–2.2	1–2
Potentiel développable	1.1–1.2	1.2–1.3	1

## Chapitre 1. Energie géothermique



**Figure 1.15.** Cartographie des classes de Rybach (2010) dans le cadre 3D de la CCNU-2009 [48].

### 5 Discussion

A l'évidence, de telles classifications empêchent clairement les comparaisons analogiques de champs aux premières étapes de l'évaluation des ressources, car une certaine température peut être trouvée dans tous les types d'environnements géologiques à différentes profondeurs. En bref, la catégorisation en fonction de la température ou de la profondeur ne facilite pas la prise de décision quant à la stratégie d'exploration appropriée. La température et la profondeur sont, pratiquement par définition, non connus avant l'exploration.

Par conséquent, nous ne pouvons pas classer une ressource géothermique en fonction de la température ou de la profondeur avant l'exploration, outre nous ne pouvons pas utiliser un tel cadre de classification pour estimer la probabilité de succès de l'exploration [44]. De même, la prise en compte de la profondeur du réservoir ou la perméabilité (ou toute autre propriété pétro-physique en l'occurrence) en tant que critère de classification ne conduit pas à une classification satisfaisante des attributs relatifs au développement des centrales tels que (fraction de vapeur dans la phase fluide mobile dans le réservoir, type de production d'énergie, mécanisme de production et l'état du fluide à la tête du puits). A titre d'exemple, il existe de nombreux puits au Nevada et dans la région limitrophe de la Californie qui produisent de manière constante 3 à 4 MWe à partir d'une gamme de profondeurs remarquablement étendue (de moins de 150 m à plus de 2 500 m). Concernant la profondeur, voire, le réservoir Geysers a connu une production commerciale allant de 300 à 4 000 m de profondeur. Alors, à quelle

## Chapitre 1. Energie géothermique

classe, dans une classification basée sur la profondeur, les Geysers devraient-ils appartenir ? [31]. En effet, l'impasse de la classification donne accès à soulever une panoplie de questions, en premier lieu, la question ultime est de savoir ce que nous cherchons réellement lorsque nous commençons l'exploration géothermique. La réponse est toujours la «puissance thermique extractible», cependant, dans des circonstances et à des emplacements différents, le principal risque peut être la température du réservoir, le débit de production ou la composition chimique des fluides en place. Les principaux risques dictent que la stratégie d'exploration la plus appropriée est presque toujours liée à la géologie [44].

Quelles réponses doivent être fournies par l'exploration géothermique, et comment pouvons-nous identifier et apprendre des analogues du monde entier ? Des facteurs tels que la porosité, la perméabilité, la nature et l'étendue de la source de chaleur sans oublier la distribution de la température (verticale ou horizontale) ont une importance variable en fonction de la nature du réservoir hébergeant la ressource de chaleur.

Un moyen logique de classer un projet géothermique à un stade précoce est un concept de type de jeu applicable à l'échelle mondiale basé sur des critères géologiques généralement connus avant l'exploration [44]. Cependant, au sein d'un même réservoir, les propriétés pétro physiques peuvent facilement varier d'un ordre de grandeur à l'autre. Comment pourrait-on alors cataloguer un tel réservoir avec un schéma de classification basé sur une propriété pétro physique ? De plus, la plage de profondeurs de production ou les propriétés pétro physiques d'un champ ne peuvent être définies qu'après un nombre important de forages de développement [31].

Tandis que, la température du réservoir peut être estimée à partir d'explorations géochimiques et d'études de flux thermiques bien avant la confirmation d'un gisement par forage ou avant d'être envisagée pour un développement commercial. C'est un avantage supplémentaire d'une classification basée sur la température [31]. En revanche, l'avantage d'un schéma de catalogue basé sur la géologie est l'adaptation de stratégies d'exploration et de technologies spécifiques à un site pour le développement sur le terrain. Ce schéma contraste avec les schémas de catalogue basés sur la température, qui ne disent rien de spécifique sur le réservoir lui-même ni sur les meilleures pratiques de développement [32].

## Chapitre 1. Energie géothermique

Réciproquement, l'énergie géothermique issue des RCS/SGS et des ressources hydrothermales est encore au stade du développement technologique ainsi que le manque de compréhension de la formation de réservoirs géothermiques dans la nature, ont limité principalement la capacité de créer des réservoirs géothermiques artificiels de manière cohérente. A cette occasion, un catalogue de types de groupe de gisement géothermiques géologiques aide à comprendre la nature d'une ressource et à définir les stratégies d'exploration appropriées, l'évaluation des réservoirs et la quantification du potentiel géothermique [29]. Tandis que, la température est un critère peu satisfaisant pour la classification des projets SGS, car contrairement à un système hydrothermal, les caractéristiques d'un réservoir SGS sont largement conçues. Étant donné l'expérience pratique limitée des projets SGS à ce jour et les limites conceptuelles, il est trop tôt pour tenter d'élaborer un schéma de classification pour les projets SGS. Un tel système de classification devrait peut-être envisagé après la publication des résultats significatifs des expériences sur les SGS et des développements sur le terrain. En tout état de cause, l'absence de système de classification ne devrait pas entraver les progrès sur les SGSs dans un avenir prévisible [31]. Quant aux systèmes géothermiques à conduction dominante décrits par le rapport entre la porosité et la perméabilité peuvent cataloguer les SGSs en trois classes : Pétro thermique, hydrothermale ou hydrothermale pure. De manière remarquable, la technologie utilisée pour la production de pétrole non conventionnel est similaire à la technologie géothermique stimulée [32].

Dans un le cadre de classification par potentiel, Rybach a souligné que l'utilisation du concept générique "potentiel" sans indication précise du type (théorique, technique, économique, durable ou développable), risquerait de créer une confusion parmi les investisseurs quant aux attentes réelles d'une perspective ou d'un développement géothermique donné [48].

Goldstein et al. ont montré que la classification des ressources selon divers potentiels est faisable et praticable. Les définitions par potentiel de Rybach peuvent ajouter une valeur supplémentaire dans ce contexte. Cette classification constitue d'ores et déjà un modèle utile pour normaliser les rapports futurs sur les ressources en énergie géothermique dans le monde [45].

## Chapitre 1. Energie géothermique

### 6 Conclusion

Au regard de la synthèse formulée, nous avons présenté d'une part, l'énergie géothermique ainsi que l'aspect technologique qui relève de son ultime potentiel énergétique et d'autre part, clarifier, voire, une certaine confusion entre deux concepts jumeaux "renouvelable et durable" quant à leurs significations liées à cette énergie.

Dans ce chapitre, nous avons résumé succinctement la perspective de la production d'énergie géothermique au cours des dernières années assortis avec le statut de l'utilisation mondiale de l'énergie géothermique. En se référant à la littérature, la capacité opérationnelle globale d'exploitation pour la production d'électricité géothermique à partir de telles ressources géothermiques est d'environ 12,8 GWe en janvier 2015, répartie sur 24 pays, et devrait atteindre entre 14,5 GWe et 17,6 GWe d'ici 2020 et à environ 25 GWe à l'horizon 2030. L'Islande et le Salvador produisent 25% pourcent de leur énergie électrique à partir de ressources géothermiques. La majeure partie de cette augmentation devrait se produire en Asie du Pacifique, principalement en Indonésie ; en Amérique centrale et du Sud ; ainsi qu'aux États-Unis, au Japon, en Nouvelle-Zélande et en Islande. Tandis que, l'utilisation directe des ressources énergétiques géothermiques double tous les cinq ans avec une capacité mondiale installée d'environ 70 329 MWth enregistrée à la fin de 2014. Cela équivaut à une économie d'énergie annuelle aux alentours de 63 millions de tonnes de pétrole et une réduction de 60 millions de tonnes des émissions de carbone.

A travers l'étude réalisée, il est montré que les propriétés thermo physiques du fluide (température, pression, état physique) et l'utilisation sont très liées car le niveau de température du fluide extractible d'un gisement géothermique conditionne le type d'utilisation possible. En effet, les meilleurs gisements géothermiques pour la production d'électricité sont généralement situés autour de zones volcaniques actives, souvent près des frontières des plaques tectoniques. En outre, l'utilisation non-électrique s'adresse aux gisements de basse et très basse énergie qui sont largement répandus à la surface du globe terrestre.

Au chapitre des applications géothermiques, on aurait plutôt tendance à souligner que les systèmes fermés sont d'autant plus adéquat à l'air, quant aux systèmes ouverts sont adaptés particulièrement à l'exploitation des eaux souterraines. Entre autre, les systèmes actifs en particulier les pompes à chaleur géothermiques ont majoritairement éclipsé une panoplie d'applications géothermiques.

## Chapitre 1. Energie géothermique

Telles sont, en somme, les différents types de classification, supposent bien des nuances entre elles. De ce fait, nous avons explicitement mené une discussion qui fédère les différents avantages et limites d'application relatives à chaque type de classification. Dans ce contexte, il n'existait aucune norme universellement reconnue pour la classification et la déclaration des ressources et des réserves géothermiques. Sur la base des systèmes de classification disponibles dans la littérature, on peut affirmer que des problèmes majeurs demeurent en ce qui concerne la nomenclature et la terminologie. De part et d'autre, il semble y avoir de multiples efforts parallèles au sein de la communauté géothermique pour essayer de proposer des directives ou des normes universellement applicables pour la classification et la notification des ressources géothermiques. Cependant, les différentes organisations impliquées n'ont pas nécessairement travaillé ensemble, ce qui a conduit à une duplication des efforts et des documents de référence indépendants qui ne peuvent toujours pas être mis sous le même parapluie à ce jour.

Sur le plan technologique, ce prélude à la géothermie nous a permis de situer notamment à l'intérieur du périmètre des systèmes peu profonds idoines à la région de Biskra. Ceci appuie objectivement le choix d'étudier le comportement thermo physique d'un système passif horizontal à base d'air, qui fera objet dans les chapitres ultérieurs. A cet effet, le prochain chapitre est dédié à l'état de l'art des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol (ECSHAS).

# CHAPITRE 2. ECHANGEURS DE CHALEUR SOUTERRAINS HORIZONTAUX AIR-SOL : COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE

La synthèse susmentionnée dans le premier chapitre révèle que sous le terme technologie géothermique se cache en effet une diversité et variétés d'applications thermiques. L'éventail des applications va de la fourniture de la chaleur jusqu'au le rafraichissement de l'air en passant par l'exploitation des eaux souterraines. L'éloquence des chiffres indique que la géothermie peu profonde de très basse enthalpie est largement répandue dans le monde entier et présente un environnement propice pour les applications appropriées aux climats chauds et arides.

L'exploitation de telles ressources à faibles profondeurs devient courante notamment durant ces dernières années. En outre, les activités de recherche relative à cet axe se caractérisent par une dynamique plus accélérée et impliquent d'autres formes de technologies renouvelables. De ce fait, présenter une synthèse bibliographique exhaustive à ce jour reste indéniablement une tâche compliquée.

Pour cela, nous venons de renforcer l'intérêt d'étudier les systèmes passifs horizontaux, d'autant plus, ce chapitre présente et discute plus particulièrement un état de l'art des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol (ECSHAS). Ainsi, il nous semble qu'il est approprié de centrer notre analyse sur tout le spectre des travaux relatifs au domaine de rafraichissement de l'air utilisant l'énergie géothermique comme source froide.

Sans se clore, notre approche est de faire surface les aspects non exploitables et ombragées liés à ce domaine comme une nécessité invoquée d'une part, et d'autre part, la focalisation sur les principaux constats dégagés ainsi qu'aux conclusions sur le comportement thermo-physique de ces systèmes passifs. En effet, ce comportement couvre quasiment l'intégralité des travaux liés au processus du transfert de chaleur entre l'air "le fluide" et le sol avoisinant l'échangeur.

### 1 Description du système passif horizontal

Un système d'ECSHAS consiste généralement en un puits d'entrée avec des filtres et un réseau de conduits (tuyaux) enfouis dans le sol à travers lesquels l'air est transporté par un ventilateur (Figure 2.1). Le réseau de conduits enterré peut être installé dans des espaces ouverts ou sous des bâtiments (sous la dalle de fondation) sous forme de grilles, en serpentin ou en anneaux (Figures 2.2 a et b). La structure en anneau est utilisée autour des zones pavées (voir Figure 2.2 c) [54].

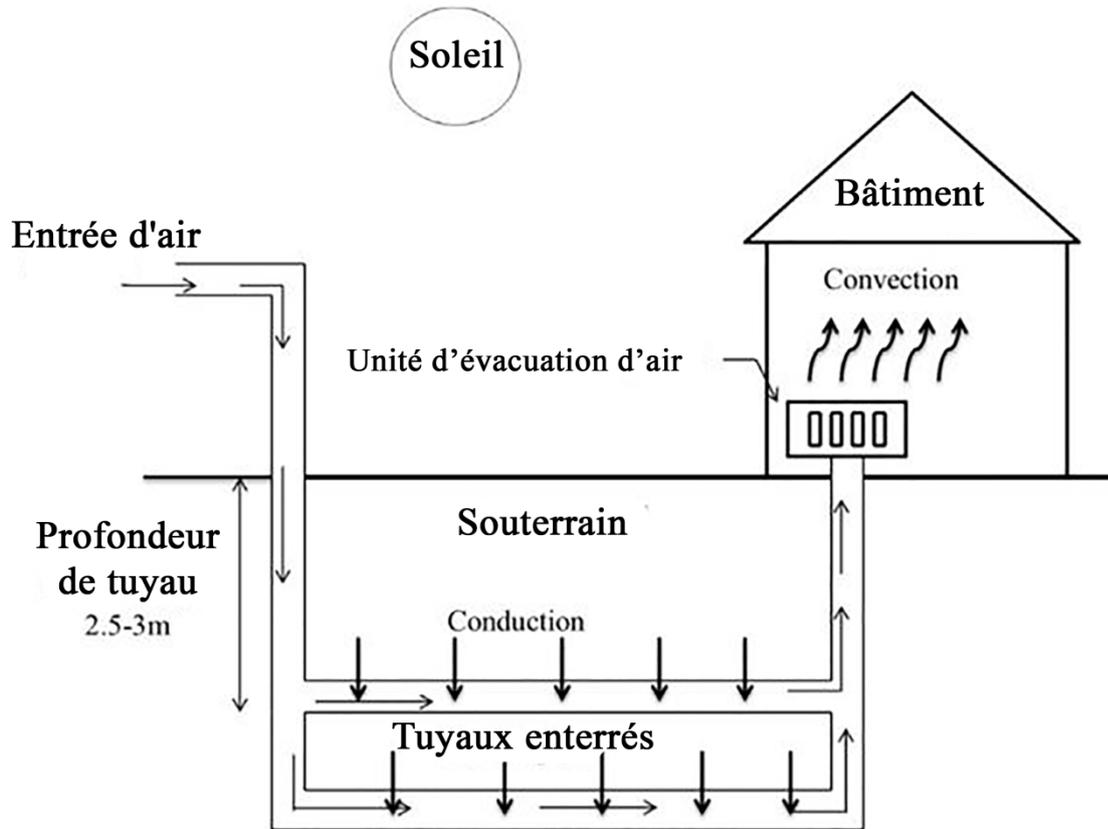


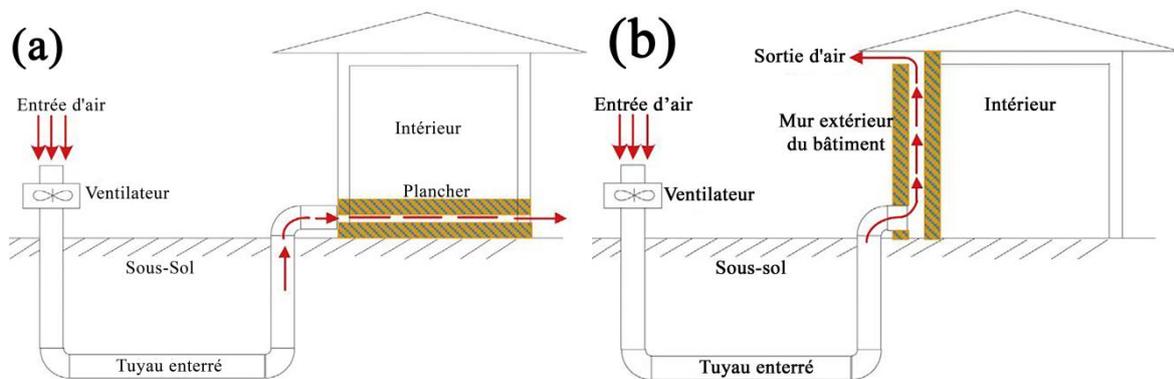
Figure 2.1. Principe de fonctionnement d'ECSHAS [55].



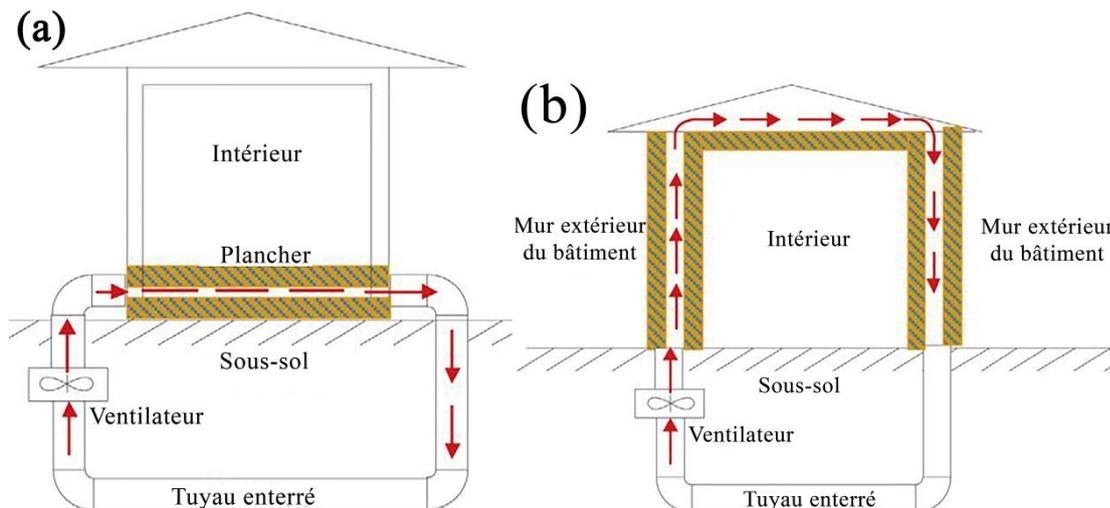
Figure 2.2. Différentes configurations de conduits sous le niveau du sol [54].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

Egalement, les systèmes des ECSHAs sont souvent intégrés aux systèmes de ventilation et aux enveloppes de bâtiment et conçus sur la base de trois configurations: système en boucle ouverte (Figure 2.3), système en boucle fermée (Figure 2.4) et système hybride [38, 56, 57]. La classification des ECSHAs a été précédemment élaborée dans la section 4.2.2.1 du chapitre 1. Néanmoins, l'arrangement des conduits et leurs modes de disposition sont des notions sur lesquelles, nous voulons mettre l'accent en termes de classification. Par ce dispositif, les systèmes des ECSHAs sont classés selon l'arrangement comme : Boucle horizontale/rectiligne; Boucle verticale; Boucles spirales /sinueuse; boucles hélicoïdale/étang; et selon leurs modes de disposition comme: i) Système à un tube; ii) Système à tubes parallèles (Figures 2.5 , 2.6 et 2.7) [55].

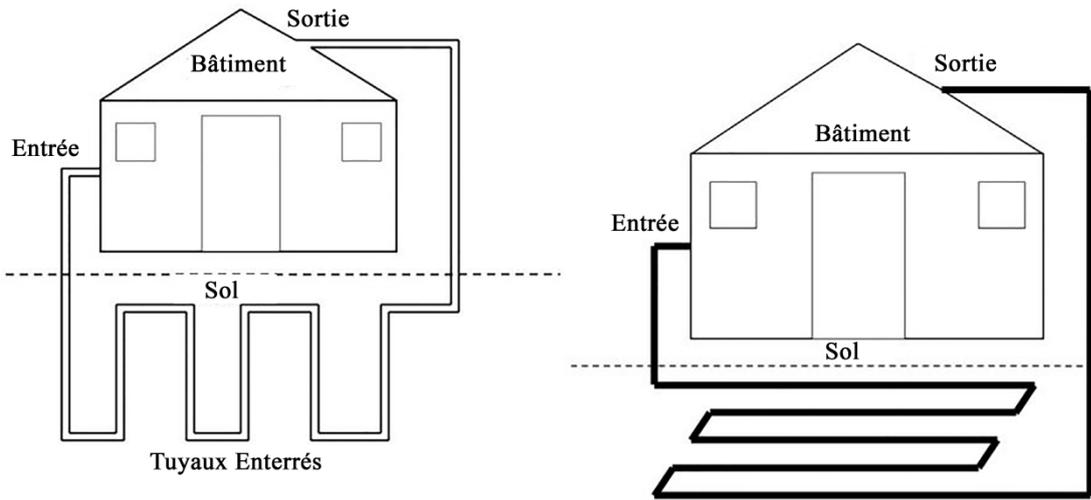


**Figure 2.3.** Système en boucle ouverte :a) Intégration avec plancher creux ;b) Intégration avec mur de bâtiment creux [38].

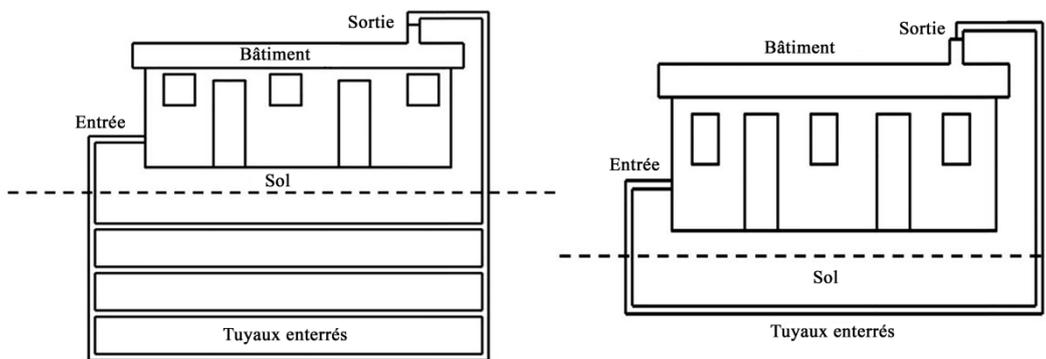


**Figure 2.4.** Système en boucle fermée :a) Intégration avec plancher creux ;b) Intégration avec mur de bâtiment creux [38].

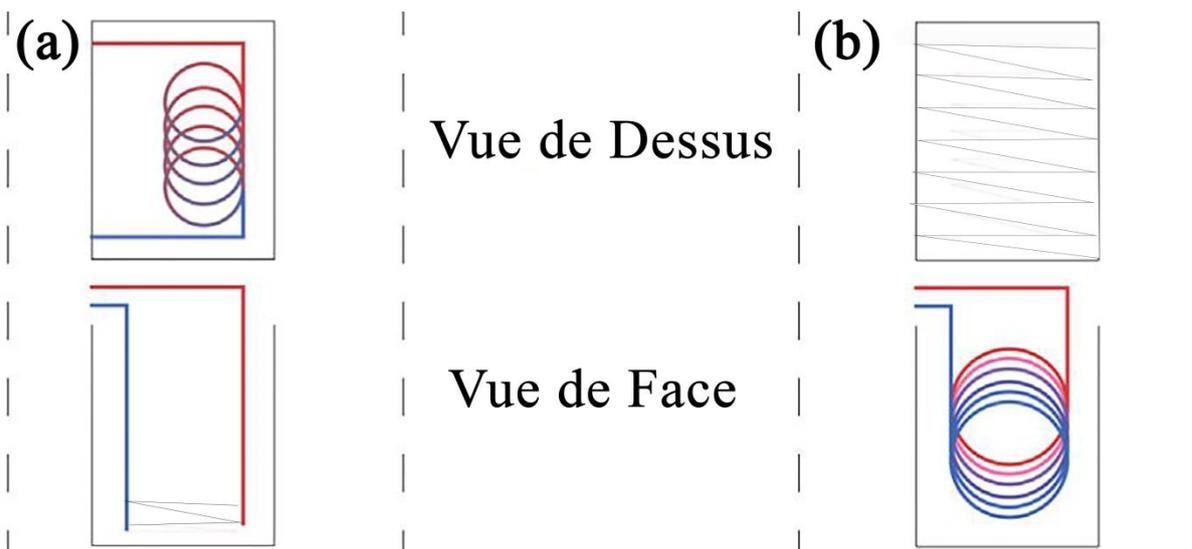
## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol



**Figure 2.5.** Système de boucle horizontale et de boucle verticale [55].



**Figure 2.6.** Système à un conduit et conduits parallèles [55].



**Figure 2.7.** a) Boucles sinueuses ; b) Boucle verticale en spirale [58].

### 2 Synthèse des études relatives à l'évaluation des performances des ECSHASs

Les études menées sur les ECSHASs sont basées sur différentes catégories, à savoir les études expérimentales, les études théoriques et les études basées sur des algorithmes [59]. Ainsi, les domaines relatifs à ces catégories d'études sont systématiquement compartimentés en optimisation de la conception, évaluation des performances thermiques/exergétiques et études paramétriques. A ce titre, le comportement physique de l'échangeur peut être analysé via plusieurs approches telles que : i) l'apport énergétique spécifique ; ii) le nombre d'unités de transfert thermique NUT et le coefficient de convection moyen  $h_{\text{moy}}$  ; iii) le comportement thermique ; iv) L'efficacité énergétique. Ces grandeurs sont régies par de nombreux modèles qui peuvent être divisés en deux grandes classes : i) méthodes analytiques ; ii) méthodes numériques. Les modèles de transfert de chaleur pour les ECSHASs sont résumés dans le Tableau 2.1 par ordre chronologique.

#### 2.1 Etudes basées sur des algorithmes

Cette section présente une actualisation des huit fameux algorithmes permettant de modéliser un échangeur de chaleur souterrain (Tableau 2.2). Ces différents algorithmes disponibles sur le scénario actuel d'application des échangeurs de chaleur air-sol sont catalogués en deux classes. Celles qui calculent d'abord le transfert de chaleur par convection entre l'air en circulation et le conduit, puis le transfert de chaleur par conduction entre le conduit et le sol environnant [60], d'une part, et, d'autre part, les algorithmes qui calculent uniquement le transfert de chaleur par convection entre l'air en circulation et le conduit [61-63]. A cette occasion, Tzaferis et al. [64] ont conclu que les huit premiers algorithmes proposés sont suffisamment précis pour prévoir la température de l'air sortant de l'ECSHA.

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

**Tableau 2.1.** Modèles de transfert de chaleur au sein des ECSHASs.

Méthode	Objectif
Modèle analytique [65].	Analyser le transfert de chaleur entre l'air traversant la conduite souterraine et le sol environnant
Modèle numérique implicite transitoire pour des tubes simples [66].	- Prédire les champs de température de l'air et du sol sous un bâtiment. - Teneur en humidité du sol et humidité de l'air en circulation.
Modèles analytiques[67].	Déterminer le potentiel annuel de chauffage et de refroidissement des systèmes de conduites d'air parallèles souterrains
Modèle numérique pour les systèmes à deux tuyaux: méthode de la marche dans le temps [68].	Calculer le transfert d'énergie du sol à l'ECSHAS
Modèle numérique explicite pour systèmes multi-canalisation [69].	Prédire les échanges thermiques latents et sensibles
Modèle analytique simplifié pour les serres [70].	Evaluer la performance en termes de nivellement de charge thermique (NCT) et COP
Approche bidimensionnelle transitoire numérique [71].	Calculer l'énergie fournie par l'échangeur de chaleur pendant la saison froide ou chaude
Analyse modale pour la résolution d'équations différentielles [72].	Calculer la température de l'air de sortie pendant la période de simulation
Méthode des facteurs de réponse par convolution .Modèle numérique [73].	Résoudre le problème de conduction en réduisant temps de calcul
Méthode des éléments finis quasi 3D ( Modèle AGHX) [74].	Analyser la performance énergétique.
Méthode du volume de contrôle transitoire [75].	Analyser la capacité d'auto-récupération pendant le temps d'inactivité et les performances énergétique sous des conditions de fonctionnement continu et intermittent.
Un modèle analytique transitoire[76].	Etudier l'influence des paramètres de conception sur les performances de l'ECSHAS
Méthodes différences finies appliqués aux les bilans énergétiques [77] .	Analyser l'effet du mode de fonctionnement continu, de la conductivité thermique du sol et de la vitesse d'écoulement de l'air sur les performances thermiques.

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

**Tableau 2.2.** Les algorithmes permettant de prédire les performances des ECSHASs.

Algorithmes	Modèles analytiques d'estimation de la température de l'air à la sortie de l'ECSHAS	Elmeret Schiller	[64]	$T_{a,x+1} = T_{a,x} - \frac{Q_x}{\dot{m} C p_a}$	Q flux de chaleur par unité de longueur (W/m)
		Santamouris		$T_{a,s} = (T_{a,e} - T_{p,ex}) \exp(-Sa) [1 + (Bi Sa)^{0.5} * \int_0^{F_0} \exp(-Bi F_0) I_1(2[Bi Sa F_0]^{0.5}) * F_0^{0.5} dF_0] + T_{p,ex}$	Bi ,F <sub>0</sub> , Sa paramètres adimensionnels T <sub>p,ex</sub> Température de la paroi extérieure du conduit
		Rodriguez et al		$T_{a,x} = T_{p,ex} + (T_{a,e} - T_{p,ex}) \exp\left(-\frac{4hx}{2\rho_a C p_a V R_i}\right)$	h coefficient de convection (W/m <sup>2</sup> k) Cp Chaleur massique (J/Kg K) ρ masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
		Levit et al		$T_a^{x+1} = T_a^x \frac{\dot{m}_a C p_a - U A dx}{\dot{m}_a C p_a} + \frac{U A dx}{\dot{m}_a C p_a} T_s(x, D)$ $A = 2\pi D$	U Coefficient de transfert de chaleur total D diamètre du conduit
		Seroa et al		$T_{a,s} = \frac{\left[\left(1 - \frac{U}{2}\right) T_{a,e} + U T_{p,ex}\right]}{\left(1 + \frac{U}{2}\right)}$	T <sub>p,ex</sub> température de la paroi externe du tuyau.
		Elmer et Schiller		$T_{a,x+1} = T_{a,x} - \frac{Q_x}{\dot{m} C p_a} \text{ ou } Q_x = U_w (T_{a,x} - T_{p,ex}) 2\pi R_{in} dx$	U <sub>w</sub> est le coefficient de transfert de chaleur global entre l'air et la paroi externe du conduit.
		Sodha et al		$T_{a,s} = T_{p,ex} \Phi_a(n)$	
		Chen et al		$T_a^{x+1} = \frac{2U_w}{\rho_a C p_a R_{ex} V} T_{p,ex} dx + T_a^x \left(1 - \frac{2U_w}{\rho_a C p_a R_{ex} V} dx\right)$	

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

		Holmuller [78]	$T_a(x, t) = \theta_0 \exp\left(-\frac{2\pi r_0}{Cp_a \dot{m}_a} hx\right) \cos\left(\omega(t - \Delta t_x) - \frac{2\pi r_0}{Cp_a \dot{m}_a} \lambda_a x\right)$	
		Yang [79]	$A_n' = A_0 e^{-\left[\frac{i\omega}{V_a} + \frac{2\delta'}{R}(1-F)\right]x} + \left[ \frac{V_a 2\delta(F-1)e^{-\left[\frac{i\omega}{V_a} + \frac{2\delta'}{R}(1-F)\right]x}}{Ri\omega + V_a 2\delta(1-F)} + V_a 2\delta(1-F) \right] A_{s,z}'$	
		Mehdid [1]	$T_{s(k,j,m)} = \frac{2}{r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{(T_{a(j,i)} - T_{s0})}{\log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right)} \left[ e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau} \right]_{t_{i-1}}^{t_i} \right) \right) + T_{s0}$	
Autres approches	Puri	[59]	Modèle numérique implicite pour les échangeurs de chaleur air-sol à un seul tuyau.	
	Boulard		Modèle numérique sur le transfert de chaleur et d'humidité dans un échangeur de chaleur à tubes multiples.	
	Bojic		Approche de volume fini et ayant une configuration multitubes	
	Zimmerman		Dans cet algorithme, il existe une analogie entre l'électricité et la chaleur et peut être représenté comme un modèle de capacité de résistance.	
	Hanby		TRNSYS-IISIBAT est utilisé pour la modélisation d'échangeur de chaleur sol-air à un tuyau.	

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

### 2.2 Etudes analysantes les modèles d'ECSHAS

De nombreuses recherches ont été menées pour développer des modèles analytiques et numériques pour l'analyse et l'évaluation du comportement thermique ainsi qu'exergétique de diverses configurations des ECSHASs. En effet l'approche analytique se fonde sur une panoplie d'algorithmes déjà susmentionnés et approches mathématiques. En sommes, ces algorithmes vont donner par la suite la naissance à des modèles ou solutions purement analytiques complets et d'autre font recours aux méthodes de résolution numériques. La précision des modèles paramétriques et numériques peut être testée par rapport aux données expérimentales relatives aux performances thermiques (énergie et température) de l'ECSHAS. Toutefois, il sied de rappeler que la plupart des modèles numériques mettent surtout en avant la contrainte du temps de calcul. Calculer avec précision le comportement de l'échangeur nécessite une étude de convergence en raison du type de maille requis.

Parallèlement, un certain nombre de logiciels commercialisables disponibles sont l'objet de modélisation et de simulation des échangeurs souterrains. Conçus sous forme de module, ces logiciels sont fondés sur la mise en œuvre de plusieurs modèles et approches mathématiques. Ces outils informatiques peuvent réduire davantage le temps et simplifier l'analyse des échangeurs. Bien qu'ils ne sont pas utilisés rapidement pour la conception. Le tableau 2.3 présente les caractéristiques des logiciels les plus courants.

Par ailleurs, la dynamique des fluides numérique (DFN) est reconnue depuis de nombreuses années comme une méthode puissante pour étudier le transfert de chaleur et de masse. La DFN applique une règle très simple de discrétisation de l'ensemble du système en petites mailles. Les codes DFN sont structurés autour des algorithmes numériques utilisés pour résoudre les problèmes d'écoulement de fluide. Ils fournissent des solutions numériques pour des équations différentielles partielles. Ces dernières régissent le flux d'air et le transfert de chaleur sous forme discrétisée dans un temps réduit et à un coût raisonnable en raison de la réduction du travail expérimental requis [54, 59].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

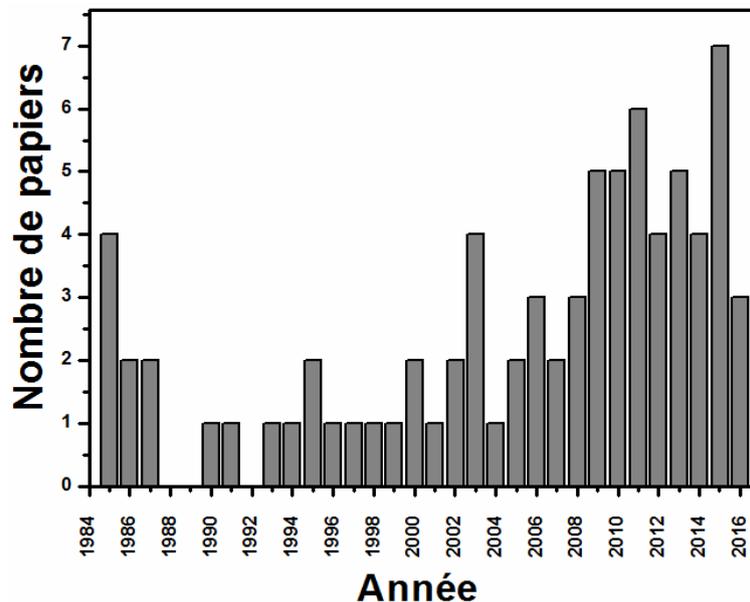
**Tableau 2.3.** Logiciels de modélisation et simulation des ECSHASs [54].

Appellation	Description	Fonctionnalités
EnergyPlus	Logiciel de simulation actuellement pris en charge par le Department of Energy des États-Unis.  Il met en œuvre l'approche complète de l'équilibre thermique.	Le modèle a développé des algorithmes de transfert de chaleur et de température du sol dans un programme simulant ECSHAS.
TRNSYS+Calculation of soil temperature	TRNSYS est une simulation complète et modulaire environnement pour l'étude des systèmes dynamiques.	Modèle numérique qui prédit la performance thermique de l'ECSHAS.
WKM	Outil de conception développé par Huber Energietechnik AG (Zurich). Logiciel commercial.	Sortie : tendance de la température (entrée/sortie), temps de fonctionnement ECSHAS, récupération de chaleur, performance énergétique hivernale et estivale.
GAEA	Outils de conception développés par l'Université de Siegen. Logiciel commercial.	Sortie : tendance de la température (entrée/sortie), durée de fonctionnement EAHE, performance énergétique hiver et été, temps de retour sur investissement.
L-EwtSim	Outil de conception développé par DLR Koln (AG-Solar). Logiciel gratuit téléchargeable.	Sortie : profil de température dans le tube / tuyau, tendance de la température, performance énergétique
REHAU – Awadukt Thermo Software GHE – 1.03	Outil de conception développé par REHAU (outil privé) pour son propre usage interne.	Entrée : paramètres du sol et d'extérieurs ; plan de climatisation. Sortie : tendance de la température (entrée / sortie), temps de fonctionnement, récupération de chaleur, performance énergétique estivale et hivernale

### 2.3 Etudes expérimentales

L'optimisation des systèmes thermiques ne peut pas toujours être effectuée à l'aide de techniques d'optimisation mathématiques ou numériques en raison de modèles incomplets, de la complexité de l'installation ou des difficultés génériques rencontrées lors du traitement mathématique. En outre, l'optimisation mathématique ou numérique s'applique simplement à une structure spécifiée du système alors que, souvent, des modifications structurelles permettraient d'améliorer la rentabilité de l'installation. Néanmoins, il n'est pas toujours possible ni pratique de développer un modèle mathématique pour chaque configuration de conception prometteuse d'un système [80].

Dans cette optique, nous serons manifestement amenés à mettre l'accent sur le caractère éminemment du volet expérimental. A cet effet, la Figure 2.8 traduit immédiatement la forte détermination de ce volet particulièrement dans la dernière décennie. Suite à une synthèse, les travaux expérimentaux dans le monde se focalisent notamment sur l'optimisation de la conception, l'évaluation des performances thermiques/exergétiques et les études paramétriques des ECSHASs (Tableau 2.4 & figure 2.9). Le terme ECSHAS trouve principalement ses applications dans les serres, les fermes d'élevage, les bâtiments commerciaux et résidentiels, ainsi que pour le conditionnement des espaces.



