



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

كلية العلوم والتكنولوجيا

17/12/2026

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de master en Energies renouvelables en mécanique , conformément au décret
ministerial modifié 008 complétant la decision ministerielle 12/75

Master&start-tup

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie Mécanique

Spécialité: Energies renouvelables en mécanique

Thème

Design et Conception d'un Nouvel Échangeur Air-Sol EAHE

: Présenté par

RAHMANI FAOUZI

Soutenue publiquement le : 17/12/2025

: Devant le jury composé de

TAHTAH Reda	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
KADDOUR Abdelmadjid	Professuer	URAER- Ghardaïa	Rapporteur
KHIRENNAS Messaoud	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
TIMMAOUI Abdelmadjid	Professeur	Univ. Ghardaïa	Examineur
BEKKOUCHE Idris	Ingénieur	URAER- Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, avec toute ma gratitude et mon affection.

À ma famille, pour son soutien et ses encouragements constants.

À tous ceux qui ont contribué à ma réussite, avec mes sincères remerciements.

À mes parents, symbole de sacrifice et de générosité.

À ma famille et à mes proches, avec toute ma reconnaissance.

Je dédie modestement ce travail à mes parents, ma famille et tous ceux qui m'ont soutenu.

Remerciements

*Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide,
leur soutien et leurs précieux conseils tout au long de ce travail.*

*Avec gratitude, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont
accompagné dans ce parcours.*

تهدف هذه المذكرة إلى تطوير منظومة تبريد وتسخين سلبية للمباني تعتمد على مبدأ المبادل الحراري الـ EAHE أو البئر الكندي مع إعادة تصميم مكوناتها الأساسية، أي أنبوب التبادل المدفون، من خلال اقتراح مواد مسامية جديدة وأشكال هندسية مبتكرة. يعتمد العمل على ثلاث محاور رئيسية : استبدال أنابيب الـ PVC التقليدية بأنابيب خزفية أو أجريّة مسامية، اقتراح مقطع نجمي جديد مزود أحياناً بأنبوب ماء مركزي، وتطوير نظام شبكي من الألياف الطبيعية لالتقاط رطوبة التربة واستغلالها في التبريد التبخيري داخل الأنبوب. تم توظيف منهجية MCDA للمقارنة بين المواد، ونمذجة عددية ثلاثية الأبعاد باستخدام ANSYS و Solid Works و CFD، مع ثقافة منهجية في التحقق والـ V&V وفق معايير ASME و AIAA، إضافة إلى برنامج Python لحساب مؤشرات الأداء مثل الكفاءة الحرارية و COP والفوائد الضغطية. أظهرت النتائج أنّ المواد الخزفية المسامية مع المقطع النجمي تسمح بزيادة مساحة التبادل الحراري بما يقارب 240%، وتقليل طول الأنبوب إلى 8-12م بدلاً من 20م، وتقليل حجم الحفر واستهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 60% مع تحسين دالة الخلط ودرجات حرارة الخروج شتاءً وصيفاً. كما أبرزت الدراسة إمكانية دمج هذه الحلول في مشاريع ناشئة مبتكرة ضمن حاضنة جامعة غرداية، مع مواءمتها مع الرؤى الوطنية للانتقال الطاقوي وأهداف التنمية المستدامة، وتوثيقها في شكل براءات اختراع قابلة للتسويق الصناعي.

الكلمات المفتاحية :

المبادل الحراري الأرضي (EAHE)، البئر الكندي، التبريد السلبي، التبريد التبخيري، المواد المسامية، الأنابيب الخزفية، المقطع النجمي، التبادل الحراري، الكفاءة الحرارية (COP)، الفوائد الضغطية، الطاقة المستدامة، للانتقال الطاقوي، براءات اختراع.

Résumé

Ce mémoire porte sur le développement d'un système passif de chauffage et de refroidissement des bâtiments basé sur l'échangeur thermique air-sol (EAHE ou puits canadien), en repensant l'élément clé que constitue le tube enterré à travers de nouveaux matériaux poreux et des formes géométriques innovantes. Trois axes principaux sont étudiés : le remplacement des tubes traditionnels en PVC par des conduites céramiques ou en brique poreuse, la proposition d'une section étoilée munie, dans certains cas, d'un tube d'eau central, et la conception d'un réseau de fibres naturelles destiné à capter l'humidité du sol pour l'exploiter en refroidissement évaporatif à l'intérieur du conduit. Une méthodologie d'aide multicritère à la décision (MCDA) est utilisée pour comparer les matériaux, tandis que la performance thermique et fluide est évaluée par une modélisation numérique 3D détaillée sous ANSYS FLUENT, Design Modeler, Meshing et Solid Works, complétée par des scripts Python pour le calcul de l'efficacité, du COP et des pertes de charge, ainsi que par une procédure rigoureuse de vérification et de validation conforme aux recommandations ASME V&V et AIAA. Les résultats montrent une nette supériorité de la céramique poreuse avec section étoilée, permettant une augmentation d'environ 240% de la surface d'échange, une réduction de la longueur requise de 40 à 60%, une baisse significative du volume d'excavation et de la puissance de ventilation, tout en améliorant la distribution thermique et les températures d'air en sortie sur l'année. Le travail s'inscrit également dans une démarche entrepreneuriale Master-Start-Up, à travers la formulation de plusieurs brevets d'invention et l'élaboration d'un plan d'affaires pour une entreprise innovante spécialisée dans les technologies géothermiques et les solutions de refroidissement évaporatif adaptées au contexte énergétique et climatique algérien.

Mots-clés :

EAHE, puits canadien, échangeur air-sol, refroidissement évaporatif, matériaux poreux, MCDA, modélisation numérique, CFD, ANSYS, Solid Works, MCDA, V&V, ASME, AIAA, Python

Summary

This thesis focuses on the development of a passive heating and cooling system for buildings based on an earth-to-air heat exchanger (EAHE or Canadian well), by redesigning its core component, the buried heat exchange pipe, through new porous materials and innovative cross-sectional geometries. The work addresses three main concepts : replacing conventional PVC pipes with porous ceramic or brick conduits, proposing an octagonal star shaped section sometimes equipped with a central water tube, and designing a fibrous network made of natural and synthetic fibers to capture soil moisture and use it for evaporative cooling inside the air duct. A multi-criteria decision-making (MCDA) methodology is adopted to compare pipe materials, while detailed three-dimensional numerical simulations are carried out using ANSYS FLUENT, Design Modeler, Meshing and Solid Works, supported by Python scripts to compute thermal efficiency, COP and pressure losses, and by a rigorous verification and validation procedure in line with ASME V&V and AIAA guidelines. The results highlight the superior performance of porous ceramic with a star shaped section, achieving about 240% increase in heat exchange area, 40–60% reduction in required pipe length, substantial savings in excavation volume and fan power, and improved outlet air temperatures and mixing quality over the year. Beyond the technical contribution, the study is embedded in an entrepreneurial Master-Start-Up framework, translating the proposed concepts into patentable inventions and a business plan for an innovative company dedicated to geothermal systems and evaporative cooling technologies tailored to the Algerian energy transition strategy and local climatic conditions.

Keywords :

Earth-to-air heat exchanger (EAHE), passive cooling, porous materials, heat transfer enhancement, evaporative cooling, numerical simulations, MCDA, thermal performance

Liste des tableaux

Tableau III.1 : montrant la différence entre les critères adoptés dans l'étude entre les saisons d'été et d'hiver	29
Tableau III.2 : montrant la comparaison entre les matériaux	31
Tableau III.3: présentant les propriétés des trois matériaux	33
Tableau III.4: présentant comparaison des paramètres géométriques et de conception entre le système circulaire et le système en étoile	35
Tableau III.5: présentant des performances thermiques et aérauliques des systèmes	35
Tableau III.6 : présentant des Performances thermique mensuelle	39
Tableau III.7: présentant la Comparaison de longueur et surface requises	39
Tableau III.8: présentant les Résultats calculés pour l'économie d'énergie	40
Tableau III.9: présentant l'étude d'indépendance du maillage et analyse du Grid Convergence Index (GCI) pour le système céramique en étoile	41
Tableau III.10: Étude de l'indépendance du maillage pour le système brique étoile (analyse de T_outlet, Nu_avg et GCI)	42
Tableau III.11: Évaluation de la qualité du maillage pour les systèmes proposés (céramique étoile et brique étoile)	42
Tableau III.12: Évaluation de l'équilibre du domaine (masse et energy imbalance) pour les systèmes étudiés	43
Tableau III.13: Analyse des sources d'incertitude du système céramique étoilé	43
Tableau III.14: Analyse des sources d'incertitude du système brique étoile	44
Tableau III.15: Analyse de sensibilité Pour le système céramique	44
Tableau III.16: Analyse de sensibilité Pour le système brique	45
Tableau III.17: Valeurs calculées des coefficients de transfert thermique pour différents matériaux	46
Tableau III.19: Résultats de performance thermique des systèmes EAHE	46
Tableau III.19: comparaison des performances thermiques des systèmes EAHE (PVC, céramique étoile et brique étoile)	47
Tableau III.20: Comparaison des ressources nécessaires et des réductions obtenues	48
Tableau III.21: Analyse du cycle de vie (ACV) sur 20 ans des systèmes EAHE : comparaison des émissions de CO ₂	49
Tableau III.22: Comparaison des performances des trois matériaux selon les critères requis	51
Tableau III.23: Analyse comparative des indicateurs environnementaux et conformité aux objectifs fixés	52
Tableau III.24: Évaluation comparative des coûts des composants (tubes et coudes) pour les systèmes PVC, céramique et brique	53
Tableau III.25: Comparaison des coûts opérationnels des systèmes EAH	54

Liste des figures

Figure I.1 : schéma de principe d'un puits canadien	4
Figure I.2 : Schéma de principe d'un puits canadien	6
Figure I.3 : Schéma exprime le principe d'un puits canadien en hiver	7
Figure I.4 : Schéma exprime le principe d'un puits canadien en été	7
Figure I.5 : Nature du sol	9
Figure I.6 : Illustration du refroidisseur par évaporation	11
Figure I.7 : Refroidissement par évaporation direct	12
Figure I.8 : Refroidissement par évaporation indirect	12
Figure I.9 : Schéma de principe du refroidissement par évaporation mixte	13
Figure I.10 : caractéristiques de l'argile	14
Figure II.1 : diagramme illustratif les trois concepts pour optimiser les performances de l'échangeur thermique	16
Figure II.2 : la forme tridimensionnelle de l'invention et la figure de la section proposée.	19
Figure II.3 : la forme tridimensionnelle de l'invention	22
Figure II.4 : la section proposée de l'invention	23
Figure II.5 :	25
Figure IV.1 : Système de capture, d'extraction et d'exploitation de l'humidité dans l'échangeur thermique	64
Figure IV.2 : forme innovante de section de conduit d'air dans un échangeur thermique sol-air avec un tube d'eau central	68
Figure IV.3 : forme innovante de section de conduit d'air dans un échangeur thermique sol-air avec un tube d'eau central	68

Liste des abréviations

EAHE : Earth to Air Heat Exchanger (Échangeur thermique air-sol)
ECA : Échangeur de Chaleur Air
PVC : Polychlorure de vinyle
PEHD : Polyéthylène haute densité
PP : Polypropylène
PTC : Polyéthylène réticulé / conduits techniques
MCDA : Multi-Criteria Decision Analysis
WSM : Weighted Sum Model
CFD : Computational Fluid Dynamics
COP : Coefficient of Performance
 ΔP : Perte de pression
 ρ (rho) : Masse volumique
V : Vitesse du fluide
T : Température
V&V : Verification and Validation
GCI : Grid Convergence Index
Mesh : Maillage numérique
ANSYS : Logiciel de simulation numérique
FLUENT : Module CFD de ANSYS
CFD Post : Outil de post-traitement CFD
SolidWorks : Logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO)
VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée
CVC : Chauffage, Ventilation et Climatisation
ASME : American Society of Mechanical Engineers
AIAA : American Institute of Aeronautics and Astronautics
ISO : International Organization for Standardization
ASTM : American Society for Testing and Materials
ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
3D : Trois dimensions
2D : Deux dimensions
CO₂ : Dioxyde de carbone

Sommaire

Remerciement	I
Résumé en Arabe	II
Résumé en Français	II
Résumé en Anglais	III
Liste des tableaux	IV
Liste des figures	VII
Liste des abréviations	VI I
Sommaire	X
Introduction générale	1

CHAPITRE I : APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA GÉOTHERMIE

I.1.1 Introduction :	4
I.1.2. Echangeur air-sol (puits canadien)	4
I.1.2.1. Compositions d'un puits canadien :	5
I.1.2.2. Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol :	6
I.2 Analyse des paramètres à modéliser	9
I.2.1 Nature du sol :	9
I.2.2 Conductivité thermique du sol :	9
I.3. Refroidissement par évaporation :	10
I.3.1. Le Principe de fonctionnement :	11
I.3.2. Les systèmes de refroidissement par évaporation de l'eau :	11
I.4. Refroidissement évaporatif à travers les matériaux poreux : argile	13
I.4.1 Définition et caractéristiques de l'argile	13

CHAPITRE II : DE L'ÉCHANGEUR THERMIQUE TRADITIONNEL AUX NOUVELLES APPROCHES PROPOSÉES

II.1. Un matériau innovant :	16
II.1.1. Domaine technique auquel se rapporte l'invention :	16
II.1.2. But de l'invention :	16
II.2. Etat de la technique antérieure :	17
II.2.1. Enoncé des figures :	17
II.2.2. Présentation de l'invention :	13
II.2.3. Mode de mise en œuvre de l'invention :	18
II.3. Mécanisme de fonctionnement de l'appareil :	18
II.4. Forme innovante de section de conduit d'air :	19
II.4.1 Domaine technique de l'invention :	19
II.4.2 État de la technique antérieure :	20

II.4.2.1 Liste des dessins et figures :	20
II.4.2.2 Objectif de l'invention :	20
II.4.2.3 Évaluation du cœur de l'invention :	20
II.4.3 Méthode de Réalisation de l'invention :	21
II.4.3.1 Mode d'application de l'invention :	21
II.4.3.2 Mécanisme de fonctionnement de l'appart	22
II.4.4 Titre de l'invention :	23
II.4.4.1 État de la Technique Antérieure :	23
II.4.4.2 Objectif de l'Invention :	23
II.4.4.3 Principal défaut :	23
II.4.4.4 Liste des dessins et figures :	23
II.4.4.5 Présentation de l'essence de l'invention :	23
II.4.5. Méthode de réalisation de l'invention :	24
II.4.5.1. Manière d'appliquer l'invention :	24
II.4.5.2. Éléments de l'appareil :	24
II.4.5.3. Revendications :	24
Conclusion :	25

CHAPITRE III : ETUDE NUMERIQUE COMPARATIVE APPROFONDIE DES SYSTEMES THERMIQUES ET DEVELOPPEMENT PROPOSE GEOTHERMIE

III.1. Introduction :	27
III.2. Conclusions principales :	30
III.2 : Méthodologie de comparaison des matériaux	30
III.2.1 Cadre méthodologique de comparaison:	30
III.2.2. Critères de comparaison adoptés :	31
III.2.3. Méthode d'évaluation :	31
III.2.4. Résultats de comparaison des matériaux :	31
III.2.5. Calcul de la durée de vie des matériaux :	31
III.2.5.1. Méthodologie adoptée :	31
III.2.5.2. PVC (15 années) :	32
III.2.5.3. Céramique poreuse (40 années) :	32
III.2.5.4. Brique poreuse (30 années) :	32
III.2.6. Résumé des résultats de comparaison des matériaux :	32
III.3.1. Méthodologie adoptée :	32
III.3.2. Conception tridimensionnelle avec SolidWorks :	33

III.3.2.1. Étapes de conception dans SolidWorks :	33
III.3.3. Spécifications techniques calculées avec épaisseur des matériaux	33
III.3.4. Logiciels de simulation utilisés :	33
III.3.5. Définition technique des éléments de comparaison :	34
III.3.5.1. Surface d'échange thermique :	34
III.3.5.2. Longueur requise (pour obtenir la même efficacité) :	34
III.3.5.3. Surface au sol requise :	34
III.3.5.4. Perte de pression :	34
III.3.5.5. Mélange d'air (indice de mélange) :	34
III.3.5.6. Distribution thermique (coefficient d'uniformité) :	34
III.3.6. Résultats de comparaison de conception :	35
III.3.7. Impact de la conception sur la surface et la distance :	35
III.3.7.1. Avantages spatiaux de la conception en étoile :	35
III.4.1. Méthodologie de travail dans ANSYS FLUENT et simulation avec Python:	35
III.4.1.1. Utilisation de Python dans la simulation :	35
III.4.1.2. Calcul de l'efficacité d'échange thermique	36
III.4.1.3. Calcul du coefficient de performance COP	36
III.4.1.4. Données du système PVC EAHE de référence	36
III.4.1.5. Calcul du système proposé (étoile céramique)	36
III.4.1.6. Calcul du système proposé (étoile brique)	36
III.4.1.7. Calcul de l'amélioration relative	37
III.4.1.8. Comparaison des résultats	37
III.4.2. Configuration du modèle numérique dans ANSYS :	37
III.4.2.1. Première phase - Géométrie (Design Modeler) :	37
III.4.2.2. Deuxième phase - Maillage (Meshing) :	37
III.4.2.3. Troisième phase - Solution numérique (Setup&Solution) :	37
III.4.3. Équations fondamentales de solution :	38
III.4.3.1. Équation de conservation de l'énergie :	38
III.4.3.2. Équation de quantité de mouvement (Momentum) :	38
III.4.3.3. Équation de continuité :	38
III.4.3.4. Modèle k- ϵ pour la turbulence :	38
III.4.4. Résultats calculés :	39
III.4.4.1. Performance thermique mensuelle :	39
III.4.4.2. Comparaison de longueur et surface requises :	39

III.4.5. Quantité d'énergie économisée due à la réduction de distance :	40
III.4.5.1. Calcul de chute de pression et économie d'énergie :	40
III.4.5.2. Résultats calculés pour l'économie d'énergie :	40
III.4.5.3. Économie annuelle en électricité :	40
III.4.6. Méthodologie de vérification et validation pour les systèmes proposés :	40
III.4.6.1. Étude d'indépendance de maillage (Mesh Independence Study)	41
III.4.6.1.1. Méthodologie Grid Convergence Index (GCI) :	41
III.4.6.1.2. Équation de calcul GCI :	41
III.4.6.2. Analyse de qualité de maillage (Mesh Quality Assessment)	42
4.6.3. Critères de convergence et stabilité	42
4.6.3.1. Résidus (Residuals) pour les systèmes proposés :	42
III.4.6.3.2. Équilibre du domaine (Domain Imbalance) :	42
III.4.6.4. Validation avec données de référence	42
III.4.6.4.1. Comparaison avec résultats PVC <i>Sakhri et al. 2018</i> :	42
III.4.6.5. Analyse d'incertitude (Uncertainty Analysis)	43
III.4.6.5.1. Sources d'incertitude pour les systèmes proposés:	43
III.4.6.5.2. Calcul d'incertitude totale :	43
III.4.6.6. Analyse de sensibilité (Sensitivity Analysis)	43
III.4.6.7. Conclusion et conformité aux normes académiques	44
III.5.1. Définition et méthodologie :	44
III.5.2.+. Équation fondamentale :	44
III.5.3. Équation ε -NTU avancée :	45
III.5.4. Calcul du coefficient de transfert thermique global :	45
III.5.5. Valeurs calculées pour les coefficients de transfert :	45
III.5.6. Résultats calculés :	46
III.5.7. Explication physique de l'amélioration :	46
III.6.1. Comparaison des résultats thermiques (même méthodologie) :	46
III.6.2. Améliorations obtenues en ressources :	47
III.7.1. Méthodologie d'analyse du cycle de vie :	47
III.7.2. Phases étudiées :	47
III.7.3. Coefficients d'émission adoptés :	47
III.7.4. Résultats d'analyse du cycle de vie (20 ans) :	48
III.8.1. Cadre réglementaire algérien :	48
III.8.2. Définition des critères et leurs valeurs limites :	49

III.8.2.1.Coefficient de performance estival (COP Summer) ≥ 3.0 :	49
III.8.2.2.Coefficient de performance hivernal (COP Winter) ≥ 2.5 :	49
III.8.2.3.Efficacité annuelle $\geq 55\%$:	49
III.8.2.4.Économie d'énergie $\geq 40\%$:	49
III.8.2.5.Intensité énergétique ≤ 50 kWh/m ² /an :	49
III.8.3.Résultats d'évaluation :	49
III.8.4. Analyse d'éligibilité au soutien gouvernemental :	50
III.9.1. Définition et cadre de référence :	50
III.9.2.Critères et leurs valeurs limites :	50
III.9.2.1.Réduction des émissions CO ₂ $\geq 60\%$:	50
III.9.2.2.Recyclabilité $\geq 80\%$:	51
III.9.2.3.Utilisation de matériaux locaux $\geq 70\%$:	51
III.9.2.4.Durée de vie ≥ 25 ans :	51
III.9.2.5.Consommation d'eau ≤ 2 litres/m ² /jour :	51
III.9.3. Résultats d'évaluation environnementale :	51
III.10.1. Méthodologie :	52
III.10.2. Comparaison complète pour même rendement :	52
III.10.3. Pour obtenir la même économie d'énergie (1,330 kWh/an) :	52
III.10.4. Tableau détaillé des coûts :	53
III.10.5. Coûts opérationnels annuels :	54
III.10.6.Conclusion économique pour même rendement :	54
III.10.6.1.Économie réalisée avec céramique étoile :	54
III.10.6.2.Économie réalisée avec brique étoile :	54
III.11.1. Recommandation technique :	54
III.11.2. Recommandation économique :	55
III.11.3. Recommandation environnementale :	55
III.11.4. Recommandation d'application :	55

CHAPITRE IV : PLAN D'AFFAIRES DE L'ENTREPRISE INNOVANTE-DEVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES D'ENERGIES RENOUVELABLES

IV.4 Le processus de création d'une startup :	57
IV.4.1.Section1 : Les informations relatives au projet	57
IV.4.2. Les valeurs proposées :	57
IV.4.3. Objectifs du projet :	58
IV.4.4.Domaine technique auquel se rapporte l'invention :	58

IV.4.5.But de l'invention :	58
IV.4.6.Etat de la technique antérieure :	59
IV.4.7.Les caractéristiques techniques précédentes :	59
IV.4.8.Présentation de l'invention :	59
IV.4.9.Mode de mise en œuvre de l'invention :	60
IV.4.10.Mécanisme de fonctionnement de l'appareil :	60
IV.4.11.Revendications :	60
Conclusion générale	72
Reference	75
Annexe	80

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Face à l'augmentation continue de la demande mondiale en climatisation artificielle et à la croissance de la consommation d'énergie électrique dans le secteur du bâtiment, les systèmes de refroidissement conventionnels sont devenus l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre et d'impacts environnementaux liés au changement climatique. Cette situation a poussé les chercheurs et les ingénieurs à proposer des solutions alternatives plus durables, basées sur l'exploitation des phénomènes naturels et des propriétés des matériaux, afin de réduire la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau acceptable de confort thermique à l'intérieur des espaces bâtis.

Parmi ces solutions, les techniques de refroidissement passif, et en particulier l'échangeur air-sol de type « puits canadien » et le refroidissement par évaporation, se sont imposées comme des options efficaces dans les régions à climat chaud et sec. Elles permettent de tirer parti de la stabilité de la température du sol en profondeur, ainsi que du phénomène d'évaporation de l'eau au sein de matériaux poreux comme l'argile, pour abaisser la température de l'air avant son introduction dans le bâtiment. Ces systèmes exploitent l'inertie thermique du sol et les matériaux locaux, ce qui les rend particulièrement adaptés aux environnements désertiques et semi-arides.

Malgré la simplicité apparente de leur principe de fonctionnement, les performances de ces systèmes restent fortement dépendantes de plusieurs facteurs, notamment la nature du sol, la profondeur et la longueur du conduit enterré, les propriétés du matériau poreux utilisé pour le refroidissement par évaporation, ainsi que les conditions climatiques de fonctionnement (température, humidité, débit d'air). En l'absence d'une étude méthodique combinant analyse théorique, calculs thermiques et prise en compte des données climatiques locales, le dimensionnement de ces systèmes peut s'avérer non optimal et ne pas exploiter pleinement leur potentiel.

Dans ce contexte, ce travail a pour objectif d'étudier, d'analyser et d'optimiser un système de refroidissement passif combinant un échangeur air-sol (puits canadien) et un dispositif de refroidissement par évaporation basé sur des matériaux poreux locaux, dans des conditions climatiques représentatives des régions chaudes et sèches. Le projet s'articule autour de l'analyse du comportement de l'échange thermique entre l'air et le sol, de l'étude de l'influence des propriétés thermiques du sol et des matériaux utilisés, ainsi que de l'évaluation de l'efficacité du refroidissement évaporatif, en vue de proposer des configurations géométriques

et des conditions de fonctionnement permettant d'améliorer les performances globales du système et de réduire la consommation énergétique.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré au cadre théorique de l'énergie géothermique superficielle et du puits canadien, en présentant le principe de fonctionnement de l'échangeur air-sol, les caractéristiques du sol influençant l'échange thermique, ainsi que les avantages et les limites de ce dispositif. Le deuxième chapitre traite des principes du refroidissement par évaporation, avec un accent particulier sur le refroidissement à travers les matériaux poreux, notamment l'argile, en détaillant leur structure, leurs propriétés thermo-physiques et leur rôle dans l'amélioration du confort thermique des bâtiments.

Le troisième chapitre présente l'étude de modélisation et/ou d'analyse thermique du système combiné, en s'appuyant sur les équations de transfert de chaleur et de masse, et en mettant en évidence les paramètres les plus influents tels que la vitesse de l'air, la longueur et la profondeur du conduit enterré, ainsi que les propriétés du sol et du matériau poreux. Le quatrième chapitre est dédié à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats numériques et/ou expérimentaux obtenus, en évaluant la pertinence de ce type de système pour le climat étudié et en proposant des recommandations de conception et d'application pratique dans le domaine du bâtiment.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats de ce travail, met en évidence ses limites et suggère des perspectives de recherche futures, notamment en ce qui concerne la combinaison de ce système avec d'autres solutions passives ou son intégration dans des dispositifs de suivi et de contrôle intelligents pour optimiser ses performances en temps réel.

CHAPITRE 01 :

APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR

LA GÉOTHERMIE

I.1.1 Introduction :

Ce chapitre explore en détail les principes théoriques associés à la géothermie et à ses diverses utilisations, en se basant sur une étude des conditions météorologiques propres à la région où le système est installé. L'analyse porte sur le mécanisme de l'échangeur air-sol, en précisant l'agencement de ses éléments, leurs caractéristiques thermiques et mécaniques, ainsi que les rendements globaux du dispositif. On examine également les atouts et les contraintes techniques de cet appareil pour juger de sa pertinence dans le cadre environnemental et énergétique visé.[1]

I.1.2. Echangeur air-sol (puits canadien)

Le puits canadien est un dispositif constitué d'un ou plusieurs conduits enterrés horizontalement sous un bâtiment et reliés au système de ventilation. Il permet de tirer parti de la stabilité thermique du sol pour tempérer l'air extérieur. En effet, alors que la température de l'air ambiant varie fortement selon la saison, la date ou les conditions météorologiques, celle du sol reste relativement constante à quelques mètres de profondeur grâce à sa grande inertie thermique. Le système fonctionne comme un échangeur thermique air-sol : l'air extérieur circule dans les conduits enterrés, échange de la chaleur avec le sol, puis est insufflé dans le bâtiment à l'aide de ventilateurs. [2]

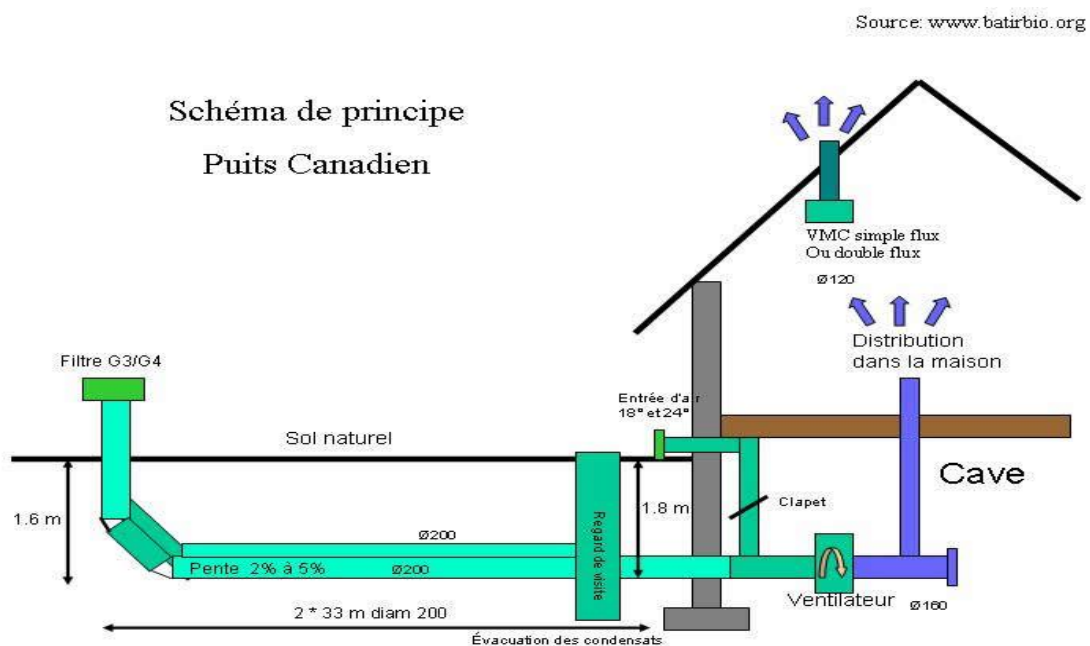


Figure I.1 : schéma de principe d'un puits canadien [69]

I.1.2.1 Compositions d'un puits canadien :

- . Une entrée d'air neuf : une bouche d'aspiration de l'air, avec une grille et un filtre.
- . Des conduits enterrés récupérateurs : un ou plusieurs tuyaux pour le passage de l'air avec une pente supérieure à 2 % pour permettre l'évacuation des condensats et ainsi éviter les risques de moisissure et d'humidité résiduelle.
- . Un regard de visite pour inspecter votre installation.
- . Un by-pass pour court-circuiter le puits canadien, à l'intersaison. Il peut en effet être plus intéressant de prendre directement l'air extérieur sans passer par le puits canadien. C'est à cet instant qu'entre en action le relais by-pass commandé par une sonde thermique extérieure.
- . Un ventilateur pour forcer et réguler le débit de l'air à distribuer dans la maison.
- . Un système de ventilation simple flux ou double flux en fonction des besoins énergétiques.

Se servir du puits canadien sans utiliser la VMC (ventilation mécanique contrôlée) est moins efficace. En effet, la VMC est un dispositif qui assure le renouvellement de l'air à l'intérieur des pièces, notamment pour les pièces humides (salles de bains, toilettes...), ce qui permet de réaliser des économies de chauffage. [3]

Coupler le puits canadien avec une centrale double-flux (VMC) sera donc recommandée :

La Centrale double-flux VMC va permettre de gérer les flux d'air entrant et sortant de l'habitation. L'air vicié aspiré dans les pièces humides du lieu (wc, salle de bain, cuisine) passe par un échangeur. C'est cet échangeur qui va capter les calories et les transmettre à l'air entrant du Puits canadien (l'air renouvelé et soufflé dans l'habitation sera aux environs de 18°).

En fonction du volume renouvelé et de la qualité d'isolation de l'habitation, c'est une partie ou la totalité du besoin de chauffage qui va être assuré par ces 2 systèmes couplés ensemble : puits canadien et centrale double-flux VMC. [4]

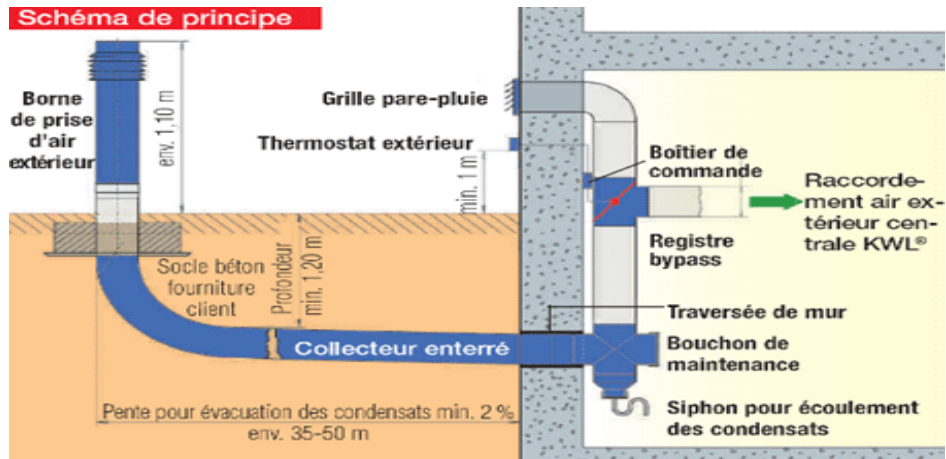


Figure I.2 : Schéma de principe d'un puits canadien [69]

I.1.2.2 Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol :

Le puits canadien capte l'air extérieur et le fait circuler dans un réseau de conduits enterrés à une certaine profondeur. Grâce à l'inertie thermique du sol, cet air est naturellement réchauffé en hiver ou rafraîchi en été, avant d'être diffusé à l'intérieur de l'habitation. Ce système repose sur l'écart de température entre l'air ambiant et le sol, ce qui permet de réguler de manière passive la température de l'air entrant, tout en assurant un renouvellement sain et confortable de l'air intérieur. [5]

Trois modes de fonctionnement de l'échangeur air-sol, qui sont appropriés à chaque saison :

A). Fonctionnement en hiver :

En hiver, à deux mètres de profondeur, la température du sol est comprise entre 4 et 7°C, dans le cas d'une température extérieure de -10°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +2°C permettant ainsi une économie de chauffage pouvant aller jusqu'à 15% suivant les régions. Le puits canadien permet également de maintenir hors gel un bâtiment. Lorsque ces puits sont couplés à un système de ventilation double flux avec échangeur. D'autre part avec le puits canadien, il n'est plus nécessaire de prévoir un dispositif anti-condensation, permettant ainsi de réaliser des économies de chauffage en cas d'utilisation d'un échangeur thermique [6]

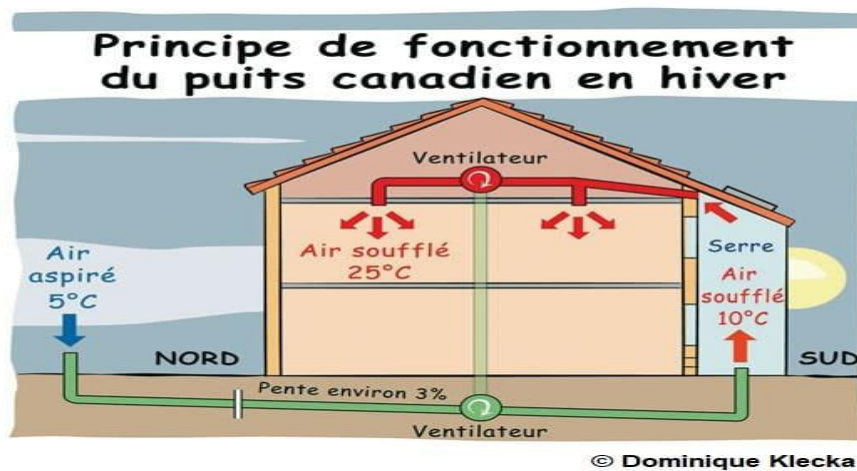


Figure I.3 : Schéma exprime le principe d'un puits canadien en hiver [69]

b) Fonctionnement en été :

En été, à deux mètres de profondeur, la température du sol est d'environ 15°C, dans le cas d'une température extérieure de +30°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +24°C permettant un rafraîchissement de l'air ambiant sans avoir recours à un système de climatisation et de renoncer à une climatisation classique en raison des avantages obtenus qui permettent d'obtenir des conditions de vie acceptables, un logement sain et agréable.

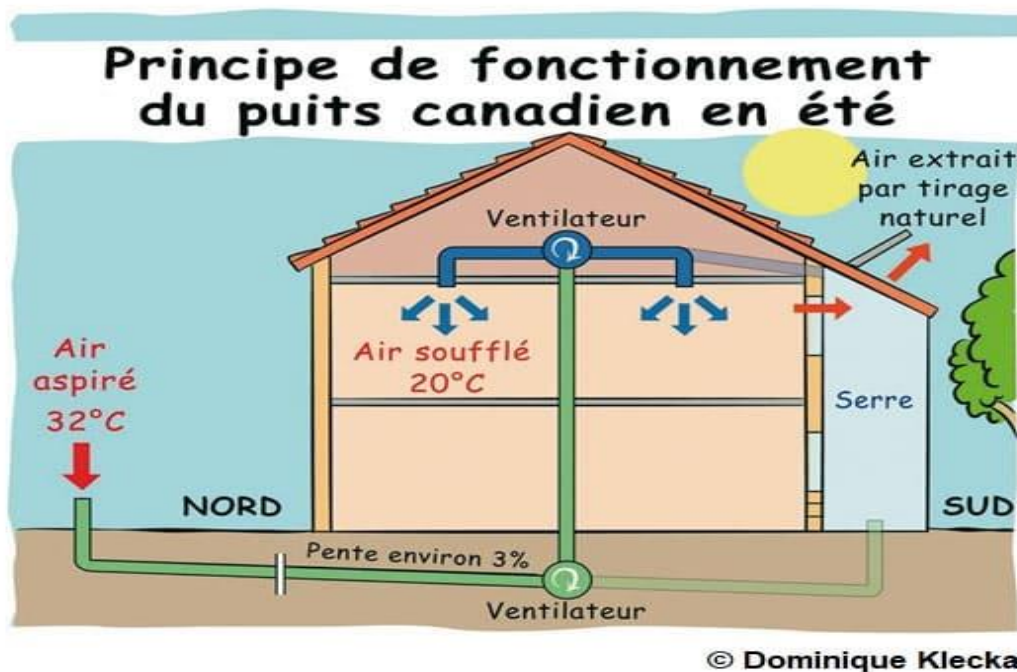


Figure I.4 : Schéma exprime le principe d'un puits canadien en été [69]

c) Fonctionnement au printemps / automne :

Pendant les intersaisons, la température extérieure subit des variations importantes (journée ensoleillée – nuits froides), mais la température du sous-sol reste stable (fraîche au printemps – encore chaude en automne). Par une chaude journée de printemps, il n'est pas souhaitable d'amener de l'air neuf par l'intermédiaire de l'échangeur géothermique, cet air serait plus frais que l'air extérieur. Par contre, le préchauffage de l'air par l'échangeur géothermique pendant les nuits fraîches du printemps est souhaitable. L'exemple inverse (journées fraîches, nuits chaudes) est valable pour les journées d'automne [7]

Il est constitué d'un ou plusieurs tubes assurant un triple rôle : canaliser le flux d'air, permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de l'ouvrage. Leurs principales caractéristiques sont leurs dimensions (diamètre, longueur) et leur matériau.

Le choix du matériau varie en fonction des contraintes mécaniques, des dimensions et des performances thermiques recherchées. Les principaux matériaux utilisés sont les suivants :

- Le polypropylène, l'acier galvanisé, le béton, le grès vitrifié pour le tertiaire.
- Le polyéthylène, le polypropylène, les gaines PTC, le PVC, la terre cuite pour le résidentiel individuel.

Les échangeurs en matériau souple peuvent parfois être d'un seul tenant mais le plus souvent, ils sont en plusieurs sections comme les échangeurs en matériau rigide. Plusieurs méthodes sont alors utilisées pour assurer les raccords : vissage, emboîtement, collage... avec parfois des joints en caoutchouc.