**Figure 2.8.** Représentation graphique par année du nombre d'études de recherche expérimentale pour les ECSHASs [59].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

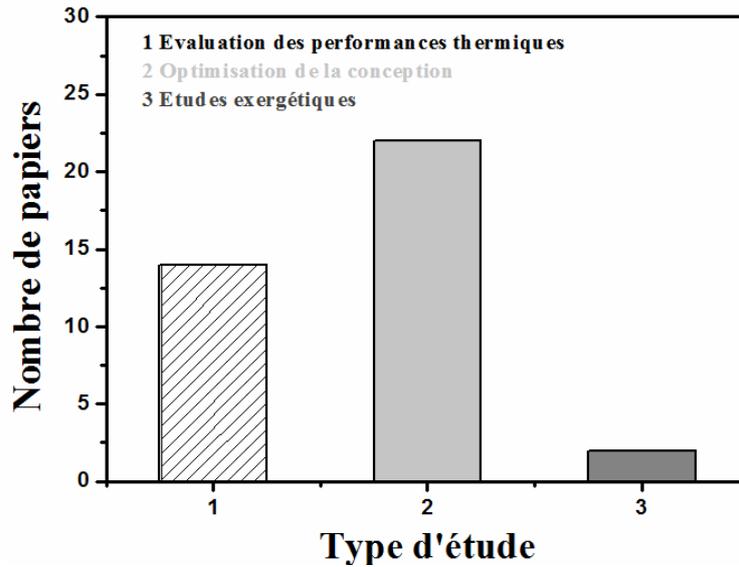


Figure 2.9. Représentation graphique du nombre de papiers en fonction du type d'étude.

Tableau 2.4. Classification des études expérimentales dans le monde par ordre chronologique.

Type d'étude	Emplacement	Année	Référence
Evaluation des performances thermiques	Caroline du Nord, USA	1985	[65]
	Florida, USA	1993	[81]
	France	1996	[82]
	New Delhi, Inde	2009	[83]
	Chine	2010	[84]
	Viamas, Brésil		[85]
	Turquie	2011	[86]
	Inde		[87]
	Arunachal Pradesh, Inde	2013	[88]
	Thaïlande		[89]
	Imola, Italie		[90]
	Malysie	2014	[91]
	Baghdad, Iraq	2015	[92]
Ajmer, Inde	2016	[93]	
Optimisation de la conception	Poznan		[94]
	New Delhi, Inde	2001	[95]

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

	New Delhi, Inde	2003	[95]
	Harbin, Chine		[96]
	Sfax, Tunisie	2006	[97]
	Nord Est de l'Iran	2011	[98]
	Sahara algérien		[76]
	Lebanon	2013	[99]
	Viamas, Brésil	2014	[100]
	Omaha, USA		[101]
	Biskra, Algérie		[102]
	Inde	2014	[102]
	/		[103]
	Ajmer, Inde		[104]
	Changqing, Chine	2015	[79]
	Marrakech, Maroc		[105]
	Bhopal, India,		[106]
	Ajmer, Inde		[93]
	/	2016	[107]
	Bangladesh		[108]
	Algérie		[109]
	France		[110]
<hr/>			
Etudes exergétiques	Turquie	2013	[111]
		2017	[112]
<hr/>			

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

### 3 Effet des paramètres de conception sur les performances des systèmes d'ECSHAS

Les performances des systèmes d'ECSHAS peuvent être influencées par divers paramètres, à savoir les conditions de la surface du sol, la surface du conduit, la longueur du conduit, la teneur en humidité de l'air entrant et l'humidité du sol, la température de la surface de la terre, la vitesse de l'air dans le conduit, les conditions de la surface de la paroi du conduit, le matériau du conduit, la profondeur d'enfouissement du conduit, la durée et le mode de fonctionnement.

#### 3.1 Effet de conditions géographiques et climatiques

Les données météorologiques d'un lieu particulier constituent un paramètre essentiel pour décider de l'aptitude du système d'ECSHAS pour ce lieu. Avant le développement réel d'un système d'ECSHAS, la faisabilité technique peut être identifiée en observant l'évolution des données météorologiques de l'emplacement, à savoir, la température de l'air ambiant et l'humidité relative maximale, minimale et annuelle moyenne ainsi que la température du sol non perturbé à une profondeur quelconque. L'échange de chaleur entre le sous-sol et l'air passant par le conduit enterré est régi par la différence de température entre le sol et l'air dans une large mesure. Les effets de conditions géographiques et climatiques sont présentés dans le Tableau 2.5.

**Tableau 2.5.** Résumé des travaux relatifs aux effets des conditions géographiques et climatiques.

Climat	Conclusions importantes	Références
Continental humide	Les conditions géographiques et climatiques influencent les performances de manière significative.	[96]
Chaud et (Aride-semi-aride)	Le système d'ECSHAS est un excellent système passif pour le chauffage et la climatisation des bâtiments dans les zones à climat sec, mais il peut également être utilisé dans les climats humides en ajoutant un dispositif supplémentaire pour contrôler l'humidité relative de l'air.	[104, 113-116]
Neige	La réduction maximale de la charge du chauffage est d'ordre (45,5–48,6%) selon le modèle du sol environnant.	[117]
Désertique	La réduction minimale est de (23,8–25,2%) selon le modèle du sol environnant.	
Chaud et humide	Une chute de température significative de 6,4°C et de 6,9°C en saison humide et en saison chaude et sèche, respectivement.	[118]
Chaud-aride et froid	L'ECSHAS est plus efficace dans le climat chaud-aride car il peut être utilisé pendant 294 jours par an, réduction de la consommation d'énergie de 50,1 à 63,6% alors qu'il peut être utilisé pendant 225 jours de l'année avec une consommation d'énergie réduite d'environ 24,5 à 47,9% par temps froid.	[119]

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

### 3.1.1 Température du sous-sol et effet des traitements de surface

La gouvernance des performances par la température du sous-sol a incité quelques chercheurs à étudier la température du sous-sol à titre expérimental [94, 120-122], tandis que d'autres l'ont estimé à l'aide de modèles empiriques [123, 124]. Toutefois, l'influence de la température de la surface de la terre sur la température du sous-sol peut varier considérablement avec les conditions climatiques, les saisons et les conditions de la surface de la terre. De plus, l'inertie thermique du sol atténue et retarde les fluctuations de température à la surface. A cet effet, plusieurs investigations croisées entre travaux expérimentaux et numériques (Tableau 2.6), se sont notamment concentrées sur les implications des facteurs ambiantes ainsi que les propriétés du sol dans l'estimation de la distribution de la température du sol en fonction de la profondeur. La température de surface de la terre, en tout lieu, peut être déterminée à l'aide de l'équation du bilan énergétique suivante [120, 125, 126]:

$$\left(-\lambda \frac{\delta T_{sur}}{\delta z}\right)_{z=0} = h_{sur} [T_a - T_{sur}] + \alpha_0 S - \dot{m}L - \varepsilon \Delta R \quad (2.1)$$

Le premier terme à droite dans l'équation ci-dessus est le flux d'énergie dû au transfert de chaleur par convection entre la surface de la terre et l'air, le second terme fait référence à l'énergie solaire absorbée par la surface, le troisième terme est le flux d'énergie dû à l'évaporation de l'eau de la surface, et le dernier terme est l'échange net de rayonnement à ondes longues entre la surface et le ciel.

**Tableau 2.6.** Travaux relatifs à l'estimation de la température du sol en fonction de la profondeur.

Conclusions importantes	Références
Les propriétés thermo-physiques du sol affectent la température du sous-sol de manière significative	[126]
Un effet négligeable (moins de 1 ° C) des propriétés du sol pour de faibles profondeurs.	[97]
L'estimation de la température du sol en fonction de la profondeur.	[70, 123-125, 127-130]
La variation diurne de la température de surface ne pénètre pas plus profondément que 0.5 m et la variation annuelle ne dépasse pas 4m.	[125, 131-134]
A Bangkok, la température du sous-sol à une profondeur de 1 m a été mesurée entre 27 ° C et 28 ° C toute l'année.	[135]
La régularité de la température du sous-sol augmente avec la profondeur.	[136]
En été, la température du sous-sol pour la surface nue était d'environ 4 ° C plus élevée que la surface recouverte de gazon court à une profondeur de 1m. De plus, les variations de température à court terme disparaissent à une profondeur d'environ 1 m.	[94]

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

La température du sous-sol non perturbé,  $T(z, t)$ , à la profondeur  $z$  dans le sol et au temps  $t$ , est estimée à l'aide de différentes relations empiriques présentées dans le Tableau 2.7.

Lorsque la température du sous-sol pour des conditions de surface de la terre nues / normales (ensoleillement sec) n'est pas dans la plage souhaitable pour le confort thermique (18-30°C), les conditions de surface sont modifiées pour ramener la température dans la plage de chauffage/refroidissement des bâtiments. Les températures de surface ainsi que celles du sous-sol peuvent être modifiées de manière significative en supprimant ou en améliorant les processus mentionnés dans le côté droit de l'équation (2.1). Bien que les stratégies de traitement pour la modification de la surface varient selon les conditions climatiques[137]. Nous présentons un récapitulatif des principaux travaux en matière d'effets de traitements de surface dans le Tableau 2.8.

**Tableau 2.7.** Modèles empiriques estimant la température du sous-sol[137].

Model	Terme	Références
$T(z, t) = T_m + A_s e^{-z \left( \frac{\pi}{8760\alpha} \right)^{0.5}} * \cos \left[ \frac{2\pi}{8760} (t - t_0) - \frac{z}{2} \left( \frac{8769}{\pi\alpha} \right)^{0.5} \right]$	$T_m$ - Température moyenne annuelle $\alpha$ - Diffusivité thermique du sol	[122]
$T(z, t) = T_m + A_s e^{-z \left( \frac{\pi}{365\alpha} \right)^{1/2}} * \cos \left[ \frac{2\pi}{365} (t - t_0) - \frac{z}{2} \left( \frac{365}{\pi\alpha} \right)^{1/2} \right]$	$A_s$ -Amplitude de la fluctuation de température à la surface	[124]
$T(z, t) = T_m + \cos \left[ \omega(t - t_0) - \frac{z}{d} \right] * A e^{-\left( \frac{z}{d} \right)}$	$t_0$ - Déphasage $d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}$ - Constante de phase	[97]

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

**Tableau 2.8.** Effets de traitements de surface sur la température du sous-sol.

Conclusions importantes	Références
A une profondeur d'environ 4 m, la température du sol reste presque constante pour les différentes conditions de surface.	
La température maximale a été estimée à environ 53°C pour un sol noir sec recouvert d'une feuille de verre, et la température minimale était d'environ 17.3°C pour une surface de sol humide et ombragé.	[131]
La température du sous-sol à différentes profondeurs à l'intérieur de la serre a été observée de 7 à 9 ° C et 3 à 6 ° C plus élevée que la surface nue pour les variations journalières et mensuelles, respectivement.	[70]
Ombre, humidifier et recouvrir la surface de la terre avec des cailloux blancs ou de la chaux pour abaisser la température du sous-sol.	[138, 139]
L'irrigation nocturne de la surface du sol recouverte d'une couche de galets de 12 cm d'épaisseur a abaissé la température du sous-sol de 9 ° C en été.	[138]
Il a été suggéré de noircir la surface de la terre et / ou de la recouvrir de feuilles de plastique pour augmenter la température.	[140]
A une profondeur de 4 m, les températures moyennes sont de 21, 46°C respectivement pour les sols secs nus, secs et recouverts de verre ; avec des températures maximales de 21.5 et 47° C en décembre et janvier, alors que les températures minimales enregistrées en mai et juin, sont de 19,44 °C, respectivement.	[122]
Le sol recouvert d'herbe diminuait la variation de température annuelle tandis que le système sous une surface de sol nu augmentait la capacité de chauffage du système.	[141]
La chaleur emmagasinée par le sol est plus faible dans les sols couverts de végétation pour le refroidissement, mais plus élevée pour le chauffage.	[71]
La longueur du conduit pourrait être réduite à 105 m, 78 m et 70 m au lieu de 150m pour les surfaces de terre ombragées, humides et ombragées, respectivement.	[142]
Pour divers zones climatiques, les traitements de surface de la terre pourraient réduire considérablement la consommation d'énergie.	[142]

### 3.2 Effet des propriétés de sol

Les performances thermiques des systèmes d'ECSHAS dépendent en grande partie des propriétés thermo-physiques du sol. Différentes propriétés du sol importantes affectant les performances des ECSHASs sont présentées et discutées dans les sections cités-infra.

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

### 3.2.1 Diffusivité thermique du sol

Parmi toutes les propriétés thermo-physiques, la performance des ECSHASs est profondément influencée par la conductivité thermique du sol, la chaleur spécifique et la masse volumique. Ces trois propriétés du sol peuvent être exprimées en termes de diffusivité thermique en tant que :

$$\text{Diffusivité thermique} = \text{Conductivité thermique} / (\text{Chaleur spécifique} * \text{Masse volumique})$$

Dans le cadre des travaux numériques (Computational Fluids Dynamics), Mathur et al.[143] ont présenté les analyses effectuées sur trois sols différents avec différentes valeurs de diffusivité thermique (Tableau 2.9). Sur les trois sols, deux avaient des valeurs de conductivité thermique très proches mais des valeurs de diffusivité thermique significativement différentes. L'évaluation a été réalisée en étudiant la chute de température de l'air, le taux de transfert de chaleur et le COP du système.

L'étude révèle que chaque sol présente un taux différent de dissipation thermique et de saturation thermique sur une période de fonctionnement continu, qui affecte négativement les performances de l'échangeur (Tableau 2.10).

**Tableau 2.9.** Propriétés thermo-physiques des sols [143].

Sol	Site	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/Kg K)	Conductivité thermique (W/m K)	Diffusivité thermique (m <sup>2</sup> /s)
A	Ajmer (Inde)	2050	1840	0.52	1.37*10 <sup>-7</sup>
J	Jodhpur (Inde)	1470	1553.14	1	4.37*10 <sup>-7</sup>
F	Presles (France)	1500	880	1.28	9.69*10 <sup>-7</sup>

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

**Tableau 2.10.** Résumé sur les performances thermiques en termes de chute de température, de température du sol, de taux d'échange thermique et de COP[143].

Performances thermiques	1h			3h			6h			12h		
	A	J	F	A	J	F	A	J	F	A	J	F
Chute de Température (°C)	17.74	18.24	18.24	17.08	17.77	17.8	16.47	17.44	17.54	15.87	17.22	17.39
Température radiale du sol (°C) (D=0.25 m, L= 10 m)	27	27	27	27	27.06	27.29	27	27.29	27.75	27.01	27.65	28.15
Taux de transfert de chaleur moyen (W/m <sup>2</sup> )	44.5	44.92	44.92	43.98	44.68	44.69	43.45	44.49	44.54	42.92	44.36	44.45
COP	4.29	4.41	4.41	4.13	4.29	4.3	3.98	4.21	4.24	3.83	4.16	4.2

Cette dissipation de la chaleur dans le sol environnant et ensuite à la région du sous-sol externe dépend principalement de la conductivité thermique du sol ; même si leur diffusivité thermique est d'ordre différent, du fait que les performances des échangeurs avec les deux sols ayant une conductivité thermique très proche, étaient très similaires même après 12 heures de fonctionnement continu. On peut donc en conclure que la conductivité thermique du sol affecte considérablement les performances thermiques de l'échangeur. Par conséquent, la chute maximale de la température de l'air et le transfert de chaleur sont atteints avec un sol ayant une conductivité thermique supérieure. Dans le même contexte, un sol ayant une diffusivité thermique plus élevée présente un taux de transfert de chaleur plus élevé et peut transférer davantage de chaleur à travers le sol proche jusqu'au sous-sol extérieur. Entre autre, les performances thermiques de l'échangeur se détériorent après une utilisation continue pendant une longue période. Cette détérioration a été davantage observée avec la moindre conductivité thermique du sol en raison de la saturation du sol située à proximité du conduit de l'échangeur.

## **Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol**

### **3.2.2 Conductivité thermique du sol**

L'étude de Mathur et al. ont incité plusieurs auteurs à s'intéresser essentiellement au rôle de la conductivité thermique du sol dans le transfert de chaleur entre le sol et les ECSHASs. Les travaux de Song et al. ont révélé que lorsque la conductivité thermique du sol augmentait de 1.1 à 2.5 W/m.K, la capacité de transfert de chaleur augmentait de 100.8% [144].

En ajoutant que la détérioration maximale des performances est enregistrée par les sols de faibles conductivité thermique et l'épaisseur de l'anneau de sol perturbé dépend de la conductivité thermique du sol et de la période de fonctionnement continu de l'échangeur souterrain. Cette épaisseur de l'anneau du sol perturbé est estimé au diamètre du conduit [145].

De ce fait, cette propriété est qualifiée comme étant cruciale pour les échangeurs de chaleur souterrains et dépend principalement de la densité sèche, du degré de saturation, de la taille des particules, de la géométrie du tassement et de la minéralogie du sol [146]. Ces facteurs peuvent être classés en deux groupes (i) facteurs de composition et (ii) facteurs environnementaux. Les facteurs de composition du sol comprennent la taille des particules, le classement, la forme et les composants minéraux du sol. La forme et la taille des particules de sol affectent la disposition des particules de sol, ce qui détermine la "structure du sol" ou son compactage et contrôlent dans une certaine mesure la conductivité thermique du sol. Dans les minéraux du sol, le quartz a une conductivité thermique plus élevée (environ 7,9 W/m.K). Par conséquent, la teneur en quartz devrait être plus présente dans le sol pour atteindre des taux de transfert de chaleur élevés [147]. Les facteurs environnementaux qui influencent la conductivité thermique du sol comprennent sa température, sa teneur en eau et sa densité. La conductivité thermique d'un sol humide est supérieure à celle d'un sol sec [148]. La surface de contact physique entre les particules du sol augmente avec l'augmentation de sa densité, améliorant ainsi sa conductivité thermique [149].

#### **3.2.2.1 Teneur en humidité du sol**

La teneur en humidité du sol affecte de manière significative les propriétés thermiques du sol et par conséquent, l'efficacité thermique des systèmes géothermiques peu profonds, voire, la conductivité thermique du sable saturé en eau était de six à huit fois supérieure à celle des couches du même sable saturées d'air [93]. A cet effet, différents modèles ont été développés pour prédire la conductivité thermique du sol en tenant compte des effets de la teneur en eau, du degré de saturation, de la porosité, de la pression et de la température (Tableau 2.11).

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

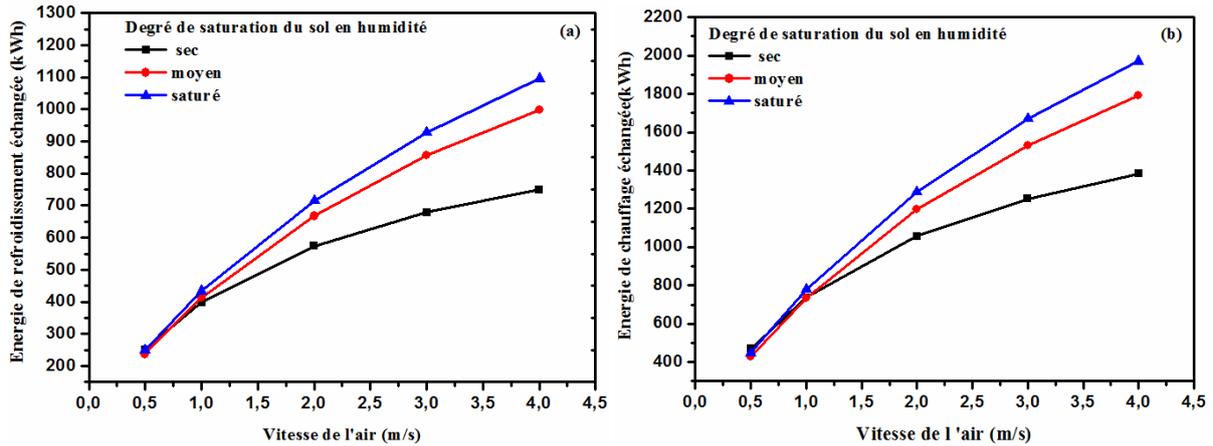
**Tableau 2.11.** Modèles d'estimation de la conductivité thermique de différents sols  $\lambda$ .

Modèles	Sols	Termes	Références
$\lambda = \left( \lambda_{eau}^n \lambda_{solide}^{1-n} - \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2650 - 0.947\rho_d} \right) \lambda_r + \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2650 - 0.947\rho_d}$		n Porosité, $\rho_d$ Densité de sol sec, $k_r$ Conductivité thermique normalisée/ Nombre de Kersten	[146]
$\lambda = \eta_1 (1-\phi) \lambda_{solide} + (1-\eta_2) [1-\eta_1 (1-\phi)]^2$ $* \left[ \frac{(1-\phi)(1-\eta_1)}{\lambda_{solide}} + \frac{\phi S_r}{\lambda_{eau}} + \frac{\phi(1-S_r)}{\lambda_{air}} \right]^{-1}$ $+ \eta_2 [(1-\phi)(1-\eta_1) \lambda_{solide} + \phi S_r \lambda_{eau} + \phi(1-S_r) \lambda_{air}]$		$\phi$ Porosité. $S_r$ Degré de saturation. $\eta_1$ Coefficient de la structure poreuse du mélange solide et gaz. $\eta_2$ Fonction du degré de saturation, porosité et température.	[150]
$\frac{\lambda}{\lambda_s} = 2(1+\xi)^2 \left\{ \frac{\alpha_{eau}}{(1-\alpha_{eau})^2} \ln \left[ \frac{(1+\xi) + (\alpha_{eau}-1)\chi}{(\xi + \alpha_{eau})} \right] \right.$ $+ \left. \frac{\alpha_{air}}{(1-\alpha_{air})} \ln \left[ \frac{(1+\xi)}{(1+\xi) + (\alpha_{air}-1)\chi} \right] \right\}$ $+ \frac{2(1+\xi)}{(1-\alpha_w)(1-\alpha_a)} [(\alpha_w - \alpha_a)\chi - (1-\alpha_a)\alpha_w]$	sables	$\xi$ et $\chi$ sont les coefficients d'épaisseur du film d'eau et du degré de saturation $\alpha_{eau} = \lambda_{eau} / \lambda_{solide}$ ; $\alpha_{air} = \lambda_{air} / \lambda_{solide}$ .	[151]
$\lambda = 0.1442 [0.9 \log w - 0.2] * 10^{0.6243\gamma_d}$	Argile	$w$ la teneur en humidité du sol en%; $\gamma_d$ la densité de sol sec.	[152]
$\lambda = 0.1442 [0.7 \log w + 0.4] * 10^{0.6243\gamma_d}$	sablonneux		
$\lambda = \lambda_{eau}^n \lambda_{solide}^{1-n} [(1-b) S_r + b]^{cn}$	Sable de quartz	b, c Coefficients empiriques	[153]

Lin et al. [154] ont analysé l'impact de l'humidité du sol sur la performance énergétique du système à long terme dans des conditions sèches, partiellement et totalement saturées. Les résultats obtenus montrent qu'à une vitesse de circulation de l'air faible d'ordre 0.51m/s, les trois conditions d'humidité du sol présentent pratiquement la même énergie échangée cumulée, et l'impact de la saturation en eau est négligeable.

Toutefois, à partir du seuil de vitesse de l'air de 1m/s, nécessaire pour atteindre un écoulement turbulent pleinement développé, ces différences augmentent considérablement (Figure 2.10). L'énergie échangée est à son maximum à l'état saturé. Inversement, elle est à son minimum à l'état sec. De plus, ces différences deviennent d'autant plus grandes que la vitesse de l'air augmente, voire, à une vitesse de l'air de 4 m/s, la différence relative entre les conditions sèches et saturées atteint 46.4% pour le chauffage et 42.4% pour le refroidissement.

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol



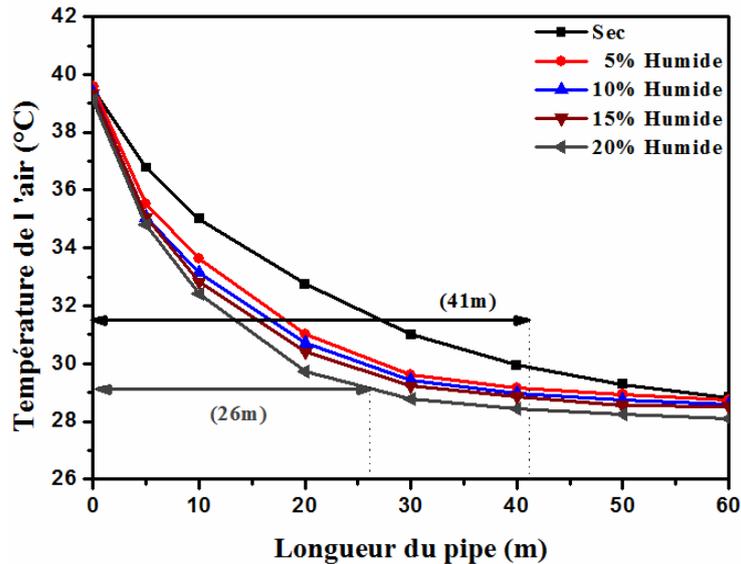
**Figure 2.10.** a) Energie de refroidissement cumulée; b) Energie de chauffage cumulée (du 13-07-2014 au -07-13-2017) [154].

Lors du processus de refroidissement, le sol adjacent au conduit de l'échangeur se dessèche en raison du phénomène couplé de flux de chaleur et d'humidité dans le sol. Cet assèchement du sol avoisinant entraîne une augmentation de la résistivité thermique et une diminution subséquente de la capacité thermique du sol [155].

Ce transfert interne au sein du sol est dicté par les gradients de transfert d'humidité et de chaleur dans les directions axiale et radiale des ECSHASs [156]. De plus, Les comportements thermiques ainsi celui de l'humidité des sols secs et humides ont montré que le pouvoir de diffusion thermique d'un sol humide était supérieur à celui d'un sol sec [157].

L'implication du facteur teneur en humidité dans la conception des ECSHASs a permis de réduire considérablement la distance du point de genou, à savoir, 29 m, 28 m, 27 m et 26 m avec 5%, 10%, 15% et 20% d'humidité, respectivement, comparé à 41 m de longueur dans un sol sec, après 10 h de fonctionnement (figure 2.11). En termes de performance, le taux moyen de transfert de chaleur et le COP ont augmenté de 24,1% et 24,0% respectivement pour une teneur en humidité de 20% à 30 m de longueur par rapport au système sec [158]. Parallèlement, il a été enregistré que l'efficacité exergétique est respectivement de 52,25% et 53,18% pour les systèmes sec et humide [159].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol



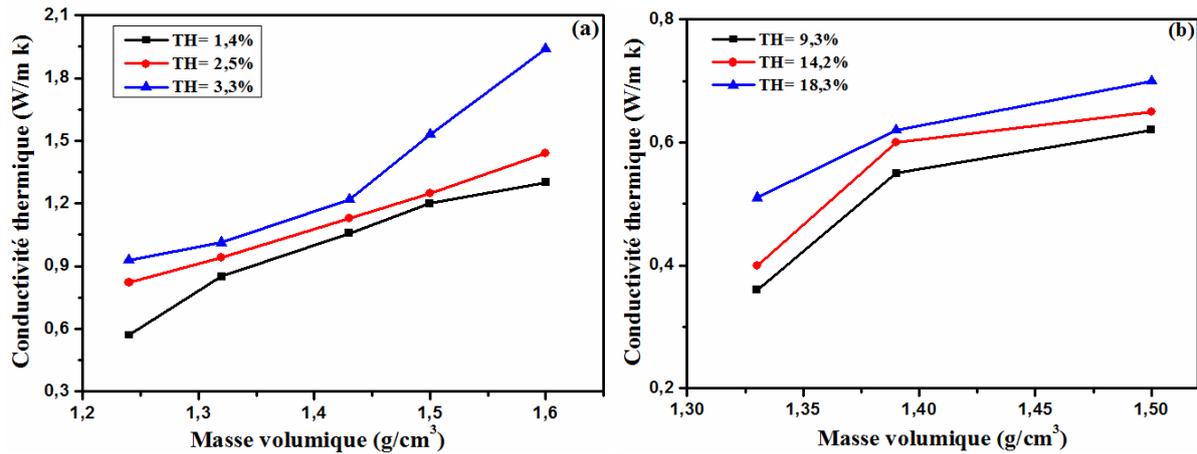
**Figure 2.11.** La température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour les systèmes sec et humide après 10 heures de fonctionnement pour le mois d'avril 2017 [158].

### 3.2.2.2 Masse volumique et composition minérale du sol

La conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la masse volumique apparente du sol, à la suite de l'amélioration du contact entre les particules du sol relativement plus grosses (figure 2.12). En augmentant le niveau de compactage du sol, la porosité diminuera à mesure que davantage de particules de sol sont remplies dans un volume unitaire. La surface accrue qui en résulte fournit effectivement un chemin de flux de chaleur plus étendu, améliorant ainsi la conductivité thermique du sol [149].

Elminshawy et al. [160] ont examiné trois niveaux différents de compactage du sol avec des valeurs distinctes de densité relative, de taux de vide et de porosité. Les résultats obtenus ont révélé qu'en augmentant le niveau du compactage du sol, la baisse de température de l'air induit s'est accrue de 8 à 24°C, de même, l'efficacité du système s'est étendue de 0.3 à 0.7. Egalement, la conductivité thermique du sol est influencée par la composition minérale du sol, par exemple, le sol à haute teneur en matière organique avait une faible conductivité thermique [149] et les sables à haute teneur en quartz ont une conductivité thermique supérieure à celle des sables à haute teneur en pyroxène, plagioclase et feldspath [151].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol



**Figure 2.12.** Conductivité thermique en fonction de la densité du sol à trois teneurs d'humidité différentes: a) Sable (1.4, 2.5, 3.3%) ; b) Limon argileux (9.3, 14.2, 18.3%)[149].

### 3.2.3 Composition du matériau de remblayage

Dans les échangeurs souterrains, le taux de transfert de chaleur entre le fluide et le sol dépend des propriétés thermiques du sol. Ainsi, les performances thermiques de l'échangeur de chaleur du sol peuvent être sensiblement régénérées en améliorant les propriétés thermiques du sol ou matériau de remblayage à proximité du conduit. Cette amélioration se fait essentiellement au détriment de l'ajout de matériaux de remblayage ayant une bonne conductivité thermique. Les différents matériaux de remblayage disponibles pour l'échangeur de chaleur souterrain sont présentés dans le Tableau 2.12.

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

**Tableau 2.12.** Effet du matériau de remblayage sur les performances des échangeurs de chaleur souterrains.

Matériau de remblayage	Conclusions importantes	Références
Sable+ Ciment	La conductivité thermique des coulis sable-ciment est meilleure que celle des coulis de ciment purs.	[161-164]
Sable + Bentonite	La conductivité thermique du mélange sable-bentonite augmente en augmentant la teneur en bentonite, mais éventuellement après avoir atteint sa valeur maximale, elle commence à diminuer rapidement avec l'augmentation de la teneur en bentonite.	[161, 165-168]
Bentonite + Graphite	La conductivité thermique de la bentonite mélangée à base de graphite est supérieure à celle de la bentonite mélangée avec le sable et de la bentonite pure.	[161, 169-172]
Sable + cire	Les propriétés thermiques du sable mélangé à la cire se sont améliorées et ne se sont pas détériorées avec le temps et à l'exposition contrairement au sable humide.	[161, 173]
Sable + Bentonite+Graphite	- L'ajout de la bentonite inhiberait la migration d'humidité dans le sable.  - L'additif de graphite améliore la conductivité thermique du mélange sable / bentonite.  - La diffusivité thermique apparente du mélange sable et 5% de bentonite a augmenté d'environ 31% par rapport au sable individuel.	[174]

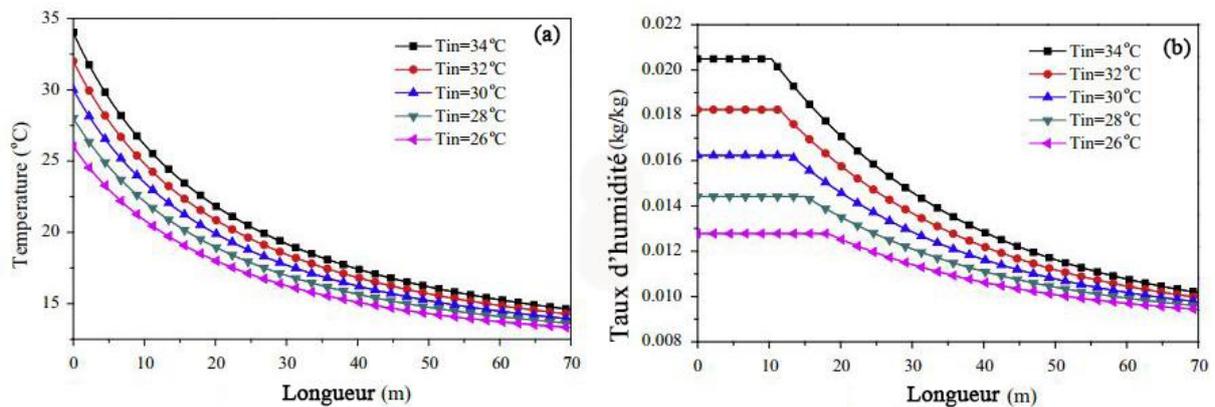
### 3.3 Effet des paramètres thermiques et du débit d'air

Du fait que la vitesse de transfert de chaleur entre l'air et le sol est régie par les propriétés de l'air tel que la température, le débit et l'humidité relative. Ces derniers jouent un rôle important à l'échelle conceptuelle des échangeurs souterrains. Au chapitre des travaux effectués, diverses études ont mis en exergue l'influence de ces propriétés sur les performances des ECSHASs. Les effets des diverses propriétés thermiques et du débit d'air sont résumés dans le Tableau 2.13.

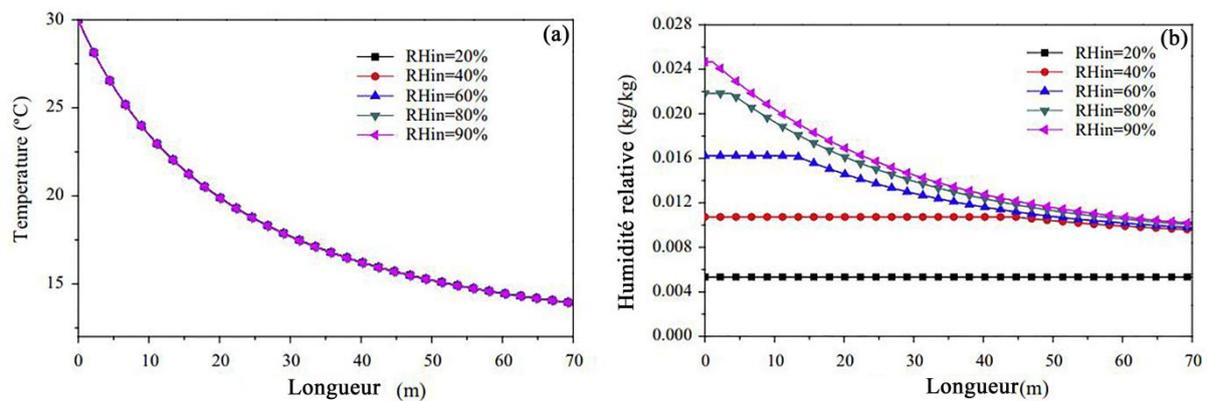
## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

**Tableau 2.13.** Effets des propriétés thermiques et du débit d'air sur les performances des ECSHASs.

Propriétés de l'air	Conclusions importantes	Références
Température d'entrée	En augmentant la température d'air d'entrée, la température d'air de sortie augmente, mais la chute de température totale augmente en mode de refroidissement, cependant, l'élévation de la température totale diminue pendant l'opération de chauffage (Figure 2.13).	[160, 175, 176]
Humidité relative	L'humidité relative de l'air entrant a une influence non significative sur la baisse / l'augmentation de la température du système ECSHAS. Toutefois, l'humidité relative de l'air diminue en mode de chauffage en hiver et augmente pendant le mode de refroidissement en été. (Figure 2.14).	[84, 160]
Débit	Avec l'augmentation du débit d'air, la différence de température totale entre les températures d'entrée et de sortie diminue, cependant les gains / pertes de chaleur totaux augmentent (Figure 2.15).	[66, 141, 160, 177, 178]



**Figure 2.13.** Performances d'ECSHAS sous différentes conditions de température de l'air à l'entrée[175].



**Figure 2.14.** Performances d'ECSHAS sous différentes conditions d'humidité relative à l'entrée[175].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

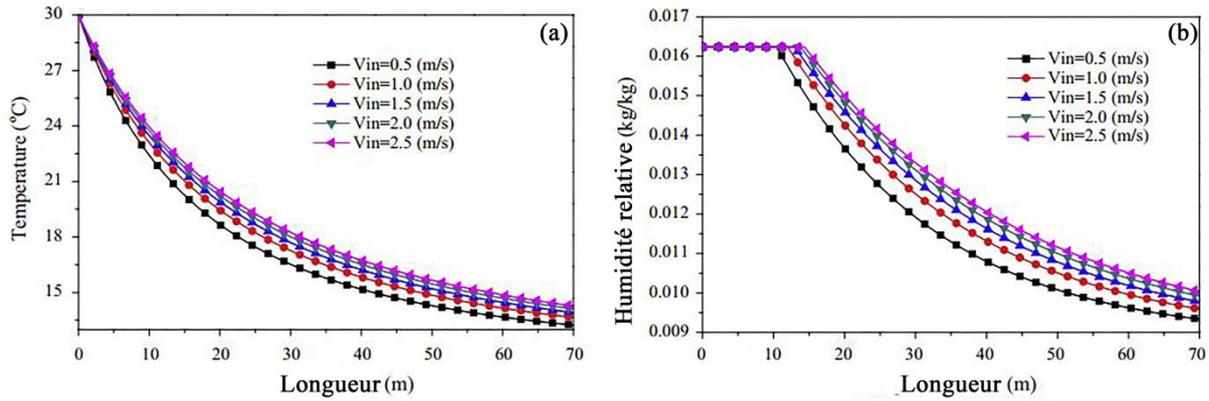
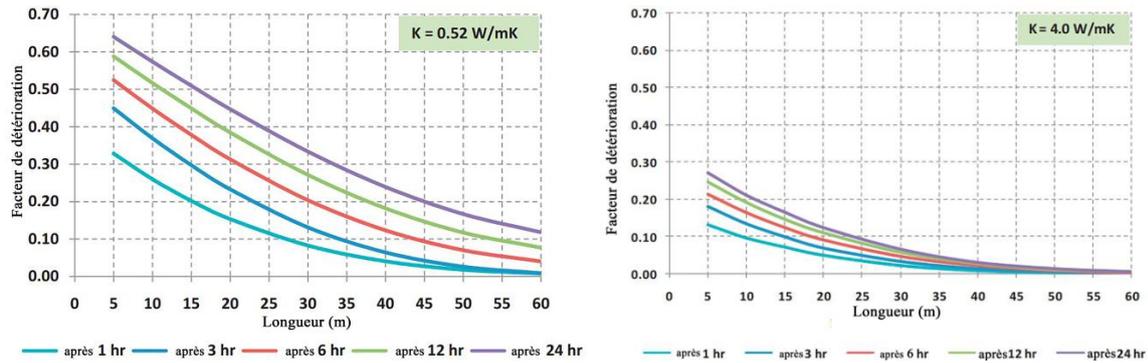


Figure 2.15. Performances d'ECSHAS sous différentes conditions de vitesse de l'air [175].

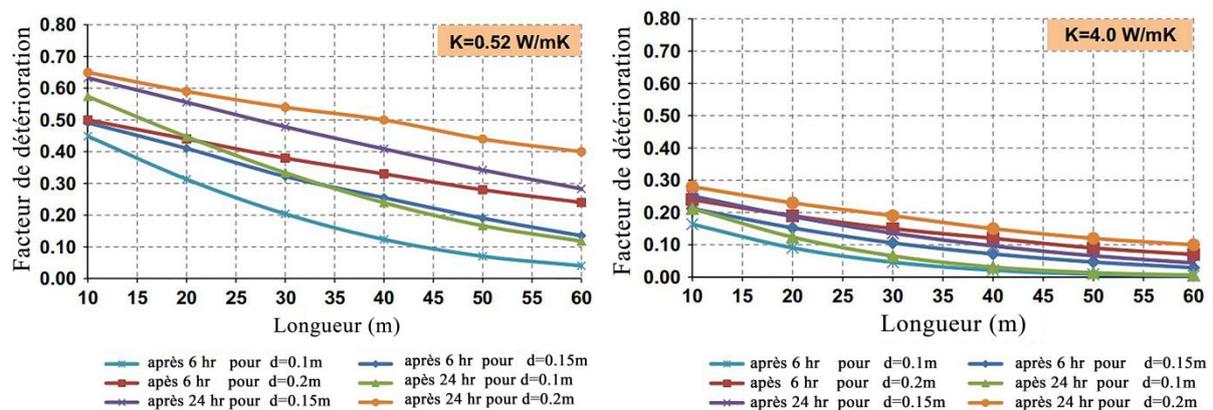
### 3.4 Effet des propriétés du conduit

Les propriétés géométriques et thermo-physiques du conduit sont des paramètres clés qui influent considérablement sur les performances d'ECSHAS. Les propriétés géométriques comprennent la longueur, le diamètre et l'épaisseur du conduit tandis que les propriétés thermo-physiques comprennent la conductivité thermique, la densité, la rugosité, etc. [179]. Sous différents scénarios, plusieurs études paramétriques ont été réalisées pour évaluer le potentiel d'énergie thermique des ECSHASs. Le tableau 2.14 récapitule les principaux résultats relatifs aux effets des différentes propriétés du conduit sur les performances du système ECSHAS. Dans le cadre des règles de dimensionnement et de conception des échangeurs horizontaux, Les auteurs [178, 180, 181] ont su incarné brillamment un nouveau terme adimensionnel appelé le facteur de détérioration (point de genou), dans l'analyse du comportement transitoire des échangeurs fonctionnant en mode continu. Sa signification physique fournit une large comparaison entre les performances thermiques de l'échangeur opérant en régime stationnaire ainsi qu'en régime transitoire. L'ordre de détérioration s'avère être fonction de la conductivité thermique du sol, la durée de fonctionnement continue et la longueur du conduit. Les cas analysés ont montré que la plage de détérioration était comprise entre 0% et 64%, s'il est ignoré lors de la conception, il pourra nuire aux performances des échangeurs de chaleur air-sol. Des valeurs plus grandes du facteur de détérioration reflètent une plus grande détérioration de la performance thermique de l'échangeur fonctionnant en mode transitoire. Par conséquent, il est conclu que tout en optimisant la longueur du conduit de l'échangeur, il convient de prendre en compte le facteur de détérioration de manière à s'assurer que le système serait en mesure de fournir une performance thermique constante lorsqu'il est utilisé pendant de longues durées sous des conditions transitoires (Figures 2.16 & 17).

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol



**Figure 2.16.** Variation horaire du facteur de détérioration pour deux sols différents le long du conduit sous des conditions transitoires [180].



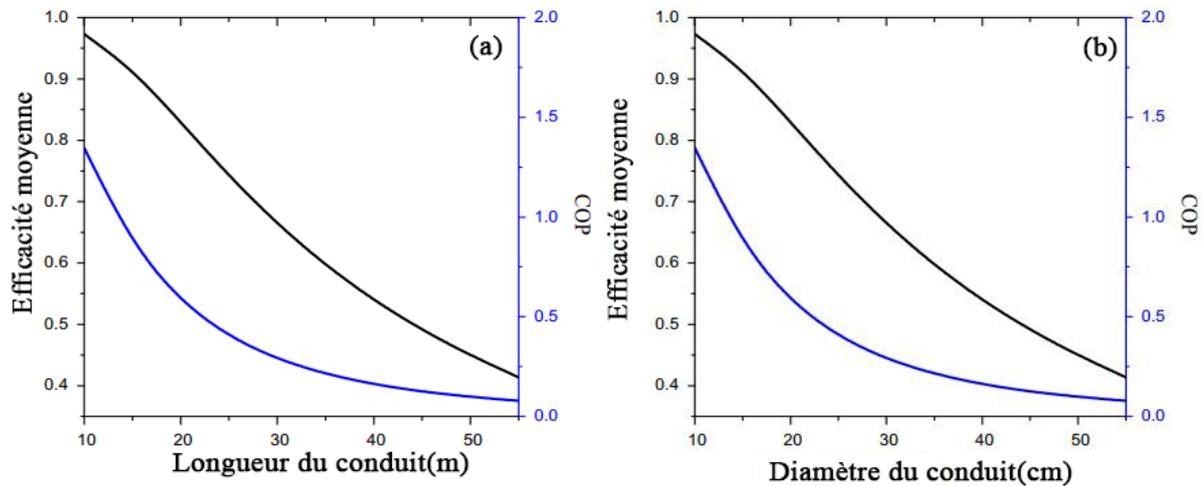
**Figure 2.17.** Variation horaire du facteur de détérioration pour deux sols différents le long du conduit sous des conditions transitoires pour différents diamètres [178].

**Tableau 2.14.** Effets des propriétés du conduit sur les performances des ECSHASs.

Propriétés du tuyau	Conclusions importantes	Références
Longueur	En augmentant la longueur du conduit/tuyau, la différence entre les températures d'entrée et de sortie d'air augmente jusqu'à une certaine longueur au-delà de laquelle aucune augmentation du transfert de chaleur n'a été mise en évidence (Figure 2.18a).	[97, 109, 177, 182, 183]
	La longueur initiale du conduit de l'échangeur contribue de manière majeure aux performances thermiques de l'échangeur et que cette contribution est d'autant plus importante pour les sols ayant une conductivité thermique supérieure	[145]
Diamètre	- A un débit massique donné, le potentiel de chauffage et de refroidissement d' ECSHAS augmente avec la diminution du diamètre du conduit (Figure 2.18b).	[66, 71, 136, 184]
	- La longueur du conduit requise pour accomplir la charge de refroidissement d'une pièce diminue avec l'augmentation de la largeur effective du conduit.	[142]
Matériau	Le matériau des tuyaux n'affecte pas les performances de l'échangeur de manière significative voire négligeable (Tableau 2.15).	[68, 71, 107, 185, 186]

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

Rugosité	En augmentant la rugosité relative du conduit, l'efficacité du refroidissement / chauffage augmente, mais la puissance de pompage augmente également.	[187, 188]
Profondeur d'enfouissement	En augmentant la profondeur d'enfouissement, le potentiel du chauffage et du refroidissement augmente jusqu'à une certaine profondeur au-delà de laquelle aucune amélioration significative de la performance n'a été observée.	[66, 97, 136, 141, 182, 184, 189]
Isolation thermique à la sortie	L'amélioration de la performance du système était évidente jusqu'à l'épaisseur de l'isolation de 0.05 m, au-delà duquel un effet imperceptible. L'élévation de température augmente jusqu'à 2.6°C en mode de chauffage en hiver, tandis que la chute de température augmente jusqu'à 5°C au maximum en mode de refroidissement en été par rapport à un système sans isolation	[141]



**Figure 2.18.** Evolution de l'efficacité moyenne et du coefficient de performance (COP) en fonction: a) de la longueur du conduit; b) du diamètre du conduit [177].

**Tableau 2.15.** Effet des matériaux du conduit sur les potentiels de refroidissement et du chauffage de ECSHASs [71].

Matériau du conduit	Conductivité thermique du conduit (W/m k)	Potentiel de refroidissement (kWh/année)	Potentiel de chauffage (kWh/année)
Plastique	0.24	933.96	388.81
Acier	57	939.89	391.25
Cuivre	395	939.92	391.27

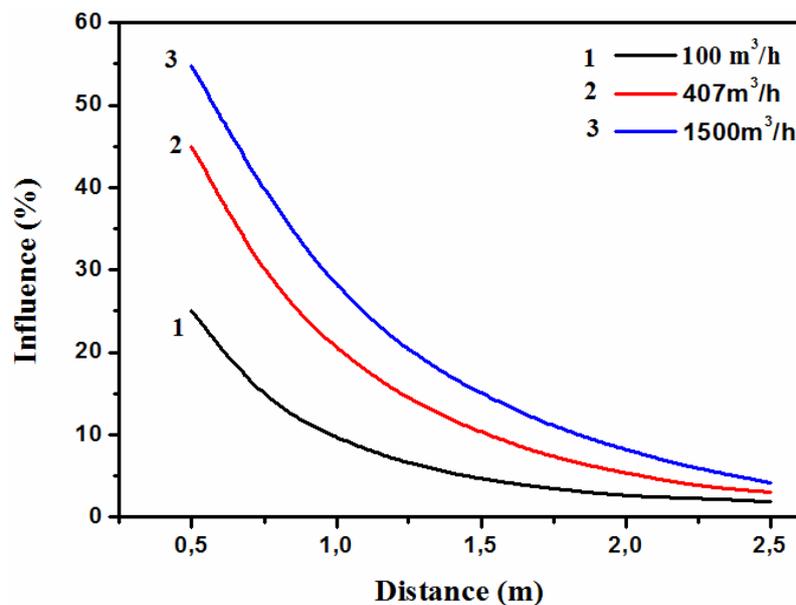
### 3.5 Effet de l'interférence thermique entre les conduits (tubes) adjacents

Les grandes exigences de charge de refroidissement/chauffage peuvent nécessiter l'utilisation de conduits multiples, ce qui rend l'inter-espacement entre les conduits un facteur important et qui doit être supérieur à la zone d'influence thermique (ZIT). La zone d'influence thermique (ZIT) définie comme une région de la couche du sol autour du conduit de l'échangeur où le transfert de chaleur de l'air au sol provoque un changement appréciable

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

de la température des couches du sol avoisinant le conduit (augmentation ou diminution de 0.5 °C de la température du sol non perturbé) [190]. Freire et al. [191] ont étudié les configurations à couches de conduits multiples et conclu que 1.5 m est la distance optimale entre les couches. Kabashnikov et al.[183] ont comparé les effets de l'espacement des conduits avec ceux ayant un espacement infini entre eux et ont constaté que la puissance calorifique journalière était réduite de 5 à 15% et de 10 à 25% lorsque l'espacement entre les conduits était maintenu à 1,5 m et 1 m respectivement (Figure 2.19).

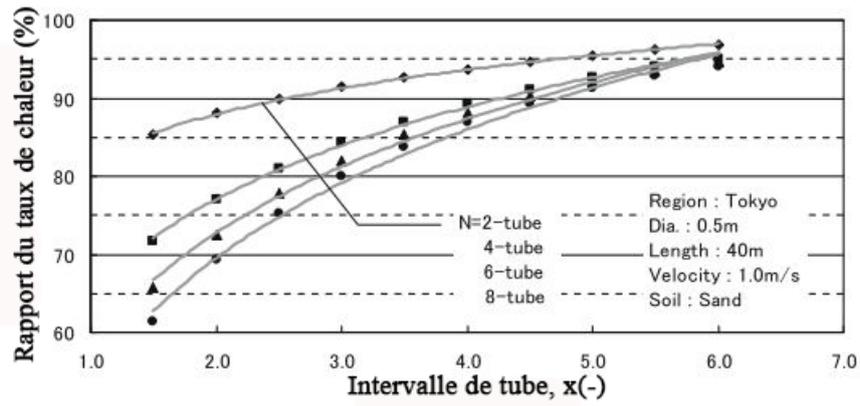
La figure 2.20 représente la variation du rapport de taux de chaleur pour les systèmes à 2, 4, 6 et 8 conduits (tubes). On peut observer que le rapport du taux de chaleur annuel échangé diminue lorsque l'intervalle d'arrangement diminue, et que le gradient négatif augmente avec l'augmentation du nombre de conduits [192].



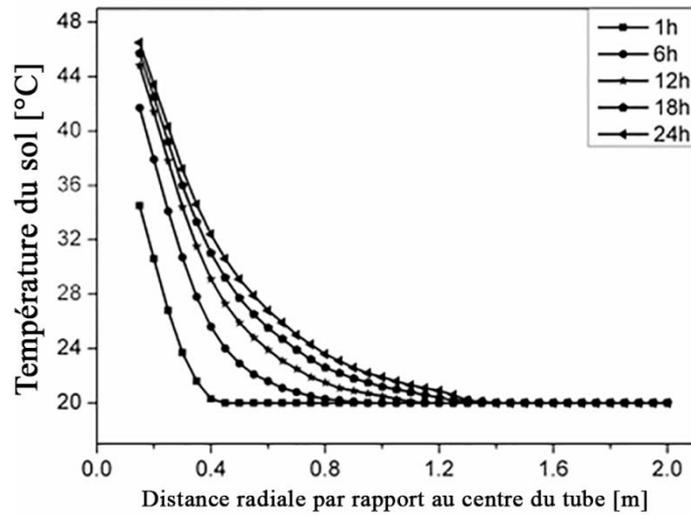
**Figure 2.19.** Variation de la puissance thermique d'un ECSHAS en fonction d'espacement des conduits (tubes) à différents débits: (1)100 m<sup>3</sup>/h; (2)407 m<sup>3</sup>/h; (3)1500 m<sup>3</sup>/h [183].

Entre autre, le calcul semi-analytique de l'inter-espacement est nettement attribué aux travaux de Rouag et al. s'inscrivant dans le cadre du transfert de chaleur au sein de l'ECSHAS. Les figures 2.21 & 2.22 révèlent que la ZIT est proportionnelle avec la durée de fonctionnement et la conductivité thermique du sol. La figure 2.22 est aisément produite par le calcul semi-analytique développé dans le chapitre trois de cette thèse [1, 2].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

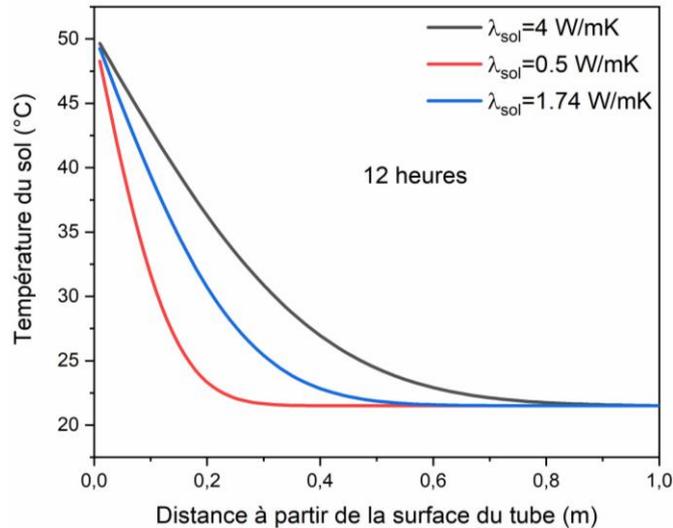


**Figure 2.20.** Effet des paramètres de conception ECSHAS sur le rapport du taux de chaleur [192].



**Figure 2.21.** Température radiale du sol à l'entrée de l'ECSHAS pour différentes durées de fonctionnement continu [2].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol



**Figure 2.22.** Température radiale du sol à l'entrée de l'ECSHAS pour différentes conductivités thermiques après 12 heures de fonctionnement continu [2].

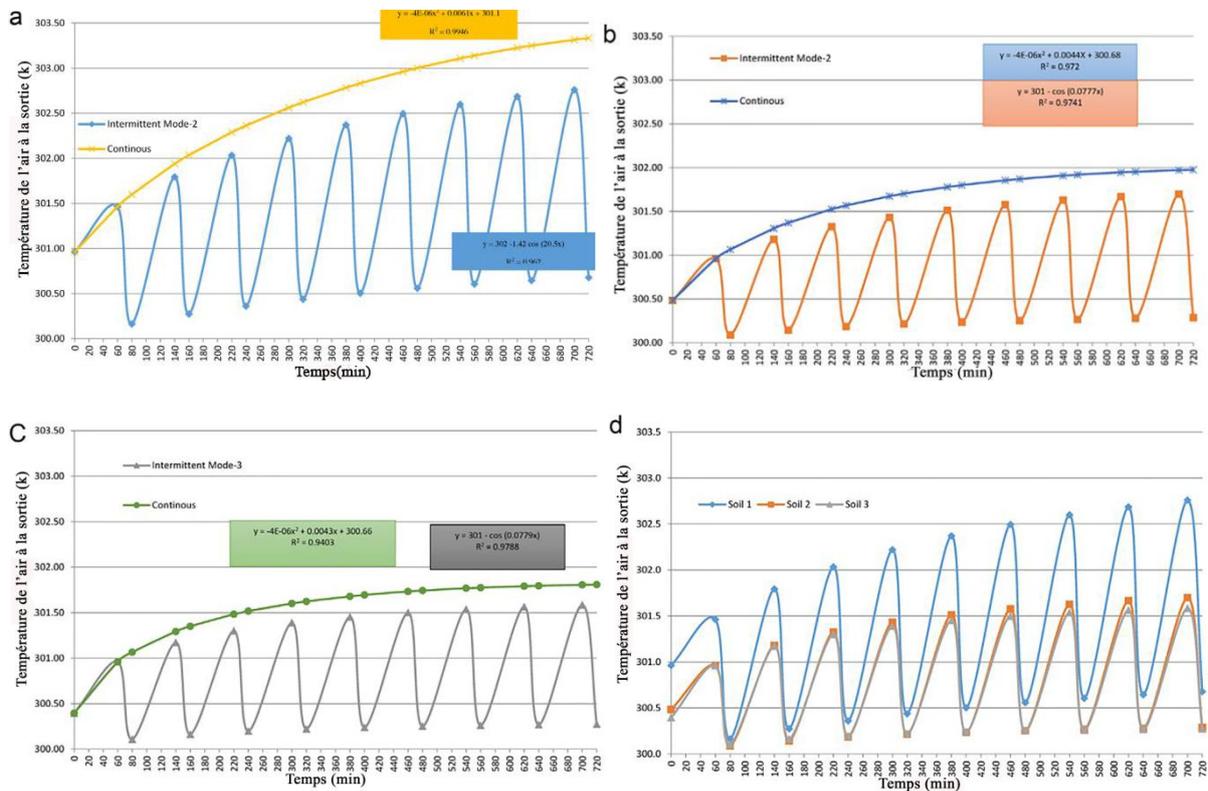
### 3.6 Effet de la durée de fonctionnement et mode de fonctionnement

A une autre échelle, la revue de la littérature a clairement montré que les performances thermiques de l'échangeur se détérioraient au cours de son fonctionnement continu, en particulier en cas de faible conductivité thermique du sol. La conductivité thermique est une propriété inhérente du sol et ne peut pas être modifiée aussi facilement, si elle est jugée défavorable pour le développement des échangeurs.

A ce titre, Mathur et al. [193, 194] ont proposé le fonctionnement intermittent de l'échangeur comme une alternative pour résoudre ce problème de saturation, en supposant que le sol se régénère au cours de la période de non fonctionnement. A fin d'étudier l'équilibre entre les conditions «ON» et «OFF» et évaluer l'intérêt du mode intermittent, une comparaison a été faite entre trois types de sols différents (Tableau 2.9), en tenant compte de trois modes de fonctionnement pour un cycle de douze heures (12 h) : mode-1 (fonctionnement continu pendant 12 h), mode-2 (fonctionnement intermittent, cycle de 60 min en marche et arrêt de 20 min) et mode -3 (fonctionnement intermittent, cycle d'activation et d'arrêt de 60 min). En sommes, l'utilisation de l'échangeur pendant 12 h de fonctionnement continu ne permet pas à la chaleur emmagasinée dans le sol de se dissiper et la température du sol voisinant l'échangeur augmente continuellement, ce qui diminue la chute de température de l'entrée à la sortie de l'échangeur. Cet effet dépend notamment de la conductivité thermique du sol, c'est-à-dire que le sol ayant une conductivité thermique inférieure saturera plus rapidement que le sol ayant une conductivité thermique supérieure (Figure 2.23).

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

La capacité de refroidissement et la température du sol, en mode de fonctionnement intermittent, peuvent être récupérées pendant le temps d'inactivité par conduction naturelle de la chaleur entre les couches du sol, d'une part, et, d'autre part, cette capacité d'auto-récupération de refroidissement, en mode de fonctionnement continu, peut être à l'origine de la convection forcée via une purge nocturne lorsque la température ambiante est plus basse que la température du sol (Figure 2.24). Bien que la durée et le débit d'air de la purge nocturne doivent être optimisés, sinon l'énergie absorbée est supérieure à la puissance thermique. Il est donc suggéré que l'échangeur soit utilisé en mode intermittent avec un fonctionnement nocturne limité pour permettre la récupération de la température grâce à la purge. Egalement, cette étude a révélé que le système à sol de conductivité thermique plus élevé peut être utilisé en continu (mode 1), tandis que le système à sol de conductivité thermique plus faible doit être utilisé en mode intermittent (modes 2 et 3).

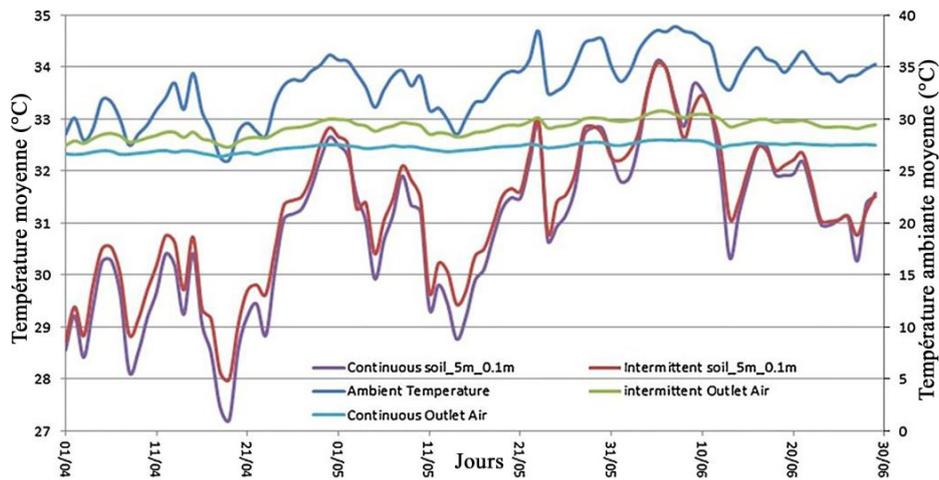


**Figure 2.23.** Température de l'air à la sortie en fonctionnement intermittent (mode 2) et continu avec : a) sol-1 ; b) sol-2; c) sol-3; d) Température de l'air à la sortie en fonctionnement intermittent (mode 2) des différents sols [193].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

Néanmoins, bien que le mode intermittent se soit avéré très utile, la capacité de récupération diminue progressivement avec la distance et le temps de fonctionnement. A cet effet, une récupération complète du sol peut être obtenue avec des conditions de fonctionnement et un calendrier approprié pour maintenir l'échangeur en bon état de fonctionnement (Figure 2.25) [75].

En revanche, dans une dimension temporelle plus ample, le sol entraîne une saturation thermique à la fin de l'été, ce qui peut le rendre inutilisable pour l'été prochain. Ce scénario exige une évacuation de la chaleur par convection forcée. Trois stratégies, à savoir la purge nocturne, en été, le fonctionnement de jour et de nuit en hiver, ont été tentés pour estimer l'étendue de la récupération du sol. Les résultats révèlent que l'avantage de la purge nocturne est inférieur à l'énergie nécessaire au fonctionnement du souffleur pour la purge nocturne. Toutefois, le fonctionnement jour/nuit en hiver offre un meilleur sol pour la saison estivale prochaine (Figure 2.26) [195].



**Figure 2.24.** Différence en température du sol et de l'air sortant entre modes de fonctionnement continu et intermittent [194].

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

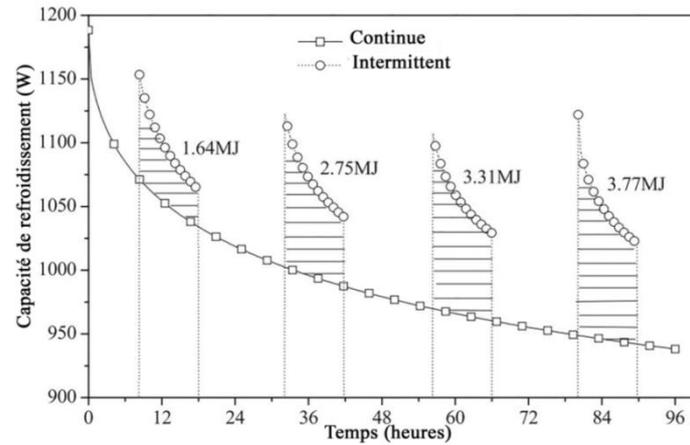


Figure 2.25. Différence en capacité de refroidissement entre modes de fonctionnement continu et intermittent [75].

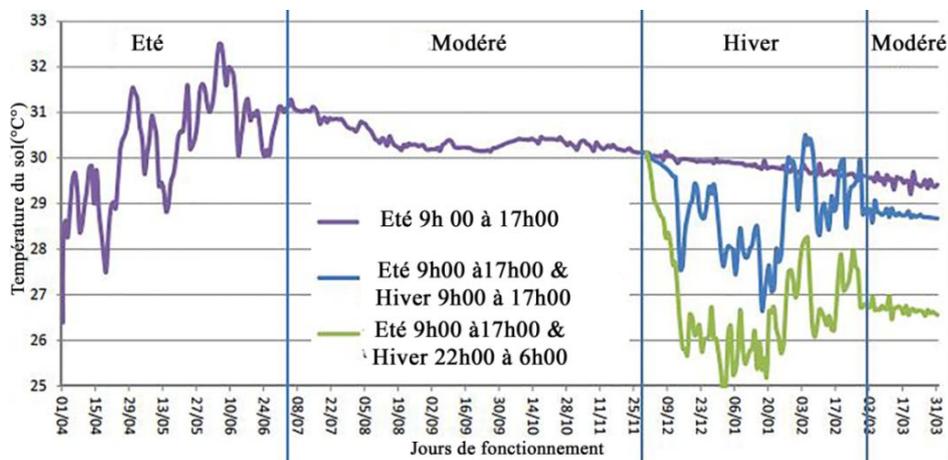


Figure 2.26. Variation de la température du sol sur une année [195].

### 4 Discussion

Il a été analysé à partir des résultats des différentes études menées (tableaux 2.5-2.15) que les résultats se concentrent principalement sur l'évaluation des performances thermiques ainsi que l'optimisation de la conception des ECSHASs.

Il convient de noter que, selon le principe de fonctionnement de l'ECSHAS, la température de sortie dépend notamment des conditions géographiques et climatiques, des paramètres thermiques et de la configuration du flux d'air et des propriétés du conduit (tuyau) d'une part, et, d'autre part le temps de fonctionnement et les propriétés intrinsèques au sol voire la conductivité thermique qui sont des facteurs déterminants et prédictifs de la performance énergétique des échangeurs souterrains.

L'utilisation d'ECSHAS est recommandée dans les endroits où la variation de la température de l'air ambiant diurne et saisonnier est élevée, vue que L'ECSHAS ait une faible

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

performance, si l'amplitude de variation de la température de l'air ambiant est faible (inférieure à 7–8°C), ainsi, la température d'entrée de l'air a un effet significatif sur les performances thermiques du système d'ECSHAS.

La température du sol est régie par les conditions climatiques tout au long de l'année. En hiver, la surface de la terre peut être noircie ou vitrée pour augmenter la température de la surface. Cependant, En été, la température de surface peut être réduite en adoptant des processus tels que l'ombrage, la surface mouillée avec de l'eau pulvérisée ou en faisant recouvrir la surface en végétations ou en herbes etc.

La position des conduits sous la surface de la terre joue également un rôle important dans l'analyse des performances d'ECSHAS. Une augmentation de la profondeur du sol au-dessus de la surface du conduit améliore le potentiel de chauffage/refroidissement du système. Cependant, il est conclu que la profondeur d'enfouissement optimale est de 3 à 4 m, car une excavation trop profonde du sol ne provoque pas de changement appréciable de la température du sol. En plus, il ne fait qu'augmenter les coûts de la creuse et contester la viabilité économique de l'ECSHAS.

La vitesse d'écoulement de l'air joue également un rôle essentiel dans la conception du système d'ECSHAS. La vitesse du flux d'air est directement proportionnelle à la température de sortie. Toute petite modification de la vitesse d'écoulement de l'air entraîne une légère diminution de la température de sortie. Ceci est principalement dû à l'augmentation du débit massique. Les vitesses d'air élevées ne sont pas écoénergétiques. En règle générale, la vitesse d'écoulement de l'air varie entre 2 et 5 m/s, comme le suggéraient les études.

La connaissance des propriétés thermo-physiques du sol est cruciale pour la conception d'un système d'ECSHAS. Les performances améliorées du système d'ECSHAS peuvent être obtenues en fournissant un sol de bonne conductivité thermique et une plus grande teneur en humidité à proximité du conduit ECSHAS. Pour favoriser davantage l'échange de chaleur, le sol doit être tassé de manière dense autour du conduit (tube) pour augmenter le taux d'échange thermique. Il est généralement recommandé d'utiliser de l'argile ou du sable compactée.

En général, les diamètres typiques vont de 10 cm à 30 cm mais peuvent aller jusqu'à 1 m pour les bâtiments commerciaux. Le coût des conduits de gros diamètre (0,15 m) est 6 à 7 fois supérieur à celui des conduits de petit diamètre (0,05 m) pour la même résistance.

## Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol

Par conséquent, il est recommandé d'utiliser plusieurs conduits de petit diamètre au lieu d'un seul conduit de gros diamètre.

Cependant, lors de la mise en service de plusieurs conduits en parallèle de manière continue (pendant des durées plus longues) aussi bien sous des conditions ambiantes rudes, l'espacement entre les conduits devient un paramètre critique particulièrement en raison de la saturation thermique du sol situé à proximité du conduit. Les conduits doivent être espacés d'environ 1 m les uns des autres afin de minimiser les interactions thermiques. Il est à noter que l'épaisseur de la zone d'influence thermique (ZIT) ne reste pas constante le long du conduit d'ECSHAS, car le taux de transfert de chaleur dans la section amont du conduit est supérieur à celui de la section aval. Par conséquent, il est recommandé de réduire progressivement l'entraxe entre les conduits le long du réseau. Cette considération réduira les coûts globaux d'excavation et de remblayage.

Entre autre, Il est à noter que la durée de fonctionnement du système d'ECSHAS doit être gérée correctement de manière à ce que le sol récupère ses propriétés thermiques au moins dans une mesure considérable lorsqu'il est utilisé pour des durées plus longues.

Le fonctionnement intermittent est une alternative pour résoudre ce problème de saturation, en supposant que le sol se régénère au cours de la période de non fonctionnement (d'inactivité) par conduction naturelle de la chaleur entre les couches du sol, d'une part, et, d'autre part, cette capacité d'auto-récupération de refroidissement, en mode de fonctionnement continue, peut être à l'origine de la convection forcée via une purge nocturne lorsque la température ambiante est plus basse que la température du sol. Les études ont révélé que le système ayant un sol de conductivité thermique plus élevée peut être utilisé en continu, tandis que le système ayant un sol de conductivité thermique plus faible doit être utilisé en mode intermittent.

En revanche, face à une dimension temporelle plus ample, le sol entraîne une saturation thermique à la fin de l'été, ce qui peut le rendre inutilisable pour l'été prochain. A cet effet, trois stratégies, à savoir la purge nocturne, en été, le fonctionnement de jour et de nuit en hiver, ont été tentées pour estimer l'étendue de la récupération du sol. Les résultats révèlent que le fonctionnement jour/nuit en hiver offre un meilleur sol pour la saison estivale prochaine.

## **Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol**

En somme, l'étude bibliographique montre que si le système d'ECSHAS est développé conformément aux directives de conception appropriées, il serait capable ainsi d'économiser jusqu'à 50% d'énergie par rapport aux systèmes conventionnels et constituerait ainsi l'alternative idéale.

Nonobstant les soins apportés à la conception des systèmes d'ECSHAS, les analyses économiques et exergétiques sont limitées dans la littérature et ne peuvent pas être appliquées de manière générale pour chaque type de conception et de climat.

### **5 Conclusion**

Ce chapitre a pour objectif de démystifier et de simplifier certains phénomènes ayant trait à l'ECSHAS. Il se veut aussi un espace de réflexion sur la manière la plus adéquate de mettre en application l'émergence des nouveaux concepts étroitement liés au fonctionnement des ECSHASs, à un moment où plusieurs chercheurs ont utilisé l'échangeur de chaleur souterrain comme source ou puits.

Dans cette synthèse, les systèmes d'ECSHAS ont été introduits au moyen d'une description de la géométrie et de tous les paramètres connexes ainsi que les matériaux utilisés pour un ECSHAS. Les options disponibles pour l'ECSHAS incluent les systèmes en boucle ouverte ou fermée, de type vertical ou horizontal, et enfin leurs configuration du réseau de canalisations décrits dans la section 1 de ce chapitre. La technologie des échangeurs de chaleur souterrains est largement régit par la parfaite compréhension de la dynamique de transfert de chaleur entre le fluide traversant le conduit, et le sol autour du conduit. Dans cette dimension, le transfert de chaleur s'offre comme une discipline auquel prendre part de nouvelles terminologies telles que la zone d'influence thermique, la saturation thermique du sol, le rayon de sol.

Ces terminologies sont essentiellement liées aux effets des paramètres de conception déjà passés en revues tels que les propriétés thermophysiques du sol, du conduit et de l'air ainsi que la durée de fonctionnement. Quant à la modélisation qui est un outil très utile pour prévoir l'effet des paramètres de conception et de fonctionnement tels que la longueur, le rayon, la profondeur d'enfouissement et le débit d'air sur la performance thermique et la capacité de chauffage/refroidissement des systèmes d'ECSHAS. Selon la littérature, plusieurs modèles de calcul simulent le comportement thermo-physique des échangeurs de chaleur air-sol. Différents modèles paramétriques et numériques pour l'ECSHAS ont été publiés au cours des deux dernières décennies.

## **Chapitre 2. Echangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol**

Les modèles de simulation peuvent être classés en tant que modèles avec une solution analytique, numérique ou mixtes. A l'occasion, en dépit du temps de calcul relativement important consacré à l'étude de convergence, les solutions numériques ont majoritairement dominé l'aspect analytique.

La présence timide de l'aspect analytique nous a incité à investir dans l'action de recourir les modèles analytiques traitant les problèmes transitoires du comportement thermo-physique de l'ECSHAS. C'est dans cette perspective que s'inscrit la deuxième partie de cette thèse (chapitre 3) dont l'objectif porte sur le développement de nouvelles approches semi-analytiques à caractère transitoire relative à la conception thermique des ECSHASs.

## PARTIE II. MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT THERMIQUE DES ECSHASs

*« C'est en retraçant précisément le sujet de la saturation lié au fonctionnement continue des ECSHASs, que le chapitre trois (3) examine l'essentiel de ce phénomène thermique en présentant de nouveaux modèles semi-analytiques. Redynamiser l'aspect analytique représente l'originalité et la contribution majeure de cette thèse. C'est dans cette direction que s'organise le chapitre quatre (4) qui s'appuie sur la mise en application des modèles semi-analytique développés dans le dimensionnement des ECSHASs. »*

## Chapitre 3. MODELISATION MATHEMATIQUE DES ECSHASs

Contrairement à ce qui se passe pour un milieu de stockage liquide, qui se décrit souvent par séparation des paramètres capacitif et convectif (modèles à un nœud). Cependant, les interactions thermiques au sein d'un milieu solide, de nature diffusive induit des déphasages et amortissements de température souvent difficile à caractériser de façon intuitive. De plus, l'inhomogénéité du champs de température ne permettant pas généralement la mise en œuvre de modèles mathématiques simples [196].

Si, à défaut de mieux, le dimensionnement d'échangeur air/sol ainsi que la prédiction des performances des ECSHASs se font via les algorithmes indiqués dans le tableau 2.13, il reste à priori difficile, particulièrement en condition non-stationnaire, d'estimer les paramètres fondamentaux tels que le coefficient d'échange air/sol, la température effective du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur et l'inter-espacement entre les conduits.

A cet effet, des efforts considérables sont investis dans la modélisation. Plusieurs approximations et hypothèses à caractère théorique et computationnel ont été introduites afin de contourner ces difficultés et d'obtenir des solutions réalisables. La plupart des modèles analytiques et semi-analytiques actuellement utilisés sont basés sur les travaux de Carslaw et Jaeger en 1947 [197], qui semblent être les premiers à introduire un traitement complet de la conduction thermique dans les solides soumis à différentes combinaisons de conditions initiales et limites. Les équations qui régissent ces modèles sont généralement résolues à partir des transformations de Laplace basées sur l'emploi des fonctions de Bessel et de Green.