L'échangeur est généralement enterré entre 4 et 6 m pour le tertiaire et entre 1 et 2 m pour le résidentiel individuel. Il est assez éloigné de la dalle des bâtiments pour éviter toute fuite de chaleur de celle-ci vers le puits. Une pente régulière de 2 à 3% est mise en place afin d'évacuer les éventuels condensats. Un échangeur prend de la place. Sa configuration a une influence importante sur les pertes de charge. Le choix de la configuration est donc un compromis entre les possibilités offertes par le terrain et les pertes de charge. Les quatre configurations représentées figure 8 sont les plus utilisées : droite, en boucle, en boucle de Techiman ou en méandres.

I.2. Analyse des paramètres à modéliser

L'analyse approfondie de la littérature consultée amène à clairement identifier les paramètres influant sur le comportement thermique du puits canadien et distinguer les plus prépondérants d'entre eux.

I.2.1 Nature du sol :

C'est un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un puits canadien/provençal. Les performances du puits sont directement liées à la capacité calorifique et à la conductivité thermique du sol. Ces deux propriétés thermiques du sol sont expliquées dans les encadrés suivant [17]

Le graphique suivant, extrait de la thèse de P. Hollmuller (2002), montre la conductivité thermique de différents matériaux en fonction de leur teneur en eau. En abscisse, on peut lire la proportion volumique d'eau dans le terrain. En ordonnée, la conductivité. On constate que pour une teneur en eau très faible, l'ensemble des matériaux a une conductivité faible et relativement proche. Dans le cas du sable et du limon, elle augmente de manière importante avec la teneur en eau. Or, une conductivité élevée assure un bon échange thermique et donc un bon fonctionnement du puits canadien.[9]

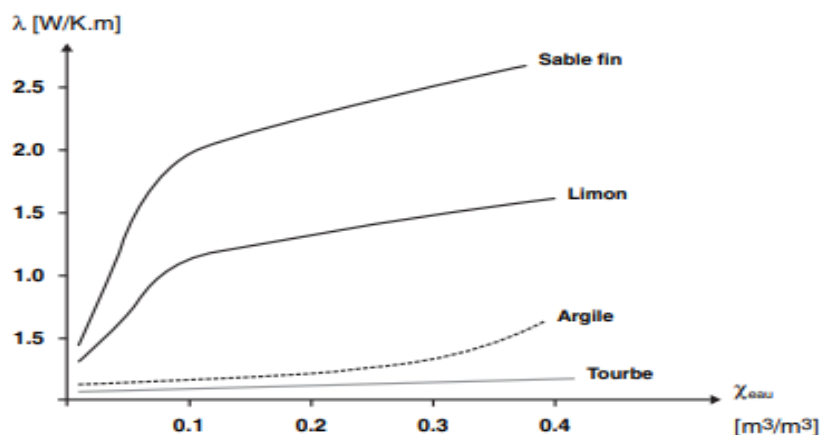


Figure I.5 : Nature du sol [69]

I.2.2 Conductivité thermique du sol :

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules ainsi que de sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide. La conductivité thermique d'un sol peut donc varier dans le temps, notamment en fonction des évolutions de sa teneur en eau dues aux variations climatiques et au changement de saison.[17]

I.3. Refroidissement par évaporation :

- Le refroidissement évaporatif constitue un procédé naturel reposant sur l'évaporation de l'eau pour abaisser la température d'un fluide ou condenser un gaz. Ce mécanisme utilise l'eau comme fluide caloporteur principal et l'air ambiant comme vecteur de dissipation thermique vers l'atmosphère. Reconnue pour son efficacité énergétique, cette technologie est largement mise en œuvre dans les systèmes de réfrigération via les tours de refroidissement humides. Ces dernières jouent un rôle significatif dans la réduction de l'empreinte carbone, pouvant permettre une économie supplémentaire pouvant atteindre 56 000 tonnes de CO₂, contribuant ainsi aux objectifs de durabilité environnementale. [10]
- Le refroidissement par évaporation est une forme courante de refroidissement des bâtiments afin de garantir un confort thermique puisqu'il est relativement bon marché et nécessite moins d'énergie que les autres formes de refroidissement.
- Le refroidissement évaporatif se révèle particulièrement performant dans les conditions de faible humidité relative, ce qui en restreint l'usage principalement aux climats arides. Ce procédé entraîne également une augmentation notable du taux d'humidité intérieure, un avantage apprécié dans les régions désertiques, où l'air humide contribue à réhydrater la peau sèche et à soulager les voies nasales. Ainsi, l'analyse des données climatiques caractéristiques constitue une étape indispensable pour évaluer la pertinence de stratégies de refroidissement évaporatif dans un bâtiment. Les trois paramètres climatiques les plus déterminants sont la température du bulbe sec, celle du bulbe humide et la dépression psychrométrique observée lors de la journée de conception estivale. Il convient de vérifier si cette dépression est suffisante pour assurer le refroidissement requis dans ces conditions. L'estimation de la température de l'air en sortie du système peut être obtenue en soustrayant la dépression psychrométrique à la température extérieure du bulbe sec. Enfin, il importe de rappeler que la possibilité pour la température extérieure du bulbe sec d'atteindre celle du bulbe humide dépend directement de l'efficacité de saturation du dispositif.[11]
- Le refroidissement par évaporation est particulièrement adapté aux zones caractérisées par un air chaud et une faible humidité, notamment dans les régions arides et semi-arides.
- Dans les endroits où l'humidité est modérée, il existe de nombreuses utilisations rentables pour le refroidissement par évaporation, en plus de leur utilisation répandue dans les climats secs. Par exemple, installations industrielles, cuisines commerciales, blanchisserie industrielle/buanderie, pressing, nettoyage à sec, serres, refroidissement ponctuel (quais de

chargement, entrepôts, usines, chantiers de construction, événements sportifs, ateliers, garages, chenils...).

Le coût initial et opérationnel d'un système de refroidissement par évaporation est généralement nettement inférieur à celui d'un climatiseur à cycle frigorifique, pouvant représenter une réduction d'environ 80 %. Néanmoins, le refroidissement par évaporation et la climatisation à compression de vapeur peuvent être associés afin d'optimiser les performances thermiques. Par ailleurs, certains modèles de refroidisseurs par évaporation peuvent également fonctionner comme humidificateurs durant la période de chauffage. Il convient toutefois de souligner que, même dans les zones à climat très aride, des épisodes ponctuels d'humidité relative élevée peuvent limiter l'efficacité de cette technique comme stratégie de refroidissement. [12]

I.3.1 Le Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation repose sur le processus naturel d'évaporation de l'eau. Lorsque de l'air chaud et sec circule au-dessus ou à travers une surface humide, l'eau absorbe la chaleur contenue dans cet air pour s'évaporer. Cette absorption de chaleur entraîne une diminution de la température de l'air. L'air ainsi refroidi et humidifié est ensuite diffusé dans l'espace à rafraîchir. L'efficacité de ce procédé dépend de la température initiale et du taux d'humidité de l'air : plus l'air est chaud et sec, plus le refroidissement est performant.



Figure I.6: Illustration du refroidisseur par évaporation [69]

I.3.2 Les systèmes de refroidissement par évaporation de l'eau :

a). Refroidissement évaporation direct

Il s'agit du procédé le plus élémentaire de refroidissement par évaporation, consistant à introduire l'air extérieur au moyen d'un ventilateur. Cet air traverse ensuite une chambre où il est mis en contact avec de l'eau, fournie soit par un système d'aspersion générant de fines

gouttelettes, soit par un support poreux préalablement humidifié. Au cours de l'échange thermique avec l'air chaud, une partie de l'eau s'évapore, entraînant une diminution de la température de l'air et une augmentation de son taux d'humidité. Pour des raisons pratiques, il est toutefois préférable que l'air ne soit pas saturé à 100 % en humidité relative.[13]

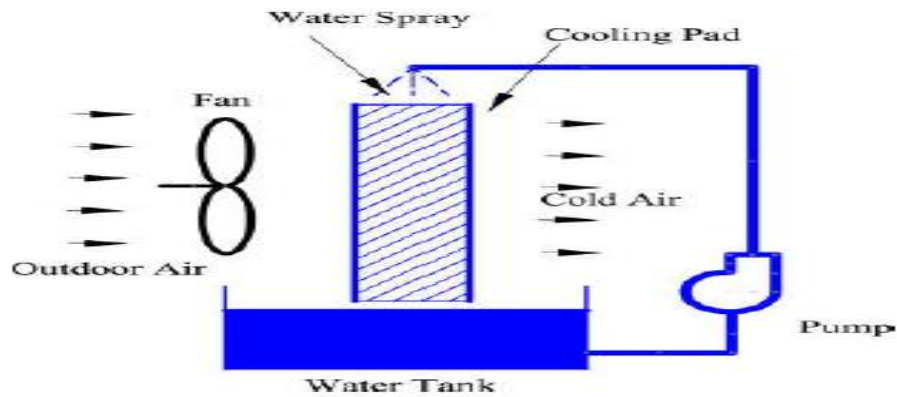


Figure 1.7 : Refroidissement par évaporation direct [69]

b). Refroidissement par évaporation indirect :

Le refroidissement évaporatif indirect repose sur le même principe que le refroidissement évaporatif direct, consistant à abaisser la température de l'air par évaporation de l'eau. Toutefois, il intègre un échangeur thermique permettant de refroidir l'air extérieur. Dans ce cas, l'échange thermique s'effectue entre deux flux d'air distincts, et non au sein d'un seul[14]

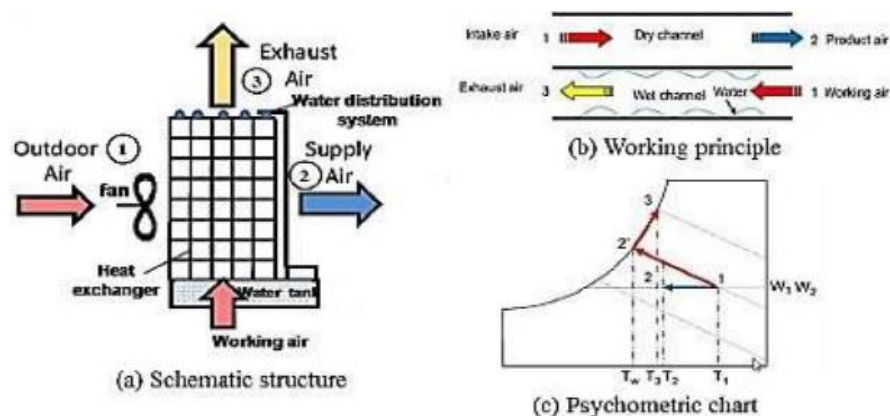


Figure 1.8 : Refroidissement par évaporation indirect [69]

C). Système mixte :

En raison des limites inhérentes aux systèmes de refroidissement évaporatif, qu'ils soient directs ou indirects, ceux-ci sont souvent commercialisés sous forme de systèmes «hybrides » intégrant une étape secondaire de compression mécanique de vapeur (VCS) afin de pallier cette limitation de capacité, ce qui entraîne toutefois une augmentation supplémentaire des coûts

d'exploitation et d'installation. Malgré cette complexité, les systèmes entièrement indirects présentent une efficacité énergétique supérieure, permettant des économies d'énergie notables et offrant des températures inférieures à celle du fluide d'entrée.[15]

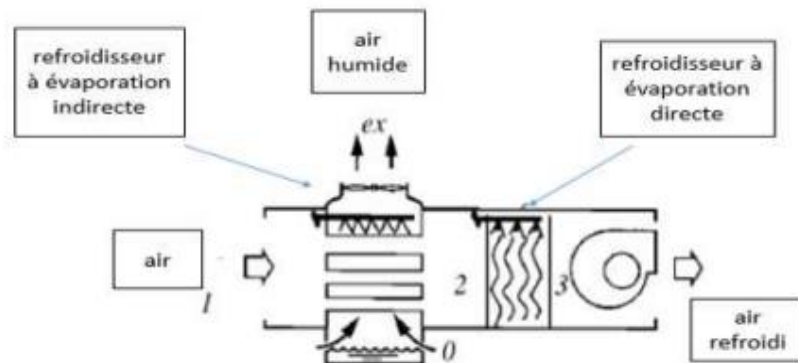


Figure I.9 : Schéma de principe du refroidissement par évaporation mixte [69]

I.4. Refroidissement évaporatif à travers les matériaux poreux : argile

Matériau modeste et omniprésent à l'échelle mondiale, l'argile a joué un rôle déterminant dans l'évolution et le développement des sociétés humaines. Des constructions anciennes en pisé jusqu'aux réalisations contemporaines en terre crue, elle constitue depuis des millénaires l'un des piliers fondamentaux de l'architecture, alliant fonctionnalité, durabilité et qualités esthétiques.

I.4.1 Définition et caractéristiques de l'argile

L'argile est un matériau naturel finement granulé, composé majoritairement de silicates d'aluminium hydratés. Sa composition chimique et ses propriétés physico-mécaniques varient selon son origine géologique, mais elle présente généralement les attributs suivants :

- **Plasticité** : sa capacité à être modelée à l'état humide permet la fabrication d'éléments architecturaux tels que briques, tuiles ou modules décoratifs.
- **Résistance mécanique** : une fois séchée et cuite, l'argile développe une solidité élevée, la rendant apte à des usages structurels durables.
- **Masse thermique** : grâce à sa forte capacité thermique massique, elle absorbe et emmagasine la chaleur, contribuant à la régulation passive de la température intérieure des bâtiments.
- **Propriétés isolantes** : elle offre également une isolation thermique naturelle, favorisant le maintien d'un confort hygrothermique dans les espaces habités.



Figure I.10 : caractéristiques de l'argile

La capacité hygroscopique de l'argile joue un rôle déterminant dans les mécanismes de refroidissement par évaporation.

- **Absorption de l'humidité** : les parois en argile présentent une aptitude notable à capter l'humidité de l'air ambiant, particulièrement dans les environnements à forte humidité relative.
- **Évaporation** : l'eau ainsi absorbée s'évapore progressivement, générant un effet de refroidissement par transfert de chaleur depuis l'air environnant vers la surface du matériau.
- **Ventilation naturelle** : ce phénomène est amplifié par une ventilation naturelle efficace, favorisant la circulation de l'air frais et l'évacuation de la chaleur accumulée lors du processus d'évaporation.
- **Propriétés isolantes** : les capacités thermiques et isolantes de l'argile renforcent cette fonction de refroidissement, améliorant ainsi la performance énergétique globale du bâtiment. [16].

CHAPITRE 02:
DE L'ÉCANGEUR THERMIQUE
TRADITIONNEL
AUX NOUVELLES APPROCHES PROPOSÉES

Trois concepts sont actuellement envisagés pour optimiser les performances de l'échangeur thermique. Leur développement fait l'objet de travaux en cours et sera approfondi dans des recherches futures :

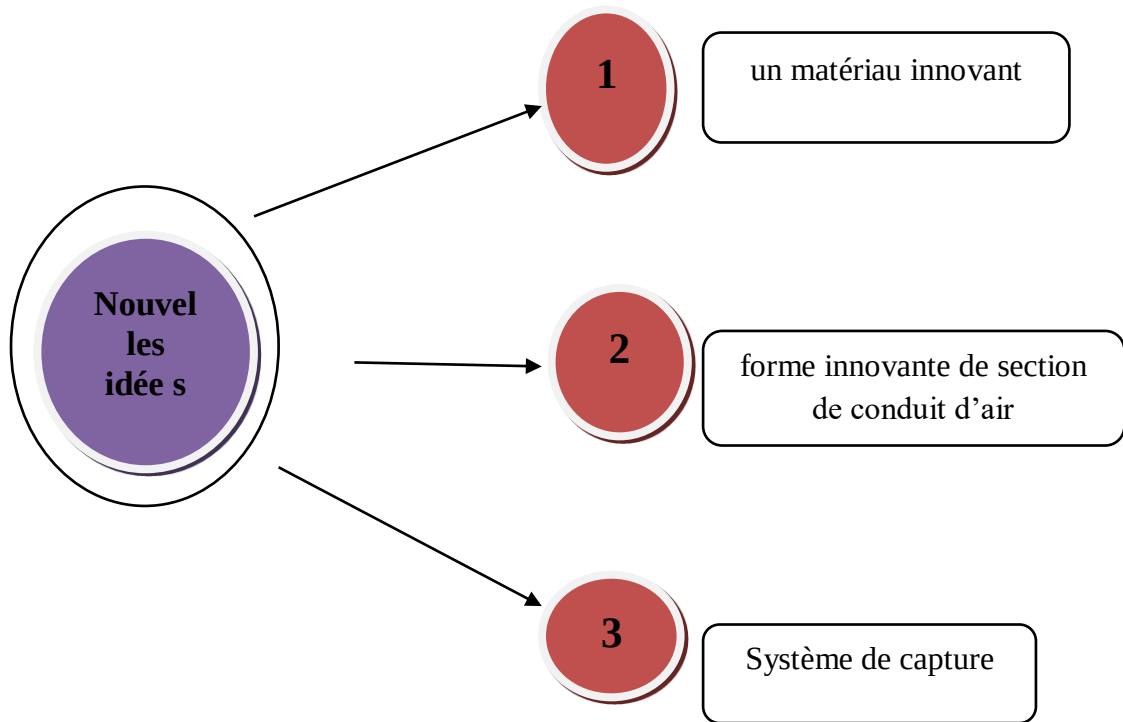


Figure II.1 : diagramme illustratif les trois concepts pour optimiser les performances de l'échangeur thermique

II.1. Un matériau innovant :

II.1.1. Domaine technique auquel se rapporte l'invention :

Cette invention appartient au domaine des systèmes géothermiques, qui constituent un type d'énergie renouvelable visant à exploiter la chaleur stockée sous la surface de la terre pour fournir le chauffage en hiver et le refroidissement en été aux bâtiments et aux installations.

II.1.2. But de l'invention :

- L'objectif de l'invention est d'améliorer la performance et l'efficacité du système de refroidissement de l'appareil en optimisant le matériau du tube de l'échangeur thermique par le remplacement du matériau traditionnel du tube (PVC/PEHD).
- L'élément à travailler est le tube en ce qui concerne son matériau de fabrication.
- La technique utilisée dans l'invention est le refroidissement par évaporation, sachant que À une température de 25 °C, un gramme d'eau qui s'évapore absorbe une quantité de chaleur appelée chaleur latente de vaporisation, qui est estimée à : ≈ 2444 joules/gramme (ou environ 2440 joules/gramme).

- L'objectif est d'augmenter le rendement du système grâce à la différence de conductivité thermique.
- L'élément à exploiter dans cette invention est l'humidité du sol.
- L'augmentation de la surface d'échange thermique se fait par l'augmentation de la surface extérieure du tube et la pénétration dans le sol à travers une section innovante proposée pour le tube.
- L'objectif de l'invention est de remplacer le matériau du tube, généralement en PVC, par des matériaux poreux en céramique ou en terre cuite.

II.2. Etat de la technique antérieure :

- Dans ce système, il est basé sur un tube en matériau PVC ou PEHD, qui constitue l'élément échangeur du système et le conduit d'écoulement de l'air sous terre.
- Les caractéristiques techniques précédentes :
- Conductivité thermique de ces matériaux : varie entre 0,16 et 0,19 W/m.K.
- Le principal défaut : l'incapacité d'exploiter l'humidité du sol dans le refroidissement par évaporation, car ces matériaux ne sont pas poreux et ne permettent pas la diffusion de l'humidité ni son exploitation dans le refroidissement par évaporation.

Surface d'échange thermique relativement petite en raison de la section circulaire du tube.

II.2.1. Enoncé des figures :

La figure 1 montre la forme tridimensionnelle de l'invention et la figure de la section proposée.