Au chapitre des échangeurs horizontaux, le transfert de chaleur de l'air au sol provoque un changement appréciable de la température des couches du sol (augmentation ou diminution de 0.5°C de la température du sol non perturbé) connue sous le nom de la zone d'influence thermique (ZIT) ou du sol perturbé. La quantification de la ZIT est capitale pour le dimensionnement ainsi l'inter-espacement entre les conduits qui doit être supérieur à la ZIT. En effet, plusieurs travaux ont étudié le rayon de sol approprié requis pour la conception des ECSHASs où certains auteurs le supposent négligeable ou constant. Ce rayon est la première distance de l'axe du conduit où il n'y a pas d'effet de chaleur d'ECSHAS. Selon la littérature, 1 à 1.5 m est la distance optimale entre les couches et les conduits.

## Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

Toutefois, à notre connaissance, il semble d'aucun argument scientifique ne permet de démontrer le choix de ce rayon et nous croyons fermement que ce rayon n'est pas constant mais peut augmenter et diminuer en fonction de : i) la durée de fonctionnement, ii) la diffusivité thermique du sol, iii) le diamètre du conduit et iv) la température de l'air. Dans cette orientation, ce présent chapitre s'inscrit ainsi.

Hormis des solutions stationnaires pour l'ECSHAS, nous présentons dans ce chapitre des nouveaux modèles semi-analytiques non-stationnaires. En utilisant les initiales des noms de famille des auteurs, nous nous référons ci-dessous à ces nouveaux modèles en tant que modèle RBM et RBM généralisé "GRBM". Ces modèles traitent respectivement la diffusion de chaleur latérale (interaction air-tube-sol) et la variation longitudinale de la température du flux d'air.

A l'occasion, il convient cependant d'ouvrir une parenthèse à propos des solutions analytiques non-stationnaires relatives aux systèmes géothermiques verticaux peu profonds. La plupart des formulations mathématiques disponibles pour cette catégorie traite l'échangeur comme une source de chaleur constante incorporée dans une masse de sol. Selon la littérature, plusieurs modèles analytiques peuvent être classés en trois catégories distinctes: le modèle de source de ligne infinie, le modèle de source de ligne finie et le modèle de source cylindrique infini [198].

A l'origine, le RBM s'inspire principalement du modèle de source cylindrique et sert à estimer la résistance thermique du sol en quantifiant la diffusion de chaleur latérale (interaction air-conduit-sol), tandis que le GRBM vient d'autant plus pour la généralisation du RBM focalisant sur la variation longitudinale de la température du flux d'air le long de l'échangeur.

### 1 Bases analytiques du modèle proposé

#### 1.1 Développement analytique

Les bases analytiques du modèle proposé dans le cadre de la présente thèse ont été présentées pour la première fois dans le manuscrit de thèse de docteur Rouag [2]. Par la suite, ces bases mathématiques ont été structurées dans un modèle semi-analytique nommé RBM en utilisant les initiaux des auteurs à savoir : Rouag, Benchabane et Mehdid (le présent auteur) [1].

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

Le modèle semi-analytique transitoire (RBM) calcule le transfert de chaleur dans le sol au voisinage d'ECSHAS soumis à un taux de transfert de chaleur constant au niveau du rayon intérieur du conduit (Condition de Neumann); le conduit de l'ECSHAS est enterré dans un milieu (sol) dont la température de champ lointain est constante.

Le fonctionnement continu de l'échangeur de chaleur géothermique entraîne l'augmentation de la température du sol dans les environs immédiats au fil du temps[199, 200]. Ainsi, pour assurer un refroidissement continu de l'air, il est nécessaire de connaître la distance optimale entre les tubes, ainsi qu'entre les échangeurs dans le cas de l'utilisation de plusieurs ECSHAS. Pour cela, nous avons résolu l'équation thermique à l'entrée de l'échangeur géothermique dans le sol, considérée comme un cylindre creux semi-infini avec un flux de chaleur constant par unité de longueur à  $r = r_1$ , exprimé en coordonnées cylindriques [198, 201] indiqué sur la figure. 3.1.

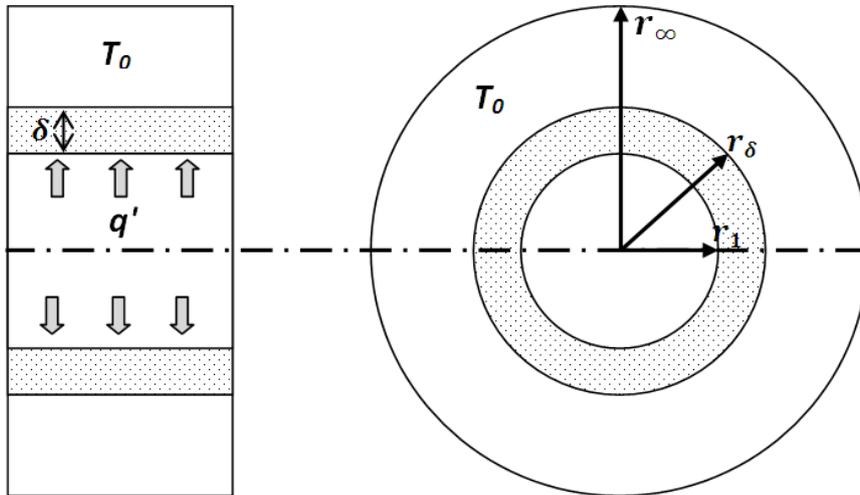
$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \quad \text{For } r > r_1 \quad (3.1)$$

Où  $u(r, t) = T(r, t) - T_0$  et  $T_0$  est la température initiale du sol.

$$u(r, 0) = 0 \quad (3.1a)$$

$$u(r \rightarrow \infty, t) = 0 \quad (3.1b)$$

$$\left[ -\lambda \frac{\partial u}{\partial r} \cdot 2\pi r \right]_{r=r_1} = q_0 \quad (3.1c)$$



**Figure 3.1.** Schéma du cylindre creux semi infini étudié[2].

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECHASs

Après avoir utilisé la transformation de Laplace [202], l'équation (3.1) devient:

$$\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \hat{u}}{\partial r} - \frac{s}{\alpha} \hat{u} = 0 \quad (3.2)$$

$$\hat{u}(r \rightarrow \infty, s) = 0 \quad (3.2a)$$

$$\left[ -\lambda \frac{\partial \hat{u}}{\partial r} \cdot 2\pi r \right]_{r=r_1} = \frac{q_0}{s} \quad (3.2b)$$

La solution de ce dernier peut être obtenue comme

$$\hat{u}(r, t) = \frac{q_0}{2\pi r_1 \lambda s} \frac{K_0(r\sqrt{s\alpha})}{K_1(r_1\sqrt{s/\alpha})} \quad (3.3)$$

Où  $K_0$  et  $K_1$  sont les fonctions de Bessel modifiées du deuxième type de zéro et du premier ordre, respectivement. Ensuite, en utilisant l'intégrale de Bromwich [198], la transformation inverse de Laplace peut être exprimée sous la forme de l'équation suivante :

$$u(r, t) = \frac{q_0}{4\pi^2 r_b \lambda_i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{st} \frac{K_0(r\sqrt{s\alpha})}{K_1(r_b\sqrt{s/\alpha})} ds \quad (3.4)$$

Carslaw et al. [197] a donné la solution de l'intégrand dans l'équation (3.4) à  $s = 0$ , de la forme :

$$u(r, t) = -\frac{2Q_0}{\pi\lambda} \int_0^\infty (1 - e^{-\alpha\beta^2 t}) \frac{J_0(\beta r)Y_1(\beta r_1) - Y_0(\beta r)J_1(\beta r_1)}{\beta[J_1^2(\beta r_1) + Y_1^2(\beta r_1)]} \quad (3.5)$$

Où  $Q_0 = q_0 / 2\pi r_1$ , à  $r = r_1$

Afin d'éviter le problème de la résolution d'intégrales infinies impliquées dans des régions infinies, il est recommandé de déterminer la distance du champ lointain, où elle est connue analytiquement comme  $r = r_\infty = 4\sqrt{\alpha t}$  [198], où le flux de chaleur généré par l'air entrant disparaît. Pour une région finie, la solution peut être obtenue en termes de sommation en série, qui converge relativement rapidement. Yener et Kakaç [201] ont montré que la solution de l'équation de la chaleur dans le système de coordonnées cylindriques, d'un domaine fini situé dans la plage  $r_1 \leq r \leq r_\infty$ , soumise à un flux de chaleur  $q'(t)$  par unité de longueur, peut être exprimée comme suit:

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

$$u(r, t) = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_n^2 t} \frac{J_0(\beta_n r) J_0(\beta_n r_1)}{J_1(\beta_n r_\infty)} \int_0^t e^{-\alpha \beta_n^2 (t-\tau)} q'(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

Où  $\beta_n$  sont les racines positives de  $J_0(\beta_n r) = 0$ . En pratique, dans de nombreux modèles utilisés, le flux de chaleur provenant de l'échangeur de chaleur air-sol est considéré comme constant. En résolvant l'intégrale de l'équation (3.6), la distribution de la température dans le sol peut être exprimée comme suit :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q'}{\pi \lambda r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha \beta_n^2 t}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r) J_0(\beta_n r_1)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \quad (3.7)$$

Où le flux de chaleur par unité de longueur,  $q'$ , et la résistance thermique du sol,  $R_s$ , sont calculés au moyen des équations suivantes :

$$q' = \frac{(T_f - T_0)}{R_s} \quad (3.8)$$

$$\text{Où } R_s = \frac{1}{2\pi \lambda_s L} \ln\left(\frac{r_\delta}{r_1}\right) \quad (3.9)$$

Afin de rendre l'équation (3.7) plus applicable, nous substituons les équations (3.8) et (3.9) dans l'équation (3.7). Ainsi, la distribution de température transitoire dans le sol entourant l'ECSHAS peut s'écrire comme suit :

$$T(r, t) = \frac{2(T_f - T_0)}{r_\infty^2 \ln\left(\frac{r_\delta}{r_1}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha \beta_n^2 t}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r) J_0(\beta_n r_1)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} + T_0 \quad (3.10)$$

#### 1.2 Estimation du rayon du sol par le modèle basique (RBM)

Le flux de chaleur provenant de l'ECSHAS diminue avec le temps en raison de l'augmentation de la température du sol environnant à proximité du conduit, ce qui induit une variation du rayon du sol et par conséquent, la résistance thermique du sol. Pour cela, la température du sol entourant le conduit est calculée en utilisant l'équation (3.10) en changeant le rayon du sol,  $r_s$ , pour chaque pas de temps (c'est-à-dire que le flux de chaleur reste constant pendant tout le pas de temps actuel). Ce rayon,  $r_s$ , est la première distance où la température du sol atteint la température initiale du sol ( $T_0$ ). Pour mieux comprendre la méthode de calcul, la figure 3.2 présente l'organigramme du modèle RBM développé, classifié comme modèle semi analytique. Tout d'abord, le rayon de sol  $r_s$  est initialisé à deux fois le rayon du conduit avant

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

de procéder à calculer le gradient de la température du sol par l'équation (3.10). Par la suite, le nouveau rayon,  $r_\delta$ , sert à calculer la distribution de la température du sol pour l'étape suivante complète. Lorsque la température du sol atteint la température initiale  $T_0$ , la distance radiale obtenue (dans la boucle du temps courante) est enregistrée en tant que rayon du sol perturbé,  $r_\delta$ . Par la suite, ce nouveau rayon,  $r_\delta$ , sert comme initialisation pour calculer la distribution de la température du sol pour la prochaine incrémentation du temps. Comme on peut le voir sur la Figure 3.2 et l'équation 3.10, le modèle RBM prend en compte tous les paramètres affectant les performances de tels systèmes (propriétés thermo-physiques de l'air et du sol, température ambiante, paramètres géométriques et la durée de fonctionnement) qui rendent la conception des ECSHASs plus fiable. Autrement, à la fois l'aspect analytique et la simplicité du présent modèle rend également la conception thermique de ces systèmes plus précise avec un temps de calcul considérablement réduit.

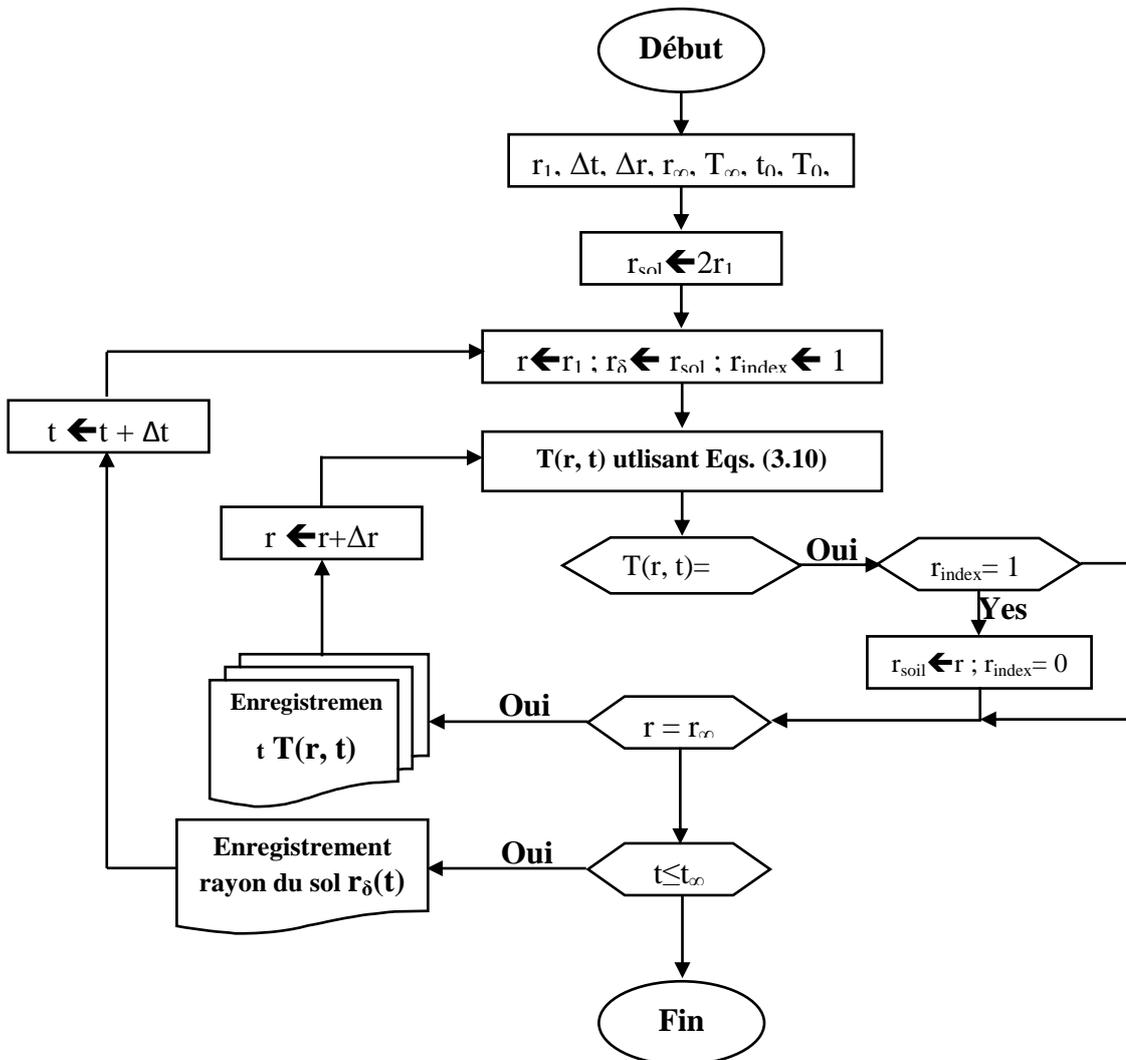


Figure 3.2. Organigramme du modèle RBM.

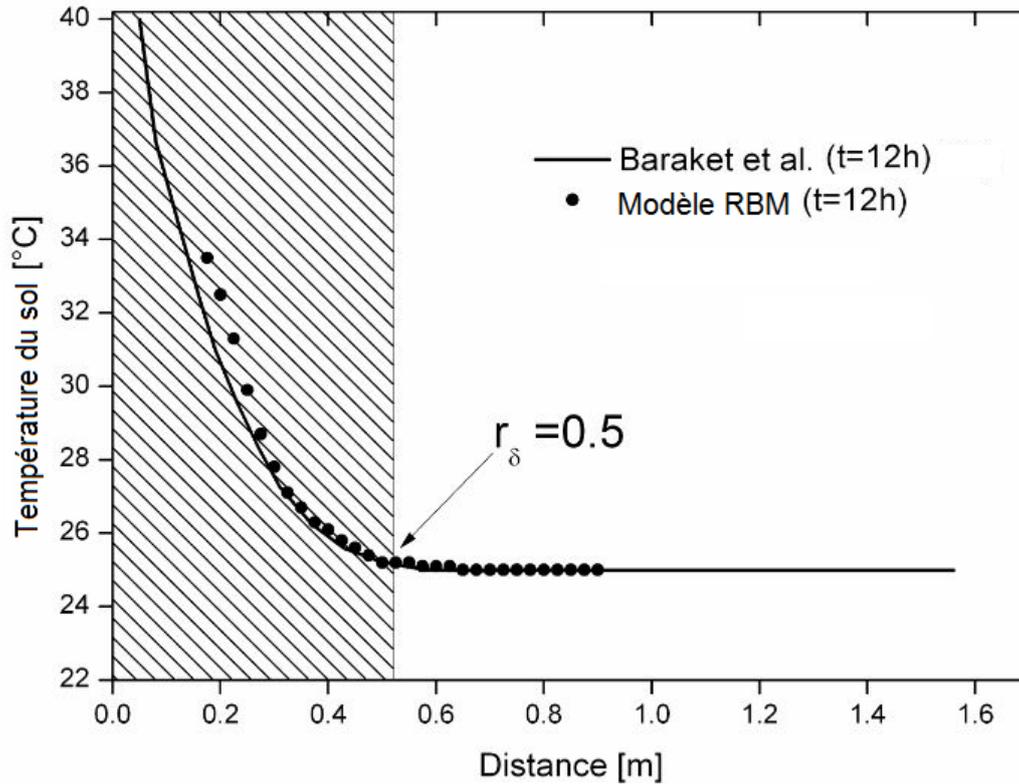
### 1.3 Vérification du modèle basique

Le modèle développé dans la section précédente a été vérifié numériquement en se référant aux nombreuses études dans la littérature. Seulement, les profils de la température et du rayon du sol sont vérifiées avec les travaux de Barakat et al. et Mathur et al. [193, 199]. Il convient de noter que la température de la surface du conduit est considérée égale à la température de l'air d'entrée. Egalement, le modèle RBM sera utilisé dans une nouvelle approche appelée modèle GRBM qui sera décrite et validée dans la deuxième partie du chapitre. L'étude numérique réalisée par Barakat et al. repose sur la discrétisation de l'équation de la conduction thermique radiale à travers le sol en un domaine de calcul utilisant la méthode des différences finies. Le tableau 3.1 présente les paramètres d'entrée détaillés du sol, du conduit et du temps de fonctionnement utilisés dans la simulation numérique.

La figure 3.3 montre qu'il existe un bon accord entre la température radiale du sol prédite par le modèle RBM et les résultats numériques de Barakat et al. avec une différence relative moyenne de 1.62%. On constate qu'après 12 h de fonctionnement, le sol atteint sa température initiale à une distance de 0,5 m de la surface du conduit.

**Tableau 3.1.** Paramètres d'entrée considérés de comparaison avec Barakat et al. [199].

Paramètres du sol	Capacité calorifique du sol (J/kg °C)	1995.4
	Conductivité thermique du sol (W/m °C)	1.74
	Densité du sol (kg/m <sup>3</sup> )	1868
	Température initiale du sol (°C)	25
Paramètres du conduit	Température de surface du conduit (°C)	40
	Diamètre du conduit (m)	0.3
Durée de fonctionnement	Temps (h)	12



**Figure 3.3.** Vérification du modèle RBM avec le travail de Barakat et al.[2].

Le modèle a également été vérifié avec le modèle CFD développé par Mathur et al. dans GAMBIT (version 2.2.3) et simulé dans ANSYS FLUENT (version 6.3) qui utilisait la méthode des volumes finis. Les paramètres d'entrée de Mathur et al utilisés pour la comparaison, sont donnés dans le tableau 3.2.

Les résultats de la comparaison entre la température radiale du sol prédite à 10 m par le modèle RBM et les données numériques de Mathur et al. (2015a) sont rassemblés dans le tableau 3.3. Le choix de cette distance revient à ce que l'amplitude de la sollicitation de la température est d'autant plus significative ce qui permet de mieux vérifier le modèle RBM. Comme on peut le voir dans le tableau 3.3, un bon accord est enregistré avec une différence relative inférieure à 6%. Ainsi, le modèle RBM est vérifié et peut être utilisé pour des analyses ultérieures. Cependant, ces vérifications sont effectuées pour de petites durées de fonctionnement (<12 h) et plusieurs vérifications prenant en compte les longues durées sont recommandées. En dépit de cette limitation, le RBM peut être utilisé pour obtenir une estimation rapide de la température du sol donc le rayon du sol.

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

**Tableau 3.2.** Paramètres d'entrée pour la comparaison avec Mathur et al. [193].

Paramètres du sol	Chaleur spécifique du sol (J/kg °C)	1840
	Conductivité thermique du sol (W/m °C)	0.52
	Densité du sol (kg/m <sup>3</sup> )	2050
	Diamètre du sol environnant $r_{\infty}$ (m)	1.1
	Température de surface du conduit (°C)	46.2
Paramètres du conduit	Diamètre du conduit (m)	0.1
	Section du conduit (m)	10

**Tableau 3.3.** Vérification de la température du sol estimée par le modèle RBM par rapport aux données numériques de Mathur à 10 m de distance [2].

	Temps (h)	Température du sol (°C)		Différence relative %	
		Mathur et al.[193]	Modèle RBM		
Distance radiale de la surface du conduit (m)	0.05	1	28.46	27.69	2.70
		3	30.07	28.81	5.40
		6	31.34	30.02	5.74
		12	32.61	31.69	4.94
	0.25	1	27.00	27.08	0.31
		3	27.00	27.16	0.47
		6	27.00	27.18	0.56
		12	27.01	27.21	0.62

## 2 Description du modèle proposé (GRBM)

Les spécifications du modèle proposé reposent sur des conditions limites variables pour l'air et le sol avec le temps pour que le dimensionnement soit plus précis. L'idée du modèle GRBM est basée sur les étapes suivantes :

Premièrement, le sol et le conduit d'ECSHAS sont subdivisés en plusieurs couches. Pour chaque couche, l'épaisseur du sol perturbé et la température radiale du sol à proximité du tuyau a été déterminée par le modèle RBM précédemment développé par Rouag et al [2]. Ce dernier permet de calculer la température du sol et sa résistance thermique. Ensuite, la résistance thermique totale est calculée pour l'ensemble : air, conduit et sol. Enfin, les paramètres déterminés, considérés comme des constantes, sont utilisés pour évaluer la température d'air à la sortie de la couche en cours durant le pas de temps de calcul courant. Selon le modèle GRBM et pour chaque pas de temps, toutes les étapes ci-dessus sont appliquées à chaque couche où la température de l'air de sortie de la  $j^{\text{ème}}$  couche est considérée comme la température de l'air d'entrée pour la couche suivante,  $(j+1)^{\text{ème}}$  couche.

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHAS

Cette opération est répétée jusqu'à l'extrémité du tuyau ECSHAS ( $j=np$ ), comme illustré sur la figure 3.4. La résistance thermique du sol pour chaque couche du pas de temps précédent sert comme initialisation pour la prochaine incrémentation du temps.

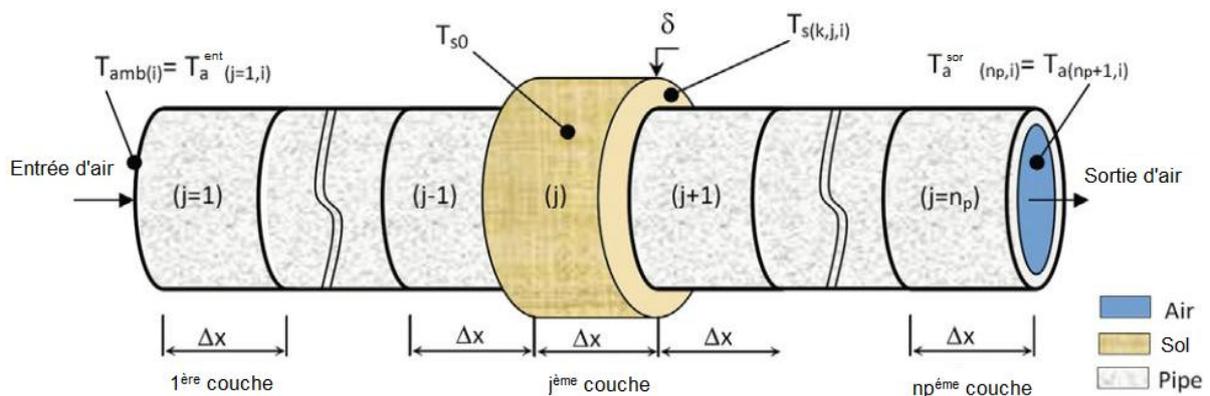
#### 2.1 Estimation de la température de l'air

La modélisation de EAHE est établie de telle sorte que les hypothèses suivantes sont respectées : (i) le sol autour de l'échangeur de chaleur est homogène et isotropes et il y a un parfait contact entre le sol et le conduit. (ii) Le flux d'air est uniforme sur toute la longueur des conduits enterrés. (iii) Les propriétés thermo-physiques de l'air sont des constantes. (iv) Nous supposons que le conduit et le sol sont subdivisés en plusieurs couches de longueur ( $\Delta x$ ) disposés en série. (v) Le flux d'air est considéré unidimensionnel comme le montre la figure 3.4. (vi) Dans chaque couche, le flux de chaleur entre l'air et le sol est supposé constant pour le pas de temps courant de calcul.

Pour une  $j^{\text{ème}}$  couche, le bilan énergétique est écrit comme suit la relation :

$$\dot{m}_a C_{p_a} \frac{dT_a}{dx} = - \frac{(T_a - T_s)}{R_{tot}} \quad (3.11)$$

Où  $T_a$ ,  $C_{p_a}$  et  $\dot{m}_a$  sont respectivement la température, la capacité thermique spécifique et le débit massique de l'air. La résistance thermique totale,  $R_{tot}$ , est la somme des résistances thermiques de l'air,  $R_{cv}$ , du conduit  $R_p$  et de  $R_s$  du sol perturbé entourant la  $j^{\text{ème}}$  couche. En résolvant analytiquement l'équation différentielle (3.11), la température de sortie d'air de la  $j^{\text{ème}}$  couche ( $j$ ) est donnée comme suit :



**Figure 3.4.** Schéma illustratif de la subdivision du conduit d'EAHE et du sol en plusieurs couches selon le modèle GRBM, où  $i$ ,  $j$  et  $k$  sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon [1].

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

$$T_{a(j)}^{sor} = (T_{a(j)}^{ent} - T_{s0}) \exp\left(\frac{-\Delta x}{R_{tot} \dot{m}_a C_{p_a}}\right) + T_{s0} \quad (3.12)$$

En appliquant l'hypothèse (vi), pour un temps donné  $t_i$ , en prenant la longueur de la couche  $\Delta x = 1m$  et en considérant la température de l'air à l'entrée de la  $j^{ème}$  couche actuelle comme la température de l'air à la sortie de la couche précédente  $(j-1)^{ème}$ , l'équation 3.12 peut être écrite comme :

$$T_{a(j,i)} = (T_{a(j-1,i)} - T_{s0}) \exp\left(\frac{-1}{\rho_a C_{p_a} S V_a R_{tot(j,i)}}\right) + T_{s0} \quad (3.13)$$

Comme mentionné ci-dessus, l'équation (3.13) est exprimée à l'état d'équilibre en supposant des propriétés thermiques constantes du sol ainsi que le flux de chaleur air-sol pour le pas de temps complet (hypothèse iii et vi). Le calcul de la température de l'air est répété pour la prochaine étape de temps avec de nouvelles températures et résistance thermique du sol en utilisant le modèle RBM.

#### 2.2 Estimation de la résistance thermique du sol

La résistance thermique totale entre l'air, le conduit et le sol entourant la  $j^{ème}$  couche de l'ECSHAS peut être exprimée par la relation suivante :

$$R_{tot} = R_{cv} + R_p + R_s \quad (3.14)$$

Où la résistance thermique due au transfert de chaleur par convection entre l'air et la surface interne du conduit,  $R_{cv}$ , est calculée comme suit :

$$R_{cv} = 1 / (h_a 2\pi r_{int}) \quad (3.15)$$

Le coefficient de convection de l'air est :

$$h_a = Nu \cdot \lambda_a / d_{int} \quad (3.16)$$

Où  $d_{int}$  est le diamètre intérieur du conduit. Le nombre de Nusselt pour le flux d'air à l'intérieur du conduit est donné par l'équation (3.17):

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (3.17)$$

Où  $Re$  et  $Pr$  sont respectivement les nombres de Reynolds et de Prandtl définis comme suit :

$$Re = V_a \cdot d_H / \nu_a \quad (3.18)$$

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECHASs

$$Pr = \mu_a \cdot Cp_a / \lambda_a \quad (3.19)$$

La résistance thermique du tuyau,  $R_c$ , est donnée par l'équation suivante :

$$R_p = \log(r_e / r_{int}) / (2\pi\lambda_p) \quad (3.20)$$

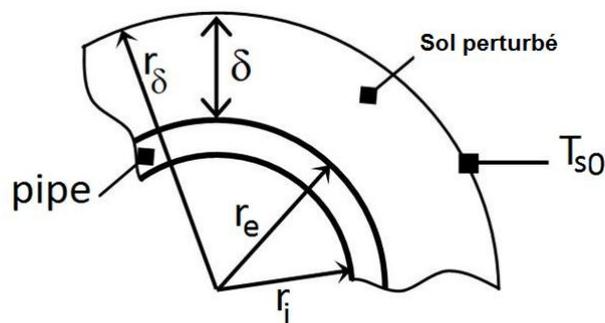
La résistance thermique de l'anneau de sol,  $R_s$ , est donnée par l'équation (3.21)

$$R_s = \log(r_\delta / r_e) / (2\pi\lambda_s) \quad (3.21)$$

$$r_\delta = r_e + \delta \quad (3.22)$$

Où  $r_\delta$  et  $\delta$  sont respectivement le rayon du sol et l'épaisseur du sol perturbé (voir figure 3.5). En général, la résistance thermique du tuyau,  $R_c$ , et la résistance thermique due à la convection de l'air dans le conduit,  $R_{cv}$ , sont des constantes.

Cependant, il n'y a pas d'accord dans la littérature existante sur le calcul de la résistance thermique du sol. Les auteurs calculent la résistance thermique du sol,  $R_s$ , en supposant que l'effet thermique de l'air sur le sol entourant le conduit est négligeable après un certain rayon constant dans le sol [145, 203]. Ce rayon du sol, appelé  $r_\delta$ , est la première distance où aucune augmentation significative de la température initiale du sol  $T_{s0}$  (Figure 3.5). A titre d'exemple, certains auteurs suggèrent que le rayon du sol,  $r_\delta$ , est égal à trois fois le rayon du conduit [145] ou égale au diamètre du conduit [203]. Le modèle GRBM tire son originalité du lien subtilement tissé entre le modèle RBMet la prévision de la température de l'air à la sortie.



**Figure 3.5.** Schéma illustratif de l'épaisseur du sol perturbé,  $\delta$ , et le rayon du sol,  $r_\delta$ .

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECHASs

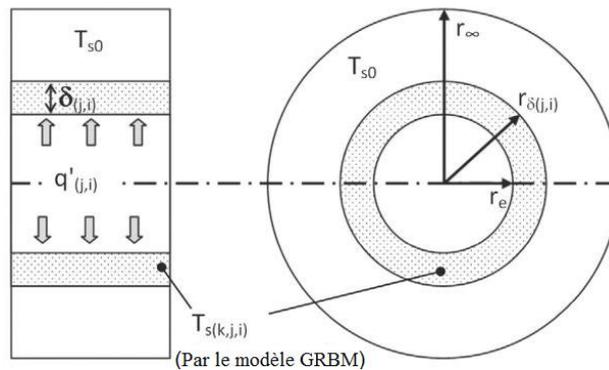
Le modèle RBM développé précédemment aborde l'aspect transitoire de la résistance thermique du sol et considère que la distance  $r_\delta$  n'est pas constante, mais variable en fonction du rayon du conduit ( $r_e$ ), du temps de fonctionnement ( $t$ ) et de la diffusivité du sol  $\alpha_s$ . Pour cela, la solution analytique de l'équation (3.23) de conduction thermique dans le sol est présentée ci-dessous. Cette équation est exprimée en coordonnées cylindriques au niveau de la  $j^{\text{ème}}$  couche du conduit et du sol environnant considéré comme un cylindre creux semi-infini, illustré à la figure 3.6.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \quad \text{Pour } r \geq r_e \\ \text{Avec } u(r, 0) = 0 \\ u(r \rightarrow \infty, t) = 0 \\ \left[ -\lambda_s \frac{\partial u}{\partial r} \right]_{r=r_e} = q' \end{array} \right. \quad (3.23)$$

Où  $u(r, t) = T(r, t) - T_0$  et  $T_0$  est la température initiale du sol.

$$u_{(k,j,i)} = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_s \beta_n^2 t} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \int_0^t e^{\alpha_s \beta_n^2 t} q'(t) dt \quad (3.24)$$

$u_{(k,j,i)} = T_{s(k,j,i)} - T_{s0}$ , avec  $i, j$  et  $k$  sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon.  $T_{s0}$  est la température initiale du sol et  $q'$  est le flux de chaleur par unité de longueur de la  $j^{\text{ème}}$  couche pour le  $i^{\text{ème}}$  intervalle de temps [198], où,  $\beta_n$ , sont définis comme les racines positives de  $J_0(\beta_n r_\infty) = 0$ , avec  $\beta_n = z_n / r_\infty$  et  $z_n$  sont les racines positives des fonctions de Bessel  $J_0(z) = 0$ , seulement dix racines ( $z_n$ ) ont été considérées.



**Figure 3.6.** Vues axiale et radiale du conduit et du sol environnant à la  $j^{\text{ème}}$  couche où le sol est considéré comme un cylindre creux semi-infini, où  $i, j$  et  $k$  sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon.

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECHASs

En référence à l'hypothèse (vi), il existe deux manières de calculer le flux thermique par unité de longueur,  $q'(t)$ , dans l'équation (3.24):

Le flux de chaleur,  $q'$ , est considéré comme constant dans l'ensemble du pas de temps,  $\Delta t$ . Dans ce cas, l'entité  $q'(t)$  peut être directement sortie de l'intégrale de l'équation (3.24) Ainsi, la température du sol à la  $j^{\text{ème}}$  couche peut être écrite comme :

$$T_{s(k,j,i)} - T_{s0} = \frac{q'_{(j,i)}}{\pi \lambda_s r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \quad (3.25)$$

Pour le  $i^{\text{ème}}$  pas de temps courant, le flux de chaleur par unité de longueur,  $q'_{(j,i)}$ , est calculé par la résistance thermique du sol,  $R_{s(j,i-1)}$ , comme suit:

$$q'_{(j,i)} = \frac{(T_{a(j,i)} - T_{s0})}{R_{s(j,i-1)}} \quad (3.26)$$

Où  $T_{a(j,i)} = T_{a(j-1,i)}^{\text{sor}}$

$$R_{s(j,i-1)} = \frac{1}{2\pi \lambda_s} \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right) \quad (3.27)$$

Après substitution des équations. (3.26) et (3.27) dans l'équation (3.25), les températures transitoires du sol autour du tuyau peuvent s'écrire comme suit :

$$T_{s(k,j,i)} = \frac{2(T_{a(j,i)} - T_{s0})}{r_\infty^2 \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} + T_{s0} \quad (3.28)$$

Utilisant les propriétés habituelles de la relation de Chasles[204] relatives aux intégrales, l'équation (3.24) devient pour la  $j^{\text{ème}}$  couche :

$$u_{(k,j,m)} = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e) e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \left( \int_0^{t_1} e^{\alpha_s \beta_n^2 t} q'_{(j)}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} e^{\alpha_s \beta_n^2 t} q'_{(j)}(t) dt + \dots + \int_{t_{m-1}}^{t_m} e^{\alpha_s \beta_n^2 t} q'_{(j)}(t) dt \right) \quad (3.29)$$

Où

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECHASs

$$u_{(k,j,m)} = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e) e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( q'_{(i,j)} \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\alpha_s \beta_n^2 t} dt \right) \right) \quad (3.30)$$

Où  $(q'_{(i,j)}, i=0,1\dots m)$  est le flux de chaleur constant par unité de longueur de chaque  $i^{\text{ème}}$  intervalle de temps  $[t_{i-1}-t_i]$  (hypothèse vii), calculé à l'aide de la résistance thermique du sol,  $R_s(j, i-1)$ , comme suit:

$$q'_{(i,j)} \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} = \frac{T_{a(j,i)} - T_{s0}}{R_{s(j,i-1)}} \quad (3.31)$$

$$R_{s(j,i-1)} = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right) \quad (3.32)$$

$$\text{Où } T_{a(j,i)} = T_{a(j-1,i)}^{\text{sor}}$$

En conséquence, la température du sol de la  $j^{\text{ème}}$  couche étudiée avec une température d'air en entrée variable peut être exprimée dans les équations (3.33 et 3.34).

$$u_{(k,j,m)} = \frac{1}{\pi\lambda_s r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e) e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{q'_{(j,i)}}{\beta_n^2} \left[ e^{\alpha_s \beta_n^2 t} \right]_{t_{i-1}}^{t_i} \right) \right) \quad (3.33)$$

$$T_{s(k,j,m)} = \frac{2}{r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{(T_{a(j,i)} - T_{s0})}{\log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right)} \left[ e^{\alpha_s \beta_n^2 t} \right]_{t_{i-1}}^{t_i} \right) \right) + T_{s0} \quad (3.34)$$

Ainsi, les températures transitoires du sol autour du conduit et le rayon du sol sont estimés à l'aide de l'équation (3.28) dans le cas d'une température d'entrée d'air constante et à l'aide de l'équation (3.33) dans le cas d'une température d'entrée d'air variable.

### 2.3 Organigramme du modèle GRBM

Pour mieux comprendre la méthode de calcul basée sur le modèle GRBM, l'organigramme présenté dans la Figure 3.7 résume les différentes étapes décrites ci-dessus. Il convient de noter que la résistance thermique et la température du sol ont été estimées, pour chaque couche, en utilisant le modèle RBM de sous-programme. De plus, ce sous-programme dépend de la condition aux limites d'entrée (température du fluide d'entrée), ce qui implique l'utilisation de : (i) l'équation. (3.28) dans le cas d'un flux de chaleur constant, (ii) ou l'équation (4.33) dans le cas d'un flux de chaleur variable.