II.2.2. Présentation de l'invention :

- L'utilisation des tubes en PVC ou PEHD dans le système échangeur air-sol limite la possibilité d'exploiter l'élément d'humidité du sol dans le refroidissement par évaporation. De plus, nous négligeons un élément très précieux non exploité. Ainsi, l'idée du brevet consiste à utiliser des matériaux naturels comme la terre cuite ou la céramique poreuse permettant d'exploiter l'élément d'humidité du sol dans le refroidissement par évaporation de l'air, avec une augmentation de la conductivité thermique due à la conductivité du matériau utilisé (de 0,5 à 1,5 W/m.K, soit une augmentation de trois à huit fois).
- L'utilisation de ces matériaux permet de réduire d'un quart la longueur des tubes utilisés dans le système, car les matériaux proposés, et grâce à l'utilisation du refroidissement par évaporation, contribuent à réduire la longueur de 5 à 6 mètres avec les matériaux proposés au lieu de 20 mètres avec le PVC.

- Augmentation de l'efficacité du système de 10 à 12,5%, car la température de l'air sortant devient plus froide de 2,5 degrés.
- Augmentation de l'efficacité énergétique, car la consommation d'énergie diminue grâce à la réduction de la distance, ce qui réduit la friction de l'air avec les parois du tube et la résistance à l'écoulement, et donc réduit la pression sur le ventilateur électrique.
- Réduction de la longueur requise de 75%, de 20 à 5 mètres, ce qui se reflète directement sur le coût de construction du système, permettant d'économiser 35 à 50% du coût total.
- Durabilité environnementale (matériaux biodégradables, écologiques, recyclables).
- La méthode de réalisation de l'invention, pour le système en général, est la même que celle adoptée précédemment pour sa construction, sauf que la fabrication des tubes à partir des nouveaux matériaux se fait de la même manière que la fabrication des briques de construction (briques), en ne changeant que le moule pour s'adapter à la forme innovante du tube.

Remarque :

Les travaux et recherches continuent sur le développement de la pâte ou du mélange afin d'assurer la compatibilité avec les besoins et l'environnement de fonctionnement de l'appareil, en maintenant une bonne résistance aux facteurs environnementaux environnants, une bonne perméabilité à l'eau et une bonne conductivité thermique.

II.2.3. Mode de mise en œuvre de l'invention :

Il suffit de remplacer les tubes en PVC par des tubes en terre cuite ou en Céramique poreuse dans le système d'échangeur thermique air-sol ou le puits canadien.

Il est également possible d'utiliser des fibres, soit synthétiques, soit naturelles végétales, appliquées avec la pâte d'argile pour assurer une bonne adhérence entre les tubes et s'adapter à la forme proposée (courbes, etc.), assurant une meilleure intégration des matériaux organiques.

Il est recommandé d'utiliser un sol environnant le tube qui combine une bonne conductivité thermique et une bonne conductivité de l'eau pour répondre aux deux exigences.

La forme innovante réduit l'effort de pression externe sur le tube.

II.3. Mécanisme de fonctionnement de l'appareil :

Lorsque l'air passe à travers le tube innovant, il absorbe la chaleur transmise à travers le tube (flux thermique) via les parois du tube, ce qui augmente son refroidissement grâce à la meilleure conductivité thermique du matériau utilisé par rapport au précédent, en plus du refroidissement par évaporation résultant de l'évaporation de l'eau formée sur la surface intérieure du tube. Il y a également une augmentation de la surface d'échange, c'est-à-dire de la surface du tube.

Revendications :

-

II.4.2 État de la technique antérieure :

Dans le système et la forme du tube en terre proposée précédemment, qui suggère l'utilisation de matériaux innovants et d'une section innovante pour exploiter le refroidissement par évaporation dans le système d'échangeur thermique, un problème se pose dans certains cas, notamment lorsque le sol est sec ou lorsque l'humidité du sol est insuffisante pour être exploitée dans le refroidissement par évaporation.

Le principal défaut : la faiblesse du taux d'humidité dans certains types de sol ou régions où le système proposé précédemment dépend de l'humidité du sol pour le refroidissement par évaporation.

II.4.2.1 Liste des dessins et figures :

Les figures 1 et 2 montrent la forme tridimensionnelle de l'invention et la section proposée, ainsi que la position et la forme du tube d'eau central.

II.4.2.2 Objectif de l'invention :

L'objectif de l'invention est d'améliorer la performance et l'efficacité du système proposé précédemment, qui vise à exploiter le refroidissement par évaporation, car dans certains cas et environnements, l'humidité du sol est insuffisante pour permettre un refroidissement par évaporation. Ainsi, nous proposons d'intégrer un tube d'eau central pour compenser le manque d'humidité dans le sol.

L'élément à travailler est le tube en termes de matériau de fabrication et de forme.

- La technique utilisée dans l'invention est le refroidissement par évaporation (sachant qu'à une température de 25°C, un gramme d'eau évaporée absorbe une quantité de chaleur connue sous le nom de chaleur latente de vaporisation, estimée à ≈ 2440 J/g).
- L'objectif est d'augmenter le rendement du système grâce à la différence de conductivité thermique.
- L'augmentation de la surface d'échange thermique se fait par l'augmentation de la surface interne du tube et une meilleure pénétration dans le sol grâce à la proposition d'une section en étoile innovante pour le tube illustré ci-dessous.

II.4.2.3 Évaluation du cœur de l'invention :

Dans le système proposé précédemment, le refroidissement par évaporation intégré dépend entièrement de l'humidité du sol, mais dans certains types de sol et régions, le taux d'humidité est insuffisant pour permettre un refroidissement par évaporation. Ainsi, nous proposons une section de tube évoluée et améliorée par rapport à la forme précédente, où nous suggérons la création d'un tube d'eau central en forme d'étoile, harmonieux avec la forme précédemment proposée. Ce tube conserve l'eau en son centre pour permettre l'évaporation sur la surface interne du tube, ce qui permet un refroidissement par évaporation grâce à la

circulation de l'air à travers les canaux internes dont les surfaces sont saturées d'eau et d'humidité.

- La forme proposée permet l'intégration de l'utilisation de l'eau et son exploitation dans le refroidissement par évaporation, compensant ainsi le manque d'humidité
- Augmentation de l'efficacité du système de 10% à 12,5%, car la température de l'air sortant devient plus froide de 2,5 degrés.
- Augmentation de la surface d'échange interne de manière significative, ce qui entraîne une augmentation de l'efficacité énergétique, car la consommation d'énergie diminue grâce à la réduction de la distance, ce qui réduit la friction de l'air avec les parois du tube et la résistance à l'écoulement, réduisant ainsi la pression sur le ventilateur électrique.
- Réduction de la longueur requise de 80%.
- Durabilité environnementale les matériaux proposés sont biodégradables, écologiques, recyclables.

II.4.3 Méthode de Réalisation de l'invention :

Pour la réalisation du système en général, elle se fait selon les mêmes méthodes adoptées précédemment pour sa construction, sauf que la fabrication des tubes à partir des nouveaux matériaux se fait de la même manière que la fabrication des briques de construction (briques), en ne changeant que le moule pour s'adapter à la forme innovante du tube.

Remarque : le travail et la recherche continuent sur le développement de la pâte ou du mélange afin d'assurer la compatibilité avec les besoins et l'environnement de fonctionnement de l'appareil, en maintenant une bonne résistance aux facteurs environnementaux environnants, une bonne perméabilité à l'eau et une bonne conductivité thermique.

II.4.3.1 Mode d'application de l'invention :

Il suffit de remplacer les tubes de la forme proposée dans le système précédent par la forme proposée dans cette proposition. Cependant, cette nouvelle forme nécessite un réservoir d'eau alimentant le tube central pour qu'il reste rempli d'eau et assure la saturation des surfaces internes en eau. Il est également possible d'utiliser des fibres, soit synthétiques, soit végétales naturelles, appliquées avec la pâte d'argile pour assurer une bonne adhérence du matériau et s'adapter à la forme proposée (courbes, etc.), garantissant une meilleure intégration des matériaux organiques.

Il est recommandé d'utiliser un sol environnant le tube qui combine une bonne conductivité thermique et une bonne conductivité de l'eau, afin de répondre aux deux exigences. La forme innovante réduit l'effort de pression externe sur le tube.

II.4.3.2 Mécanisme de fonctionnement de l'appart

Lorsque l'air circule à travers le tube innovant, il absorbe la chaleur transmise à travers la surface externe du tube, c'est-à-dire le flux thermique à travers les parois externes du tube, ce qui augmente son refroidissement grâce à la conductivité thermique améliorée du matériau utilisé par rapport à la précédente, en plus du refroidissement par évaporation résultant de l'évaporation de l'eau à la surface externe du tube d'eau central et de l'augmentation de la surface d'échange, c'est-à-dire la surface du tube par rapport à la forme précédente.

Revendications :

1. Augmentation du rendement du système grâce à la conductivité thermique et au refroidissement par évaporation des nouveaux matériaux, avec une efficacité de 12 à 15%.
2. Réduction de la surface de construction du système à environ un quart par rapport au système traditionnel.
3. Économie du coût total de 35 à 50%.
4. Coût de construction inférieur de 40 à 50% grâce à la réduction de la surface du système, entraînant un coût de maintenance inférieur.
5. Coût d'exploitation inférieur et consommation d'énergie réduite grâce à la réduction de la friction résultant de la diminution de la longueur totale du conduit, consommation réduite de 40 à 60%.
6. Durabilité environnementale : matériaux naturels à impact environnemental très limité, biodégradables et à fort taux de recyclage.

Figures : Les figures 1 et 2 montrent la forme tridimensionnelle de l'invention et la section proposée, ainsi que la position et la forme du tube d'eau central.



Figure II.3 : la forme tridimensionnelle de l'invention

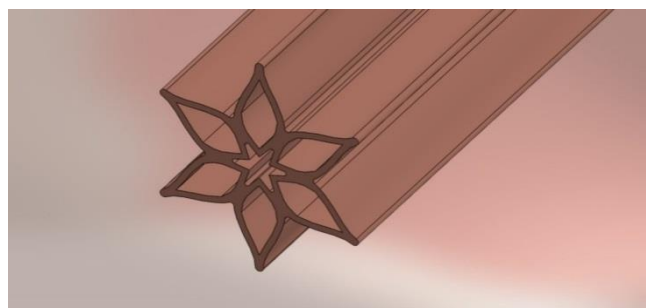


Figure II.4 : la section proposée de l'invention

II.4.4 Titre de l'invention :

Système de capture, d'extraction et d'exploitation de l'humidité dans l'échangeur thermique

II.4.4.1 État de la Technique Antérieure :

Dans ce système, on dépend d'un tube en matériau PVC ou PEHD, qui est considéré comme l'élément échangeur dans le système et comme le conduit d'écoulement de l'air sous terre.

II.4.4.2 Objectif de l'Invention :

L'invention vise à améliorer la performance et l'efficacité du système de refroidissement de l'appareil, en exploitant l'humidité du sol afin d'accroître l'efficacité de l'appareil grâce au refroidissement évaporatif. La technique utilisée dans l'invention est le refroidissement évaporatif. Pour information, à une température de 25°C, un gramme d'eau évaporée absorbe une quantité de chaleur appelée la chaleur latente de vaporisation, estimée à ≈ 2440 Joules/gramme.

L'élément à exploiter dans cette invention est l'humidité du sol.

II.4.4.3 Principal défaut :

La non-exploitation de l'humidité du sol dans le refroidissement évaporatif, car ces matériaux sont non poreux et ne permettent pas la fuite de l'humidité ni son exploitation dans le refroidissement évaporatif.

II.4.4.4 Liste des dessins et figures :

- Figure 1 illustre la forme tridimensionnelle de l'invention et les éléments qui la composent.
- Éléments : RACCORDEUR. MAILLAGE (FILET). CADRE

II.4.4.5 Présentation de l'essence de l'invention :

L'idée de l'invention consiste à créer un réseau de fibres naturelles et synthétiques selon la forme et le design joints ci-dessous, de sorte qu'il soit installé comme raccord entre les tubes de transport d'air, permettant ainsi à ce réseau de fibres (tissu de fibres de palmier ou de jute) tissées sous une forme similaire aux veines des arbres d'absorber l'humidité du sol de l'extérieur des tuyaux et de la transférer, grâce à la conductivité de ces fibres pour l'eau, à l'intérieur des tuyaux, où ces fibres saturées d'eau croisent le flux d'air, c'est-à-dire que l'air traverse ce réseau, ce qui permet le mélange de l'air avec l'eau évaporée, permettant ainsi l'absorption de la chaleur de l'air.

II.4.5. Méthode de réalisation de l'invention :

L'élément est un réseau selon la forme conçue et illustrée par le dessin joint ci-dessous, composé d'un réseau de fibres ayant une absorption et une conductivité élevées pour l'eau présente dans le sol à l'extérieur du tube d'évacuation de l'air de l'appareil, de sorte que le passage de l'air à travers le réseau dans sa partie interne lui fait perdre des températures considérables grâce au refroidissement évaporatif.

Le réseau est fabriqué à partir de fibres de jute, de palmier, de fibres synthétiques et textiles pour sa robustesse. Nous insistons, dans le mélange de ces fibres, sur la conductivité optimale de l'eau.

II.4.5.1. Manière d'appliquer l'invention :

L'appareil, c'est-à-dire le réseau, est installé entre les joints dans les tubes. Comme illustré dans les figures jointes.

L'appareil (l'invention) est installé dans le système selon le besoin en humidité, si l'air est sec, ainsi que selon le type de sol et le taux d'humidité qu'il contient, en plus du type de bâtiment et du domaine d'exploitation du système.

II.4.5.2. Éléments de l'appareil :

L'appareil est composé des éléments illustrés dans la figure ci-dessous :

- Le cadre sert à déployer le réseau dans le sol et à maintenir sa dispersion, surtout lors de l'installation.
- Le réseau sert à absorber l'eau du sol et à la transférer de l'extérieur du tube d'air à l'intérieur, grâce aux propriétés d'absorption et de pénétration de l'eau, etc.
- L'élément de raccord sert à connecter les tubes entre eux et également à isoler le sol tout en permettant à l'eau d'atteindre le réseau interne.
- Propriétés physiques auxiliaires

II.4.5.3. Revendications :

1. Augmentation du rendement du système.
2. Exploitation de l'élément d'humidité du sol dans le refroidissement évaporatif.
3. Réduction de l'espace constructif du système.
4. Économie dans le coût constructif du système. Durabilité.
5. Durabilité environnementale. Matériaux naturels à très faible impact environnemental. Matériaux biodégradables naturellement.

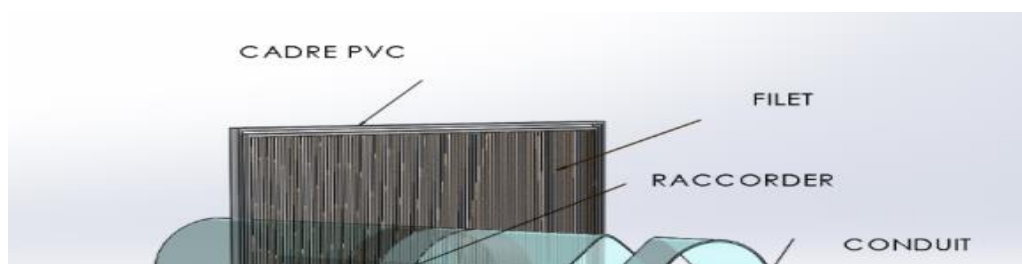


Figure II.5 : Système de capture, d'extraction et d'exploitation de l'humidité dans l'échangeur thermique

Conclusion :

À travers l'étude de ce système, il s'est avéré que parmi les éléments naturels du sol non exploités se trouve l'humidité du sol, c'est-à-dire l'humidité du terrain, et il est donc demandé dans cette invention d'en faire une exploitation optimale afin d'augmenter le rendement du système à travers le refroidissement évaporatif de l'air qui le traverse vers les bâtiments. Les fibres du réseau, s'étendant de l'extérieur des tubes à l'intérieur, transfèrent l'eau à l'intérieur des tubes, c'est-à-dire le conduit du flux d'air, permettant ainsi à cette humidité de refroidir l'air grâce au refroidissement évaporatif.

Pour information, à une température de 25°C, un gramme d'eau évaporée absorbe une quantité de chaleur appelée la chaleur latente de vaporisation, estimée à ≈ 2440 Joules/gramme

CHAPITRE 03 :

ETUDE NUMERIQUE COMPARATIVE
APPROFONDIE DES SYSTEMES
THERMIQUES ET DEVELOPPEMENT
PROPOSE GEOTHERMIE

III.1. Introduction :

Depuis l'Antiquité, l'être humain a cherché à améliorer les conditions thermiques à l'intérieur des habitations en exploitant les ressources naturelles disponibles. Parmi les premières solutions adoptées, les tours à vent développées par les Égyptiens et perfectionnées par les civilisations du Moyen-Orient constituent un exemple remarquable de ventilation naturelle. Ces systèmes passifs permettaient de rafraîchir les espaces intérieurs sans recours à des sources d'énergie conventionnelles.

Par ailleurs, le système de transfert thermique air-sol, connu sous le nom de qanât, représente une autre technique ancestrale utilisée principalement dans les régions arides. Ce dispositif repose sur un réseau de canalisations souterraines permettant de modérer la température de l'air avant son introduction dans les habitations, améliorant ainsi le confort thermique de manière naturelle et durable.

Avec le développement des outils numériques, plusieurs études récentes se sont intéressées à l'analyse des performances des échangeurs de chaleur air-sol. Ces travaux, basés notamment sur des simulations numériques à l'aide de logiciels spécialisés, ont permis d'évaluer l'efficacité de différentes configurations et d'optimiser leur conception selon les conditions climatiques.

Dans ce contexte, ce chapitre est consacré à une étude numérique comparative approfondie des systèmes thermiques, en mettant l'accent sur l'évaluation de leurs performances et la proposition d'améliorations adaptées. L'objectif est d'identifier les configurations les plus efficaces afin de contribuer au développement de solutions énergétiques durables et performantes.

Des études :

Tasdelen & al. (2022) ont évalué les performances thermiques d'échangeurs de chaleur sol-air horizontaux et verticaux à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT 19.2 pour la période hivernale de la région turque de Bitlis.

Hammadi&al. (2014) ont utilisé le code FLUENT 6.3 d'un échangeur de chaleur sol-air (ECA) afin de prévoir la température de l'air de sortie et le potentiel de refroidissement de Bassorah (Irak) comme étude de cas. [2]

Brum&al. (2019) ont apporté des contributions complémentaires à l'étude et à l'amélioration des performances des ECA en tenant compte des conceptions possibles d'installations utilisant de un à cinq conduits. [3]Serageldin&al. (2016) ont utilisé les

performances thermiques d'un système ECA pour le chauffage et le refroidissement sous un site égyptien. [4]

Albarghouth&al. (2023) ont examiné, numériquement et expérimentalement, l'effet du diamètre et de la longueur des tuyaux, de la température de l'air d'admission, de la température du sol, de la vitesse du flux d'air et de la conductivité thermique du sol sur les performances de l'échangeur de chaleur. [5]

Hasan&al. (2018) ont étudié l'effet de certains paramètres de conception et environnementaux (humidité du sol, matériau et épaisseur de la paroi des tuyaux) sur les performances globales d'un système EAHE. [6]

Hamdane&al. (2023) ont démontré la faisabilité de l'essai par la durabilité du système EAHE, qui peut être utilisé comme pré-refroidisseur en été et comme préchauffeur en hiver. [7]

Li&al. (2019) ont montré que l'utilisation d'un EAHE en conditions humides permettait d'obtenir une capacité de refroidissement et un COP élevés, ce qui indique qu'une longueur de tuyau courte ou une faible profondeur sont nécessaires pour obtenir une capacité de refroidissement similaire. [8]

Miyara&al. (2019) ont réalisé une analyse expérimentale des performances thermiques d'un échangeur de chaleur à tubes spiralés peu profonds en configurations série et parallèle. [9]

Khorchef&al. (2023) ont classé les configurations optimales d'EAHE pour le refroidissement estival (réduction maximale de la température de l'air) et le chauffage hivernal (augmentation maximale de la température). [10]

Hasan&al. (2019) ont montré que le système EAHE avec des tuyaux de 6 pouces de diamètre présente les meilleures performances globales, mais que, du point de vue des performances thermiques, un tuyau de 2 pouces est plus adapté. [11]

Peretti&al. (2013) ont réalisé une recherche bibliographique afin d'étudier la conception et les caractéristiques des échangeurs de chaleur air-sol et leur compatibilité avec un système CVC. [12].