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECASHAS

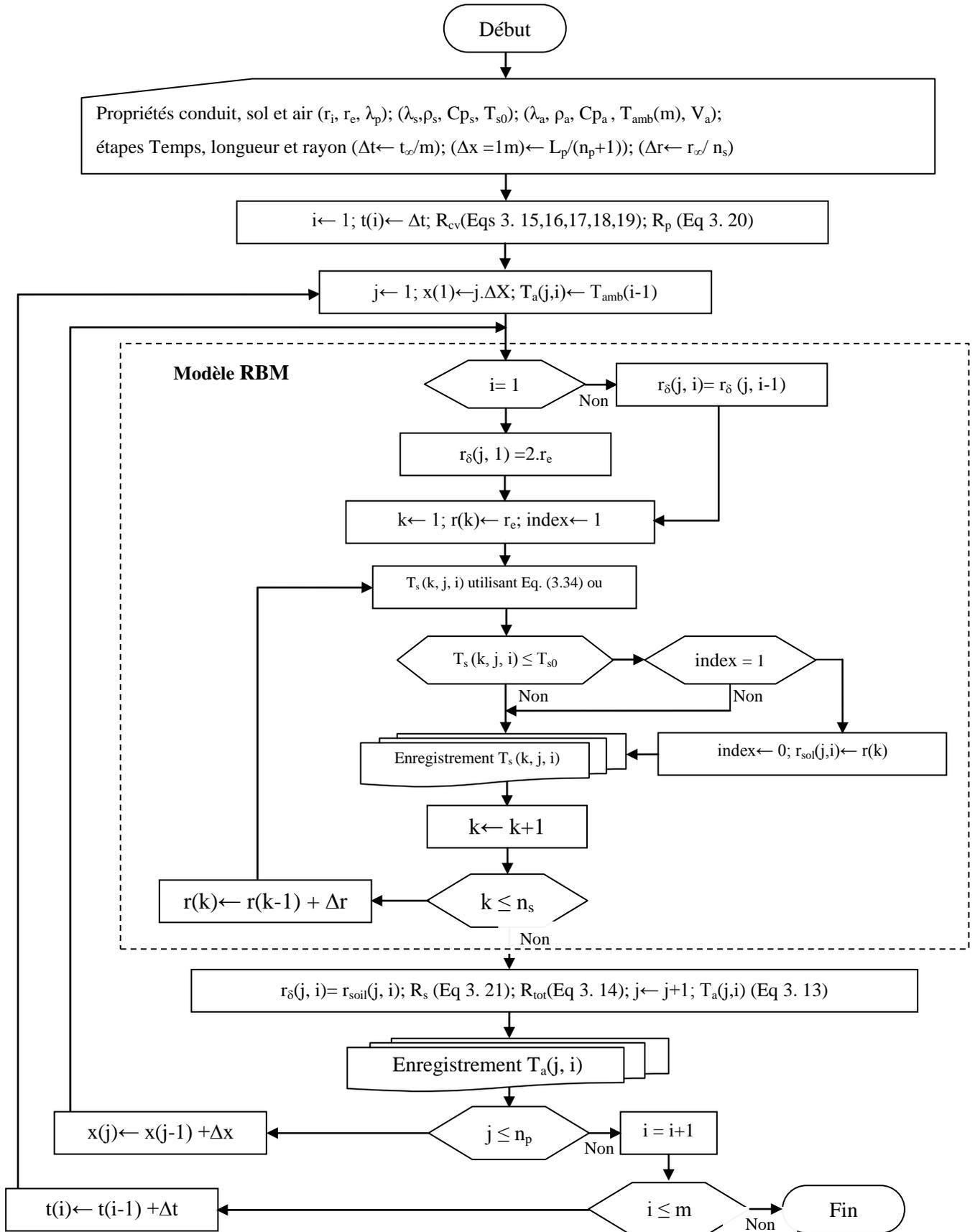


Figure 3.7. Organigramme détaillé du modèle GRBM.

## Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs

### 2.4 Validation expérimentale

Le modèle GRBM a été validé avec les mesures expérimentales effectuées sur le banc d'essai de l'équipe de Moumni installé à l'Université de Biskra [205]. Le chapitre V apportera ultérieurement soin à la mise au point de la méthodologie expérimentale adoptée dans l'analyse du comportement thermique d'ECSHAS. Les paramètres physiques et thermiques des différents matériaux utilisés dans la validation sont répertoriés dans le tableau 3.4.

Le tableau 3.5 montre la comparaison entre les résultats semi-analytiques du modèle GRBM et les données expérimentales pour 6 h de fonctionnement continu. Les paramètres de simulation utilisés dans la validation sont les suivants : la température initiale du sol ( $T_{s0}=22^{\circ}\text{C}$ ), la vitesse de l'air 3.5 m/s et les températures de l'air ambiant à l'entrée de l'échangeur. On constate qu'il existe un bon accord entre les températures de sortie d'air prédites par le modèle GRBM, et les mesures expérimentales avec une erreur relative moyenne de 2.8%.

La figure 3.8 représente l'évolution de la température de l'air le long du conduit par rapport aux résultats expérimentaux obtenus après différentes heures de fonctionnement. On remarque que les courbes du modèle GRBM sont assez cohérentes avec les données expérimentales. Selon cette validation, la distribution radiale de la température du sol environnant le conduit à caractère non stationnaire ainsi que le rayon du sol,  $r_{\delta}$ , sont bien estimés à l'aide du modèle RBM dans le cas d'une température d'entrée d'air variable. D'autre part, le modèle proposé prend en compte tous les paramètres pouvant affecter les performances d'un système d'ECSHAS tels que les propriétés thermo-physiques de l'air et du sol, le débit et la température de l'air, les paramètres géométriques du conduit et la durée de fonctionnement, ce qui rend la conception des échangeurs de chaleur horizontaux peu profonds plus fiable. En outre, l'aspect analytique et la simplicité du modèle GRBM rend la conception thermique d'ECSHAS plus précise avec un temps de calcul considérablement réduit.

**Tableau 3.4.** Propriétés physiques et thermiques (de l'air, PVC et du sol environnant) utilisées dans la validation du modèle GRBM.

	Densité ( $\text{kg/m}^3$ )	Capacité calorifique ( $\text{J/kg }^{\circ}\text{C}$ )	Conductivité thermique ( $\text{W/m }^{\circ}\text{C}$ )
Air	1.225	1005	0.0242
Sol	1800	1340	1.5
PVC	1380	900	1.16

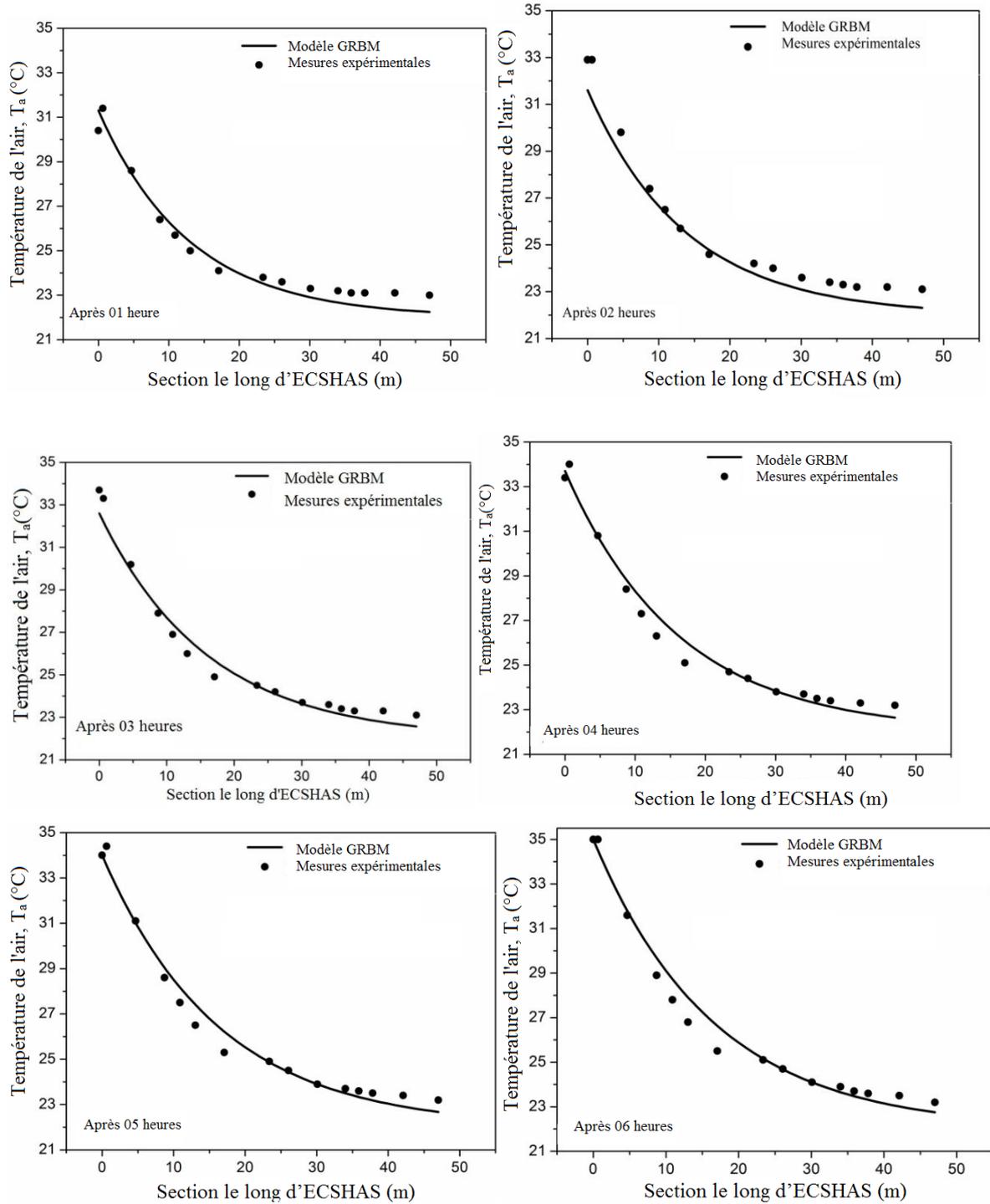
### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECHASs

**Tableau 3.5.** Comparaison des températures de l'air prédites par le modèle GRBM avec les mesures expérimentales.

Temps (HH: MM)	Durée (Hours)	T <sub>entrée</sub> (°C)	T <sub>sortie</sub> (°C)	Resultats du modèle GRBM	Erreur Relative (%)
09: 45	0	30.00	22.95	-	-
10: 00	¼	29.50	22.98	22.18	3.48
10: 15	½	30.30	23.00	22.18	3.57
10: 30	¾	31.30	23.02	22.21	3.52
10: 45	1	30.40	23.05	22.25	3.47
11: 00	1 <sup>¼</sup>	31.40	23.06	22.24	3.56
11: 15	1 <sup>½</sup>	30.50	23.08	22.28	3.47
11: 30	1¾	31.60	23.09	22.26	3.59
11: 45	2	32.90	23.11	22.31	3.46
12: 00	2 <sup>¼</sup>	32.50	23.13	22.46	2.90
12: 15	2 <sup>½</sup>	32.80	23.14	22.53	2.64
12: 30	2¾	32.60	23.15	22.58	2.46
12: 45	3	33.70	23.17	22.57	2.59
13: 00	3 <sup>¼</sup>	34.40	23.17	22.63	2.33
13: 15	3 <sup>½</sup>	34.40	23.19	22.67	2.24
13: 30	3¾	33.70	23.21	22.68	2.28
13: 45	4	33.40	23.21	22.64	2.46
14: 00	4 <sup>¼</sup>	32.40	23.22	22.63	2.54
14: 15	4 <sup>½</sup>	34.50	23.23	22.58	2.80
14: 30	4¾	34.00	23.24	22.70	2.32
14: 45	5	34.00	23.24	22.67	2.45
15: 00	5 <sup>¼</sup>	34.30	23.26	22.68	2.49
15: 15	5 <sup>½</sup>	35.30	23.27	22.70	2.45
15: 30	5¾	35.00	23.28	22.76	2.23
15: 45	6	35.00	23.29	22.75	2.32

Les résultats obtenus, résumés dans le tableau ci-dessus permettent de valider le modèle proposé. Nous présentons dans la figure 3.8, les courbes qui traduisent une comparaison entre la variation de la température de l'air en fonction du temps issues du modèle proposé et ceux obtenus expérimentalement. On remarque une parfaite concordance entre les résultats obtenus. Ceci nous amène à conclure que le modèle proposé permettra de prédire les performances d'un échangeur air / sol en l'absence d'outils expérimentaux.

### Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHAS



**Figure 3.8.** Validation du modèle GRBM avec les résultats expérimentaux réalisés après différentes heures de fonctionnement.

### 3 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté deux nouveaux modèles semi-analytiques nommés RBM et GRBM dont le premier sert à prédire les performances thermiques d'ECSHAS en fonction de la durée de fonctionnement, quant au second est destiné à l'estimation de la température de l'air le long des ECSHASs en mode de fonctionnement continu.

Contrairement aux modèles classiques de la conception thermique des ECSHASs, le modèle RBM tient compte à la fois de la dimension radiale, du flux de chaleur constant à la surface du conduit et de la variation du rayon du sol avec le temps d'où sa principale application qui consiste à estimer le rayon du sol nécessaire à la conception de l'ECSHAS selon: i) la durée de fonctionnement, ii) la diffusivité thermique du sol, iii) le diamètre du conduit et iv) la température de l'air.

Le modèle RBM a été vérifié par comparaison à plusieurs résultats de la littérature. Il s'avère que le nouveau modèle est plus crédible, en particulier pour les valeurs du rayon du sol supérieur à celui du conduit. Ainsi, le modèle RBM peut être considéré comme le premier de son genre fournissant une expression permettant d'estimer le rayon du sol (épaisseur) en fonction de tous les paramètres sus-cités ; rendant ainsi plus fiable la conception des échangeurs de chaleur géothermiques peu profonds. Par ailleurs, l'aspect analytique et la simplicité du modèle actuel rendent également la conception thermique des ECSHASs plus précise avec un temps de calcul considérablement réduit. Ces propriétés confèrent à l'image une grande partie de sa valeur conceptuelle.

A l'égard du modèle GRBM, la conception thermique des ECSHASs réfère à une approche mathématique qui s'inscrit dans le cadre de la généralisation du modèle RBM. L'élaboration du modèle du GRBM comporte trois étapes essentielles : i) la subdivision du conduit en plusieurs couches; ii) l'estimation de la température du sol perturbé qui entoure la zone examinée en utilisant le modèle RBM; iii) la prise en compte des propriétés du sol comme constantes pour toute la période en cours de temps de calcul (température du sol et rayon du sol) estimée précédemment pour calculer la température de l'air à la sortie de la couche examinée.

### **Chapitre 3. Modélisation mathématique des ECSHASs**

Dans un second temps, Il a été démontré qu'il existe une bonne concordance entre les résultats du modèle GRBM et les températures mesurées avec une erreur relative maximale de 3.6 %. Par cette validation, le modèle du GRBM peut être considéré comme le premier du genre à concevoir un ECSHAS d'une manière simple et précise avec un temps de calcul considérablement réduit. Il est à noter que les deux modèles présentés en supra ont fait l'objet de publications [1, 2].

Somme toute, le prochain chapitre s'intéressera notamment à la mise en œuvre de l'application des modèles RBM et GRBM en vertu du contexte conceptuel et l'intégration des ECSHASs avec les diverses technologies de refroidissement.

## **CHAPITRE 4. DIMENSIONNEMENT DES AÉRO-REFROIDISSEURS GÉOTHERMAUX : APPLICATION DES MODÈLES PROPOSÉS**

Après avoir publié les première et deuxième parties sur l'approche des nouveaux modèles semi-analytiques RBM et GRBM pour la conception des échangeurs de chaleur Air-Sol, il était nécessaire de mettre au point la manière d'appliquer ces modèles dans des cas réels sous les conditions climatiques de la région de Biskra. À cet égard, nous avons développé ce chapitre complémentaire qui permet d'appréhender davantage l'application des modèles RBM et GRBM sous un angle conceptuel et dans une perspective innovante.

### **Etat de l'art**

En tant que technologies économes en énergie, l'ECSHAS peut être intégré à divers systèmes de refroidissement et de chauffage telles que la technologie de refroidissement par évaporation (se référant principalement à la tour de refroidissement), les capteurs solaires thermiques, la technologie de refroidissement par rayonnement nocturne, etc.

Entre autre, le problème principal de telle installation, dans les régions chaudes, réside à leur sensibilité aux conditions météorologiques pouvant dégrader considérablement leurs performances thermiques, de même provoquer un dysfonctionnement de l'installation [206].

Outre, la revue de la littérature a montré que les températures-limites de fonctionnement des tours de refroidissement sèches ne dépassent pas 34°C [207] et les limites de fonctionnement des systèmes de réfrigération à compression de vapeur dépendent en grande partie de la température de l'air ambiant, comprise entre 46 à 50°C [208, 209]. Mais en réalité, la température de l'air ambiant peut dépasser ces limites en été atteignant 57°C dans certaines régions chaudes [210]. Cette situation nécessite de prévoir une source de liquide de refroidissement auxiliaire assurant des températures de l'air inférieures aux limites de fonctionnement.

#### **Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés**

L'étude de la littérature récente a révélé que les auteurs connectent généralement le système de chauffage des pompes à chaleur au système géothermique à eau pour améliorer ses performances [211-216]. Peu de recherches ont utilisé cette combinaison pour améliorer les performances du système de refroidissement des pompes à chaleur. De plus, le couplage des systèmes géothermiques à air aux pompes à chaleur reste relativement inexploité [106, 217-219].

Parmi les solutions techniques récentes améliorant les performances des systèmes de refroidissement conventionnels et solaires, Rouag et al. [217] ont proposé de remplacer temporairement la tour de refroidissement sèche par un échangeur géothermal eau-sol, EWHE, uniquement pendant les pics de température ambiante, afin d'éviter tout dysfonctionnement du système de refroidissement. Cependant, les auteurs ont indiqué que le fonctionnement continu d'EWHE entraînait une saturation du sol et pouvait réduire les performances d'EWHE en cas d'exploitation prolongée voire longue durée. Ounis et al. [218] ont utilisé l'eau condensée de l'évaporateur dans les systèmes de climatisation classiques pour refroidir le condenseur à l'aide d'un accessoire de grille humidifié. Cette idée peut diminuer la consommation d'énergie en améliorant les conditions de fonctionnement du condenseur.

Rouag et al. [219] Rouag et al. ont proposé en 2014 un brevet associant un échangeur géothermal air-sol (ECSHAS) avec des échangeurs de chaleur à tubes à ailettes (condenseur, tour de refroidissement sèche...). Le principe de cette solution technique est d'utiliser un mélangeur d'air pour coupler l'ECSHAS avec la batterie à ailettes. Le mélangeur d'air et d'ECSHAS présente (Géothermal Air Cooler) qui vise à augmenter la température limite de fonctionnement du condenseur (ou la tour de refroidissement) pendant les pics de températures caniculaires. Cette solution innovante a été enregistrée comme un brevet d'invention et une publication [3, 217]. En 2016, Soni et al. [106] ont utilisé la même solution pour réduire la consommation électrique d'un climatiseur conventionnel en le couplant à un système d'ECSHAS selon trois agencements différents.

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés

Ainsi, nous avons proposé et étudié un système supplémentaire basé sur un échangeur géothermal air/sol. Dans cette optique, nous nous sommes attachés à l'étude du nouveau Aéro-refroidisseur géothermal GAC, en proposant notamment de mettre en exergue l'emploi approprié des deux modèles semi-analytiques RBM et GRBM dans un cadre original de dimensionnement d'ECSHAS, ainsi de circonscrire succinctement le domaine de l'applicabilité du GAC dans la région de Biskra.

### 1 Description du système

La figure 4.1 représente un condenseur (ou une tour de refroidissement sèche) lié à une source géothermale à air. Elle résume l'utilisation de la géothermie peu profonde pour améliorer le fonctionnement des échangeurs de chaleur à air, il s'agit d'un Aéro-refroidisseur géothermal (GAC).

Cette figure montre un condenseur ou une tour de refroidissement sèche (13), un ventilateur d'extraction (4), échangeur à air de type batterie à ailettes (14), une grille (15), d'entrée d'air ambiant (1), tuyau flexible (8) et un raccord de liaison (9) du condenseur (ou de la tour de refroidissement sèche) avec l'échangeur géothermal air-sol (6) qui comporte un ventilateur d'extraction (5) avec un filtre à air (11) et un diffuseur d'air (10). On peut aussi utiliser le mélangeur d'air (7) pour mélanger l'air géothermal frais (2) avec l'air ambiant (1) avant de l'injecter dans la batterie sous forme d'un mélange d'air (3). L'air de sortie (12) est le mélange d'air (3) après avoir traversé la batterie à ailettes (14).

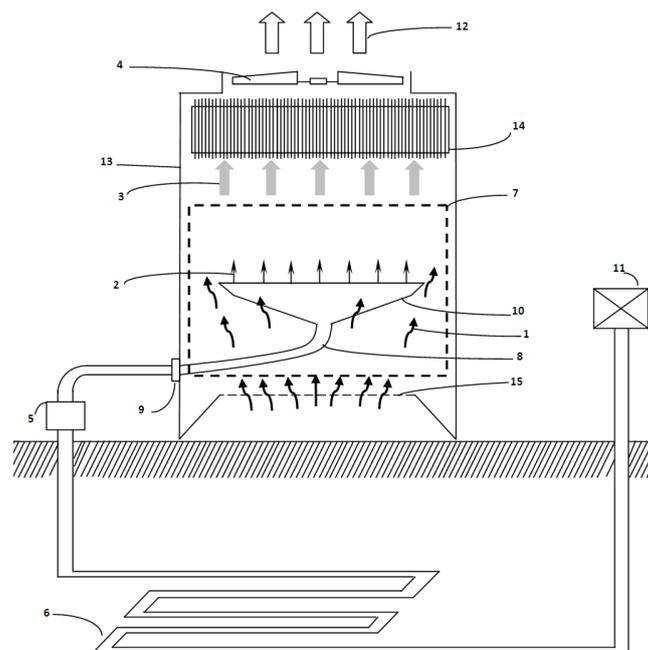


Figure 4.1. Schéma du nouveau Aéro-Refroidisseur Géothermal (GAC)[3].

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés

### 2 Formulation mathématique

#### 2.1 Paramètres du mélangeur d'air

La figure 4.2 présente un schéma du mélangeur d'air du GAC avec :

- Deux entrées : l'indice (1) pour l'air ambiant chaud et l'indice (2) pour l'air géothermal frais ;
- Une seule sortie, l'indice (3), qui correspond au mélange de (1) et (2) après le passage à travers le mélangeur.

Selon le premier principe de la thermodynamique pour un système à N entrées et P sorties on a l'équation (4.1).

$$\sum_{\text{sortie } j} (H_j + e_{cj} + e_{pj}) \dot{m}_j - \sum_{\text{entrée } i} (H_i + e_{ci} + e_{pi}) \dot{m}_i = P_u + P_{th} \quad (4.1)$$

Dans le cas d'un échangeur de chaleur  $P_u = 0$  et  $P_{th} = 0$ , donc l'équation (4.1) sera

$$\sum_{\text{sortie } j} (H_j + e_{cj} + e_{pj}) \dot{m}_j - \sum_{\text{entrée } i} (H_i + e_{ci} + e_{pi}) \dot{m}_i = 0 \quad (4.2)$$

L'équation (4.2) peut être écrite comme suit:

$$\dot{m}_3 \left( Cp_3 T_3 + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m}_1 \left( Cp_1 T_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) - \dot{m}_2 \left( Cp_2 T_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) = 0 \quad (4.3)$$

Généralement on peut négliger l'énergie potentielle  $e_p$  puisqu'elle est très petite par rapport aux H et  $e_c$ , donc l'équation (4.3) devient :

$$\dot{m}_3 \left( Cp_3 T_3 + \frac{V_3^2}{2} \right) - \dot{m}_1 \left( Cp_1 T_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) - \dot{m}_2 \left( Cp_2 T_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) = 0 \quad (4.4)$$

À partir de l'équation (4.4) on peut calculer la température du mélange T3. Cette équation nous permettra de calculer le débit massique de l'air frais  $\dot{m}_2$  nécessaire pour diminuer la température du mélange au-dessous de la température-limite de fonctionnement du condenseur (tour de refroidissement sèche).

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés

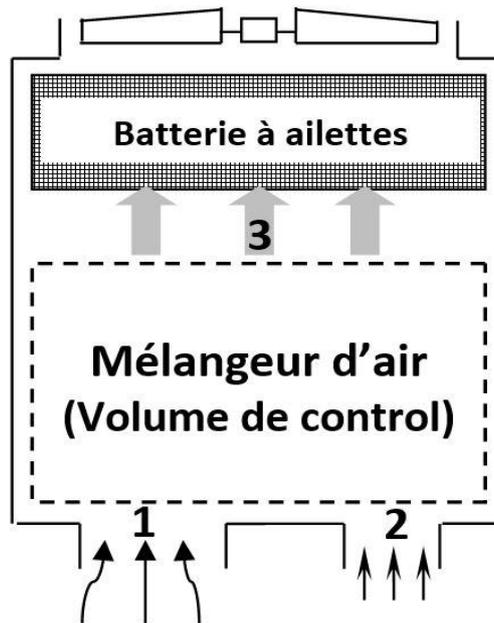


Figure 4.2. Schéma du mélangeur d'air du GAC[3].

### 3 Etude de cas d'application de l'aéro-refroidisseur géothermal à la région de Biskra

Pour tester l'applicabilité du GAC dans la région de Biskra, nous donnons dans cette section un exemple de dimensionnement d'un GAC couplé avec une tour de refroidissement sèche dont les caractéristiques techniques sont disponibles dans la littérature [220]. Le dimensionnement a été effectué en appliquant la température la plus élevée au monde ( $57^{\circ}\text{C}$ ) [210].

La tour de refroidissement a été réalisée par Citherlet et al. [220] avec une batterie à ailettes de 2 m de longueur et de 1 m de largeur où la surface d'échange totale est de l'ordre de  $270\text{ m}^2$ , le débit massique de la tour est de  $4.11\text{ kg/s}$ .

#### 3.1 Calcul et dimensionnement thermique de l'ECSHAS

##### 3.1.1 Hypothèses

Comme mentionné auparavant, et puisque l'ECSHAS fonctionne seulement pendant les températures caniculaires, l'ECSHAS de la solution proposée ne fonctionnera pas pour une longue durée ( $< 6$  heures). Pour cela, le régime considéré est permanent, (ii) le sol autour l'ECSHAS est homogène, (iii) la conductivité du sol est constante, (iv) les propriétés du sol sont iso-tropiques et il y a un contact parfait entre le sol et le tube, et (v) la conduction longitudinale est négligeable.

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermiques : Application des modèles proposés

### 3.1.2 Calcul du rayon de sol

Dans cette section, un exemple d'application du modèle RBM au sol de la région de Biskra (sud de l'Algérie) ( $34^{\circ} 47'N - 005^{\circ} 43'E$ ) est utilisé pour calculer le rayon du sol en fonction de la durée de fonctionnement de l'ECSHAS. Le tableau 4.1 présente les propriétés thermo-physiques du sol et les paramètres d'entrée utilisés dans l'application.

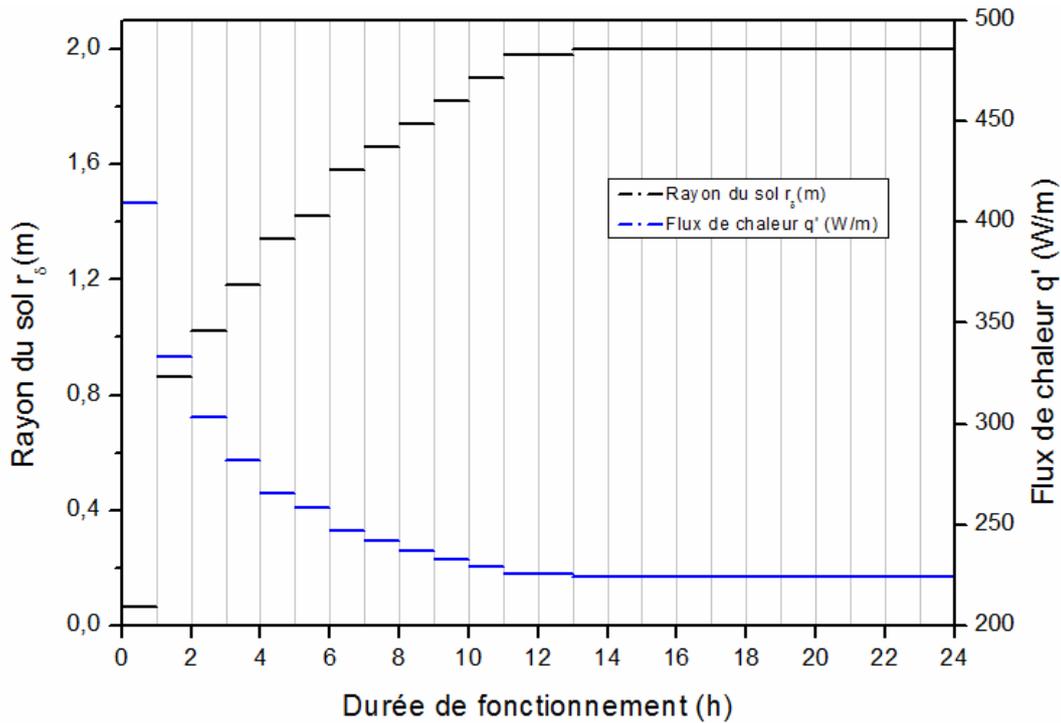
Selon l'équation (3.10), la performance de l'ECSHAS est fortement affectée par la température ambiante qui a été considérée dans nos travaux comme la température de l'air en entrée  $T_1$ . Pour cela, il est recommandé de tester l'ECSHAS dans des conditions de fonctionnement extrêmes afin de garantir une conception adéquate. À cette fin, dans ce cas d'étude, la prévision du niveau maximal de détérioration de la performance thermique est réalisée en appliquant la température la plus élevée au monde enregistrée ( $T_1 = 57^{\circ}C$  [210]) trouvée dans la littérature.

La Figure 4.3 illustre à la fois les valeurs du rayon du sol,  $r_{\delta}$ , et du flux de chaleur,  $q'$ , calculées par le modèle RBM en fonction de la durée de fonctionnement. Le rayon du sol au bout duquel l'influence thermique est observée dépend proportionnellement de la durée de fonctionnement du système d'ECSHAS. L'augmentation du rayon du sol entraîne l'augmentation de la résistance thermique du sol, et donc la diminution du flux thermique transféré au sol. Conséquemment, la performance du système d'ECSHAS se détériore en raison de la saturation du sol entourant le conduit en fonctionnement continu. De plus, l'utilisation de conditions transitoires à flux de chaleur constant (pour chaque pas de temps) surestime la longueur requise du conduit, ce qui peut garantir le confort thermique en fonctionnement estival continu. En outre, les valeurs de rayon du sol illustrées à la figure 4.3 reflètent à la fois la distance horizontale entre les conduits (distance non influençable) dans le cas d'un échangeur air/sol en forme de serpentins ainsi la distance verticale dans le cas de configuration multicouches d'ECSHASs.

**Tableau 4.1.** Paramètres d'entrée utilisés dans l'application d'ECSHAS dans la région de Biskra (Algérie) [2].

Paramètres du sol	Conductivité thermique du sol ( $W/m^{\circ}C$ ) [205]	2.5
	Diffusivité thermique du sol ( $m^2/s$ ) [205]	$2.7 \times 10^{-6}$
	Température initiale du sol ( $^{\circ}C$ )	20
Paramètres du conduit	Diamètre du conduit (m)	0.3
Température ambiante	Température de l'air à l'entrée ( $^{\circ}C$ )	57

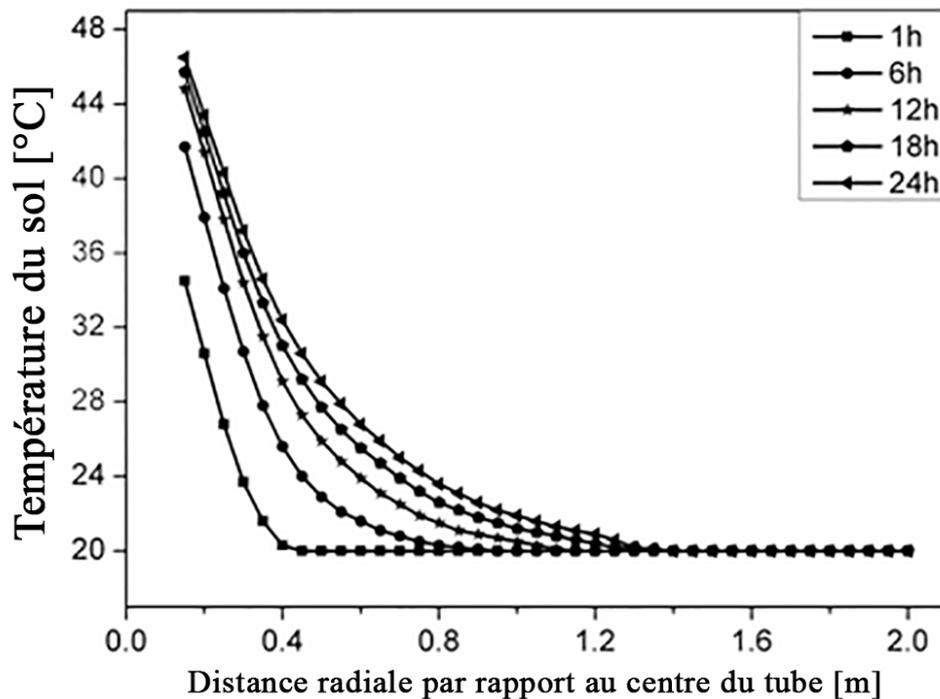
## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés



**Figure 4.3.** Rayon du sol  $r_s$  utilisé dans le calcul du flux thermique [2].

La figure 4.4 présente la distribution de la température du sol à l'entrée du conduit dans un plan horizontal à 3 m de profondeur. Comme le montre la figure 4.4, à mesure que la durée de fonctionnement augmente, la pente de la température du sol augmente. Par conséquent, une détérioration maximale des performances thermiques est observée après un fonctionnement continu de l'ECSHAS pendant 24 heures. Ceci suggère que la pénétration de la chaleur dans le sol est principalement influencée par la durée du fonctionnement continu. La figure 4.4 permet de conclure que le modèle RBM peut également être utilisé pour prédire la détérioration thermique de la performance thermique de l'ECSHAS en fonction de la durée du fonctionnement. Ces résultats rendent la conception thermique des ECSHASs plus fiable, car elle prend en compte tous les paramètres pouvant affecter les performances du système (équation 3.10 et figure 4.4). Selon la figure 4.4 et pour une durée de fonctionnement quotidienne maximale ne dépassant pas 6 heures, la propagation de chaleur peut atteindre 0.55 m de la surface du conduit. Par conséquent, pour assurer un refroidissement continu de l'air, la distance minimale entre les tubes est de 1.1 m.

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés

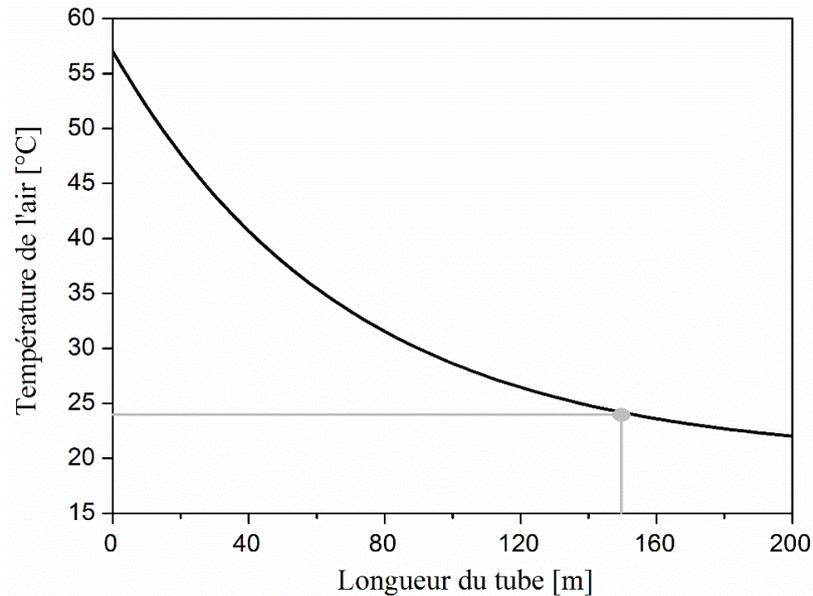


**Figure 4.4.** Température radiale du sol à l'entrée de l'ECSHAS pour différentes durées de fonctionnement continu[2].

### 3.1.3 Calcul de la longueur de l'échangeur par GRBM

Pour répondre aux exigences de refroidissement, un système de configurations multicouches composées de deux échangeurs géothermaux identiques superposés à 3 et 4,1 m de profondeur. La figure 4.5 présente les résultats de dimensionnement d'un seul échangeur géothermal assurant une température de sortie d'air  $T_2$  de l'ordre de 24°C (voir la figure 4.5). L'ECSHAS est un tube en serpentin de 150 m de longueur et 0.3 m de diamètre, enterré à 3 m de profondeur [205] (profondeur optimale choisie par Moumami et al. pour la région de Biskra). Tous les détails, données et résultats, de l'échangeur géothermal, tour de refroidissement sèche et le mélangeur d'air sont rassemblés dans le Tableau 4.2 ci-dessous. Nous pouvons voir clairement que le GAC est capable de réduire la température du mélange d'air d'environ de 14°C en comparaison avec la température ambiante  $T_1$ . La température à l'entrée de la tour de refroidissement,  $T_3$ , est presque égale à 43°C, qui est généralement dans les limites de fonctionnement des systèmes frigorifiques conventionnels.

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés



**Figure 4.4** Résultats de dimensionnement l'ECSHAS.

**Tableau 4.2.** Exemple d'application d'un Aéro-refroidisseur géothermal (GAC): détails des ECSHAS, tour de refroidissement sèche et mélangeur d'air.