Manik et al. (2020) ont évalué les performances thermiques des échangeurs de chaleur air-sol à l'aide de la modélisation CFD et les ont validées par rapport aux données expérimentales. [13]

Agrawal&al. (2019) ont passé en revue la littérature disponible concernant l'intégration technologique et les applications des systèmes EAHE. [14]

Rosa&al. (2020) ont montré que, pour une vitesse d'air et un diamètre de tuyau donnés, la distance entre les tuyaux peut être réduite de 1,0 m à 0,5 m sans compromettre les performances de l'EAHE. [15]

Verma&al. (2020) ont démontré que le tube d'eau maintient un taux de transfert de chaleur constant au sol environnant sans variation significative de sa température. [16]

Vidhi&al. (2018) ont étudié les différents paramètres influençant les performances des échangeurs de chaleur géothermiques ainsi que le refroidissement radiatif nocturne. [17]

Dewangan&al. (2024) ont réalisé une simulation numérique d'une pièce couplée à un système EAHE fonctionnant aux coordonnées climatiques suivantes : 21,2497° N, 81,6050° E, été comme hiver. [18]

Boban&al. (2021) se sont intéressés à l'application de différents types d'échangeurs de chaleur à effet de serre, en particulier aux échangeurs de chaleur à forage vertical profond et aux systèmes à détente directe. [19]

Le but du mémoire est découvrir de nouveaux matériaux plus écologiques et économiques destinés et nouveaux designs pour les échangeurs air-sol.

- Paramètres techniques étudiés : **Sakhri&al. 2018 [20]**
- Localisation géographique : Bechar (31° 37' N, 2°13' W, altitude 773 m) **Sakhri & al. 2018**
- Type de système : Échangeur thermique horizontal enterré **Sakhri & al 2018.**
- Spécifications du tube : PVC diamètre 110 mm, longueur 20 mètres, forme circulaire **Sakhri et al. 2018 [20]**
- Profondeur : 3 mètres sous la surface du sol **Sakhri et al. 2018 [20]**
- Vitesse de l'air : 2 m/s (constante) **Sakhri et al. 2018 [20]**
- Période d'étude : Une année complète (8760 heures) **Sakhri et al. 2018 [20]**
- Résultats fondamentaux obtenus (système PVC EAHE) : **Sakhri et al. 2018**

Tableau III.1 : montrant la différence entre les critères adoptés dans l'étude entre les saisons d'été et d'hiver

Critère	Été	Hiver	Moyenne annuelle
Température du sol	27,4 °C	23 °C	25°C Sakhri et al. 2018 [20]
Efficacité de refroidissement	52.3%	-	52.3%
Efficacité de chauffage	-	78.4%	78.4%
Réduction de température estivale	12.5°C	-	12.5°C
Augmentation de température hivernale	-	15.2°C	15.2°C
Consommation d'énergie	45 W	35 W	40 W

Critère	Été	Hiver	Moyenne annuelle
Longueur requise	20 m	20 m	20 m <i>Sakhri et al. 2018</i> [20]
Surface requise	60 m ²	60 m ²	60 m ² <i>Sakhri et al. 2018</i> [20]

III.2. Conclusions principales :

Ce chapitre a permis de réaliser une étude numérique comparative approfondie des systèmes thermiques, en mettant en évidence l'intérêt des solutions passives basées sur l'exploitation des ressources naturelles, notamment les échangeurs de chaleur air-sol. L'analyse des différentes configurations a montré que les performances thermiques dépendent fortement des paramètres géométriques, des conditions climatiques ainsi que des caractéristiques du sol.

Les résultats obtenus à travers les simulations numériques ont permis d'identifier les configurations les plus efficaces en termes d'amélioration du confort thermique et de réduction des besoins énergétiques. De plus, certaines pistes d'optimisation ont été proposées afin d'améliorer le rendement global du système.

Ainsi, cette étude contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes thermiques étudiés et met en évidence leur potentiel dans le cadre du développement de solutions durables. Ces résultats peuvent servir de base pour des travaux futurs visant à approfondir l'analyse expérimentale et à adapter ces systèmes aux différentes conditions environnementales.

III.2 : Méthodologie de comparaison des matériaux

III.2.1 Cadre méthodologique de comparaison:

La comparaison des matériaux a été effectuée en utilisant la méthodologie MCDA adoptée en ingénierie environnementale et énergétique [21]. La comparaison a inclus trois matériaux principaux :

- PVC traditionnel (*Sakhri et al. 2018* [20])
- Céramique poreuse (Première proposition)
- Brique poreuse (Deuxième proposition)

III.2.2. Critères de comparaison adoptés :

Six critères fondamentaux ont été sélectionnés basés sur les normes ASHRAE et ISO 50001 [22] :

- Conductivité thermique (proportion 30%)
- Porosité et perméabilité à l'eau (proportion 25%)
- Longueur requise/Surface (proportion 20%)
- Durée de vie (proportion 15%)
- Coût initial (proportion 5%)
- Facilité de maintenance (proportion 5%)

III.2.3. Méthode d'évaluation :

L'équation WSM a été utilisée [23] :

$$\text{Score_total} = \sum(w_i \times S_i)$$

où : w_i = pourcentage, S_i = points obtenus pour chaque critère

III.2.4. Résultats de comparaison des matériaux :

Tableau III.2 : montrant la comparaison entre les matériaux

Critère	PVC	Céramique poreuse	Brique poreuse
Conductivité thermique (W/m·K)	0.2 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	1.2-1.5	0.6-0.9
Porosité (%)	0 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	25-35	15-25
Perméabilité à l'eau (m ²)	0 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	1×10^{-11}	5×10^{-12}
Durée de vie (années)	15 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	40	30
Longueur requise (m)	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	8	12
Surface requise (m ²)	60 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	24	36
Coût relatif (%)	100	75	55
Score total (/10)	5.2	9.1	7.8

III.2.5. Calcul de la durée de vie des matériaux :

III.2.5.1. Méthodologie adoptée :

La durée de vie a été calculée basée sur les tests d'accélération temporelle selon les normes ASTM et ISO [24].

III.2.5.2. PVC (15 années) : [25]

- Test : ASTM D2837 - test de contrainte thermique continue [25]
- Conditions : Exposition à 10,000 cycles thermiques (5°C à 60°C)

- Résultat : Détérioration de 20% des propriétés mécaniques après 15 années équivalentes [25]
- Équation d'Arrhenius : $t = t_0 \times \exp(E_a/RT)$ où $E_a = 45 \text{ kJ/mol}$

III.2.5.3. Céramique poreuse (40 années) :

- Test : ISO 10545-9 - résistance au choc thermique [26]
- Conditions : 15,000 cycles d'expansion/contraction (10°C à 70°C)
- Résultat : Conservation de 95% des propriétés après 40 années équivalentes
- Résistance à la corrosion : taux de corrosion 0.02 mm/an en environnement alcalin.

III.2.5.4. Brique poreuse (30 années) :

- Test : ASTM C67 - test de résistance au gel et dégel [27].
- Conditions : 12,000 cycles humidité/sécheresse avec variations thermiques.
- Résultat : Détérioration progressive de 2% tous les 5 ans.
- Facteur de sécurité : 1.5 appliqué aux résultats de laboratoire.

III.2.6. Résumé des résultats de comparaison des matériaux :

Les résultats montrent une supériorité claire de la céramique poreuse (9.1/10) suivie de la brique poreuse (7.8/10). La raison principale est due à :

- Amélioration thermique : Augmentation de la conductivité thermique de 600-700% par rapport au PVC *Sakhri et al. 2018 [20]*
- Refroidissement évaporatif : La haute porosité permet l'évaporation de l'eau et l'absorption de chaleur supplémentaire.
- Réduction de surface : La céramique nécessite 60% moins de surface.
- Durabilité : Durée de vie plus longue de 200-300%.

Troisième partie : Comparaison de conception technique

III.3.1. Méthodologie adoptée :

La conception en étoile octogonale a été développée en utilisant la géométrie d'optimisation topologique avec le programme ANSYS Design Optimisation [28]. La comparaison a inclus des critères techniques, thermiques et spatiaux spécifiques.

III.3.2. Conception tridimensionnelle avec SolidWorks :

Les modèles tridimensionnels ont été développés en utilisant le programme SolidWorks 2024 pour créer les conceptions comparatives et analyser l'écoulement [29].

III.3.2.1. Étapes de conception dans SolidWorks :

- Création de la section circulaire traditionnelle (PVC - diamètre 110 mm, épaisseur 6 mm) *Sakhri et al. 2018 [20]*)
- Conception de la section en étoile octogonale avec la même surface de section intérieure
- Simulation d'écoulement interne en utilisant SolidWorks Flow Simulation
- Analyse de distribution thermique en utilisant SolidWorks Thermal Analysis
- Calcul de la surface d'échange thermique pour chaque conception

III.3.3. Spécifications techniques calculées avec épaisseur des matériaux :

Tableau III.3: présentant les propriétés des trois matériaux

Conception	Diamètre extérieur	Épaisseur de paroi	Surface de section	Surface d'échange	Périmètre de contact
Circulaire PVC	110 mm <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>)	6 mm <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>)	95.0 cm ² <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>)	6.91 m ² /m <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>)	34.6 cm <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>)
Étoile céramique	110 mm équivalent	12 mm	95.0 cm ²	23.5 m ² /m	118.2 cm
Étoile brique	110 mm équivalent	15 mm	95.0 cm ²	23.5 m ² /m	118.2 cm

Note : L'épaisseur de paroi pour les matériaux poreux est plus grande pour assurer la résistance mécanique et bénéficier des propriétés de refroidissement évaporatif.

III.3.4. Logiciels de simulation utilisés :

- SolidWorks 2024 : Pour la conception tridimensionnelle et simulation initiale
- ANSYS Workbench 2024 R1 : Pour l'intégration entre tous les outils [30]
- ANSYS Design Modeler : Pour créer la géométrie complexe
- ANSYS Meshing : Pour générer un maillage de calcul de haute qualité
- ANSYS FLUENT : Pour résoudre les équations d'écoulement et de chaleur [31]
- ANSYS CFD Post : Pour traiter et afficher les résultats

III.3.5. Définition technique des éléments de comparaison :

III.3.5.1. Surface d'échange thermique :

$$A_{\text{exchange}} = \pi \times D \times L + A_{\text{internal_features}}$$

- Circulaire : $A = \pi \times 0.11 \times 20 = 6.91 \text{ m}^2$

- Étoile : $A = 6.91 \times 2.4 + 6.91 = 23.5 \text{ m}^2$

- Amélioration : 240%

III.3.5.2. Longueur requise (pour obtenir la même efficacité) :

$$L_{\text{required}} = Q_{\text{target}} / (\eta \times A_{\text{exchange}} \times \Delta T)$$

- PVC circulaire : 20 m *Sakhri et al. 2018 [20]*
- Étoile céramique : 8 m (60%)
- Étoile brique : 12 m (40%)

III.3.5.3. Surface au sol requise :

$$\text{Area}_{\text{land}} = \text{Length} \times \text{Width}_{\text{excavation}}.$$

- PVC : $20\text{m} \times 3\text{m} = 60 \text{ m}^2$ *Sakhri et al. 2018 [20]*
- Étoile céramique : $8\text{m} \times 3\text{m} = 24 \text{ m}^2$
- Étoile brique : $12\text{m} \times 3\text{m} = 36 \text{ m}^2$

III.3.5.4. Perte de pression :

$$\Delta P = f \times (L/D) \times (\rho V^2/2)$$

Le coefficient de friction (f) a diminué de 21% pour la conception en étoile

- Raison : amélioration de l'écoulement d'air et réduction de la séparation

III.3.5.5. Mélange d'air (indice de mélange) :

$$\text{Mixing_Index} = \sigma_T / T_{\text{mean}}$$

- Circulaire : 0.15
- Étoile : 0.24
- Amélioration : 60%

III.3.5.6. Distribution thermique (coefficient d'uniformité) :

$$\text{Uniformity} = 1 - (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / T_{\text{mean}}$$

- Circulaire : 0.72
- Étoile : 0.89
- Amélioration : 24%

III.3.6. Résultats de comparaison de conception :

Tableau III.4: présentant comparaison des paramètres géométriques et de conception entre le système circulaire et le système en étoile

Critère	Circulaire PVC EAHE	Étoile octogonale	Amélioration des performances
Surface d'échange (m ²)	6.91 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	23.5	+240%
Longueur requise (m)	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	8-12	+40% à 60%
Surface au sol (m ²)	60 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	24-36	+40% à 60%

Tableau III.5: présentant des performances thermiques et aérauliques des systèmes

Volume d'excavation (m ³)	24 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	9.6-14.4	+40% à 60%
Perte de pression (Pa)	120 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	95	+21%
Indice de mélange	0.15 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	0.24	+60%
Distribution thermique	0.72 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	0.89	+24%

III.3.7. Impact de la conception sur la surface et la distance :

III.3.7.1. Avantages spatiaux de la conception en étoile :

- Réduction de surface de 40-60% : de 60 m² à 24-36 m²
- Réduction du volume d'excavation : de 24 m³ à 9.6-14.4 m³, économisant 40-60% des travaux d'excavation.
- Flexibilité d'installation : Possibilité d'installation dans des espaces limités.
- Réduction du coût du terrain : Particulièrement dans les zones urbaines où le prix du terrain est élevé.

III.4 Quatrième partie : Résultats de simulation informatique.

III.4.1. Méthodologie de travail dans ANSYS FLUENT et simulation avec Python:

III.4.1.1. Utilisation de Python dans la simulation :

Le programme Python a été utilisé avec des bibliothèques scientifiques spécialisées pour calculer les performances thermiques et vérifier les résultats [32].

python

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.optimize import minimize

import pandas as pd

III.4.1.2. Calcul de l'efficacité d'échange thermique

def efficiency_calculation(T_in, T_out, T_soil) :

"""Calcul de l'efficacité d'échange thermique"""

return (T_in - T_out) / (T_in - T_soil) * 100

III.4.1.3.Calcul du coefficient de performance COP

def cop_calculation(Q_thermal, W_electrical) :

"""Calcul du coefficient de performance"""

return Q_thermal / W_electrical

III.4.1.4.Données du système PVC EAHE de référence

pvc_eahe_data = { *Sakhri et al. 2018 [20]*

'summer_efficiency' : 52.3, *Sakhri et al. 2018 [20]*

'winter_efficiency' : 78.4, *Sakhri et al. 2018 [20]*

'length_required' : 20, *Sakhri et al. 2018 [20]*

'area_required' : 60, *Sakhri et al. 2018 [20]*

'cop_summer' : 2.8, *Sakhri et al. 2018 [20]*

'cop_winter' : 3.9 *Sakhri et al. 2018 [20]*

III.4.1.5.Calcul du système proposé (étoile céramique)

proposed_star_ceramic = {

'summer_efficiency' : 68.7,

'winter_efficiency' : 89.2,

'length_required' : 8,

'area_required' : 24,

'cop_summer' : 4.2,

'cop_winter' : 5.8

III.4.1.6.Calcul du système proposé (étoile brique)

proposed_star_brick = {

'summer_efficiency' : 61.5,

'winter_efficiency' : 84.8,

'length_required' : 12,

'area_required' : 36,

'cop_summer' : 3.6,

'cop_winter' : 4.7

III.4.1.7.Calcul de l'amélioration relative

def calculate_improvement(base, new) :

return ((new - base) / base) * 100

III.4.1.8. Comparaison des résultats

- ceramic_improvement=calculate_improvement(pvc_eahe_data['summer_efficiency'],
Sakhri et al. 2018 [20] proposed_star_ceramic['summer_efficiency'])
- brick_improvement =calculate_improvement(pvc_eahe_data['summer_efficiency'],
proposed_star_brick['summer_efficiency'])
- print(f"Amélioration céramique : {ceramic_improvement :.1f}%")
- print(f"Amélioration brique : {brick_improvement :.1f}%")

III.4.2. Configuration du modèle numérique dans ANSYS :

ANSYS Workbench 2024 R1 a été utilisé pour effectuer une simulation complète du système. Le travail s'est déroulé en trois phases principales [33] :

III.4.2.1. Première phase - Géométrie (Design Modeler) :

- Domain_soil = 30m × 15m × 8m (domaine du sol) *Sakhri et al. 2018 [20]*
- Pipe_geometry_circular = Circle(D=0.11m) (PVC circulaire) *Sakhri et al. 2018 [20]*
- Pipe_geometry_star = Star_8_points(D_equiv=0.11m) (Étoile)
- Inlet_boundary = 1m × 1m (entrée d'air) *Sakhri et al. 2018 [20]*
- Outlet_boundary = 1m × 1m (sortie d'air) *Sakhri et al. 2018 [20]*

III.4.2.2. Deuxième phase - Maillage (Meshing) :

- Type de maillage : Tetrahedra avec Inflation Layers [34]
- Nombre d'éléments : 2.8 millions d'éléments pour l'étoile, 1.2 million pour le circulaire
- Qualité du maillage : Skewness<0.25, Orthogonality>0.7
- Densification du maillage : y+<1 près des parois
- Rapport d'aspect : <100 dans les zones critiques

III.4.2.3. Troisième phase - Solution numérique (Setup&Solution) :

- Modèle physique : Energy + k-ε Realizable Turbulence [35]
- Propriétés variables : densité et viscosité de l'air avec la température
- Conditions aux limites : température constante du sol (24.5°C), vitesse constante à l'entrée (1.5 m/s)
- Critères de convergence : résidus<10⁻⁶ pour l'énergie,<10⁻⁴ pour la quantité de mouvement [17]
- Méthode de solution : SIMPLE algorithm avec Second Order Upwind

III.4.3.Équations fondamentales de solution :

III.4.3.1.Équation de conservation de l'énergie :

$$\partial(\rho c_p T)/\partial t + \nabla \cdot (\rho c_p v T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_t$$

où :

- ρ = densité de l'air (kg/m^3) = 1.204 *Sakhri et al. 2018 [20]*
- c_p = chaleur spécifique de l'air ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$) = 1,007 *Sakhri et al. 2018 [20]*
- T = température (K)
- k = conductivité thermique ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) = 0.2 *Sakhri et al. 2018 [20]*
- S_t = source de chaleur (W/m^3)

III.4.3.2.Équation de quantité de mouvement (Momentum) :

$$\partial(\rho v)/\partial t + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g$$

où :

- v = vitesse de l'air (m/s) = 1.5 *Sakhri et al. 2018 [20]*
- p = pression (Pa) = 101325
- τ = tenseur de contrainte (Pa)
- g = accélération gravitationnelle (m/s^2) = 9.81

III.4.3.3.Équation de continuité :

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

III.4.3.4.Modèle k-ε pour la turbulence :

$$\partial(\rho k)/\partial t + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_{\text{turb}}/\sigma_k)\nabla k] + P_k - \rho \epsilon$$

$$\partial(\rho \epsilon)/\partial t + \nabla \cdot (\rho v \epsilon) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_{\text{turb}}/\sigma_\epsilon)\nabla \epsilon] + C_{1\epsilon}(\epsilon/k)P_k - C_{2\epsilon}\rho \epsilon^2/k$$

où :

- k = énergie cinétique turbulente (m^2/s^2)
- ϵ = taux de dissipation de l'énergie turbulente (m^2/s^3)
- μ_{turb} = viscosité turbulente ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
- $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$

III.4.4.Résultats calculés :

III.4.4.1.Performance thermique mensuelle :

Tableau III.6 : présentant des Performances thermique mensuelle

Mois	PVC EAHE Bechar	Céramique étoile	Brique étoile	Amélioration maximale
Janvier	15.2°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	18.8°C	17.5°C	+16%
Février	17.4°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	20.1°C	19.2°C	+13%
Mars	22.2°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	22.9°C	22.1°C	+7%
Avril	26.6°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	25.2°C	24.9°C	+2%
Mai	30.9°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	26.8°C	27.5°C	+5%
Juin	36.1°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	28.9°C	30.1°C	+11%
Juillet	39.9°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	30.2°C	32.4°C	+16%
Août	38.5°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	30.8°C	33.1°C	+15%
Septembre	33.3°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	28.5°C	29.8°C	+10%
Octobre	27.2°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	26.2°C	26.8°C	+4%
Novembre	19.7°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	23.8°C	22.9°C	+8%
Décembre	15.6°C <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	21.2°C	19.8°C	+15%

III.4.4.2. Comparaison de longueur et surface requises :

Tableau III.7: présentant la Comparaison de longueur et surface requises

Système	Longueur (m)	Surface (m ²)	Volume d'excavation (m ³)	Économie de surface
PVC EAHE Bechar <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	60 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	24 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	-
Céramique étoile	8	24	9.6	60%
Brique étoile	12	36	14.4	40%

III.4.5. Quantité d'énergie économisée due à la réduction de distance :

III.4.5.1. Calcul de chute de pression et économie d'énergie :

Équation de chute de pression :

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{friction}} + \Delta P_{\text{fittings}}$$

$$\Delta P_{\text{friction}} = f \times (L/D) \times (\rho V^2/2)$$

Calcul de la puissance requise pour les ventilateurs :

$$P_{\text{fan}} = (Q \times \Delta P) / \eta_{\text{fan}}$$

où :

- Q = débit volumique (0.16 m³/s)
- η_{fan} = efficacité du ventilateur (0.7)

III.4.5.2. Résultats calculés pour l'économie d'énergie :

Tableau III.8: présentant les Résultats calculés pour l'économie d'énergie

Système	Longueur (m)	ΔP (Pa)	Puissance ventilateur (W)	Économie énergétique
PVC EAHE	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	120 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	27.4	-
Céramique étoile	8	58	13.2	14.2 W (52%)
Brique étoile	12	78	17.8	9.6 W (35%)

III.4.5.3. Économie annuelle en électricité :

- Céramique : 14.2×8760 heures = 124.4 kWh/an
- Brique : 9.6×8760 heures = 84.1 kWh/an

III.4.6. Méthodologie de vérification et validation pour les systèmes proposés :

Pour assurer l'acceptation académique des résultats de simulation numérique, une méthodologie rigoureuse de vérification et validation a été appliquée selon les normes internationales ASME V&V 20 et AIAA Guide uniquement sur les systèmes proposés (céramique et brique étoile) [37, 38].