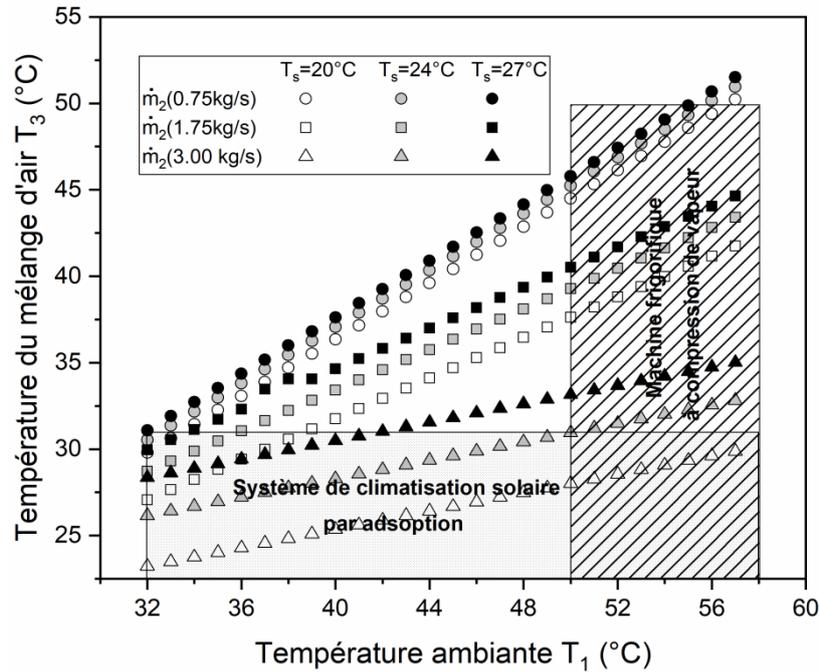
Elément	Spécifications	
ECSHAS	Nombre des ECSHASs	2
	Matériau du conduit	PVC
	Diamètre du conduit (m)	0.3
	longueur du conduit (m)	150
	Conductivité Thermique du conduit (W/m.K)	0.16
	Distance entre les ECSHASs (m)	1.1
	Vitesse de l'air (m/s)	10
	Débit volumique de l'air pour chaque ECSHAS (m <sup>3</sup> /h)	2544
	Débit massique de l'air de chaque ECSHAS (Kg/s)	1.69
	Profondeurs (m)	3 et 4.1
	Conductivité thermique du sol (W/m.K)	2.5
	Température du sol à 3 m de profondeur (°C)	20
Tour de refroidissement sèche [220]	longueur (m)	2
	Largeur (m)	1
	Surface d'échange totale (m <sup>2</sup> )	270
	Débit volumique de l'air (m <sup>3</sup> /h)	12900
	Débit massique de l'air (Kg/s)	4.11
Mélangeur d'air	Température ambiante T <sub>1</sub> (°C)	57
	Température de l'air géothermale T <sub>2</sub> (°C)	24
	Température du mélange d'air T <sub>3</sub> (°C)	43.4

#### Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés

La figure 4.6 montre l'évolution de la température du mélange d'air  $T_3$  en fonction de l'évolution de la température ambiante  $T_1$ . Le calcul a été effectué en appliquant les paramètres mentionnés dans le tableau 4.2 pour trois débits d'air différents dans chaque ECSHAS (0.37, 0.85 et 1.5 kg/s) et trois températures de sol différentes (20, 24, 27°C). Comme on peut le voir sur la figure 4.6, généralement la température du mélange d'air  $T_3$  augmente avec l'augmentation de la température ambiante  $T_1$  et du débit massique d'air  $m_1$  et inversement pour tous les cas étudiés. Comme on peut distinguer deux cas majeurs d'évolution de  $T_3$ : i) lorsque le débit chaud ( $m_1$ ) est beaucoup plus élevé que le débit frais ( $m_2$ ) ou égale, le débit massique d'air est le facteur dominant dans la détermination de la température de l'air du mélange ( $T_3$ ) malgré le fait que la température de l'air frais  $T_2$  soit si basse; ii) Cependant, dans le cas contraire, la température de l'air frais ( $T_2$ ) joue un rôle clé dans l'évolution de la température du mélange. Donc, il est à noter que la loi de mélange de gaz régit implicitement la température du mélange d'air.

Selon les résultats obtenus à la figure 4.6, une zone d'applicabilité peut être définie pour définir la plage de fonctionnement du refroidisseur à adsorption solaire et des systèmes de réfrigération classiques à compression de vapeur. Comme indiqué précédemment, les températures limites de fonctionnement sont respectivement de 32 et 50°C pour les refroidisseurs à adsorption solaire et les systèmes de réfrigération à compression de vapeur classiques [208, 209, 220]. Les résultats indiquent que le CAG peut réduire la température de l'air à l'entrée de la tour de refroidissement (ou du condenseur) en dessous de la température limite de fonctionnement, quelle que soit la température ambiante dans les deux systèmes. En outre, le GAC affiche des performances élevées à des débits massiques d'air frais faibles. La principale conclusion de la figure 4.6 est que le CAG présenté à l'image de ce chapitre peut rendre les systèmes de réfrigération par adsorption solaire applicables dans les régions chaudes et arides voire la région de Biskra.

## Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés



**Figure 4.5.** Effet de la température ambiante  $T_1$  sur la température du mélange d'air  $T_3$  pour différents débits massiques d'air.

### 4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est double : (i) la présentation d'un nouveau Aéro-refroidisseur géothermal GAC (Géothermal-Air-Cooler) et de tester son applicabilité dans la région de Biskra ; (ii) la mise en œuvre des modèles RBM et GRBM pour dimensionner les éléments du GAC.

Le nouveau Aéro-refroidisseur géothermal GAC présente une solution technique perfectionnée principalement pour résoudre le problème de dysfonctionnement des condenseurs, tour de refroidissement sèche ou d'autres échangeurs de chaleur de refroidissement à air lors de forts pics de températures caniculaires dans les régions chaudes. L'idée est d'utiliser un mélangeur d'air pour coupler un ECSHAS avec un échangeur de chaleur à tubes à ailettes (condenseur à air, tour de refroidissement sèche...). Le mélangeur d'air et l'ECSHAS présentent l'Aéro-refroidisseur géothermal (GAC).

Compte tenu de notre objectif, le cas d'étude relatif à la région de Biskra nous a semblé approprié en vue d'explicitier la démarche des modèles RBM évoqués plus haut dans la conception du GAC couplé à une tour de refroidissement obtenue de la littérature. Le dimensionnement a été réalisé en appliquant une température ambiante extrême ( $57^\circ\text{C}$ ).

#### **Chapitre 4. Dimensionnement des aéro-refroidisseurs géothermaux : Application des modèles proposés**

Quant au chapitre des résultats semi-analytiques obtenus, le CAG est en mesure de réduire la température du mélange d'air à environ 14°C par rapport à la température ambiante. Il peut dès lors améliorer les limites de fonctionnement des systèmes de climatisation conventionnels à 57°C. Le CAG conçu peut également assurer le bon fonctionnement du refroidisseur à adsorption solaire en modifiant le débit massique de l'air dans l'ECSHAS. Dans le cas de six (06) heures de fonctionnement continu, le rayon du sol peut atteindre 0.55 m de la surface du conduit de l'ECSHAS. Ainsi, le modèle RBM peut être utilisé pour prédire la détérioration thermique des performances thermiques d'ECSHAS en fonction de la durée de fonctionnement. Cette conception a fourni un cas d'étude d'autant plus intéressant qu'il a fait l'objet de maints travaux antérieurs " RBM et GRBM ".

## PARTIE III : ANALYSE DE DONNEES EXPERIMENTALES

*« A notre sens, après avoir touché conjointement l'interdisciplinarité entre la solution analytique et la simulation numérique, le travail expérimental s'avère alors nécessaire pour mettre en relief ce qui est déjà passé en revue. Ainsi, le chapitre 5 s'emploiera à la description du banc expérimental pilote installé à l'université de Biskra, la caractérisation du sol accompagnée par une analyse climatologique appropriée à la région de Biskra. Quant à la matière du chapitre six est tirée essentiellement de l'analyse spatio-temporelle de la saturation du sol à partir des mesures effectuées sur l'ECSHAS pilote. »*

# CHAPITRE 5. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL DE L'UNIVERSITE DE BISKRA

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description générale du dispositif expérimental implanté dans le site de l'université de Biskra, ainsi que les caractéristiques principales et les spécifications techniques des équipements de mesure utilisés dans cette étude. En complément, nous avons procédé à la caractérisation du sol et l'analyse climatologique de la région de Biskra.

## 1 Méthode expérimentale

### 1.1 Description de la configuration expérimentale de l'ECSHAS

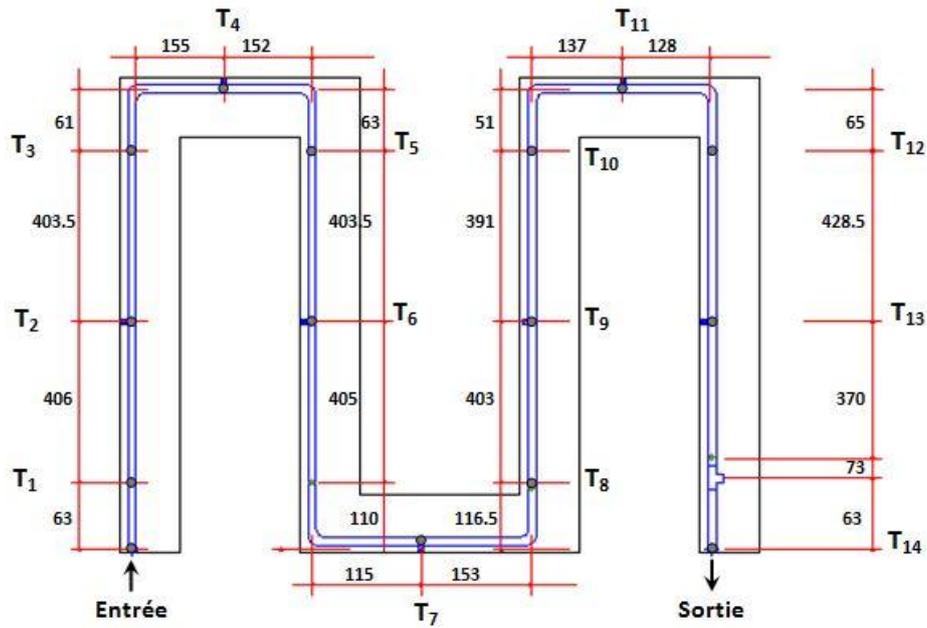
Les photos de l'ECSHAS expérimental installé à l'Université de Biskra sont présentées sur la figure 5.1. La configuration expérimentale de l'ECSHAS est une forme de serpentín horizontal du conduit cylindrique en PVC de 110 mm de diamètre intérieur et de 47 m de longueur. L'ensemble est enterré à une profondeur de 3 m sous une pente de 2% pour l'évacuation de l'eau issue à la condensation éventuelle de l'air. Les sections horizontales en serpentín du conduit sont espacées d'une distance d'environ 2 m. La sortie du conduit horizontal est reliée à un extracteur d'air à débit variable par un conduit vertical.

Quatorze thermocouples ont été utilisés pour mesurer la température de l'air le long du conduit horizontal ( $T_{ent}$ ,  $T_1$ ,  $T_2, \dots, T_{14}$ ). Ces thermocouples sont insérés à différentes positions le long de la longueur horizontale du conduit (figure 5.2). Les principales caractéristiques des composants d'ECSHAS et les spécifications techniques des équipements de mesure sont résumées dans le tableau 5.1.



**Figure 5.1.** Photos de l'installation expérimentale de l'ECSHAS à l'Université de Biskra, sud de l'Algérie 34 ° 47'N-005 ° 43'E : (a) un trou en forme de serpentín; (b) Conduit horizontal en PVC enterré avec thermocouples.

## Chapitre 5. Description du banc d'essai expérimental (ECSHAS) de l'université de Biskra



**Figure 5.2.** Position des thermocouples mesurant les températures d'écoulement d'air (Tent, T1, T2,.....T14) avec les distances suivantes (depuis l'entrée EAHE) : 63, 469, 872, 1089,1304, 1707, 2337, 2607, 3010, 3400, 3589, 3782, 4210, 4700 cm.

**Tableau 5.61.** Caractéristiques principales et spécifications techniques des équipements de mesure utilisés dans la configuration expérimentale d'ECSHAS.

Element	Spécifications techniques	
ECSHAS	Configuration : forme serpentine horizontale (boucle ouverte ECSHAS)	
	Matériau du conduit : PVC (chlorure de polyvinyle)	Densité : $1380 \text{ kg/m}^3$ Capacité thermique spécifique : $900 \text{ J/kg. } ^\circ\text{C}$ Conductivité thermique : $1.16 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$
	Longueur du tuyau horizontal enterré : 47m	
	Diamètre intérieur : 0.11 m	
	Epaisseur du tuyau : 0.005m	
	Profondeur de tuyauterie : 3m	
	Distance entre axe : 2 m	
Ventilateur pour extraction d'air	Voltage: 230 V Puissance: 120 W	

## Chapitre 5. Description du banc d'essai expérimental (ECSHAS) de l'université de Biskra

	Débit volumétrique: 1.100m <sup>3</sup> /h
	Modèle : pyranomètre à main 4890. 20
	Marque: Frederiksen
	Alimentation: 9V (Bloc batterie)
	Plage de mesure : 0-1000 W /m <sup>2</sup>
	Résolution : 1 W/m <sup>2</sup>
	Précision : +/-5%
	Modèle : CP 300
Capteur de pression pour mesurer la perte de pression	Marque : KIMO
	Plage de mesure : -100/+100 Pa
	Précision: ±0, 5% = ±1Pa
	Marque : KIMO
	Modèle : HD 100
	Plage de mesure: 10-95% RH
Hygro-thermomètre pour mesurer l'humidité relative de l'air et la température de l'air à l'entrée / sortie de l'ECSHAS	Humidité
	Résolution : 0. 1%
	Précision >= 70% RH ± (3% Lecture+1% RH).
	< 70% RH ± 3% RH.
	Plage de mesure : 0 °C à 50 °C/32 °F à 122 °F
	Température
	Résolution : 0. 1°C
	Précision : ± 0. 8 °C / 1. 5°F
	Marque: KIMO
	Modèle: LV 110
Thermo-anémomètre pour mesurer la vitesse de l'air à l'entrée / la sortie de l'ECSHAS	Plage de mesure : 0 à 35m /s
	0. 3à 3m/s : ± 3%. 1m/s (0. 01m /s de résolution)
	Précision
	3. 1à 35m/s : ±1%. 0. 3m /s (0. 1m/s de résolution)

## Chapitre 5. Description du banc d'essai expérimental (ECSHAS) de l'université de Biskra

---

Thermocouple (PT100) pour mesurer la température du flux d'air le long du tuyau horizontal		Résistance: 100 $\Omega$
Wattmètre pour mesurer la consommation électrique instantanée	Plage de mesure	2000W $\pm$ (1%+1d) (1W de résolution) 6000W $\pm$ (1%+1d) (10W de résolution)

---

### 1.2 Mesures expérimentales

Les expériences ont été réalisées à l'université de Biskra le 2 mai 2013 à partir de 09: 45 à 15:45. Les températures sont mesurées toutes les 15 minutes pour une vitesse d'écoulement d'air constante de 3.5 m/s. Les mesures expérimentales des températures de l'air obtenues à partir des quatorze thermocouples (figure 5.2) sont présentées dans le tableau 5.3.

## Chapitre 5. Description du banc d'essai expérimental (ECSHAS) de l'université de Biskra

**Tableau 5.2.** Température de l'air mesurée à différentes longueurs horizontal d'ECSHAS 02/05/2013.

		Distance de l'entrée de l'ECSHAS (m)														
		0.00	0.63	4.69	8.720	10.89	13.04	17.07	23.37	26.07	30.10	34.00	35.89	37.82	42.10	47.00
Temps	Durée	Température de l'air (°C)														
HH: MM	Heures	Entrée	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>13</sub>	T <sub>14</sub>
09: 45	0	30	28.3	25.9	24.4	24.1	23.8	23.2	23	23	22.8	22.9	22.9	22.9	23	22.9
10: 00	¼	29.5	29.1	26.9	25.3	24.7	24.3	23.6	23.4	23.2	23	23	23	22.9	23	22.9
10: 15	½	30.3	29.9	27.5	25.7	25.1	24.6	23.8	23.5	23.4	23.1	23.1	23	23	23.1	22.9
10: 30	¾	31.3	30.7	28.1	26.1	25.4	24.8	24	23.7	23.5	23.2	23.2	23.1	23	23.1	23
10: 45	1	30.4	31.4	28.6	26.4	25.7	25	24.1	23.8	23.6	23.3	23.2	23.1	23.1	23.1	23
11: 00	1 <sup>¼</sup>	31.4	32	29	26.7	26	25.2	24.3	23.9	23.7	23.3	23.3	23.2	23.1	23.1	23
11: 15	1 <sup>½</sup>	30.5	32.3	29.3	27	26.1	25.4	24.4	24.1	23.8	23.4	23.3	23.2	23.1	23.2	23
11: 30	1¾	31.6	32.7	29.5	27.2	26.3	25.5	24.5	24.1	23.9	23.5	23.4	23.2	23.2	23.2	23
11: 45	2	32.9	32.9	29.8	27.4	26.5	25.7	24.6	24.2	24	23.6	23.4	23.3	23.2	23.2	23.1
12: 00	2 <sup>¼</sup>	32.5	32.9	29.9	27.5	26.6	25.8	24.7	24.3	24	23.6	23.5	23.3	23.2	23.2	23.1
12: 15	2 <sup>½</sup>	32.8	33	30	27.6	26.7	25.8	24.7	24.4	24.1	23.6	23.5	23.4	23.3	23.3	23.1
12: 30	2¾	32.6	33.4	30.2	27.7	26.8	25.9	24.8	24.4	24.1	23.7	23.5	23.4	23.3	23.3	23.1
12: 45	3	33.7	33.3	30.2	27.9	26.9	26	24.9	24.5	24.2	23.7	23.6	23.4	23.3	23.3	23.1
13: 00	3 <sup>¼</sup>	34.4	33.9	30.6	28	27	26.1	25	24.6	24.2	23.7	23.6	23.4	23.3	23.3	23.1
13: 15	3 <sup>½</sup>	34.4	33.9	30.6	28.1	27.1	26.2	25	24.6	24.3	23.8	23.6	23.5	23.4	23.3	23.1
13: 30	3¾	33.7	34.2	30.9	28.3	27.3	26.3	25.1	24.7	24.3	23.8	23.7	23.5	23.4	23.3	23.2
13: 45	4	33.4	34	30.8	28.4	27.3	26.3	25.1	24.7	24.4	23.8	23.7	23.5	23.4	23.3	23.2
14: 00	4 <sup>¼</sup>	32.4	34	30.8	28.4	27.3	26.4	25.2	24.8	24.4	23.9	23.7	23.5	23.4	23.4	23.2
14: 15	4 <sup>½</sup>	34.5	34.1	30.9	28.4	27.4	26.4	25.2	24.8	24.4	23.9	23.7	23.6	23.4	23.4	23.2
14: 30	4¾	34	34	30.9	28.5	27.4	26.4	25.2	24.8	24.5	23.9	23.7	23.6	23.5	23.4	23.2
14: 45	5	34	34.4	31.1	28.6	27.5	26.5	25.3	24.9	24.5	23.9	23.7	23.6	23.5	23.4	23.2
15: 00	5 <sup>¼</sup>	34.3	34.5	31.2	28.7	27.6	26.6	25.4	24.9	24.6	24	23.8	23.6	23.5	23.4	23.2
15: 15	5 <sup>½</sup>	35.3	34.6	31.3	28.7	27.6	26.7	25.4	25	24.6	24	23.8	23.6	23.5	23.4	23.2
15: 30	5¾	35	34.7	31.4	28.8	27.8	26.7	25.5	25.0	24.6	24	23.8	23.7	23.5	23.4	23.2
15: 45	6	35	35	31.6	28.9	27.8	26.8	25.5	25.1	24.7	24.1	23.9	23.7	23.6	23.5	23.2

### 1.3 Caractérisation du sol

Afin d'éviter les erreurs de conception causées par les longues durées d'amortissement sur les systèmes géothermiques et qui peuvent avoir de sérieuses répercussions sur les coûts de production de la chaleur/froid. Ainsi, il est nécessaire de prévoir le transport de chaleur souterrain instable aussi précisément que possible. Si des valeurs empiriques ou d'autres données dans la littérature (conductivité thermique, capacité thermique et porosité du sol ainsi que la saturation et la température du sol) ne peuvent pas être utilisées, un test de réponse géothermique, TRG, est fortement recommandé [221]. Une étude récente de Wagner et al. (2013) montre comment les essais de réponse thermique sont influencés par les eaux souterraines, TRGs [222]. Gan et al. ont prouvé que les performances du système d'ECSHAS dépendent fortement des propriétés thermiques et physiques du sol [223]. Dwarka et al. [84] ont souligné que la performance globale du système d'EATHE est affectée par les propriétés thermo-physiques du sol (conductivité thermique et capacité thermique). L'étude paramétrique réalisée par Puri a montré que les profils de température se développaient plus rapidement dans un sol plus humide que dans un sol moins humide [224].

Liu et al ont constaté que la température et le gradient de température jouent un rôle important dans le transport de l'humidité dans le sol poreux [225]. Demir et al. ont constaté que la conductivité thermique du sol dépendait fortement de la teneur en humidité du sol, ce qui affectait les performances de l'échangeur [226]. Par la suite, Ozgener et al. présentent un modèle qui inclue la teneur en humidité et la conductivité thermique du sol pour prédire la variation quotidienne des températures du sol avec la profondeur et le temps [227].

Le cas des sols naturels, un peu moins connu par les thermiciens, on se propose de caractériser et traiter brièvement le sol entourant l'ECSHAS afin d'identifier ces différentes propriétés thermo-physiques (granulométrie, capacité de rétention, taux d'humidité, densité apparente et réelle, conductivité thermique). Pour se faire, différents protocoles expérimentaux sont réalisés sur six (06) échantillons prélevés à la profondeur d'enfouissement de l'échangeur (3m), au niveau des laboratoires du département d'agronomie de l'université de Biskra. Les résultats de l'analyse de caractérisation sont résumés dans le tableau 5.3.

**Tableau 5.3.** Résultats de la caractérisation du sol de Biskra.

Tests-Propriétés	Composition	Valeur	Conclusion
Granulométrie	Sable Grossier	3.2%	Limon argileux
	Sable Fin	13.4%	
	Argile+Limon	83.4%	
Densité	Apparente	0.34gr/cm <sup>3</sup>	Minéraux argileux
	Réelle	2.31gr/cm <sup>3</sup>	
Porosité	/	>40%	Très poreux
Taux d'humidité	/	20%	/
Calcaire	/	42.68%	Fortement calcaire
Conductivité thermique	/	1.5 W/m.K	Elevée

## 2 Données météorologiques

La connaissance des conditions climatiques locales est une condition préalable à l'application réussie du système d'ECSHAS. En météorologie, les principaux éléments caractérisant le climat et la météo sont la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité (humidité et précipitations) et les vents [228, 229]. Ces paramètres présentent les facteurs déterminants pour une conception et une installation d'ECSHAS correctes. Pour cette raison, une enquête sur les conditions climatiques locales de la région de Biskra est effectuée en fonction des paramètres mentionnés ci-dessus. L'analyse est réalisée à partir de la base de données météorologique étalée sur une période de dix ans fournie par l'office national de météorologie (O.N.M). Les conditions climatiques de «Biskra» pour la période 2004-2013 (température extérieure moyenne mensuelle et humidité relative moyenne mensuelle) sont présentées dans les tableaux 5.4, 5.5 respectivement.

### 2.1 La température

Selon le tableau 5.4, on distingue trois étapes d'évolution de la température :

- Une période hivernale (novembre-décembre-janvier-février-mars) où les températures moyennes sont comprises entre 10°C et 18°C.

## Chapitre 5. Description du banc d'essai expérimental (ECSHAS) de l'université de Biskra

- Une période estivale (mai-juin-juillet-août-septembre) : les températures moyennes varient de 25°C à 36°C.
- Avril et octobre sont considérés comme une période de transition où les températures moyennes se situent généralement entre 22°C et 26°C.
- Une valeur stable et stationnaire de la température moyenne annuelle (22°C-23°C).

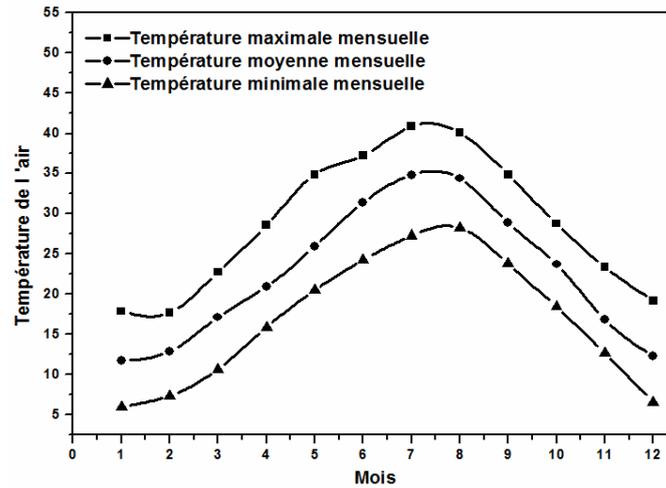
En conclusion, on peut voir qu'une année à Biskra est divisée en deux périodes ; chaud (mai, juin, juillet, août et septembre) et froid (en novembre, décembre, janvier, février et mars) rejoints par deux intervalles chauds (en avril et octobre).

Les températures mensuelles moyennes, maximales et minimales extérieures à Biskra étaient représentées sur la figure 5.3. La température du bulbe sec peut atteindre 41 °C en période estivale, ce qui signifie qu'elle ne descend pas en dessous de 26°C pendant toute la saison de refroidissement.

**Tableau 5.4.** Températures mensuelles moyennes (° C) pour la période 2004-2013.

	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Decembr	Moyenne par année
2004	12.8	14.8	17.3	19.6	23	30.1	33.3	34.7	28.3	24.5	15.5	12.3	22.3
2005	10	10.7	17.8	21.8	27.9	31.7	35.9	33.6	28.5	24	16.7	10.8	22.5
2006	12.2	12	17.7	17	28.4	31.6	34.4	33.8	27.3	24.8	16.9	13	22.4
2007	12.6	15.4	16	21.7	24.7	34	33.6	34.2	29.1	24	16.3	13.4	22.9
2008	12.6	13.7	17.9	22.4	26.5	30.8	36.2	34.3	29.4	22.3	15.5	10.9	22.7
2009	12.4	12	16	18.6	26.2	32	35.6	34.6	27.1	23	17.3	13.6	22.4
2010	12.7	14.5	18.2	21.9	24.2	31	35.1	34.4	28.9	22.5	17	12.8	22.8
2011	12.6	13.4	16	21.7	24.7	29.6	34.7	34.1	30.6	22.4	17.6	11.7	22.4
2012	12.2	10.8	17.1	21.3	26.5	34.2	36.3	35.6	29.5	24.3	17.9	12.9	23.2
2013	7.9	12.1	18.2	22	25.7	29.6	34	35.2	29.8	26	17.3	12.1	22.5
2014	11.7	12.3	16.5	22.4	28	31.1	34.3	34.2	29.3	23.5	17.5	12.2	22.8
<b>Moyenne par mois</b>	11.79	12.88	17.15	20.95	25.98	31.43	34.85	34.43	28.89	23.75	16.86	12.34	

## Chapitre 5. Description du banc d'essai expérimental (ECSHAS) de l'université de Biskra

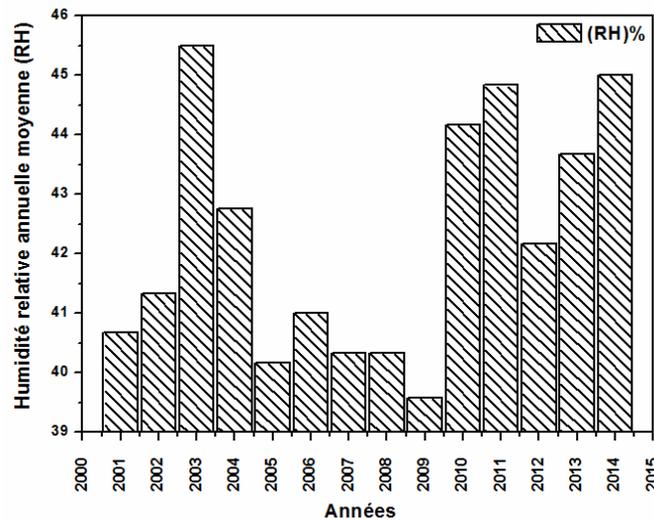


**Figure 5.3.** Température mensuelle maximale, moyenne et minimale dans la région de Biskra (2004-2013).

### 2.2 Humidité relative

**Tableau 5.5.** Moyennes annuelles d'humidité relative (%) pour la période 2001-2014.

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Humidité relative (RH)%	40.67	41.33	45.5	42.75	40.17	41	40.33	40.33	39.58	44.17	44.83	42.17	43.67	45



**Figure 5.4.** Humidité relative annuelle moyenne dans la région de Biskra (2001-2014).

On peut noter d'après le tableau 5.5 et la figure 5.4 que la moyenne annuelle de l'humidité relative est d'environ 39% jusqu'en 2009. Depuis 2010, on note une augmentation de l'humidité relative (RH) due à la présence de trois barrages aux alentours de la région de Biskra.

### 3 Conclusion

Les mesures expérimentales ont été effectuées sur l'ECSHAS horizontal enterré à 3 m, installé à l'université de Biskra, département de génie mécanique (sud de l'Algérie 34 ° 47'N-005 ° 43'E). Sur le plan de la caractérisation physique du sol, les prélèvements ont été réalisés sur l'aire du site d'expérimentation à raison de six (06) échantillons prélevés à 3 mètres. Les résultats obtenus ont montré la nature Limono-argileuse assez conducteur.

Entre autre, l'analyse climatologique dont il vient d'être fait état, permet de conclure que l'application des ECSHASs est plus appropriée à la période estivale (rafraîchissement) quant à la période hivernal (chauffage). Ainsi, dans le chapitre six (06), nous avons pris soin de faire le point sur les aspects essentiels de la saturation du sol tout en les entrelaçant avec l'intégralité des mesures expérimentales effectués sur l'ECSHAS pendant la période de refroidissement.

# CHAPITRE 6. DISCUSSION SUR LE PHENOMENE DE SATURATION DU SOL AUTOUR DES ECSHAS

Dans ce chapitre, le comportement thermique de l'ECSHAS a été stylisé en terme d'efficacité moyenne et du coefficient thermique global horaire afin de mettre en valeur le trait général de la saturation du sol et le déphasage thermique qui forment essentiellement le cœur du comportement thermique de l'ECSHAS. Dans cette direction, une étude paramétrique a été également réalisée pour étudier l'effet des paramètres de conception et de fonctionnement (longueur, débit massique d'air) sur le comportement thermique de l'ECSHAS. Les résultats présentés ci-infra s'inscrivent dans le cadre d'une publication en cours.

## 1 Analyse énergétique de l'ECSHAS

Une bonne connaissance de la thermodynamique, du transfert de chaleur et de la mécanique des fluides est importante pour comprendre les échangeurs de chaleur géothermiques, en particulier les pompes à chaleur géothermiques [4]. L'analyse thermodynamique d'ECSHAS se concentre sur le première et le deuxième principes de la thermodynamique. Le premier principe traite du bilan énergétique d'un système tandis que le deuxième s'appuie sur deux fondamentales grandeurs l'énergie et l'entropie pour une analyse approfondie du fonctionnement du système. La combinaison des deux principes offre ainsi une analyse détaillée sur l'évaluation des performances et l'optimisation du système [230].

Le taux d'échange de chaleur expérimental est calculé par l'équation suivante :

$$Qe_{\text{exp}} = \dot{m}_a C p_a (T_a^{(\text{ent})} - T_a^{(\text{sor})}) \quad (6.1)$$

Pour évaluer les performances de l'ECSHAS, nous utilisons souvent le concept d'efficacité énergétique. Il est défini par le rapport entre le taux d'échange thermique réel  $Qe_{\text{exp}}$  et le taux d'échange thermique maximal théoriquement possible  $Q_{\text{max}}$ , il s'exprime par :

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{Qe_{\text{exp}}}{Q_{\text{max}}} \quad (6.2)$$

$$\text{Ou } Q_{\text{max}} = \dot{m}_a C p_a (T_a^{(\text{ent})} - T_s) \quad (6.3)$$

L'efficacité moyenne,  $\eta_{\text{moy}}$ , pour une période  $t$  de l'ECSHAS peut être calculée par l'équation suivante :

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS

$$\eta_{mean} = \frac{\int_0^t (T_a^{(ent)} - T_a^{(sor)}) dt}{\int_0^t (T_a^{(ent)} - T_s) dt} = \frac{\sum_{k=1}^n (T_a^{(ent)}(k) - T_a^{(sor)}(k))}{\sum_{k=1}^n (T_a^{(ent)}(k) - T_s)} \quad (6.4)$$

Le taux d'échange de chaleur peut s'écrire comme suit[231]:

$$Q_e = U S DTLM \quad (6.5)$$

où DTML représente la différence de température moyenne logarithmique, écrite comme suit:

$$DTML = \frac{\Delta T}{\text{LOG} \left( \frac{(T_a^{(sor)} - T_s)}{(T_a^{(ent)} - T_s)} \right)} \quad (6.6)$$

Par conséquent, le coefficient global de transfert de chaleur (CGTC) s'écrit alors comme suit :

$$CGTC = U = \frac{\dot{m}_a c p_a}{S} \text{LOG} \left( \frac{(T_a^{(sor)} - T_s)}{(T_a^{(ent)} - T_s)} \right) \quad (6.7)$$

Ainsi, le coefficient globale moyen de transfert de chaleur, CGMTC, pour une période t est

calculé par l'équation suivante:

$$CGMTC = \frac{\dot{m} Cp}{S} \text{LOG} \left( \frac{\int_0^t (T_a^{(sor)}(k) - T_s) dt}{\int_0^t (T_a^{(ent)}(k) - T_s) dt} \right) = \frac{\dot{m} Cp}{S} \text{LOG} \left( \frac{\sum_{k=1}^n (T_a^{(sor)}(k) - T_s)}{\sum_{k=1}^n (T_a^{(ent)}(k) - T_s)} \right) \quad (6.8)$$

## 2 Analyse thermique de l'ECSHAS

### 2.1 Saturation thermique du sol

Les figures 6.1 et 6.2 montrent respectivement la température ambiante de l'air du 2 mai 2013 à partir de 9 h 45 à 15 h 45 et l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du conduit ECSHAS après différentes durées de fonctionnement (1h, 3h, 4 h : 15 min et 6h). La figure 6.2 indique que la température d'entrée d'air (figure 6.1) a un effet remarquable sur le profil de température à l'intérieur de l'ECSHAS. A titre d'exemple, la pente de la température de l'air après 6 heures de fonctionnement est plus élevée que la pente de la température de l'air après 1 heure et 3 heures de fonctionnement. Cette différence est due à l'augmentation de la température ambiante au cours de la journée.

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS

Les performances du système en termes de température de l'air de sortie sont meilleures au cours des premières heures, puis la température de l'air de sortie commence à augmenter et les performances diminuent. En outre, après 4h:15 min de fonctionnement, on constate que la température ambiante (cercle rouge sur la figure 6.1) est inférieure à la température ambiante de la durée de 3 heures (cercle bleu sur la figure 6.1). Cependant, on observe que la pente de la longue durée (4h : 15min) reste toujours au-dessus des pentes des durées plus courtes comprenant 1 et 3 heures. Ce fait peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la température du sol au cours du fonctionnement de l'ECSHAS, entraînant ainsi une diminution du flux thermique entre l'air et le sol.

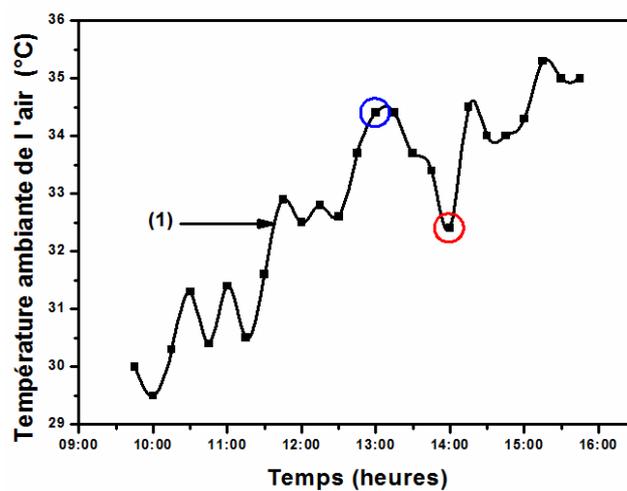


Figure 6.1. Température de l'air ambiant à Biskra (2 mai 2013).

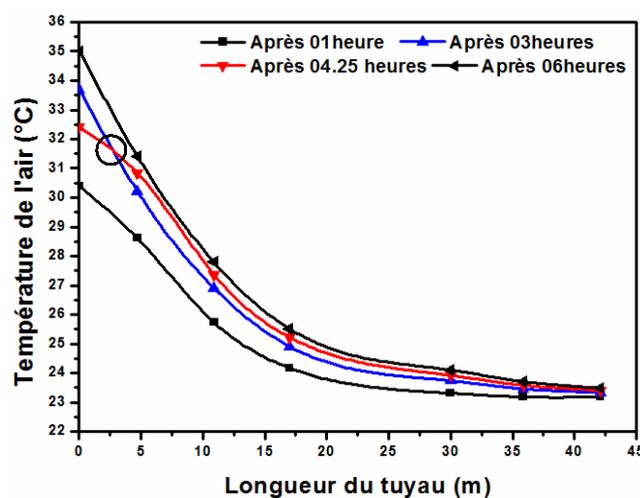
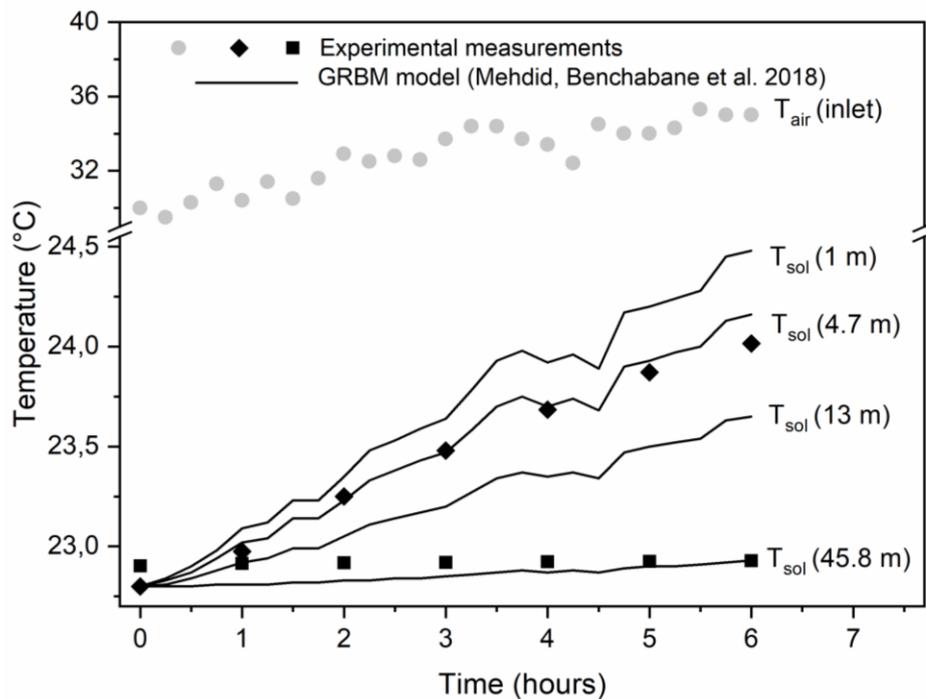


Figure 6.2. Evolution de la température de l'air le long du tuyau de l'ECSHAS.