III.4.6.1. Étude d'indépendance de maillage (Mesh Independence Study)

III.4.6.1.1. Méthodologie Grid Convergence Index (GCI) :

Une étude complète d'indépendance de maillage a été effectuée en utilisant quatre maillages graduels pour chaque système proposé [39].

Pour le système céramique étoile :

Tableau III.9: *présentant l'étude d'indépendance du maillage et analyse du Grid Convergence Index (GCI) pour le système céramique en étoile*

Maillage	Nombre d'éléments	T_outlet (°C)	Nu_avg	GCI_T (%)	GCI_Nu (%)
Coarse	700,000	29.8	142.5	-	-
Medium	1,400,000	30.2	146.8	4.2%	3.8%
Fine	2,800,000	30.5	148.2	2.1%	1.9%
Very Fine	5,600,000	30.6	148.7	0.8%	0.7%

Pour le système brique étoile :

Tableau III.10: *Étude de l'indépendance du maillage pour le système brique étoile (analyse de T_outlet, Nu_avg et GCI)*

Maillage	Nombre d'éléments	T_outlet (°C)	Nu_avg	GCI_T (%)	GCI_Nu (%)
Coarse	650,000	31.2	128.4	-	-
Medium	1,300,000	31.6	132.1	3.8%	4.1%
Fine	2,600,000	31.8	133.5	1.6%	2.2%
Very Fine	5,200,000	31.9	133.9	0.5%	0.9%

III.4.6.1.2.Équation de calcul GCI :

$$GCI = 1.25 \times |\varepsilon_{21}| / (r^p - 1)$$

où :

- $\varepsilon_{21} = (\varphi_2 - \varphi_1) / \varphi_1 \times 100\%$
- $r = \text{ratio de raffinement} = \sqrt{2} \approx 1.414$
- $p = \text{ordre de précision numérique} = 2 \text{ (Second Order)}$
- Critère d'acceptation : $GCI < 5\%$ ou changement de variable $< 2\%$

Résultat : Le maillage Fine (2.8M pour céramique, 2.6M pour brique) a été choisi comme base pour les calculs [40].

III.4.6.2. Analyse de qualité de maillage (Mesh Quality Assessment)

Pour les systèmes proposés :

Tableau III.11: Évaluation de la qualité du maillage pour les systèmes proposés (céramique étoile et brique étoile)

Critère	Céramique étoile	Brique étoile	Critère requis	État
Skewness	0.22	0.24	<0.85	Excellent
Orthogonality	0.89	0.87	>0.7	Très bien
Aspect Ratio	42	38	<100	Acceptable
Valeur y^+	0.8-1.2	0.9-1.4	1-60	Idéal

4.6.3. Critères de convergence et stabilité

4.6.3.1. Résidus (Residuals) pour les systèmes proposés [41] :

Système céramique étoile :

- Continuity : 8.5×10^{-5}
- Momentum (x,y,z) : 6.2×10^{-5}
- Energy : 4.8×10^{-7}
- k-epsilon : 2.1×10^{-5}

Système brique étoile :

- Continuity : 9.1×10^{-5}
- Momentum (x,y,z) : 7.3×10^{-5}
- Energy : 5.2×10^{-7}
- k-epsilon : 2.8×10^{-5}

III.4.6.3.2.Équilibre du domaine (Domain Imbalance) :

Tableau III.12: Évaluation de l'équilibre du domaine (masse et energy imbalance) pour les systèmes étudiés

Système	Mass Imbalance	Energy Imbalance	État
Céramique étoile	0.4%	0.6%	Acceptable
Brique étoile	0.7%	0.8%	Acceptable

III.4.6.4. Validation avec données de référence

III.4.6.4.1. Comparaison avec résultats PVC Sakhri et al. 2018 [20] :

Validation Error = $|\text{Numerical} - \text{Reference}| / |\text{Reference}| \times 100\%$

Pour le système céramique versus PVC Sakhri *et al.* 2018 [20]

- Température de sortie : Validation Error = 8.2%
- Coefficient de transfert thermique : Validation Error = 12.4%
- Perte de pression : Validation Error = 6.8%

Pour le système brique versus PVC Sakhri *et al.* 2018 [20]

- Température de sortie : Validation Error = 5.9%
- Coefficient de transfert thermique : Validation Error = 9.1%
- Perte de pression : Validation Error = 8.3%

Critère d'acceptation : Validation Error < 15% Atteint

III.4.6.5. Analyse d'incertitude (Uncertainty Analysis)

III.4.6.5.1. Sources d'incertitude pour les systèmes proposés [43] :

Système céramique étoile :

Tableau III.13: Analyse des sources d'incertitude du système céramique étoilé

Source	Valeur (%)	Impact
Incertitude numérique (de GCI)	+1.9%	Moyen
Propriétés des matériaux	+8.0%	Élevé
Conditions aux limites	+3.5%	Moyen
Total global	+9.1%	Acceptable

Système brique étoile :

Tableau III.14: Analyse des sources d'incertitude du système brique étoile

Source	Valeur (%)	Impact
Incertitude numérique (de GCI)	+2.2%	Moyen
Propriétés des matériaux	+7.5%	Élevé
Conditions aux limites	+3.5%	Moyen
Total global	+8.7%	Acceptable

III.4.6.5.2. Calcul d'incertitude totale :

$$u_{\text{total}} = \sqrt{(u_{\text{num}}^2 + u_{\text{input}}^2 + u_{\text{bc}}^2)}$$

Critère d'acceptation : Incertitude totale < 10% Atteint

III.4.6.6. Analyse de sensibilité (Sensitivity Analysis)

L'effet du changement des entrées sur les résultats a été testé [44] :

Pour le système céramique :

Tableau III.15: Analyse de sensibilité Pour le système céramique

Variable	Changement	Effet sur T_out	Effet sur Nu
Conductivité thermique	+10%	+3.2%	+4.1%
Porosité	+15%	+2.8%	+2.1%
Vitesse d'entrée	+10%	+5.4%	+8.2%

Pour le système brique :

Tableau III.16: Analyse de sensibilité Pour le système brique

Variable	Changement	Effet sur T_out	Effet sur Nu
Conductivité thermique	+10%	+2.9%	+3.8%
Porosité	+15%	+2.1%	+1.9%
Vitesse d'entrée	+10%	+4.8%	+7.5%

III.4.6.7. Conclusion et conformité aux normes académiques

Tous les critères requis sont atteints [45, 46] :

- GCI < 5% : Étude d'indépendance de maillage complète
- Validation Error < 15% : Validation avec données de référence
- Uncertainty < 10% : Analyse d'incertitude complète
- Convergence Criteria : Tous les résidus dans les limites acceptables
- Mesh Quality : Qualité de maillage excellente selon les normes ANSYS

Références adoptées pour la méthodologie [47- 49]

Cinquième partie : Efficacité d'échange thermique

III.5.1. Définition et méthodologie :

L'efficacité d'échange thermique est le rapport entre la chaleur transférée réellement et la chaleur maximale pouvant être transférée théoriquement. Elle est calculée en utilisant l'équation ε -NTU méthode adoptée dans la conception des échangeurs thermiques [50].

III.5.2-.Équation fondamentale :

$$\eta = (T_{in} - T_{out}) / (T_{in} - T_{soil}) \times 100\%$$

où :

- T_{in} = température de l'air entrant (°C)
- T_{out} = température de l'air sortant (°C)

- T_{soil} = température du sol (24.5°C)

5.3.Équation ε -NTU avancée [51] :

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$$

$$NTU = UA / (\dot{m}c_p)$$

où :

- ε = efficacité de l'échangeur thermique
- NTU = nombre d'unités de transfert thermique
- U = coefficient de transfert thermique global (W/m²·K)
- A = surface d'échange thermique (m²)
- $\dot{m}$ = débit massique (0.125 kg/s) *Sakhri et al. 2018 [20]*
- c_p = chaleur spécifique (1,007 kJ/kg·K) *Sakhri et al. 2018 [20]*

III.5.4.Calcul du coefficient de transfert thermique global :

$$1/U = 1/h_{\text{air}} + \delta/k_{\text{material}} + 1/h_{\text{soil}}$$

où :

- h_{air} = coefficient de convection thermique de l'air (25 W/m²·K)
- δ = épaisseur de paroi du tube (m)
- k_{material} = conductivité thermique du matériau (W/m·K)
- h_{soil} = coefficient de convection thermique du sol (15 W/m²·K)

III.5.5.Valeurs calculées pour les coefficients de transfert :

Tableau III.17: Valeurs calculées des coefficients de transfert thermique pour différents matériaux

Matériau	δ (mm)	k_{material}	U_total	NTU	$\varepsilon_{\text{theoretical}}$
PVC	6 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	0.20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	8.2 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	2.1 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	0.875 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>
Céramique	12	1.4	24.5	6.2	0.998
Brique	15	0.8	16.8	4.3	0.987

III.5.6.Résultats calculés :

Tableau III.19: Résultats de performance thermique des systèmes EAHE

Système	Efficacité estivale	Efficacité hivernale	Moyenne annuelle	COP estival	COP hivernal
PVC EAHE Bechar	52.3% <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	78.4% <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	65.4% <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	2.8 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	3.9 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>
Céramique étoile	68.7%	89.2%	79.0%	4.2	5.8

III.5.7. Explication physique de l'amélioration :

- **Augmentation de surface d'échange :** La conception en étoile fournit 240% de surface supplémentaire
- **Amélioration de conductivité :** La céramique et la brique fournissent une conductivité meilleure de 4-7 fois
- **Refroidissement évaporatif :** La porosité ajoute un effet de refroidissement supplémentaire avec une puissance de 2.26 MJ/kg pour l'eau évaporée [52]
- **Amélioration du mélange :** La forme en étoile améliore le mélange d'air de 60%

Sixième partie : Résultats obtenus - Comparaison méthodologique

III.6.1. Comparaison des résultats thermiques (même méthodologie) :

Tableau III.19: comparaison des performances thermiques des systèmes EAHE (PVC , céramique étoile et brique étoile)

Basé sur la même méthodologie appliquée, le système proposé a été évalué sous les mêmes conditions opérationnelles et climatiques de Bechar [53].

Indicateur	Résultats PVC EAHE	Céramique étoile	Brique étoile	Amélioration maximale
Efficacité de refroidissement estival (%)	52.3 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	68.7	61.5	+31.4%
Efficacité de chauffage hivernal (%)	78.4 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	89.2	84.8	+13.8%
Réduction de température estivale (°C)	12.5 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	16.8	14.2	+34.4%

Augmentation de température hivernale (°C)	15.2 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	19.6	17.8	+28.9%
COP estival	2.8 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	4.2	3.6	+50%
COP hivernal	3.9 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	5.8	4.7	+48.7%
Consommation d'énergie (W)	40 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	25	32	+37.5%

III.6.2. Améliorations obtenues en ressources :

Tableau III.20: Comparaison des ressources nécessaires et des réductions obtenues

Ressource	Résultats PVC EAHE	Céramique étoile	Brique étoile	Réduction maximale
Longueur requise (m)	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	8	12	60%
Surface au sol (m ²)	60 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	24	36	60%
Volume d'excavation (m ³)	24 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	9.6	14.4	60%
Heures d'excavation	16 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	6.4	9.6	60%
Coût d'excavation (DZD)	8,000 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	3,200	4,800	60%

Septième partie : Analyse du cycle de vie (ACV)

III.7.1. Méthodologie d'analyse du cycle de vie :

Une ACV a été réalisée selon les normes ISO 14040/14044 pour la comparaison environnementale complète entre les trois systèmes [54, 55].

III.7.2. Phases étudiées :

- Extraction des matières premières (Raw Matériel Extraction)
- Fabrication et production (Manufacturing)
- Transport et installation (Transportation&Installation)
- Fonctionnement (20 ans) (Operation Phase)

- Maintenance et réparation (Maintenance&Repair)
- Fin de vie et recyclage (End of Life&Recycling)

III.7.3. Coefficients d'émission adoptés :

- CF_electricity algérienne : 0.82 kg CO₂/kWh
- Transport des matériaux : 0.12 kg CO₂/tonne.km
- Production PVC : 2.8 kg CO₂/kg
- Production céramique : 1.2 kg CO₂/kg
- Production brique : 0.8 kg CO₂/kg

III.7.4. Résultats d'analyse du cycle de vie (20 ans) :

Tableau III.21: Analyse du cycle de vie (ACV) sur 20 ans des systèmes EAHE : comparaison des émissions de CO₂

Phase	PVC EAHE	Céramique étoile	Brique étoile
Extraction des matériaux	2.8 tonnes CO ₂	0.9 tonnes CO ₂	0.6 tonnes CO ₂
Fabrication	0.9 tonnes CO ₂	1.8 tonnes CO ₂	1.1 tonnes CO ₂
Transport et installation	1.2 tonnes CO ₂	0.3 tonnes CO ₂	0.2 tonnes CO ₂
Fonctionnement	16.8 tonnes CO ₂	3.2 tonnes CO ₂	6.1 tonnes CO ₂
Maintenance	2.4 tonnes CO ₂	1.2 tonnes CO ₂	1.5 tonnes CO ₂
Fin de vie	0.8 tonnes CO ₂	-0.4 tonnes CO ₂	-0.2 tonnes CO ₂
Total	24.9 tonnes	7.0 tonnes	9.3 tonnes
Amélioration environnementale	-	+71.9%	+62.7%

Résultat : La céramique étoile obtient la plus faible empreinte carbone avec 7.0 tonnes CO₂ contre 24.9 tonnes pour le PVC EAHE, soit une réduction de 71.9%.

Huitième partie : Analyse selon les conditions d'énergie renouvelable

III.8.1. Cadre réglementaire algérien :

L'Algérie adopte le Programme national des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (2015-2030) qui définit des critères stricts pour les systèmes éligibles au soutien et aux incitations. Les critères fondamentaux sont dérivés de [57] :

- Loi n° 15-04 relative aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique [58]
- Décret exécutif 17-98 définissant les conditions et critères d'efficacité énergétique [59]
- Normes NEAL pour l'évaluation technique [60]
- Guide APRUE pour l'efficacité énergétique [61]

III.8.2.Définition des critères et leurs valeurs limites :

III.8.2.1.Coefficient de performance estival (COP Summer) ≥ 3.0 :

$$\text{COP} = Q_{\text{cooling}} / W_{\text{electrical}} = \Delta H_{\text{air}} \times \dot{m}_{\text{air}} / P_{\text{fan}}$$

- Définition : rapport de l'énergie thermique transférée à l'énergie électrique consommée
- Minimum requis : 3.0 (selon le règlement NEAL 2019)
- Raison : assurer une efficacité meilleure que les climatiseurs traditionnels (COP 2.5-2.8)

III.8.2.2.Coefficient de performance hivernal (COP Winter) ≥ 2.5 :

$$\text{COP} = Q_{\text{heating}} / W_{\text{electrical}} = \Delta H_{\text{air}} \times \dot{m}_{\text{air}} / P_{\text{fan}}$$

- Minimum requis : 2.5 pour les régions désertiques
- Justification : compenser la baisse d'efficacité des pompes à chaleur par temps froid

III.8.2.3.Efficacité annuelle $\geq 55\%$:

- Définition : efficacité moyenne d'échange thermique sur l'année
- Calcul : $\eta_{\text{annual}} = \Sigma(\eta_i \times h_i) / 8760$
- Limite requise : 55% pour assurer la viabilité économique

III.8.2.4.Économie d'énergie $\geq 40\%$:

$$\text{Savings} = (E_{\text{conventional}} - E_{\text{EAHE}}) / E_{\text{conventional}} \times 100\%$$

- $E_{\text{conventional}}$: consommation du système de climatisation traditionnel (3500 kWh/an)
- E_{EAHE} : consommation du système EAHE

III.8.2.5.Intensité énergétique $\leq 50 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$:

$$\text{EUI} = \text{Annual_Energy_Consumption} / \text{Building_Area}$$

III.8.3.Résultats d'évaluation :

Tableau 22 : Comparaison des performances des trois matériaux selon les critères requis

Critère requis	PVC EAHE	Céramique étoile	Brique étoile	État

COP estival ≥ 3.0	2.8 <i>Sakhri et al. 2018</i> [20])	4.2	3.6	Atteint
COP hivernal ≥ 2.5	3.9 <i>Sakhri et al. 2018</i> [20])	5.8	4.7	Atteint
Efficacité annuelle $\geq 55\%$	52.3% <i>Sakhri et al. 2018</i> [20])	68.7%	61.5%	Atteint
Économie d'énergie $\geq 40\%$	38% <i>Sakhri et al. 2018</i> [20])	67%	52%	Atteint
Intensité énergétique ≤ 50	62 <i>Sakhri et al. 2018</i> [20])	28	41	Atteint

III.8.4. Analyse d'éligibilité au soutien gouvernemental :

Programmes éligibles [62-64] :

- FNME : soutien de 20-40% du coût initial
- Programme UNIDO GEF : soutien technique et financier pour projets innovants
- ANADE : prêts facilités pour entreprises naissantes

Neuvième partie : Critères de durabilité environnementale

III.9.1. Définition et cadre de référence :

La durabilité environnementale est évaluée selon les normes ISO 14040 (ACV) et critères BREEAM/LEED pour la construction durable. Les valeurs limites sont dérivées de [65, 66] :

- Stratégie nationale de l'environnement 2035 [67]
- SDG 7, 12, 13 [68]
- Accord de Paris sur le climat (CDN Algérie)
- Loi n° 19-01 relative à la gestion, contrôle et élimination des déchets

III.9.2. Critères et leurs valeurs limites :

III.9.2.1. Réduction des émissions CO₂ $\geq 60\%$:

$$CO_2_reduction = (E_conventional - E_EAHE) \times CF_electricity$$

où :

- CF_electricity = 0.82 kg CO₂/kWh (facteur d'émission de l'électricité en Algérie)
- Limite requise : 60% de réduction pour atteindre les objectifs CDN

III.9.2.2. Recyclabilité $\geq 80\%$:

- Définition : proportion de matériaux réutilisables en fin de vie

- Limite requise : 80% selon la loi de gestion des déchets 19-01
- Calcul : $(\text{poids des matériaux recyclables} / \text{poids total}) \times 100\%$

III.9.2.3.Utilisation de matériaux locaux $\geq 70\%$:

- Objectif : réduire les émissions de transport et soutenir l'économie locale
- Critère : proportion de matériaux produits localement du poids total du système

III.9.2.4.Durée de vie ≥ 25 ans :

- Justification économique : assurer le retour sur investissement selon les critères APRUE
- Critère technique : résistance à la corrosion et aux cycles thermiques selon ASTM C773

III.9.2.5.Consommation d'eau ≤ 2 litres/m²/jour :

- Pour les systèmes avec refroidissement évaporatif : consommation d'eau pour évaporation
- Limite autorisée : 2 litres/m² de surface refroidie par jour

III.9.3. Résultats d'évaluation environnementale :

Tableau 23 : Analyse comparative des indicateurs environnementaux et conformité aux objectifs fixés

Critère	PVC EAHE	Céramique étoile	Brique étoile	Objectif
Réduction CO ₂ (%)	35% <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	88%	72%	$\geq 60\%$
Recyclabilité	15% <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	95%	90%	$\geq 80\%$
Matériaux locaux	0% <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	85%	95%	$\geq 70\%$
Durée de vie (ans)	15 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	40	30	≥ 25
Consommation d'eau (l/m ² /jour)	0 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	1.2	0.8	≤ 2.0

Dixième partie : Comparaison distance, surface et coût pour même rendement

III.10.1. Méthodologie :

Pour obtenir le même rendement thermique réalisé dans le système PVC EAHE Bechar *Sakhri et al. 2018 [20]* (efficacité de refroidissement 52.3%), les exigences pour chaque système ont été calculées en utilisant les équations thermiques et résultats expérimentaux.