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS

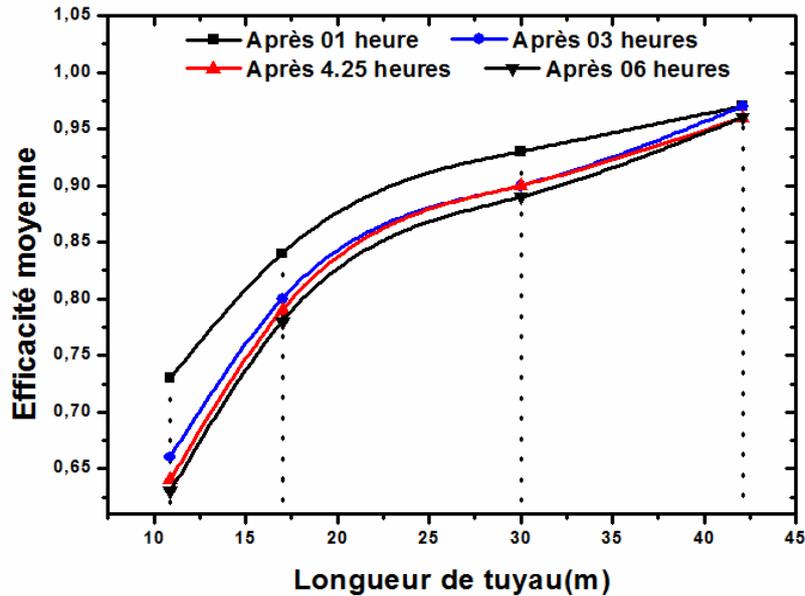
La figure 6.3 montre qu'à mesure que le temps de fonctionnement continu augmente, la température du sol augmente également. Entre autre, l'apparition du début de la saturation est bien constatée dans les premiers trente (30) mètres de l'ECSHAS. Ainsi, le taux de pénétration de la chaleur dans le sol décroît, accompagné notamment par une détérioration des performances thermiques en particuliers dans cette partie de l'échangeur.

La figure 6.4 montre la variation de l'efficacité moyenne en fonction de la longueur du conduit. Il est clair que le rendement horaire moyen augmente avec l'augmentation de la longueur du conduit. On constate une augmentation de plus de 56% de l'efficacité horaire moyenne lorsque la longueur du conduit passe de 10 à 30 m. On observe cependant une augmentation seulement 10% du rendement horaire moyen correspondant à un changement de longueur de canalisation de 30 à 47 m. Ainsi, la longueur initiale du conduit de l'échangeur de chaleur contribue de manière significative aux performances thermiques de l'échangeur de chaleur.



**Figure 6.3.** Température d'entrée d'air et température du sol à quatre sections de l'échangeur de chaleur (~ 55 mm près de la paroi du conduit d'ECSHAS) avec fonctionnement à temps continu. Les symboles et les lignes droites illustrent respectivement les résultats expérimentaux et semi-analytiques.

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS



**Figure 6.4.** Evolution de l'efficacité moyenne avec le temps de fonctionnement.

La figure 6.5 représente l'évolution de la température de l'air le long du tuyau ainsi que le coefficient global moyen de transfert de chaleur (CGMTC) après six heures de fonctionnement continu. La température de l'air le long du conduit augmente avec le temps de fonctionnement, cependant, le coefficient global moyen de transfert de chaleur (CGMTC) décroît progressivement avec la longueur et le temps de fonctionnement.

Côté entrée ; il existe un gradient important entre la température de l'air et la température du sous-sol. Par conséquent, le transfert de chaleur dans la partie avant (Figure 6.5 a, b, c) au cours des trente premiers mètres est beaucoup plus fort que celui de la fin et diminue avec l'augmentation de la température ambiante et du temps de fonctionnement qui induit le début de la saturation du sol. Cette dernière se manifeste par une augmentation de la température de l'air de 3,7°C, 2,3°C et 1,26°C à 13 m, 17 m et 30 m respectivement pendant six (06) heures de fonctionnement continu et l'évolution de la température de l'air le long du conduit était linéaire avec le temps de fonctionnement.

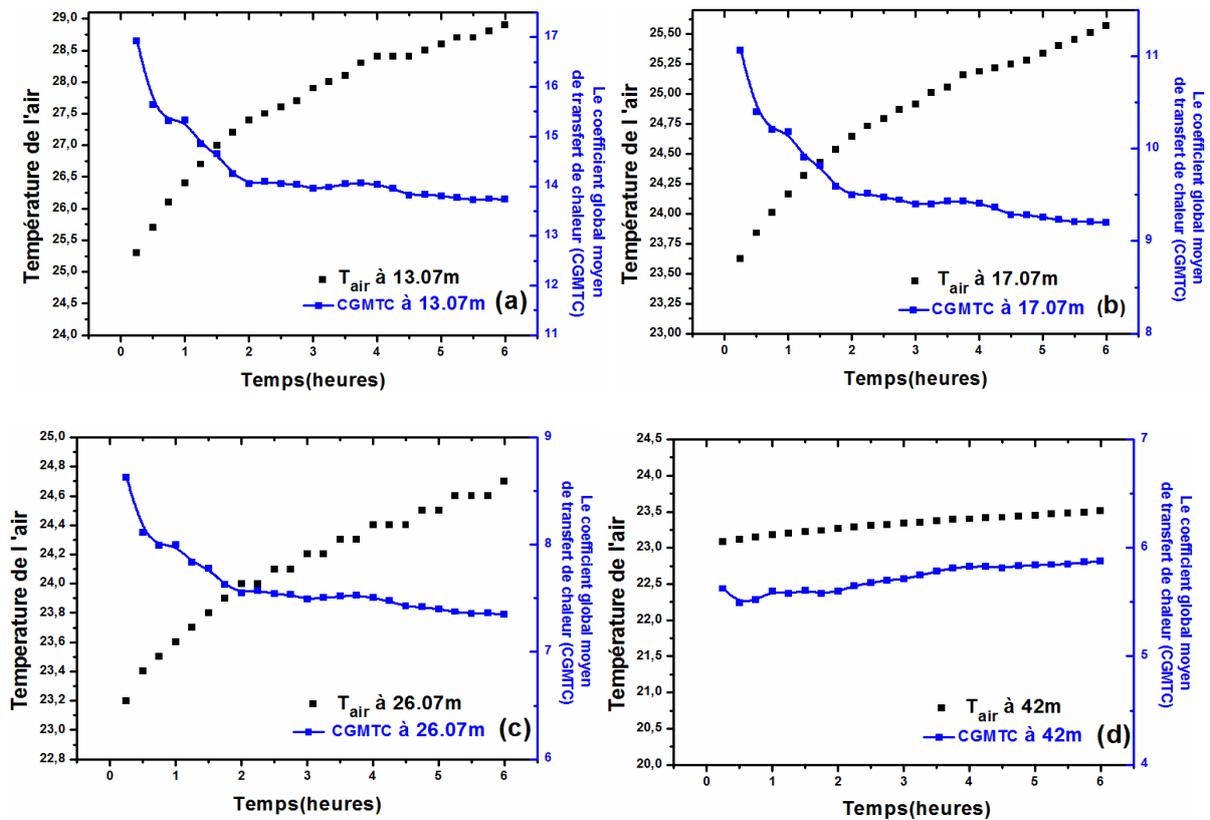
Egalement, le CGMTC est plus important à 13 m (16,92 W/m<sup>2</sup>.°C) qu'à 17 m (11,06W/m<sup>2</sup>.°C), idem entre 17 m et 26 m (8,62 W/m<sup>2</sup>.°C). Cela s'explique par le fait que le gradient entre la température de l'air à l'intérieur de l'ECSHAS et la température du sous-sol à 10 m est supérieure à 17 m, ainsi qu'entre 17 m et 30 m. Les courbes hyperboliques représentées sur la figure 6.5 (a, b, c) indiquent que le CGMTC diminue avec le temps de fonctionnement. Le taux de décroissance est de 3,2, 2,4 et 1,27 W/m<sup>2</sup>. °C à 13 m, 17 m et 26 m respectivement, après six heures de fonctionnement.

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS

Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le sol développe une résistance thermique due à la chaleur transmise par l'air chaud pendant le temps de fonctionnement, c'est-à-dire le début de la saturation du sol. Cette résistance thermique exprime l'épaisseur perturbée du sol qui dépend du diamètre du conduit, du temps de fonctionnement et de la diffusivité du sol [1, 2].

D'autre part, la variation continue de la température de l'air d'admission induit la variation du taux d'accumulation de chaleur du sol et de la résistance thermique du sol au fil du temps. En dépit de ce fait, le déclin du CGMTC est toujours présent ce qui explique la diminution de la chaleur dégagée par l'air vers le sol et traduit une fois de plus la saturation du sol environnant l'échangeur.

Alors qu'elle n'est pas observée au-delà de 30 mètres de longueur, la température de l'air de sortie sera très proche de la température initiale du sol et a un profil linéaire avec le temps de fonctionnement (figure 6.5d). Comme, nous remarquons une variation négligeable du coefficient de chaleur global moyen  $0.26 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  après six heures de fonctionnement. Généralement, le CGMTC est maintenu presque constant à environ  $5.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (figure 6.5d), ce qui signifie que le sol près du conduit n'est pas affecté à 42 m de longueur.



**Figure 6.5.** Evolution du coefficient global moyen du transfert de chaleur (CGMTC) et de la température de l'air à différentes sections en fonction du temps de fonctionnement.

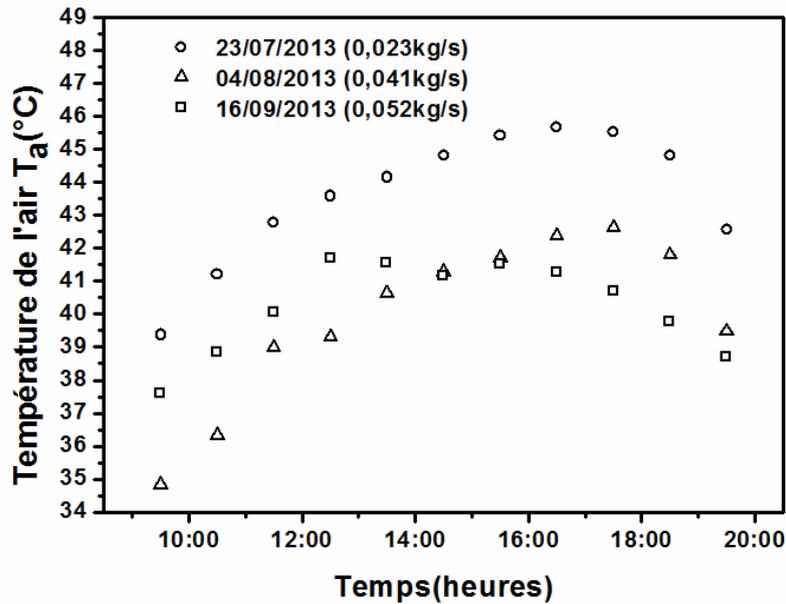
### 2.2 Effet du débit massique d'air et du temps de fonctionnement sur la saturation thermique du sol

La saturation thermique du sol est l'état du sol auquel la température du sol adjacent aux conduits devient presque égale à la température de l'air, ce qui entraîne un taux minimal de transfert de chaleur entre l'air et le sol [2]. Dans cette section, l'effet du débit massique d'air sur la saturation du sol est étudié en se basant sur l'historique thermique du sol décrit par la thèse de Beloufi du 27-05- 2013 au 19-09-2013 [232]. De plus, notre choix s'est porté sur les mesures expérimentales réalisées par Belloufi et al. pour les raisons suivantes [77, 233]:

i) les mesures sont effectuées sur le même banc d'analyse où l'authenticité des tests est préservée ; ii) la durée de fonctionnement est importante et plus longue (10 heures) ; iii) le sol est soumis à de fortes sollicitations en température ; iv) trois débits massiques d'air différents de 0.023, 0.041 et 0.052 kg/s sont utilisés pendant dix heures en fonctionnement continu; v) les mesures sont effectuées en refroidissement d'été. C'est pourquoi, les résultats expérimentaux de Belloufi et al. représentent des données adéquates pour cette étude. Les mesures expérimentales de Belloufi et al. [77] pour trois débits massiques d'air sont présentés dans la figure 6.6.

La figure 6.7 montre la variation horaire du coefficient global du transfert de chaleur par unité de température (CGTC) pour trois débits massiques d'air (0.023, 0.041 et 0.052 kg/s) à différentes sections du conduit de l'ECSHAS (13, 17, 26, 42 m). Il a été noté que lorsque le débit massique augmente, le taux de transfert de chaleur augmente également. Par conséquent, le CGTC atteint ses valeurs maximales au débit massique de 0.052 kg/s.

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS



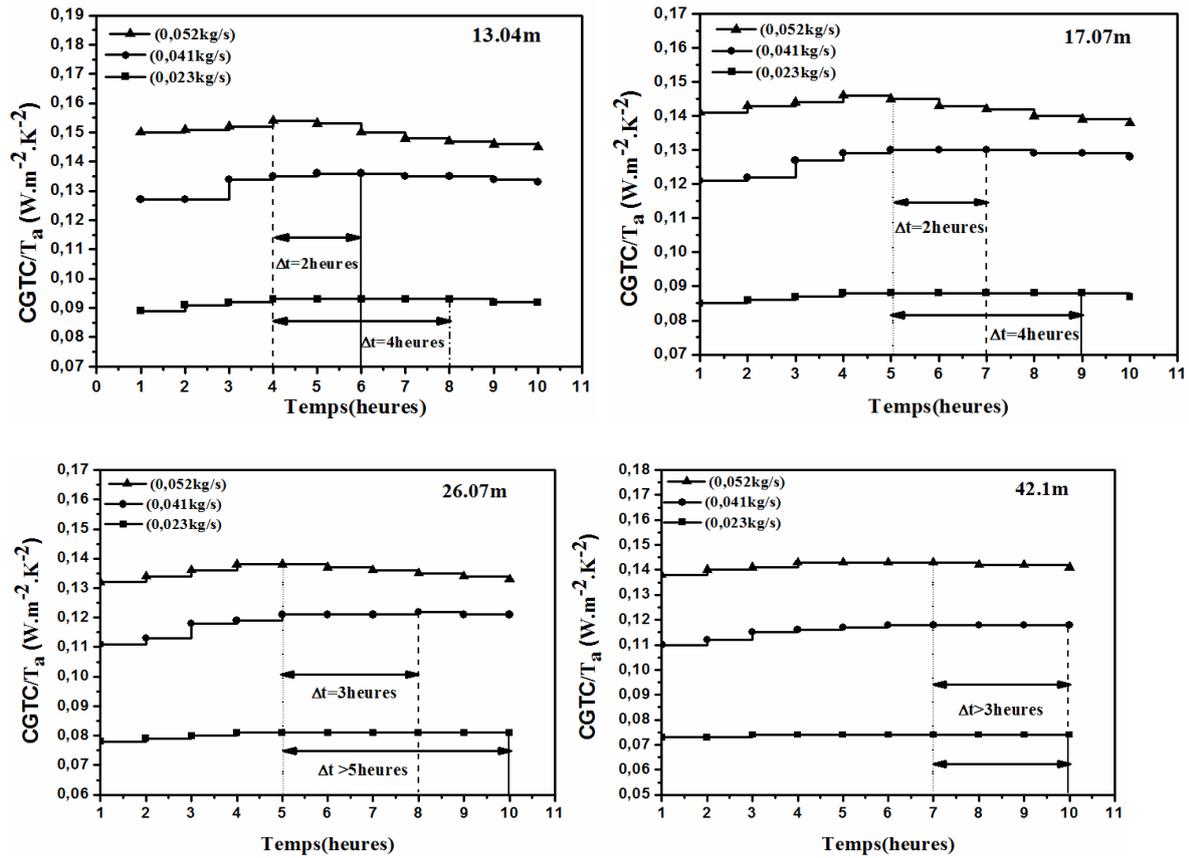
**Figure 6.6.** Température de l'air ambiant.

En revanche, sur les trente premiers mètres (13, 17 et 26 m), il y a une diminution remarquable des CGTCs par unité de température après une certaine durée de fonctionnement (après 05 heures). Cette détérioration des performances peut s'expliquer par le fait de la saturation des sols dans cette zone des canalisations de l'échangeur où la chaleur transmise est maximale. Alors qu'aux derniers mètres (42 m), le coefficient thermique global, CGTC, reste quasiment constant tout au long de la durée de fonctionnement.

De plus, malgré l'inertie du sol, la saturation commence bien avant dans les hauts débits et plus visible sur les trente premiers mètres même après 4, 5 et 7 heures de fonctionnement continu à 13 m, (17 m et 26 m) et 42 m de longueur respectivement. On note également que le début du phénomène de la saturation du sol enregistre un déphasage d'une heure (01) à (17 m et 26 m) et de 3 heures à 42 m comparativement à 13 m pour un débit massique d'air de 0.052 kg /s.

Evoquant que le phénomène de saturation s'élargit loin de l'amont du conduit. Néanmoins, il reste le même (2 heures et 4 heures) dans les 20 premiers mètres (13 et 17 m) bien que ; le début de la saturation est retardé d'une heure à 17 m pour 0.41 et 0.23 kg/s respectivement. De plus, nous soulignons que l'effet de saturation est absent à 0.023 kg/s et persiste à 0.052 kg/s pour des longueurs supérieures à 25 mètres. Cependant, pour 0.041 kg/s, l'effet de saturation se déplace pour des longueurs inférieures à 25 mètres alors que le sol n'est pas affecté à une longueur supérieure à 42 mètres.

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS



**Figure 6.7.** Variation du CGTC par unité de température en fonction de la durée de fonctionnement pour différents débits massiques à différentes sections de l'ECSHAS.

### 3 Conclusion

A travers la littérature, le système d'ECSHAS a certaines limites inhérentes à une application réelle en raison de la saturation thermique du sol. En effet, pour comprendre les phénomènes de la saturation thermique des sols dans le système d'ECSHAS, la stratégie adoptée repose sur une analyse transitoire du comportement thermique d'ECSHAS en utilisant des variables d'états physiques tels que l'évolution de la température du sol et de l'air dans un premier temps, d'autre part, l'efficacité et le coefficient de chaleur global moyen.

Les résultats obtenus ont montré que la température du sol est plus élevée à la longueur initiale du conduit d'ECSHAS, puis diminue plus loin de l'entrée. Cette dernière se manifeste par une détérioration maximale des performances thermiques dans cette région due au fonctionnement continu. Par conséquent, le taux de pénétration de la chaleur dans le sol est principalement affecté par le temps de fonctionnement continu.

De même, le coefficient global moyen de transfert de chaleur (CGMTC) souligne à nouveau que le transfert est plus dominant dans les trente premiers mètres que celui de la fin provoquant un développement cohérent de la résistance thermique du sol dans cette région au

## Chapitre 6. Discussion sur le phénomène de saturation du sol autour des ECSHAS

fil du temps. Cette résistance thermique explique la diminution de la chaleur dégagée par l'air dans le sol et traduit une fois de plus la saturation du sol environnant. Après une mise en évidence expérimentale de ce phénomène, une attention particulière est accordée à l'image des effets du débit massique d'air et de la durée de fonctionnement en ce qui concerne le déphasage de saturation. Aux trente premiers mètres, le débit élevé mérite un niveau de saturation important bien avant le débit massique moyen et faible respectivement. Alors que, aux derniers mètres (42 m), le coefficient global du transfert de chaleur thermique, CGTC, reste quasiment constant tout au long de la durée de fonctionnement.

Entre autres, le déphasage par rapport à la chute du CGTC se caractérise par un relâchement à l'écart de l'amont du conduit. Malgré cela, les résultats corroborent clairement avec les résultats précédents et révèlent que l'effet de saturation est absent à 0.023 kg/s et persiste à 0.052 kg/s pour des longueurs supérieures à 25 mètres. Cependant, pour 0.041 kg/s, l'effet de la saturation se déplace pour des longueurs inférieures à 25 mètres alors que le sol n'est pas affecté à une longueur supérieure à 42 mètres. Cette enquête sera utile pour la conception des ECSHASs et pour comprendre en profondeur les phénomènes affectant les performances des ECSHASs.

## CONCLUSION GENERALE

Cette thèse présente une contribution originale à l'étude du phénomène de transfert thermique au sein des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux air-sol (ECSHAS) en l'occurrence de leur comportement thermique durant les périodes caniculaires et leur degré d'intégration avec d'autres technologies à caractère renouvelable. En effet, l'échangeur de chaleur souterrain horizontale air-sol (ECSHAS) (communément appelé le « puits canadien ») utilise la géothermie peu profonde du sol pour rafraîchir l'air ou le chauffer.

L'objectif principal de la présente étude est ainsi de mettre en place une approche semi-analytique pour la compréhension du comportement thermique transitoire de l'ensemble sol-ECSHAS et le dimensionnement des ECSHASs d'une part, et, d'autre part, l'analyse expérimentale du phénomène de la saturation du sol avoisinant l'ECSHAS. Cette évaluation est réalisée par l'exploitation d'un ECSHAS installé à l'université de Biskra, département de génie mécanique (sud de l'Algérie  $34^{\circ} 47'N-005^{\circ} 43'E$ ) durant la période estivale caractérisée par un climat semi-aride chaud et sec avec des pics de température maximale moyenne avoisinant parfois  $41^{\circ}C$ .

Par ailleurs, la dépense énergétique des ECSHASs notamment minime comparée aux systèmes conventionnels de climatisation durant les périodes caniculaires ou de refroidissements, a fait que ce travail s'inscrit dans la tendance internationale en matière de la consommation rationnelle d'énergie, la promotion des énergies renouvelables ainsi que la minimisation des émissions de gaz à effet de serre.

Dans la première partie, la thèse retrace dans le premier chapitre d'une part l'énergie géothermique ainsi que l'aspect technologique qui relève de son ultime potentiel énergétique et d'autre part, nous avons résumé succinctement la perspective de la production d'énergie géothermique au cours des dernières années assortis avec le statut de l'utilisation mondiale de l'énergie géothermique. En outre, la question des critères de classification des ressources ou systèmes géothermiques est circonscrites à la fin du premier chapitre.

Au regard de la synthèse formulée, la capacité opérationnelle globale d'exploitation pour la production d'électricité géothermique à partir des ressources géothermiques est d'environ 12,8 GWe en janvier 2015, répartie sur 24 pays, et devrait atteindre entre 14,5 GWe et 17,6 GWe d'ici 2020 et à environ 25 GWe à l'horizon 2030. Tandis que, l'utilisation directe des ressources énergétiques géothermiques double tous les cinq ans avec une estimation de capacité mondiale installée d'environ 70 329 MWt à la fin de 2014.

Au chapitre des applications, on aurait plutôt tendance à souligner que les systèmes fermés sont d'autant plus adéquat à l'air, quant aux systèmes ouverts sont adaptés particulièrement à l'exploitation des eaux souterraines. Entre autre, les systèmes actifs en particulier les pompes à chaleur géothermiques ont majoritairement éclipsé une panoplie d'applications géothermiques.

A propos de la classification des ressources et les systèmes géothermiques, il n'existait aucune norme universellement reconnue pour la classification et la déclaration des ressources et des réserves géothermiques. Sur la base des systèmes de classification disponibles dans la littérature, la nomenclature et la terminologie demeurent des problèmes majeurs.

Toujours dans la première partie, ce prélude à la géothermie nous a permis d'ouvrir la porte sur le deuxième chapitre dédié à l'état de l'art des échangeurs de chaleur horizontaux souterrains air-sol ECSHAS (les systèmes peu profonds) idoines à la région de Biskra. Ce chapitre a pour objectif de démystifier et de simplifier certains phénomènes ayant trait à l'ECSHAS. Il se veut aussi un espace de réflexion sur la manière la plus adéquate de mettre en application l'émergence des nouveaux concepts étroitement liés au fonctionnement des ECSHASs, à un moment où plusieurs chercheurs ont utilisé l'échangeur de chaleur souterrain comme source ou puits.

Dans cette revue bibliographique systématique, nous présentons d'abord brièvement les résultats des recherches portant sur la relation entre les paramètres de conception et les performances des ECSHASs. Ensuite, nous nous sommes penchés particulièrement sur l'analyse des modèles de calcul simulant le comportement thermo-physique des ECSHASs, entre autres, de nouvelles terminologies sont apparues telles que la zone d'influence thermique, la saturation thermique du sol et le rayon de sol.

Les performances des ECSHASs dépendent notamment des conditions géographiques et climatiques, des paramètres thermiques et de la configuration du flux d'air et des propriétés du conduit d'une part, et, d'autre part le temps de fonctionnement et les propriétés intrinsèques au sol voire la conductivité thermique qui sont des facteurs déterminants et prédictifs des performances énergétiques des échangeurs souterrains.

Il est à noter que la durée de fonctionnement du système ECSHAS doit être gérée correctement de manière à ce que le sol récupère ses propriétés thermiques au moins dans une mesure considérable lors de la mise en service de plusieurs conduits en parallèle de manière continue (pendant des durées plus longues) aussi bien sous des conditions ambiantes rudes.

En premier lieu, les conduits doivent être espacés d'environ 1 m les uns des autres afin de minimiser les interactions thermiques. En second lieu, le fonctionnement intermittent est une alternative pour résoudre ce problème de saturation, en supposant que le sol se régénère au cours de la période de non fonctionnement d'inactivité par conduction naturelle, d'une part, et, d'autre part, par la convection forcée via une purge nocturne. En revanche, face à une dimension temporelle plus ample, le fonctionnement jour/nuit en hiver offre un meilleur sol pour la saison estivale prochaine.

Dés lors, la technologie des échangeurs de chaleur souterrains est largement régit par la parfaite compréhension de la dynamique de transfert de chaleur entre le fluide traversant le conduit, et le sol autour du conduit. Dans cette dimension, la modélisation du transfert de chaleur s'offre comme un outil très utile auquel prendre part l'effet des paramètres de conception et de fonctionnement sur la performance thermique et la capacité de chauffage / refroidissement des systèmes d'ECSHAS ainsi que leurs comportement thermo-physique. Les modèles de simulation se caractérisent par une présence timide de l'aspect analytique face à l'hégémonie des solutions numériques.

En réponse aux deux problèmes fondamentaux en amont de la conclusion que ce manuscrit était sensé éclaircir, le lecteur pourra constater que dans les deux dernières parties où nous avons abordé dans chacune un volet particulier de la manière dont nous sommes arrivés également à plusieurs conclusions :

- 1) La tentative de la compréhension fine du comportement des ECSHASs lié aux phénomènes physiques sous-jacents à la saturation du sol s'est soldée par un double succès : d'une part l'élaboration d'un outil semi-analytique de pré-dimensionnement simplifié (RBM & GRBM); d'autre part, sa mise en application en vertu du contexte conceptuel et l'intégration des ECSHASs avec les diverses technologies de refroidissement.

2) L'analyse systémique des résultats expérimentaux a montré que le transfert est plus dominant dans les trente premiers mètres que celui de la fin provoquant un développement cohérent de la résistance thermique du sol dans cette région au fil du temps. Cette dernière se manifeste par une détérioration maximale des performances thermiques dans cette région et traduit la saturation du sol avoisinant l'ECSHAS. En d'autres termes, le taux de pénétration de la chaleur dans le sol, exprimé par le coefficient global moyen de transfert de chaleur (CGMTC), est principalement affecté par la durée de fonctionnement continu à part entière.

3) Après la mise en évidence expérimentale du phénomène de la saturation du sol, une attention particulière est accordée à l'image des effets de débit massique de l'air et de la durée de fonctionnement en ce qui concerne le déphasage de la saturation du sol. La variation horaire du CGTC par unité de température souligne que le taux de transfert de chaleur est proportionnel au débit massique. Par conséquent, le CGTC atteint ses valeurs maximales à 0.052 kg/s.

En revanche, l'effet de saturation est absent à 0.023 kg/s et persiste à 0.052 kg/s pour des longueurs supérieures à 25 mètres. Cependant, pour 0.041 kg/s, la saturation se déplace sur des longueurs inférieures à 25 mètres, alors qu'aux derniers mètres (42 m), le coefficient global du transfert de chaleur thermique, CGTC, reste quasiment constant tout au long de la durée de fonctionnement signifiant que le sol n'est pas affecté. Le débit élevé (0.052kg/s) mérite un niveau de saturation important bien avant le débit massique moyen (0.041 kg/s) et faible 0.023 (kg/s) respectivement. En matière de déphasage, la saturation se manifeste dans le haut débit après 4, 5 et 7 heures de fonctionnement continu à 13 m, (17 m et 26 m) et 42 m de longueur respectivement. Signifiant ainsi que le début du phénomène de la saturation du sol enregistre un déphasage d'une heure (01) à (17 m et 26 m) et de 3 heures à 42 m comparativement à 13 m sous un débit massique d'air de 0.052 kg /s. Entre autres, par rapport à 0.052 kg/s, le déphasage est d'ordre deux heures (02) et quatre heures (4) pour 0.041 kg/s et 0.023 kg/s respectivement dans les premières 20 mètres. Dans la foulée de ce travail, nous pensons que les résultats obtenus à travers cette étude sont prometteurs, bien que d'éventuels prolongements de cette thèse puissent nous fournir plus de renseignements sur le comportement de l'ECSHAS dans une dimension temporelle plus ample. Comme il serait par suite souhaitable de mettre en perspectives d'un modèle d'analyse et d'évaluation des systèmes de réseaux d'ECSHASs via un projet pilote ainsi qu'une démonstration de taille de l'apport réel du potentiel de rafraîchissement sous les climats arides et semi-arides de l'oasis algérien.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C.-E. Mehdid, A. Benchabane, A. Rouag, N. Moumami, M.-A. Melhegueg, A. Moumami, M.-L. Benabdi and A. Brima, Thermal design of Earth-to-air heat exchanger. Part II a new transient semi-analytical model and experimental validation for estimating air temperature, *Journal of cleaner production*, vol. 198 pp. 1536-1544, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.063>.
- [2] A. Rouag, A. Benchabane and C.-E. Mehdid, Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature, *Journal of cleaner production*, vol. 182 pp. 538-544, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.089>.
- [3] A. Rouag, A. Benchabane, C.-E. Mehdid, M.-A. Melhegueg, N. Boultif, S. H. Sellam and A. Labeled, Technical solution for malfunction of air coolers and condensers in hot climates: Thermal design of a Geothermal Air-Cooler (GAC), *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. xx pp. xx, 14/10/2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1777225>.
- [4] M. A. Rosen and S. Koohi-Fayegh, *Geothermal energy: Sustainable heating and cooling using the ground*, John Wiley & Sons, 2017.
- [5] B. Matek, Annual US & Global Geothermal Power Production Report, Geothermal Energy Association, Washington, USA, 36pp, 2016.
- [6] V. Stefansson, The renewability of geothermal energy, Presented at Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, pp. 883-888, 2000.
- [7] H. K. Gupta and S. Roy, *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century*, Elsevier, 2006.
- [8] R. Bertani, World geothermal power generation in the period 2001-2005, *Geothermics*, vol. 34 6, pp. 651-690, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.09.005>.
- [9] Annual US geothermal power production and development report, GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION, April 2012.
- [10] M. Antics and B. Sanner, Status of geothermal energy use and resources in Europe, Presented at Proceedings of the European geothermal congress, pp. 8, 2007.
- [11] I. Stober and K. Bucher, *Geothermal energy: from theoretical models to exploration and development*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [12] J. W. Lund, The United States of America Country Update, vol. pp. 2005.
- [13] F. A. Benito, M. S. Ogena and J. A. Stimac, Geothermal energy development in the Philippines: country update, Presented at Proceedings world geothermal congress, pp. 24-29, 2005.
- [14] L. C. Gutierrez-Negrin and J. L. Quijano-Leon, Update of geothermics in Mexico, *Geotermia*, vol. 17 pp. 21-30, 2004.
- [15] R. Sukhyar, A. W. Soedibjo, N. Ganefianto and J. Stimac, Geothermal energy update: Geothermal energy development and utilization in Indonesia, Presented at Proceedings World Geothermal Congress, pp. 2010.
- [16] G. Cappetti and L. Ceppatelli, Geothermal Power Generation in Italy: 2000-2004 Update Report, Presented at Proceedings, pp. 24-29, 2005.

## Références Bibliographiques

- [17] S. Kawazoe and N. Shirakura, Geothermal power generation and direct use in Japan, Presented at Proceedings, pp. 24-29, 2005.
- [18] M. G. Dunstall, 2000-2005 New Zealand Country Update, Presented at Proceedings, pp. 2005.
- [19] A. Ragnarsson, Geothermal development in Iceland 2000-2004, *Fish farming*, vol. 4 9, pp. 2005.
- [20] A. Mainieri and E. Robles, Costa Rica country update, Presented at Proceedings, pp. 18-31, 2000.
- [21] R. Herrera, F. Montalvo and A. Herrera, El Salvador country update, Presented at Proceedings World Geothermal Congress, pp. 25-30, 2010.
- [22] A. Z. Mayorga, Nicaragua country update, Presented at Proceedings world geothermal congress, pp. 24-29, 2005.
- [23] A. R. n. Manzo, Geothermal power development in Guatemala 2000-2005, Presented at Proceedings, pp. 2005.
- [24] V. Kononov and O. Povarov, Geothermal development in Russia: country update report 2000-2004, Presented at Proceedings, pp. 24-29, 2005.
- [25] J. W. Lund and T. L. Boyd, Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review, *Geothermics*, vol. 60 pp. 66-93, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>.
- [26] D. E. White and D. L. Williams, Assessment of geothermal resources of the United States, 1975, US Department of the Interior, Geological Survey, 1975.
- [27] L. J. P. Muffler, Assessment of geothermal resources of the United States, 1978, Geological Survey, Reston, VA (USA). Geologic Div, 1979.
- [28] M. P. Hochstein, Assessment and modelling of geothermal reservoirs (small utilization schemes), *Geothermics*, vol. 17 1, pp. 15-49, 1988. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(88\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0375-6505(88)90004-1).
- [29] R. Haenel, L. Rybach and L. Stegena, Fundamentals of geothermics, in Handbook of terrestrial heat-flow density determination Springer. p. 9-57, 1988.
- [30] Y. Benderitter and G. Cormy, Possible approach to geothermal research and relative costs, *Small geothermal resources: A guide to development and utilization*, UNITAR, New York, vol. pp. 59-69, 1990.
- [31] S. K. Sanyal, Classification of geothermal systems- a possible scheme, Presented at Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, pp. 85-88, 2005.
- [32] I. S. Moeck, Catalog of geothermal play types based on geologic controls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37 pp. 867-882, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>.
- [33] K. C. Lee, Classification of geothermal resources by exergy, *Geothermics*, vol. 30 4, pp. 431-442, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00056-0).
- [34] C. F. Williams, M. J. Reed and A. F. Anderson, Updating the classification of geothermal resources, Presented at Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, pp. 2011.
- [35] M. Gehringer and V. Loksha, Guide Geothermique : Planification et Financement de la Production D'energie, ESMAP Technical Report 002/12, 2012.

## Références Bibliographiques

- [36] L. Philippe and L. Jean, Géothermie, *Techniques de l'ingénieur Environnement et construction*, vol. base documentaire : TIB552DUO ref. article : be8590 DO -, pp. 2008.
- [37] S. J. Zarrouk and H. Moon, Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review, *Geothermics*, vol. 51 pp. 142-153, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.11.001>.
- [38] J. Gao, A. Li, X. Xu, W. Gang and T. Yan, Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings, *Renewable energy*, vol. 128 pp. 337-349, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.089>.
- [39] F. Stauffer, P. Bayer, P. Blum, N. M. Giraldo and W. Kinzelbach, Thermal use of shallow groundwater, CRC Press, 2013.
- [40] G. D. G. f. Geowissen, Shallow Geothermal Systems: Recommendations on Design, Construction, Operation and Monitoring, John Wiley & Sons, 2016.
- [41] G. Ferguson and A. D. Woodbury, Observed thermal pollution and post-development simulations of low-temperature geothermal systems in Winnipeg, Canada, *Hydrogeology Journal*, vol. 14 7, pp. 1206-1215, 2006. [DOI 10.1111/j.1745-6284.2005.00052.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6284.2005.00052.x).
- [42] D. Banks, An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling, *Newcastle-upon-Tyne: Blackwell Publishing Ltd*, 2012.
- [43] S. Kavanaugh and K. Rafferty, Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems, ASHRAE Atlanta, 2014.
- [44] I. Moeck and G. Beardsmore, A new 'geothermal play type' catalog: Streamlining exploration decision making, Presented at Proceedings of the Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, pp. 2014.
- [45] I. Moeck, Geothermal Plays in Geologic Settings, Presented at IGA Workshop on Developing Best Practice for Geothermal Exploration and Resource/Reserve Classification, pp. 14-19, 2013.
- [46] P. Brophy, C. F. Williams and M. J. Reed, "Energy Efficiency & Renewable Energy", vol. pp. 2011.
- [47] R. Terry and K. Young, Using Geothermal Play Types as an Analogue for Estimating Potential Resource Size, *GRC Transactions*, vol. 39 pp. 2015.
- [48] L. Rybach, Classification of geothermal resources by potential, *Geothermal Energy Science*, vol. 3 1, pp. 13-17, 2015. [doi:10.5194/gtes-3-13-2015](https://doi.org/10.5194/gtes-3-13-2015).
- [49] G. R. Beardsmore, L. Rybach, D. Blackwell and C. Baron, A protocol for estimating and mapping global EGS potential, *GRC Transactions*, vol. 34 pp. 301-312, 2010.
- [50] B. Goldstein, G. Hiriart, J. Tester, R. Bertani, G.-N. Bromley and H. L. C. J. E., Ragnarsson, A., Mongillo, M. A. Muraoka, and V. I. Zui (2011): Great Expectations for Geothermal Energy to 2100, Presented at Proceedings, 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, January, pp.
- [51] G. Falcone, A. Gnani, B. Harrison and C. Alimonti, Classification and Reporting Requirements for Geothermal Resources, Presented at European Geothermal Congress, pp. 2013.
- [52] G. Falcone and G. Beardsmore, Including Geothermal Energy within a Consistent Framework Classification for Renewable and Non-Renewable Energy Resources, Presented at Proceedings World Geothermal Congress 2015, 19-25 April 2015, Melbourne, Australia, pp. 2015.