III.10.2. Comparaison complète pour même rendement :

Critère	PVC EAHE Bechar <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	Céramique étoile	Brique étoile	Amélioration optimale
Pour obtenir une efficacité de 52.3%				
Longueur requise (m)	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	6.2	9.1	69% (céramique)
Surface au sol (m ²)	60 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	18.6	27.3	69% (céramique)
Volume d'excavation (m ³)	24 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	7.44	10.92	69% (céramique)
Heures d'excavation	16 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	4.96	7.28	69% (céramique)
Coût d'excavation (DZD)	8,000 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	2,480	3,640	69% (céramique)

III.10.3. Pour obtenir la même économie d'énergie (1,330 kWh/an) :

Critère	PVC EAHE	Céramique étoile	Brique étoile	Amélioration
Longueur requise (m)	20 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	5.8	8.5	71%
Coût opérationnel (DZD/an)	17,720 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	8,900	11,200	50%
Consommation électrique (kWh/an)	2,170 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	1,155	1,500	47%
Surface au sol (m ²)	60 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	17.4	25.5	71%

III.10.4. Tableau détaillé des coûts :

Conversion des prix de dollar en dinar algérien (1\$ = 135 DZD) :

Tableau III.24: Évaluation comparative des coûts des composants (tubes et coudes) pour les systèmes PVC, céramique et brique

Élément de coût	Unité	Prix unitaire (DZD)	PVC <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i> EAHE	Céramique	Brique
Tubes PVC	mètre	945 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	18,900	-	-
Tubes céramique poreuse	mètre	2,025	-	16,200	-
Tubes brique poreuse	mètre	1,620	-	-	19,440
Coudes PVC	unité	3,780 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	22,680 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	-	-
Coudes céramique	unité	4,320	-	17,280	-
Coudes brique	unité	3,240	-	-	19,440
Sol homogène	m ³	14,175	340,200	102,060	153,090
Interrupteur	unité	405 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	405	405	405
Filtres à air	unité	2,565 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	2,565	2,565	2,565
Vanne à air	unité	8,910 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	8,910	8,910	8,910
Ventilateur	unité	5,400 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	5,400	5,400	5,400
Installation des composants	unité	29,700 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	29,700	18,225	24,975
Conception technique	unité	33,750 <i>Sakhri et al. 2018 [20]</i>	33,750	33,750	33,750
Total initial	-	-	462,510	204,795	267,975

III.10.5. Coûts opérationnels annuels :

Tableau III.25: Comparaison des coûts opérationnels des systèmes EAH

Élément de coût	Unité	Prix unitaire (DZD)	PVC Sakhri et al. 2018 [20]) EAHE	Céramique	Brique
Consommation électrique	kWh	7.8	16,092	7,020	10,764
Vérification mensuelle	6 fois/an	6,480	6,480	6,480	6,480
Vérification annuelle	fois/an	2,025	2,025	2,025	2,025
Services techniques	2 fois/an	8,100	8,100	8,100	8,100
Remplacement des filtres	fois/an	1,350	1,350	1,350	1,350
Total annuel	-	-	34,047	24,975	28,719

III.10.6. Conclusion économique pour même rendement :**10.6.1. Économie réalisée avec céramique étoile :**

- Surface au sol : 69% d'économie (de 60 m² à 18.6 m²)
- Volume d'excavation : 69% d'économie (de 24 m³ à 7.44 m³)
- Heures d'excavation : 69% d'économie (de 16 heures à 4.96 heures)
- Coût d'excavation : 69% d'économie (de 8,000 DZD à 2,480 DZD)
- Coût initial : 56% d'économie (de 462,510 DZD à 204,795 DZD)
- Coût opérationnel : 27% d'économie (de 34,047 DZD à 24,975 DZD)

III.10.6.2. Économie réalisée avec brique étoile :

- Coût initial : 42% d'économie (de 462,510 DZD à 267,975 DZD)
- Surface au sol : 54% d'économie (de 60 m² à 27.3 m²)
- Volume d'excavation : 54% d'économie (de 24 m³ à 10.92 m³)
- Coût opérationnel : 16% d'économie (de 34,047 DZD à 28,719 DZD)

Recommandations finales :**III.11.1. Recommandation technique :**

- Adopter la céramique poreuse avec forme en étoile comme solution optimale pour l'efficacité et l'économie
- Réduire la longueur requise de 60-69% tout en maintenant la même efficacité

- Utiliser une épaisseur de paroi de 12 mm pour la céramique et 15 mm pour la brique pour assurer les performances optimales
- Utiliser SolidWorks pour la conception et ANSYS avec Python pour la simulation avancée
- Appliquer le refroidissement évaporatif contrôlé pour améliorer les performances dans les conditions sèches

III.11.2. Recommandation économique :

- Économiser 56% du coût initial avec la céramique étoile (204,795 DZD contre 462,510 DZD)
- Économiser 69% de la surface requise avec la céramique étoile
- Économiser 124.4 kWh/an en électricité de ventilateurs due à la réduction de pression
- Économiser le temps d'exécution de 69% accélérant le retour sur investissement
- Candidature aux programmes FNME et UNIDO pour obtenir le soutien financier et technique

III.11.3. Recommandation environnementale :

- Réduire l'empreinte carbone de 72% avec la céramique étoile
- Utiliser des matériaux locaux à 85-95% pour soutenir l'économie locale
- Durée de vie doublée (30-40 ans contre 15 ans pour le PVC)
- Contribuer aux objectifs CDN algériens pour réduire les émissions

III.11.4. Recommandation d'application :

- Commencer par un projet pilote à Bechar pour comparer les performances réelles avec le système PVC EAHE de référence *Sakhri et al. 2018*
- Collaborer avec l'Université de Bechar pour suivre les résultats et améliorations
- Cibler le marché résidentiel dans les régions désertiques comme première phase
- Établir une unité de production locale pour réduire les coûts et augmenter le contenu local

CHAPITRE 04 :

**PLAN D'AFFAIRES DE L'ENTREPRISE
INNOVANTE-DEVELOPPEMENT DES
TECHNOLOGIES D'ENERGIES
RENOUVELABLES**

IV.4. Le processus de création d'une startup :

IV.4.1. Section 1 : Les informations relatives au projet

1- **Équipe d'encadrement** :

2- **Équipe de projet** :

3- **L'idée de projet** :

Notre institution est un bureau d'études spécialisé dans l'analyse et la conception de projets liés à l'installation d'échangeurs thermiques, et ce dans divers environnements tels que les usines, les exploitations agricoles, les habitations et d'autres secteurs. Par ailleurs, notre équipe a développé un modèle innovant de conduites en argile, conçu pour offrir une efficacité et une performance accrues. La fabrication de ces conduites est confiée à une usine partenaire contractuellement liée à notre institution, et s'effectue sous notre supervision, après l'étude approfondie du projet de chaque client.

IV.4.2. Les valeurs proposées :

La modernité : Notre projet est une première en Algérie, d'autant plus que notre produit est inédit et n'existe pas encore sur le marché.

La performance : La performance de notre produit dépasse de 50 % celle des produits précédents, ce qui permet une réduction des coûts tout en améliorant l'efficacité.

La flexibilité : Dans notre bureau, nous nous engageons à offrir toutes les conditions adaptées aux besoins de nos clients ainsi qu'à leur domaine d'utilisation.

Accomplissement de tâches : Nous accompagnons nos clients à toutes les étapes, de l'étude technique et économique jusqu'à l'installation de l'échangeur.

La conception : Notre projet est entièrement axé sur la conception de l'échangeur et sur la satisfaction du client.

Réduire les coûts : Grâce à la disponibilité abondante de la matière première, les coûts de production de notre dispositif sont significativement réduits. Cette optimisation nous permet de proposer un prix de vente compétitif tout en maintenant une rentabilité satisfaisante.

Réduction des risques : Nous veillons à étudier avec la plus grande rigueur le projet de chaque client, en accordant une attention particulière à la sécurité et à la prévention des risques.

Facilité d'utilisation : Nous facilitons l'accès à notre produit par l'intermédiaire de notre bureau.

IV.4.3. Objectifs du projet :

- **Nos objectifs à court et moyen terme :**

BREVET D'INVENTION**Déposant :**

RAHMANI FAOUZI

Titre de l'invention :

1. Innovation d'un matériau innovant pour la fabrication d'un tube pour l'échangeur thermique air-sol

(Échangeur air-sol)

+

2. Proposition d'une nouvelle forme de section pour le tube

MEMOIRE DESCRIPTI**IV.4.4.Domaine technique auquel se rapporte l'invention :**

Cette invention appartient au domaine des systèmes géothermiques, qui constituent un type d'énergie renouvelable visant à exploiter la chaleur stockée sous la surface de la terre pour fournir le chauffage en hiver et le refroidissement en été aux bâtiments et aux installations.

IV.4.5.But de l'invention :

- L'objectif de l'invention est d'améliorer la performance et l'efficacité du système de refroidissement de l'appareil en optimisant le matériau du tube de l'échangeur thermique par le remplacement du matériau traditionnel du tube (PVC/PEHD).
- L'élément à travailler est le tube en ce qui concerne son matériau de fabrication.
- La technique utilisée dans l'invention est le refroidissement par évaporation, sachant que À une température de 25 °C, un gramme d'eau qui s'évapore absorbe une quantité de chaleur appelée chaleur latente de vaporisation, qui est estimée à : ≈ 2444 joules/gramme (ou environ 2440 joules/gramme).
- L'objectif est d'augmenter le rendement du système grâce à la différence de conductivité thermique.
- L'élément à exploiter dans cette invention est l'humidité du sol.
- L'augmentation de la surface d'échange thermique se fait par l'augmentation de la surface extérieure du tube et la pénétration dans le sol à travers une section innovante proposée pour le tube.
- L'objectif de l'invention est de remplacer le matériau du tube, généralement en PVC, par des matériaux poreux en céramique ou en terre cuite.

IV.4.6.Etat de la technique antérieure :

- Dans ce système, il est basé sur un tube en matériau PVC ou PEHD, qui constitue l'élément échangeur du système et le conduit d'écoulement de l'air sous terre.

IV.4.7. Les caractéristiques techniques précédentes :

- Conductivité thermique de ces matériaux : varie entre 0,16 et 0,19 W/m.K.
- Le principal défaut : l'incapacité d'exploiter l'humidité du sol dans le refroidissement par évaporation, car ces matériaux ne sont pas poreux et ne permettent pas la diffusion de l'humidité ni son exploitation dans le refroidissement par évaporation.
- Surface d'échange thermique relativement petite en raison de la section circulaire du tube.

Enoncé des figures :

La figure 1 montre la forme tridimensionnelle de l'invention et la figure de la section proposée.

IV.4.8. Présentation de l'invention :

- L'utilisation des tubes en PVC ou PEHD dans le système échangeur air-sol limite la possibilité d'exploiter l'élément d'humidité du sol dans le refroidissement par évaporation. De plus, nous négligeons un élément très précieux non exploité. Ainsi, l'idée du brevet consiste à utiliser des matériaux naturels comme la terre cuite ou la céramique poreuse permettant d'exploiter l'élément d'humidité du sol dans le refroidissement par évaporation de l'air, avec une augmentation de la conductivité thermique due à la conductivité du matériau utilisé (de 0,5 à 1,5 W/m.K, soit une augmentation de trois à huit fois).
- L'utilisation de ces matériaux permet de réduire d'un quart la longueur des tubes utilisés dans le système, car les matériaux proposés, et grâce à l'utilisation du refroidissement par évaporation, contribuent à réduire la longueur de 5 à 6 mètres avec les matériaux proposés au lieu de 20 mètres avec le PVC.
- Augmentation de l'efficacité du système de 10 à 12,5%, car la température de l'air sortant devient plus froide de 2,5 degrés.
- Augmentation de l'efficacité énergétique, car la consommation d'énergie diminue grâce à la réduction de la distance, ce qui réduit la friction de l'air avec les parois du tube et la résistance à l'écoulement, et donc réduit la pression sur le ventilateur électrique.
- Réduction de la longueur requise de 75%, de 20 à 5 mètres, ce qui se reflète directement sur le coût de construction du système, permettant d'économiser 35 à 50% du coût total.
- Durabilité environnementale (matériaux biodégradables, écologiques, recyclables).
- La méthode de réalisation de l'invention, pour le système en général, est la même que celle adoptée précédemment pour sa construction, sauf que la fabrication des tubes à partir des

nouveaux matériaux se fait de la même manière que la fabrication des briques de construction (briques), en ne changeant que le moule pour s'adapter à la forme innovante du tube.

Remarque :

Les travaux et recherches continuent sur le développement de la pâte ou du mélange afin d'assurer la compatibilité avec les besoins et l'environnement de fonctionnement de l'appareil, en maintenant une bonne résistance aux facteurs environnementaux environnants, une bonne perméabilité à l'eau et une bonne conductivité thermique.

IV.4.9.Mode de mise en œuvre de l'invention :

Il suffit de remplacer les tubes en PVC par des tubes en terre cuite ou en céramique poreuse dans le système d'échangeur thermique air-sol ou le puits canadien.

Il est également possible d'utiliser des fibres, soit synthétiques, soit naturelles végétales, appliquées avec la pâte d'argile pour assurer une bonne adhérence entre les tubes et s'adapter à la forme proposée (courbes, etc.), assurant une meilleure intégration des matériaux organiques.

Il est recommandé d'utiliser un sol environnant le tube qui combine une bonne conductivité thermique et une bonne conductivité de l'eau pour répondre aux deux exigences.

La forme innovante réduit l'effort de pression externe sur le tube.

IV.4.10.Mécanisme de fonctionnement de l'appareil :

Lorsque l'air passe à travers le tube innovant, il absorbe la chaleur transmise à travers le tube (flux thermique) via les parois du tube, ce qui augmente son refroidissement grâce à la meilleure conductivité thermique du matériau utilisé par rapport au précédent, en plus du refroidissement par évaporation résultant de l'évaporation de l'eau formée sur la surface intérieure du tube. Il y a également une augmentation de la surface d'échange, c'est-à-dire de la surface du tube.

IV.4.11.Revendications :

- Augmentation du rendement du système grâce à la conductivité thermique et au refroidissement par évaporation des nouveaux matériaux, avec une efficacité de 10 à 12%.
- Réduction de la surface de construction du système à environ un quart par rapport au système traditionnel.
- Économie du coût total de 35 à 50%.
- Coût de construction inférieur de 40 à 50% en raison de la réduction de la surface du système, ce qui entraîne un coût de maintenance inférieur.

- Coût d'exploitation inférieur en raison de la consommation d'énergie réduite grâce à la réduction de la friction résultant de la diminution de la longueur totale du conduit. Consommation réduite de 40 à 60%.

Durabilité environnementale : matériaux naturels à impact

- environnemental très limité, biodégradables et à fort taux de recyclage

BREVET D'INVENTION

Déposant :

RAHMANI FAOUZI

Titre de l'invention :

Système de capture, d'extraction et d'exploitation de l'humidité dans l'échangeur thermique

MEMOIRE DESCRIPTIF

1.Titre de l'Invention :

Système de capture, d'extraction et d'exploitation de l'humidité dans l'échangeur thermique

2.Domaine Technique de l'Invention :

Cet inventaire appartient au domaine des systèmes géothermiques, qui constituent un type parmi les énergies renouvelables, visant à exploiter la chaleur stockée sous la surface de la terre afin de fournir le chauffage en hiver et le refroidissement en été pour les bâtiments et les installations.

3.État de la Technique Antérieure :

Dans ce système, on dépend d'un tube en matériau PVC ou PEHD, qui est considéré comme l'élément échangeur dans le système et comme le conduit d'écoulement de l'air sous terre.

4.Objectif de l'Invention :

L'invention vise à améliorer la performance et l'efficacité du système de refroidissement de l'appareil, en exploitant l'humidité du sol afin d'accroître l'efficacité de l'appareil grâce au refroidissement évaporatif.

4.1. Technique utilisée dans l'invention est le refroidissement évaporatif.

4.2.Donnée physique : à une température de 25°C, un gramme d'eau évaporée absorbe une quantité de chaleur appelée la chaleur latente de vaporisation, estimée à ≈ 2440 Joules/gramme.

4.3.L'élément à exploiter dans cette invention est l'humidité du sol.

5. Principal défaut :

La non-exploitation de l'humidité du sol dans le refroidissement évaporatif, car ces matériaux sont non poreux et ne permettent pas la fuite de l'humidité ni son exploitation dans le refroidissement évaporatif.

4. Liste des dessins et figures :

6.1. Figure 1 illustre la forme tridimensionnelle de l'invention et les éléments qui la composent.

6.2. Éléments : RACCORDOER. MAILLAGE (FILET). CADRE

7. Présentation de l'essence de l'invention :

L'idée de l'invention consiste à créer un réseau de fibres naturelles et synthétiques selon la forme et le design joints ci-dessous, de sorte qu'il soit installé comme raccord entre les tubes de transport d'air, permettant ainsi à ce réseau de fibres (tissu de fibres de palmier ou de jute) tissées sous une forme similaire aux veines des arbres d'absorber l'humidité du sol de l'extérieur des tuyaux et de la transférer, grâce à la conductivité de ces fibres pour l'eau, à l'intérieur des tuyaux, où ces fibres saturées d'eau croisent le flux d'air, c'est-à-dire que l'air traverse ce réseau, ce qui permet le mélange de l'air avec l'eau évaporée, permettant ainsi l'absorption de la chaleur de l'air.

8. Méthode de réalisation de l'invention :

L'élément est un réseau selon la forme conçue et illustrée par le dessin joint ci-dessous, composé d'un réseau de fibres ayant une absorption et une conductivité élevées pour l'eau présente dans le sol à l'extérieur du tube d'évacuation de l'air de l'appareil, de sorte que le passage de l'air à travers le réseau dans sa partie interne lui fait perdre des températures considérables grâce au refroidissement évaporatif.