## Références Bibliographiques

- [53] B. Segneri, D. S. Jenne, K. Young, H. Thorsteinsson and E. Hass, Geothermal codification impacts on geothermal development and investments, Presented at Proceedings, 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February, pp. 11-13, 2013.
- [54] C. Peretti, A. Zarrella, M. De Carli and R. Zecchin, The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28 pp. 107-116, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.057>.
- [55] N. Bordoloi, A. Sharma, H. Nautiyal and V. Goel, An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89 pp. 261-280, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>.
- [56] H. Dhruw, G. Sahu, P. Sen, R. Sharma and S. Bohidar, A review paper on earth tube heat exchanger, *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 3 pp. 415-417, 2015.
- [57] A. K. Chaturvedi and V. Bartaria, PERFORMANCE OF EARTH TUBE HEAT EXCHANGER COOLING OF AIR - A REVIEW, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 4 1, pp. 378, 2015.
- [58] L. Aresti, P. Christodoulides and G. Florides, A review of the design aspects of ground heat exchangers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92 pp. 757-773, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.053>.
- [59] M. Kaushal, Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review, *Energy and Buildings*, vol. 139 pp. 634-652, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.024>.
- [60] G. Schiller, Earth tubes for passive cooling, the development of a transient numerical model for predicting the performance of earth-to-air heat exchangers, in Project reports for MS degree MIT, Mechanical Engineering, 1982.
- [61] M. Santamouris and C. Lefas, Thermal analysis and computer control of hybrid greenhouses with subsurface heat storage, *Energy in Agriculture*, vol. 5 2, pp. 161-173, 1986. [https://doi.org/10.1016/0167-5826\(86\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0167-5826(86)90016-1).
- [62] H. Levit, R. Gaspar and R. Piacentini, Simulation of greenhouse microclimate produced by earth tube heat exchangers, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 47 1, pp. 31-47, 1989. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90084-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90084-1).
- [63] D. Elmer and G. Schiller, A preliminary examination of the dehumidification potential of earth/air heat exchangers, Presented at Proceedings of the 1st national passive cooling conference, Miami, pp. 161-165, 1981.
- [64] A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris and A. Argiriou, Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers, *Energy and buildings*, vol. 18 1, pp. 35-43, 1992. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90049-M](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90049-M).
- [65] A. Dhaliwal, D. Goswami and G. Das, Heat transfer analysis in environmental control using an underground air tunnel, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 107 2, pp. 141-5, 1985. <https://doi.org/10.1115/1.3267667>.
- [66] G. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos, Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers, *Solar Energy (Journal of Solar Energy Science and Engineering);(United States)*, vol. 53 3, pp. 1994. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90636-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90636-X).

## Références Bibliographiques

- [67] M. Sodha, U. Mahajan and R. Sawhney, Thermal performance of a parallel earth air-pipes system, *International Journal of Energy Research*, vol. 18 4, pp. 437-447, 1994. <https://doi.org/10.1002/er.4440180404>.
- [68] M. Bojic, G. Papadakis and S. Kyritsis, Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger, *Energy*, vol. 24 6, pp. 519-523, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00012-2).
- [69] P. Hollmuller and B. Lachal, Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects, *Energy and Buildings*, vol. 33 5, pp. 509-518, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00105-5).
- [70] M. Ghosal, G. Tiwari, N. Srivastava and M. Sodha, Thermal modelling and experimental validation of ground temperature distribution in greenhouse, *International Journal of Energy Research*, vol. 28 1, pp. 45-63, 2004. <https://doi.org/10.1002/er.950>.
- [71] V. Badescu, Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renewable energy*, vol. 32 5, pp. 845-855, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.004>.
- [72] S. p. Thiers and B. Peuportier, Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France, *Solar Energy*, vol. 82 9, pp. 820-831, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.014>.
- [73] P. Tittlein, G. Achard and E. Wurtz, Modelling earth-to-air heat exchanger behaviour with the convolutive response factors method, *Applied Energy*, vol. 86 9, pp. 1683-1691, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.010>.
- [74] A. Trzaski and B. Zawada, The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency, *Building and Environment*, vol. 46 7, pp. 1436-1444, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.010>.
- [75] F. Niu, Y. Yu, D. Yu and H. Li, Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies, *Applied Thermal Engineering*, vol. 77 pp. 90-100, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.069>.
- [76] M. Benhammou, B. Draoui, M. Zerrouki and Y. Marif, Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate, *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 1-11, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.042>.
- [77] Y. Belloufi, A. Brima, S. Zerouali, R. Atmani, F. Aissaoui, A. Rouag and N. Moumami, Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode, *International Journal of Heat and Technology*, vol. 35 2, pp. 279-288, 2017. DOI: 10.18280/ijht.350208.
- [78] P. Hollmuller, Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46 22, pp. 4303-4317, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00199-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00199-6).
- [79] D. Yang, Y. Guo and J. Zhang, Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment, *Energy conversion and management*, vol. 109 pp. 184-194, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.050>.
- [80] M. D. d'Accadia and F. de Rossi, Thermoeconomic optimization of a refrigeration plant, *International Journal of Refrigeration*, vol. 21 1, pp. 42-54, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(97\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(97)00071-6).
- [81] D. Goswami and K. Biseli, Use of underground air tunnels for heating and cooling agricultural and residential buildings, *Fact sheet EES*, vol. 78 pp. 1-4, 1993.

## Références Bibliographiques

- [82] L. Serres, A. Trombe and J. H. Conilh, Study of coupled energy saving systems sensitivity factor analysis, *Building and Environment*, vol. 32 2, pp. 137-148, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00039-X).
- [83] A. Chel and G. Tiwari, Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate, *Energy and Buildings*, vol. 41 1, pp. 56-66, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.006>.
- [84] J. Darkwa, G. Kokogiannakis, C. Magadzire and K. Yuan, Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system, *Energy and Buildings*, vol. 43 2-3, pp. 728-736, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.018>.
- [85] J. Vaz, M. A. Sattler, E. D. dos Santos and L. r. A. Isoldi, Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger, *Energy and Buildings*, vol. 43 9, pp. 2476-2482, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.003>.
- [86] L. Ozgener, A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15 9, pp. 4483-4490, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.103>.
- [87] M. Dubey, J. Bhagoria and L. Lanjewar, Earth air heat exchanger in parallel connection, *Int J Eng Trends Technol*, vol. 4 6, pp. 2463-2467, 2013.
- [88] T. Choudhury and A. K. Misra, Minimizing changing climate impact on buildings using easily and economically feasible earth to air heat exchanger technique, *Mitigation and adaptation strategies for global change*, vol. 19 7, pp. 947-954, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9453-3>.
- [89] S. Mongkon, S. Thepa, P. Namprakai and N. Pratinthong, Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earth tube system for the tropical greenhouse, *Energy and Buildings*, vol. 66 pp. 104-111, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.009>.
- [90] G. Chiesa, M. Simonetti and M. Grosso, A 3-field earth-heat-exchange system for a school building in Imola, Italy: Monitoring results, *Renewable energy*, vol. 62 pp. 563-570, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.020>.
- [91] A. N. Z. Sanusi and A. A. A. Zamri, Achieving cooler soil as an effective heat sink for earth-to-air heat exchanger (EAHE) cooling technology in Malaysia tropical climate, *Natural Resources*, vol. 5 13, pp. 804, 2014. DOI: 10.4236/nr.2014.513069.
- [92] J. Jassim, Sustainable design of wind-catcher of an earth-to-air heat exchanger in hot dry areas, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6 pp. 582-9, 2015. DOI:
- [93] S. Jakhar, M. Soni and N. Gakkhar, Performance analysis of earth water heat exchanger for concentrating photovoltaic cooling, *Energy Procedia*, vol. 90 pp. 145-153, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.179>.
- [94] C. O. Popiel, J. Wojtkowiak and B. Biernacka, Measurements of temperature distribution in ground, *Experimental thermal and fluid science*, vol. 25 5, pp. 301-309, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(01\)00078-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(01)00078-4).
- [95] N. Thanu, R. Sawhney, R. Khare and D. Buddhi, An experimental study of the thermal performance of an earth-air-pipe system in single pass mode, *Solar Energy*, vol. 71 6, pp. 353-364, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00072-X).
- [96] Z. Li, W. Zhu, T. Bai and M. Zheng, Experimental study of a ground sink direct cooling system in cold areas, *Energy and Buildings*, vol. 41 11, pp. 1233-1237, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.020>.

## Références Bibliographiques

- [97] H. B. J. Derbel and O. Kanoun, Investigation of the ground thermal potential in Tunisia focused towards heating and cooling applications, *Applied thermal engineering*, vol. 30 10, pp. 1091-1100, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.022>.
- [98] M. H. Abbaspour-Fard, A. Gholami and M. Khojastehpour, Evaluation of an earth-to-air heat exchanger for the north-east of Iran with semi-arid climate, *International Journal of Green Energy*, vol. 8 4, pp. 499-510, 2011 <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.576289>.
- [99] B. Yassine, K. Ghali, N. Ghaddar, G. Chehab and I. Srour, Effectiveness of the earth tube heat exchanger system coupled to a space model in achieving thermal comfort in rural areas, *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 33 3, pp. 567-586, 2014. <https://doi.org/10.1080/14786451.2012.762776>.
- [100] J. Vaz, M. A. Sattler, R. d. S. Brum, E. D. dos Santos and L. r. A. Isoldi, An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE), *Energy and Buildings*, vol. 72 pp. 122-131, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.009>.
- [101] Y. Yu, H. Li, F. Niu and D. Yu, Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney, *Applied energy*, vol. 114 pp. 209-217, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.009>.
- [102] N. Hatraf, F. Chabane, A. Brima, N. Moumami and A. Moumami, Parametric study of to design an earth to air heat exchanger with experimental validation, *Engineering Journal*, vol. 18 2, pp. 41-54, 2014. <https://doi.org/10.4186/ej.2014.18.2.41>.
- [103] H. Li, Y. Yu, F. Niu, M. Shafik and B. Chen, Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney, *Renewable Energy*, vol. 62 pp. 468-477, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.008>.
- [104] S. Jakhar, R. Misra, V. Bansal and M. Soni, Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India, *Energy and Buildings*, vol. 87 pp. 360-369, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.070>.
- [105] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, H. Hamdi, P. Hollmuller and A. Bennouna, Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for buildings air refreshment in Marrakech. In: *BS2015, 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association. 2015*.
- [106] S. K. Soni, M. Pandey and V. N. Bartaria, Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements, *Energy and Buildings*, vol. 129 pp. 1-8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.063>.
- [107] A. A. Serageldin, A. K. Abdelrahman and S. Ookawara, Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation, *Energy conversion and management*, vol. 122 pp. 25-38, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>.
- [108] M. S. Uddin, R. Ahmed and M. Rahman, Performance evaluation and life cycle analysis of earth to air heat exchanger in a developing country, *Energy and Buildings*, vol. 128 pp. 254-261, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.088>.
- [109] D. Belatrache, S. d. Bentouba and M. Bourouis, Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42 13, pp. 8898-8904, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.221>.

## Références Bibliographiques

- [110] F. Chlela, A. Husaunndee, P. Riederer and C. Inard, Numerical evaluation of earth to air heat exchangers and heat recovery ventilation systems, *International Journal of Ventilation*, vol. 6 1, pp. 31-42, 2007. <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683762>.
- [111] A. Hepbasli, Low exergy modelling and performance analysis of greenhouses coupled to closed earth-to-air heat exchangers (EAHEs), *Energy and Buildings*, vol. 64 pp. 224-230, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.012>.
- [112] O. Ozgener, L. Ozgener and D. Y. Goswami, Seven years energetic and exergetic monitoring for vertical and horizontal EAHE assisted agricultural building heating, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80 pp.175-179, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.056>.
- [113] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agarwal, J. Mathur and T. Aseri, Evaluating Thermal Performance and Energy Conservation Potential of Hybrid Earth Air Tunnel Heat Exchanger in Hot and Dry Climate — In Situ Measurement, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 5 3, pp. 031006, 2013. <https://doi.org/10.1115/1.4023435>.
- [114] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal and J. Mathur, Performance evaluation and economic analysis of integrated earth-air-tunnel heat exchanger-evaporative cooling system, *Energy and Buildings*, vol. 55 pp. 102-108, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.047>.
- [115] A. Mathur, S. Mathur, G. Agrawal and J. Mathur, Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes, *Renewable Energy*, vol. 108 pp. 474-487, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.001>.
- [116] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, P. Hollmuller, H. Hamdi and A. Bennouna, Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate, *Energy and Buildings*, vol. 125 pp. 109-121, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.071>.
- [117] S. M. N. Shojaee and K. Malek, Earth-to-air heat exchangers cooling evaluation for different climates of Iran, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 23 pp. 111-120, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.09.007>.
- [118] A. N. Sanusi, L. Shao and N. Ibrahim, Passive ground cooling system for low energy buildings in Malaysia (hot and humid climates), *Renewable Energy*, vol. 49 pp. 193-196, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.033>.
- [119] F. Fazlikhani, H. Goudarzi and E. Solgi, Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates, *Energy Conversion and Management*, vol. 148 pp. 78-89, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.069>.
- [120] A. Asghar, A. Sharma and S. Singh, Effect of different earth surface treatments on sub-soil temperatures, *International Journal of Energy Research*, vol. 14 9, pp. 911-924, 1990. <https://doi.org/10.1002/er.4440140902>.
- [121] G. Florides and S. Kalogirou, Ground heat exchangers: A review of systems, models and applications, *Renewable energy*, vol. 32 15, pp. 2461-2478, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>.
- [122] Y. Nassar, A. ElNoaman, A. Abutaima, S. Yousif and A. Salem, Evaluation of the underground soil thermal storage properties in Libya, *Renewable energy*, vol. 31 5, pp. 593-598, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.001>.
- [123] T. Kusuda and P. R. Achenbach, Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States, National Bureau of Standards Gaithersburg MD, 1965.

## Références Bibliographiques

- [124] T. Kusuda, O. Piet and J. W. Bean, Annual Variation of Temperature Field and Heat Transfer Under Heated Ground Surfaces (slab-on-grade Floor Heat Loss Calculation), US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1983.
- [125] S. Bharadwaj and N. Bansal, Temperature distribution inside ground for various surface conditions, *Building and Environment*, vol. 16 3, pp. 183-192, 1981. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(81\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0360-1323(81)90012-3).
- [126] G. Mihalakakou, M. Santamouris, J. Lewis and D. Asimakopoulos, On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, *Solar Energy*, vol. 60 3-4, pp. 181-190, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00012-1).
- [127] A. Khatri, M. Sodha and M. Malik, Periodic variation of ground temperature with depth, *Solar Energy*, vol. 20 5, pp. 425-427, 1978. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90161-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90161-5).
- [128] M. Sodha, N. Bansal and A. Seth, Variance of the ground temperature distribution, *Applied Energy*, vol. 8 4, pp. 245-254, 1981. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(81\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0306-2619(81)90021-0).
- [129] S. A. Baggs, Remote prediction of ground temperature in Australian soils and mapping its distribution, *Solar Energy*, vol. 30 4, pp. 351-366, 1983. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90189-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90189-5).
- [130] M. Krarti, C. Lopez-Alonzo, D. Claridge and J. Kreider, Analytical model to predict annual soil surface temperature variation, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 117 2, pp. 91-99, 1995. <https://doi.org/10.1115/1.2870881>
- [131] N. Bansal, M. Sodha and S. Bharadwaj, Performance of earth air tunnels, *International Journal of Energy Research*, vol. 7 4, pp. 333-345, 1983. <https://doi.org/10.1002/er.4440070405>.
- [132] M. Sodha, N. Bansal, P. Bansal, A. Kumar and M. Malik, Solar passive building, Pergamon Press, Elmsford, NY, 1986.
- [133] F. S. De La Flor and S. A. Dominguez, Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings, *Energy and buildings*, vol. 36 5, pp. 403-413, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.050>.
- [134] H. Wang, C. Qi, E. Wang and J. Zhao, A case study of underground thermal storage in a solar-ground coupled heat pump system for residential buildings, *Renewable energy*, vol. 34 1, pp. 307-314, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.024>.
- [135] J. Khedari, W. Permchart, N. Pratinthong, S. Thepa and J. Hirunlabh, Field study using the ground as a heat sink for the condensing unit of an air conditioner in Thailand, *Energy*, vol. 26 8, pp. 797-810, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00036-6).
- [136] H. Wu, S. Wang and D. Zhu, Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems, *Energy Conversion and Management*, vol. 48 5, pp. 1462-1471, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.021>.
- [137] R. Singh, R. Sawhney, I. Lazarus and V. Kishore, Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82 pp. 2162-2185, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.058>.
- [138] B. Givoni, Options and applications of passive cooling, *Energy and Buildings*, vol. 7 4, pp. 297-300, 1984. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90075-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90075-6).
- [139] B. Givoni, Cooled soil as a cooling source for buildings, *Solar Energy*, vol. 81 3, pp. 316-328, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.07.004>.

## Références Bibliographiques

- [140] B. Jayashankar, R. Sawhney and M. Sodha, Effect of different surface treatments of the surrounding earth on thermal performance of earth-integrated buildings, *International Journal of Energy Research*, vol. 13 5, pp. 605-619, 1989. <https://doi.org/10.1002/er.4440130512>.
- [141] G. Mihalakakou, J. Lewis and M. Santamouris, The influence of different ground covers on the heating potential of earth-to-air heat exchangers, *Renewable Energy*, vol. 7 1, pp. 33-46, 1996. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00114-X](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00114-X).
- [142] M. Sodha, R. Sawhney, B. Jayashankar and A. Sharma, Effect of different earth surface treatments on the thermal performance of a room coupled to an earth-air tunnel, *International journal of energy research*, vol. 14 3, pp. 337-354, 1990. <https://doi.org/10.1002/er.4440140309>.
- [143] A. Mathur, A. Srivastava, J. Mathur, S. Mathur and G. Agrawal, Transient effect of soil thermal diffusivity on performance of EATHE system, *Energy Reports*, vol. 1 pp. 17-21, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2014.11.004>.
- [144] Y. Song, Y. Yao and W. Na, Impacts of soil and pipe thermal conductivity on performance of horizontal pipe in a ground-source heat pump, vol. pp. 2006. <http://hdl.handle.net/1969.1/5465>.
- [145] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal and J. Mathur, Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, vol. 103 pp. 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.014>.
- [146] O. Johansen, Thermal Conductivity of Soils, Corps of Engineers, *US Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory: Hanover, NH, USA*, 1977.
- [147] N. Zhang and Z. Wang, Review of soil thermal conductivity and predictive models, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 117 pp. 172-183, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013>.
- [148] A. Misra, B. R. Becker and B. A. Fricke, A theoretical model of the thermal conductivity of idealized soil, *HVAC&R Research*, vol. 1 1, pp. 81-96, 1995.
- [149] N. H. Abu-Hamdeh and R. C. Reeder, Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter, *Soil science society of America Journal*, vol. 64 4, pp. 1285-1290, 2000. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>.
- [150] F. Tong, L. Jing and R. W. Zimmerman, An effective thermal conductivity model of geological porous media for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase flow, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46 8, pp. 1358-1369, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.04.010>.
- [151] S. Haigh, Thermal conductivity of sands, *Geotechnique*, vol. 62 7, pp. 617, 2012. <https://doi.org/10.1680/geot.11.P.043>.
- [152] M. Kersten, Thermal Properties of Soils, University of Minnesota, 1949.
- [153] S. X. Chen, Thermal conductivity of sands, *Heat and mass transfer*, vol. 44 10, pp. 1241, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0357-1>.
- [154] J. Lin, H. Nowamooz, S. Braymand, P. Wolff and C. Fond, Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth-air heat exchanger system, *Renewable Energy*, vol 147. pp. 2676-2687, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.106>.
- [155] V. Mei, Effect of backfilling material on ground coil performance, presented at *ASHRAE Trans.:(United States)*, vol. 93 CONF-870620-, pp. 1987.

## Références Bibliographiques

- [156] G. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos, Use of the ground for heat dissipation, *Energy*, vol. 19 1, pp. 17-25, 1994. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90101-5).
- [157] M. Balghouthi, S. Kooli, A. Farhat, H. Daghari and A. Belghith, Experimental investigation of thermal and moisture behaviors of wet and dry soils with buried capillary heating system, *Solar energy*, vol. 79 6, pp. 669-681, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.011>.
- [158] K. K. Agrawal, R. Misra, T. Yadav, G. D. Agrawal and D. K. Jamuwa, Experimental study to investigate the effect of water impregnation on thermal performance of earth air tunnel heat exchanger for summer cooling in hot and arid climate, *Renewable energy*, vol. 120 pp. 255-265, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.070>.
- [159] R. Misra, S. Jakhar, K. K. Agrawal, S. Sharma, D. K. Jamuwa, M. S. Soni and G. D. Agrawal, Field investigations to determine the thermal performance of earth air tunnel heat exchanger with dry and wet soil: Energy and exergetic analysis, *Energy and Buildings*, vol. 171 pp. 107-115, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.026>.
- [160] N. A. Elminshawy, F. R. Siddiqui, Q. U. Farooq and M. F. Addas, Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels, *Applied Thermal Engineering*, vol. 124 pp. 1319-1327, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.119>.
- [161] K. K. Agrawal, G. D. Agrawal, R. Misra, M. Bhardwaj and D. K. Jamuwa, A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of Earth air tunnel heat exchanger, *Energy and Buildings*, vol. pp. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.035>.
- [162] M. L. Allan, Thermal conductivity of cementitious grouts for geothermal heat pumps. Progress report FY 1997, Brookhaven National Lab., Upton, NY (United States), 1997.
- [163] M. L. Allan and S. P. Kavanaugh, Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps, *Hvac&R Research*, vol. 5 2, pp. 85-96, 1999. <http://dx.doi.org/10.1080/10789669.1999.10391226>.
- [164] V. Buhagiar and L. Runco, Geothermal Ground Heat Exchangers in Malta: Thermal Performance Assessment of Infill Grouts, Presented at 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany, pp. 10-12 September 2013.
- [165] H. Wang, Y. Cui and C. Qi, Effects of Sand-Bentonite Backfill Materials on the Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers, *Heat Transfer Engineering*, vol. 34 1, pp. 37-44, 2013. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.694771>.
- [166] L. Yu and W. Huang, Research on thermal conductivity of grouting material for underground heat exchanger of GSHP system, Presented at 2015 Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference, pp. 2015.
- [167] A. M. Omer, Experimental investigation of the performance of a ground-source heat pump system for buildings heating and cooling, *Global Journal of Mathematics*, vol. 2 2, pp. 196-225, 2015.
- [168] M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, V. Magnenet and C. Fond, Influence of coating soil types on the energy of earth-air heat exchanger, *Energy and Buildings*, vol. 158 pp. 1000-1012, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.048>.
- [169] C. Lee, K. Lee, H. Choi and H.-P. Choi, Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea, *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 53 1, pp. 123-128, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0413-9>.

## Références Bibliographiques

- [170] F. Delaleux, X. Py, R. g. Olives and A. Dominguez, Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity, *Applied Thermal Engineering*, vol. 33 pp. 92-99, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.017>.
- [171] M. Jobmann and G. n. Buntebarth, Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste, *Applied Clay Science*, vol. 44 3-4, pp. 206-210, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.01.016>.
- [172] S. Erol and B. François, Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers, *Applied thermal engineering*, vol. 70 1, pp. 788-799, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.034>
- [173] K. D'Angelo, Investigation of Heat Dissipation Enhancement due to Backfill Modification in Ground Coupled Heat Pump Systems, Arizona State University, 2012.
- [174] H. Li, M. Chen, B. Fu and B. Liang, Evaluation on the thermal and moisture diffusion behavior of sand/bentonite, *Applied Thermal Engineering*, vol. 151 pp. 55-65, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.100>.
- [175] F. Niu, Y. Yu, D. Yu and H. Li, Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger, *Applied energy*, vol. 137 pp. 211-221, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.008>.
- [176] R. Kumar, S. Kaushik and S. Garg, Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network, *Renewable Energy*, vol. 31 8, pp. 1139-1155, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.007>.
- [177] M. Benhammou and B. Draoui, Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44 pp. 348-355, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.030>.
- [178] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur and T. K. Aseri, CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, vol. 103 pp. 266-277, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.041>.
- [179] S. Ahmed, M. Amanullah, M. Khan, M. Rasul and N. Hassan, Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer, *Energy conversion and management*, vol. 114 pp. 324-337, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.061>.
- [180] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur and T. Aseri, Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer, *Energy and buildings*, vol. 58 pp. 103-110, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.001>.
- [181] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal and J. Mathur, 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: A transient CFD analysis, *Applied Energy*, vol. 102 pp. 418-426, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.027>.
- [182] K. H. Lee and R. K. Strand, The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings, *Energy and Buildings*, vol. 40 4, pp. 486-494, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.003>.
- [183] V. P. Kabashnikov, L. N. Danilevskii, V. P. Nekrasov and I. P. Vityaz, Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45 11, pp. 2407-2418, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00319-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00319-2).

## Références Bibliographiques

- [184] G. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos, On the cooling potential of earth to air heat exchangers, *Energy Conversion and Management*, vol. 35 5, pp. 395-402, 1994. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)90098-1](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90098-1).
- [185] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal and J. Mathur, Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling, *Energy and Buildings*, vol. 42 5, pp. 645-648, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.001>.
- [186] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal and J. Mathur, Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating, *Energy and Buildings*, vol. 41 11, pp. 1151-1154, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.010>.
- [187] M. De Paepe and A. Janssens, Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers, *Energy and buildings*, vol. 35 4, pp. 389-397, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00113-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00113-5).
- [188] A. Li, C. Yang and T. Ren, Modeling and parametric studies for convective heat transfer in large, long and rough circular cross-sectional underground tunnels, *Energy and Buildings*, vol. 127 pp. 259-267, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.088>.
- [189] M. Sodha, D. Buddhi and R. Sawhney, Thermal performance of underground air pipe: different earth surface treatments, *Energy Conversion and Management*, vol. 31 1, pp. 95-104, 1991. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(91\)90108-U](https://doi.org/10.1016/0196-8904(91)90108-U).
- [190] R. Misra, T. K. Aseri and V. Bansal, CFD analysis of thermal influence zone of earth air tunnel heat exchanger under transient conditions, Presented at 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, pp. 1655-1662, December 7-9, 2015.
- [191] A. de Jesus Freire, J. L. s. C. Alexandre, V. B. Silva, N. D. Couto and A. Rouboa, Compact buried pipes system analysis for indoor air conditioning, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51 1-2, pp. 1124-1134, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.045>.
- [192] G. Yoon, H. Tanaka and M. Okumiya, Study on the design procedure for a multi-cool/heat tube system, *Solar Energy*, vol. 83 8, pp. 1415-1424, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.03.010>.
- [193] A. Mathur, A. Srivastava, G. D. Agrawal, S. Mathur and J. Mathur, CFD analysis of EATHE system under transient conditions for intermittent operation, *Energy and Buildings*, vol. 87 pp. 37-44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.022>.
- [194] A. Mathur, A. K. Surana, P. Verma, S. Mathur, G. Agrawal and J. Mathur, Investigation of soil thermal saturation and recovery under intermittent and continuous operation of EATHE, *Energy and Buildings*, vol. 109 pp. 291-303, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.010>.
- [195] A. Mathur, A. K. Surana and S. Mathur, Numerical investigation of the performance and soil temperature recovery of an EATHE system under intermittent operations, *Renewable energy*, vol. 95 pp. 510-521, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.037>.
- [196] P. Hollmuller, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, University of Geneva, 2002.
- [197] H. Carslaw and J. Jaeger, Heat conduction in solids, in Oxford Univ. Press, n. (ed), Editor: London, UK, 1959.
- [198] R. Al-Khoury, Computational modeling of shallow geothermal systems, CRC press, 2011.

## Références Bibliographiques

- [199] S. Barakat, A. Ramzy, A. Hamed and S. El Emam, Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system, *Energy conversion and management*, vol. 111 pp. 137-146, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.060>.
- [200] X. Liu, Y. Xiao, K. Inthavong and J. Tu, A fast and simple numerical model for a deeply buried underground tunnel in heating and cooling applications, *Applied Thermal Engineering*, vol. 62 2, pp. 545-552, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.017>.
- [201] Y. Yener and S. Kakac, Heat conduction, CRC Press, 2018.
- [202] M. Ozisik and D. Tzou, On the wave theory in heat conduction, *Journal of Heat Transfer*, vol. 116 3, pp. 526-535, 1994. <https://doi.org/10.1115/1.2910903>.
- [203] F. Al-Ajmi, D. Loveday and V. I. Hanby, The cooling potential of earth - air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment*, vol. 41 3, pp. 235-244, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>.
- [204] A. Fiche, A. Martin, J.-C. Cexus and A. Khenchaf, Continuous belief functions and  $\alpha$ -stable distributions, Presented at 2010 13th International Conference on Information Fusion, pp. 1-7, 2010.
- [205] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi and S. Y. Ali, Le rafraichissement par la géothermie : étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 13 3, pp. 399-406, 2010.
- [206] A. Rouag, A. Benchabane, A. Labed and N. Boulouf, Thermal design of air cooled condenser of a solar adsorption refrigerator, *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, vol. 2 1, pp. 23-29, 2016. ISSN 2352-9873. Available at: <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/jaest/article/view/1509>.
- [207] A. Rouag, Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [208] Systemair, Catalogue Air Conditionné, <http://www.systemair.com/PageFiles/86426/CATALOGUE%20AIR%20CONDITIONNE%202015%20.pdf>, 05-08-2015.
- [209] S. Airwell, Catalogue Chauffage & Climatisation, <http://export.airwell.com/Portals/8/Press-Releases/2010/Catalogue-Airwell-Export-GB-2010.pdf>, 05-08-2015.
- [210] K. I. El Fadli, R. S. Cerveny, C. C. Burt, P. Eden, D. Parker, M. Brunet, T. C. Peterson, G. Mordacchini, V. Pelino and P. Bessemoulin, World Meteorological Organization assessment of the purported world record 58° C temperature extreme at El Azizia, Libya (13 September 1922), *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 94 2, pp. 199-204, 2013. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00093.1>.
- [211] H. Esen, M. Inalli and M. Esen, Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system, *Building and environment*, vol. 42 3, pp. 1126-1134, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.027>.
- [212] H. Esen, M. Inalli, M. Esen and K. Pihtili, Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers, *Building and environment*, vol. 42 10, pp. 3606-3615, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.014>.
- [213] A. Hepbasli and M. T. Balta, A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings, *Building and Environment*, vol. 42 10, pp. 3747-3756, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.09.003>.

## Références Bibliographiques

- [214] J. Luo, J. Rohn, M. Bayer, A. Priess, L. Wilkmann and W. Xiang, Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany, *Geothermics*, vol. 53 pp. 57-66, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.004>.
- [215] O. Ozgener and A. Hepbasli, Exergoeconomic analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25 10, pp. 1459-1471, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.09.015>.
- [216] W. Yang, L. Sun and Y. Chen, Experimental investigations of the performance of a solar-ground source heat pump system operated in heating modes, *Energy and Buildings*, vol. 89 pp. 97-111, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.027>.
- [217] A. Rouag, A. Benchabane, A. Labeled, K. Belhadj and N. Boultif, Applicability of a solar adsorption cooling machine in semiarid regions: proposal of supplementary cooler using earth-water heat exchanger, *International Journal of Heat and Technology*, vol. 34 2, pp. 281-286, 2016. <https://doi.org/10.18280/ijht.340218>.
- [218] H. Ounis, A. Bencabane and A. Rouag, Accessory with humidified grid to improve the efficiency of air heat exchangers: proposal of a mechanism for air coolers and condensers, 160057, 01/02/2016.ALGERIA, 2016.
- [219] A. Rouag, A. Benchabane, A. Labeled and N. Boultif, Use of shallow geothermal energy to improve the efficiency of air heat exchangers: Proposal of a Geothermal Air-Cooler (GAC), DZ Patent App. 9045, 04-12-2014.ALGERIA, 2014,
- [220] S. Citherlet, C. Hildbrand, J. Bony, A. Kleijer, M. Bunea and S. Eicher, Analyse des performances de la climatisation solaire par adsorption et potentiel pour la Suisse, *Rapport final, Projet SOLCOOL HEIG-VD*, vol. pp. 218, 2011.
- [221] I. Sass, D. Brehm, W. G. Coldewey, J. Dietrich, R. Klein, T. Kellner, B. Kirschbaum, C. Lehr, A. Marek, P. Mielke, L. Müller, B. Panteleit, S. Pohl, J. Porada, S. Schiessl, M. Wedewardt, D. Wesche, *Shallow Geothermal Systems: Recommendations on Design, Construction, Operation and Monitoring*, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2016.
- [222] V. Wagner, P. Blum, M. Kubert and P. Bayer, Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers, *Geothermics*, vol. 46 pp. 22-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.10.005>.
- [223] G. Gan, Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth-air tunnel ventilation of buildings, *Energy and buildings*, vol. 85 pp. 12-22, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.030>.
- [224] V. Puri, Heat and mass transfer analysis and modeling in unsaturated ground soils for buried tube systems, *Energy in Agriculture*, vol. 6 3, pp. 179-193, 1987. [https://doi.org/10.1016/0167-5826\(87\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0167-5826(87)90001-5).
- [225] B. Liu, W. Liu and S. Peng, Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48 21-22, pp. 4579-4589, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.004>.
- [226] H. Demir, A. Koyun and G. Temir, Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification, *Applied thermal engineering*, vol. 29 2-3, pp. 224-233, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.027>.

## Références Bibliographiques

- [227] O. Ozgener, L. Ozgener and J. W. Tester, A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 62 pp. 473-480, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031>.
- [228] A. Bitan, The high climatic quality city of the future, *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, vol. 26 3, pp. 313-329, 1992. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90007-F](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90007-F).
- [229] J. Cook, Searching for the bioclimatic city, Presented at Architecture and Urban Space, Proceedings of the Ninth International PLEA Conference, Seville, Spain, September 1991, pp. 7716, 1991.
- [230] S. Lohani and D. Schmidt, Comparison of energy and exergy analysis of fossil plant, ground and air source heat pump building heating system, *Renewable Energy*, vol. 35 6, pp. 1275-1282, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.002>.
- [231] N. Naili, M. Hazami, S. Kooli and A. Farhat, Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia, *Geothermics*, vol. 53 pp. 270-280, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.004>.
- [232] Y. Belloufi, Etude théorique et expérimentale de l'exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [233] Y. Belloufi, A. Brima, R. Atmani, N. Moumami and F. Aissaoui, Theoretical and experimental study of air refresh by a geothermal heat exchanger air/ground, *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828*, vol. 25, pp. 121-137, 2016.

# ANNEXES

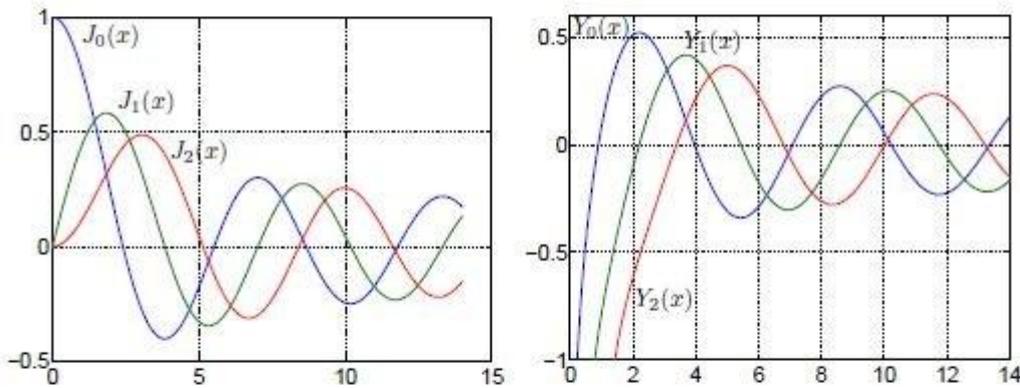
## A Fonctions de Bessel

### A.1 Equation de Bessel

C'est une EDO du second ordre :

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - n^2)y = 0$$

où  $n$  est généralement un entier mais pas forcément. Sa solution est engendrée par les deux fonctions  $J_n(x)$  qui est finie en 0 (et  $y$  est nulle pour  $n > 0$ ) et  $Y_n(x)$  qui diverge en 0. Les premières fonctions  $J_n$  et  $Y_n$  sont représentées Fig. 2.



Fonctions de Bessel

Elles ont de nombreuses propriétés intéressantes. Tout d'abord, on voit que ces fonctions oscillent et se comportent visuellement comme du sinus amorti pour  $x$  grand. On montre en effet que pour  $x \gg 1$  :

$$J_n(x) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{n\pi}{2} - \pi/4\right) \quad Y_n(x) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin\left(x - \frac{n\pi}{2} - \pi/4\right)$$

Ces approximations sont bien pratiques pour initialiser la recherche des zéros numériquement (par exemple avec MATLAB). On peut voir les fonctions de Bessel comme des analogues des fonctions trigonométriques en cylindriques.

## Annexes

Dans le tableau A.1 nous présentons les 10 premières racines de  $J_n(Z)=0$  pour  $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$ .

**Tableau A.1.** Les 10 premières racines de  $J_n(Z)=0$ ,  $n=0, 1, 2, 3$

	$J_0$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$
1	2.4048	3.8317	5.1356	6.3802	7.5883	8.7715
2	5.5201	7.0156	8.4172	9.7610	11.0647	12.3386
3	8.6537	10.1735	11.6198	13.0152	14.3725	15.7002
4	11.7915	13.3237	14.7960	16.2235	17.6160	18.9801
5	14.9309	16.4706	17.9598	19.4094	20.8269	22.2178
6	18.0711	19.6159	21.1170	22.5827	24.0190	25.4303
7	21.2116	22.7601	24.2701	25.7482	27.1991	28.6266
8	24.3525	25.9037	27.4206	28.9084	30.3710	31.8117
9	27.4935	29.0468	30.5692	32.0649	33.5371	34.9888
10	30.6346	32.1897	33.7165	35.2187	36.6990	38.1599

## B Publications scientifiques