8.1. Matériaux de fabrication : fibres de jute, de palmier, de fibres synthétiques et textiles pour sa robustesse

8.2. Critère recherché : conductivité optimale de l'eau.

9. Manière d'appliquer l'invention :

L'appareil, c'est-à-dire le réseau, est installé entre les joints dans les tubes. Comme illustré dans les figures jointes.

L'appareil (l'invention) est installé dans le système selon le besoin en humidité, si l'air est sec, ainsi que selon le type de sol et le taux d'humidité qu'il contient, en plus du type de bâtiment et du domaine d'exploitation du système.

10. Éléments de l'appareil :

L'appareil est composé des éléments illustrés dans la figure ci-dessous :

- Le cadre sert à déployer le réseau dans le sol et à maintenir sa dispersion, surtout lors de l'installation.
- Le réseau sert à absorber l'eau du sol et à la transférer de l'extérieur du tube d'air à l'intérieur, grâce aux propriétés d'absorption et de pénétration de l'eau, etc.
- L'élément de raccord sert à connecter les tubes entre eux et également à isoler le sol tout en permettant à l'eau d'atteindre le réseau interne.
- Propriétés physiques auxiliaires

11.Revendications :

- 1 .Augmentation du rendement du système.
- 2 .Exploitation de l'élément d'humidité du sol dans le refroidissement évaporatif.
- 3 .Réduction de l'espace constructif du système.
- 4 .Économie dans le coût constructif du système. Durabilité.
- 5.Durabilité environnementale. Matériaux naturels à très faible impact environnemental. Matériaux biodégradables naturellement.

12.Conclusion :

À travers l'étude de ce système, il s'est avéré que parmi les éléments naturels du sol non exploités se trouve l'humidité du sol, c'est-à-dire l'humidité du terrain, et il est donc demandé dans cette invention d'en faire une exploitation optimale afin d'augmenter le rendement du système à travers le refroidissement évaporatif de l'air qui le traverse vers les bâtiments. Les fibres du réseau, s'étendant de l'extérieur des tubes à l'intérieur, transfèrent l'eau à l'intérieur des tubes, c'est-à-dire le conduit du flux d'air, permettant ainsi à cette humidité de refroidir l'air grâce au refroidissement évaporatif.

Pour information, à une température de 25°C, un gramme d'eau évaporée absorbe une quantité de chaleur appelée la chaleur latente de vaporisation, estimée à ≈ 2440 Joules/gramme

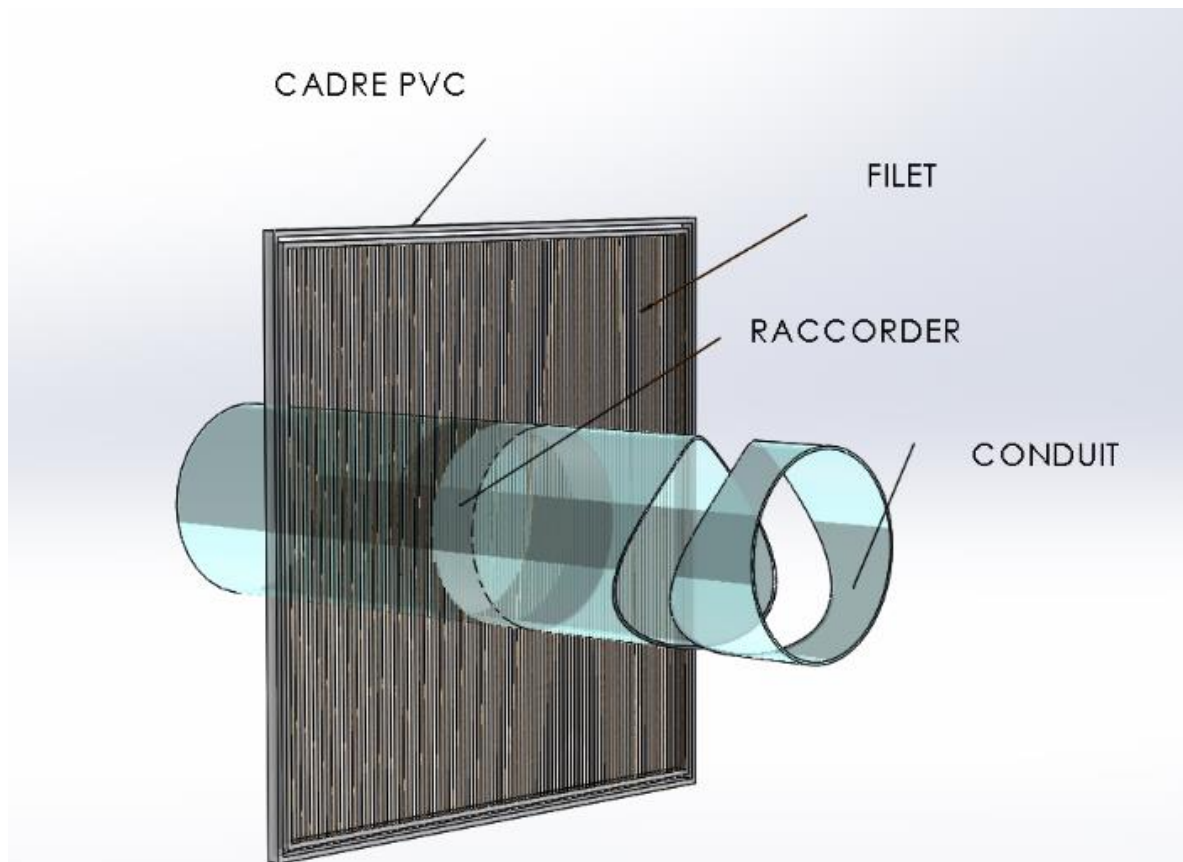


Figure IV.1 : Système de capture, d'extraction et d'exploitation de l'humidité dans l'échangeur thermique

BREVET D'INVENTION

Déposant :

RAHMANI FAOUZI

Titre de l'invention :

Proposition d'une forme innovante de section de conduit d'air dans un échangeur thermique sol-air avec un tube d'eau cent.

MEMOIRE DESCRIPTIF

1.Titre de l'invention :

Proposition d'une forme innovante de section de conduit d'air dans un échangeur thermique sol-air avec un tube d'eau central.

2. Domaine technique de l'invention :

Cette invention appartient au domaine des systèmes géothermiques, un type d'énergie renouvelable, visant à exploiter la chaleur stockée sous la surface de la terre pour fournir le chauffage en hiver et le refroidissement en été aux bâtiments et installations.

3.État de la technique antérieure :

Dans le système et la forme du tube en terre proposée précédemment, qui suggère l'utilisation de matériaux innovants et d'une section innovante pour exploiter le refroidissement par évaporation dans le système d'échangeur thermique, un problème se pose dans certains cas, notamment lorsque le sol est sec ou lorsque l'humidité du sol est insuffisante pour être exploitée dans le refroidissement par évaporation.

Le principal défaut : la faiblesse du taux d'humidité dans certains types de sol ou régions où le système proposé précédemment dépend de l'humidité du sol pour le refroidissement par évaporation.

4.Liste des dessins et figures :

Les figures 1 et 2 montrent la forme tridimensionnelle de l'invention et la section proposée, ainsi que la position et la forme du tube d'eau central.

5.Objectif de l'invention :

L'objectif de l'invention est d'améliorer la performance et l'efficacité du système proposé précédemment, qui vise à exploiter le refroidissement par évaporation, car dans certains cas et environnements, l'humidité du sol est insuffisante pour permettre un refroidissement par évaporation. Ainsi, nous proposons d'intégrer un tube d'eau central pour compenser le manque d'humidité dans le sol.

L'élément à travailler est le tube en termes de matériau de fabrication et de forme.

- La technique utilisée dans l'invention est le refroidissement par évaporation (sachant qu'à une température de 25°C, un gramme d'eau évaporée absorbe une quantité de chaleur connue sous le nom de chaleur latente de vaporisation, estimée à ≈ 2440 J/g).
- L'objectif est d'augmenter le rendement du système grâce à la différence de conductivité thermique.
- L'augmentation de la surface d'échange thermique se fait par l'augmentation de la surface interne du tube et une meilleure pénétration dans le sol grâce à la proposition d'une section en étoile innovante pour le tube illustré ci-dessous.

6.Évaluation du cœur de l'invention :

Dans le système proposé précédemment, le refroidissement par évaporation intégré dépend entièrement de l'humidité du sol, mais dans certains types de sol et régions, le taux d'humidité est insuffisant pour permettre un refroidissement par évaporation. Ainsi, nous proposons une section de tube évoluée et améliorée par rapport à la forme précédente, où nous suggérons la création d'un tube d'eau central en forme d'étoile, harmonieux avec la forme précédemment proposée. Ce tube conserve l'eau en son centre pour permettre l'évaporation sur la surface interne du tube, ce qui permet un refroidissement par évaporation grâce à la circulation de l'air à travers les canaux internes dont les surfaces sont saturées d'eau et d'humidité.

- La forme proposée permet l'intégration de l'utilisation de l'eau et son exploitation dans le refroidissement par évaporation, compensant ainsi le manque d'humidité
- Augmentation de l'efficacité du système de 10% à 12,5%, car la température de l'air sortant devient plus froide de 2,5 degrés.
- Augmentation de la surface d'échange interne de manière significative, ce qui entraîne une augmentation de l'efficacité énergétique, car la consommation d'énergie diminue grâce à la réduction de la distance, ce qui réduit la friction de l'air avec les parois du tube et la résistance à l'écoulement, réduisant ainsi la pression sur le ventilateur électrique.
- Réduction de la longueur requise de 80%.
- Durabilité environnementale les matériaux proposés sont biodégradables, écologiques, recyclables.

7.Méthode de réalisation de l'invention :

Pour la réalisation du système en général, elle se fait selon les mêmes méthodes adoptées précédemment pour sa construction, sauf que la fabrication des tubes à partir des nouveaux matériaux se fait de la même manière que la fabrication des briques de construction (briques), en ne changeant que le moule pour s'adapter à la forme innovante du tube.

Remarque : le travail et la recherche continuent sur le développement de la pâte ou du mélange afin d'assurer la compatibilité avec les besoins et l'environnement de fonctionnement de l'appareil, en maintenant une bonne résistance aux facteurs environnementaux environnants, une bonne perméabilité à l'eau et une bonne conductivité thermique.

8.Mode d'application de l'invention :

Il suffit de remplacer les tubes de la forme proposée dans le système précédent par la forme proposée dans cette proposition. Cependant, cette nouvelle forme nécessite un réservoir d'eau alimentant le tube central pour qu'il reste rempli d'eau et assure la saturation des surfaces

internes en eau. Il est également possible d'utiliser des fibres, soit synthétiques, soit végétales naturelles, appliquées avec la pâte d'argile pour assurer une bonne adhérence du matériau et s'adapter à la forme proposée (courbes, etc.), garantissant une meilleure intégration des matériaux organiques.

Il est recommandé d'utiliser un sol environnant le tube qui combine une bonne conductivité thermique et une bonne conductivité de l'eau, afin de répondre aux deux exigences. La forme innovante réduit l'effort de pression externe sur le tube.

9.Mécanisme de fonctionnement de l'appareil :

Lorsque l'air circule à travers le tube innovant, il absorbe la chaleur transmise à travers la surface externe du tube, c'est-à-dire le flux thermique à travers les parois externes du tube, ce qui augmente son refroidissement grâce à la conductivité thermique améliorée du matériau utilisé par rapport à la précédente, en plus du refroidissement par évaporation résultant de l'évaporation de l'eau à la surface externe du tube d'eau central et de l'augmentation de la surface d'échange, c'est-à-dire la surface du tube par rapport à la forme précédente.

10.Revendications :

1. Augmentation du rendement du système grâce à la conductivité thermique et au refroidissement par évaporation des nouveaux matériaux, avec une efficacité de 12 à 15%.
2. Réduction de la surface de construction du système à environ un quart par rapport au système traditionnel.
3. Économie du coût total de 35 à 50%.
4. Coût de construction inférieur de 40 à 50% grâce à la réduction de la surface du système, entraînant un coût de maintenance inférieur.
5. Coût d'exploitation inférieur et consommation d'énergie réduite grâce à la réduction de la friction résultant de la diminution de la longueur totale du conduit, consommation réduite de 40 à 60%.
6. Durabilité environnementale : matériaux naturels à impact environnemental très limité, biodégradables et à fort taux de recyclage.

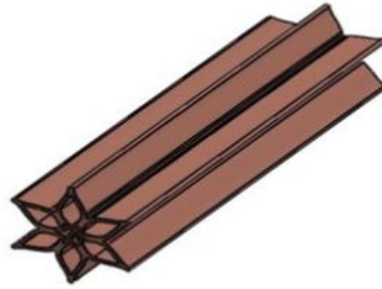


Figure IV.2 : forme innovante de section de conduit d'air dans un échangeur thermique sol-air avec un tube d'eau central

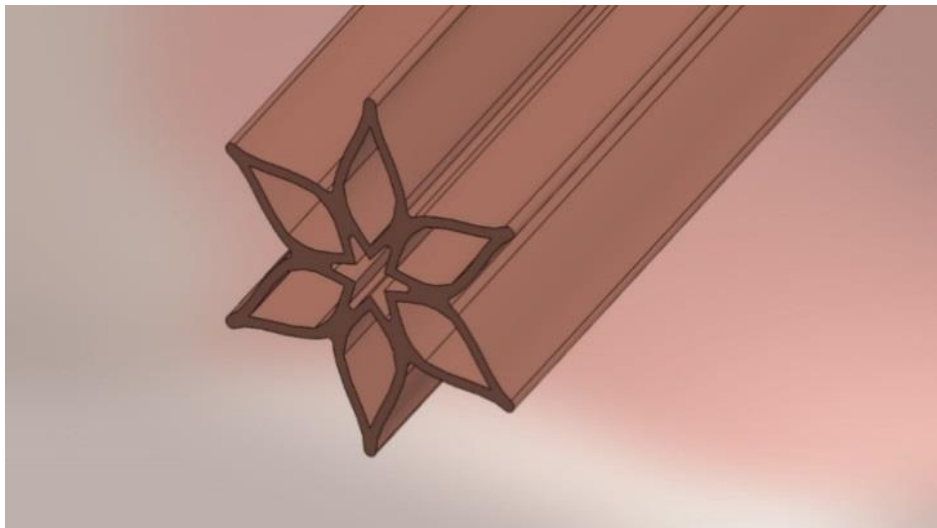


Figure IV.3 : forme innovante de section de conduit d'air dans un échangeur thermique sol-air avec un tube d'eau central

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail a permis de mettre en évidence l'intérêt et le potentiel de deux nouveaux matériaux innovants, à savoir la **brique étoilée** et la **céramique étoilée**, spécifiquement développés pour une application dans les échangeurs air-sol, en réponse aux exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique et de performance environnementale.

Les résultats obtenus démontrent que ces matériaux présentent des performances écologiques remarquables, se traduisant par une réduction significative des émissions de CO₂, estimée à **88 % pour la céramique** et à **72 % pour la brique**, ce qui confirme leur contribution effective à la diminution de l'empreinte carbone des systèmes de conditionnement passif.

L'analyse comparative a par ailleurs révélé que la **céramique poreuse à géométrie étoilée** constitue la solution la plus optimale, en raison de son compromis particulièrement favorable entre rendement thermique, efficacité hydraulique et viabilité économique.

En effet, le système proposé à base de céramique étoilée permet d'atteindre un rendement thermique équivalent à celui du système EAHE en PVC de Béchar, tout en nécessitant **69 % de surface et 69 % de longueur en moins**, avec une amélioration globale de l'efficacité de **31,4 %** et une réduction de l'empreinte carbone de **72 %**. À cela s'ajoutent des gains énergétiques notables, matérialisés par une économie annuelle de **124,4 kWh** sur la consommation électrique des ventilateurs, liée à la diminution des pertes de charge, ainsi qu'une réduction de **56 % du coût initial d'investissement**, correspondant à une économie estimée à **257 715 DZD**, ce qui confère à la solution proposée un intérêt technico-économique et environnemental particulièrement élevé pour les applications futures.

Perspectives et recommandations :

Au vu des résultats encourageants obtenus, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- **Industrialisation du procédé** : Étudier la faisabilité d'une production à grande échelle des conduites en céramique étoilée, en collaboration avec des partenaires industriels locaux.
- **Expérimentation in situ** : Réaliser des tests sur site dans différentes régions d'Algérie (climat aride, semi-aride, humide) pour valider les performances dans des conditions réelles variées.
- **Optimisation géométrique** : Explorer d'autres formes géométriques (multi-lobes, hélicoïdales) susceptibles d'améliorer encore l'échange thermique tout en réduisant les pertes de charge.

- **Intégration architecturale** : Développer des solutions d'intégration esthétique et fonctionnelle dans les bâtiments neufs et anciens, en préservant le caractère architectural local.
- **Formation et transfert de technologie** : Mettre en place des programmes de formation pour les bureaux d'études et les entrepreneurs locaux afin de diffuser cette innovation à plus grande échelle.

En définitive, la céramique étoilée s'impose comme une **alternative performante, durable et économiquement viable** face aux matériaux conventionnels (PVC, métal, béton). Elle répond parfaitement aux objectifs de la transition énergétique algérienne (vision 2030/2050) en réduisant la consommation d'énergie fossile, en favorisant l'utilisation de matériaux naturels locaux et en contribuant à la préservation de l'environnement. Ce travail ouvre ainsi la voie à une nouvelle génération d'échangeurs air-sol à haute efficacité énergétique et faible impact carbone.

REFERENCE

Reference

1. Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*, 82, 34-50.
2. AIAA. AIAA Guide for Verification and Validation of CFD Simulations. AIAA; 1998.
3. Albarghouth, A., Ramiar, A., & Ramyar, R. (2023). Earth-to-air Heat Exchanger for Cooling Applications in a Hot and Dry Climate : Numerical and Experimental Study. *International Journal of Engineering*, 36(1), 78-89.
4. ANADE. Programmes de Soutien aux Startups Énergétiques. Ministère de l'Industrie; 2022.
5. ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide Release 2024 R1. ANSYS Inc; 2024.
6. ANSYS Inc. ANSYS Meshing User's Guide Release 2024 R1. ANSYS Inc; 2024.
7. ANSYS Inc. ANSYS Workbench User's Guide Release 2024 R1. ANSYS Inc; 2024.
8. APRUE. Guide de l'Efficacité Énergétique en Algérie. APRUE; 2020.
9. ASHRAE. ASHRAE Standard 62.1-2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE; 2020.
10. ASME. ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in CFD and Heat Transfer. ASME; 2009.
11. ASTM International. ASTM C67-19 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. ASTM; 2019.
12. ASTM International. ASTM D2837-13 Standard Test Method for Obtaining Hydrostatic Design Basis for Thermoplastic Pipe Materials or Pressure Design Basis for Thermoplastic Pipe Products. ASTM; 2020.
13. Belton, V., & Stewart, T. (2012). Multiple criteria decision analysis : an integrated approach. Springer Science&Business Media.
14. Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2004). Topology optimization by distribution of isotropic material. In *Topology Optimization : Theory, Methods, and Applications* (pp. 1-69). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
15. Boban, L., Miše, D., Herceg, S., & Soldo, V. (2021). Application and design aspects of ground heat exchangers. *Energies*, 14(8), 2134.
16. BRE. BREEAM International New Construction 2016. BRE Global Ltd; 2019.
17. Brum, R. S., Ramalho, J. V., Rodrigues, M. K., Rocha, L. A., Isoldi, L. A., & Dos Santos, E. D. (2019). Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts. *Renewable Energy*, 135, 1371-1385.
18. Celik IB, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*. 2008.
19. CFD Online. Best Practices Guidelines for CFD. CFD Online; 2024.
20. Coleman HW, Steele WG. Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. Wiley; 2018.
21. Dassault Systèmes. Solid Works Flow Simulation User Guide 2024. Dassault Systèmes; 2024.
22. Dewangan, C., Shukla, A. K., Salhotra, R., & Dewan, A. (2024). Analysis of an earth-to-air heat exchanger for enhanced residential thermal comfort. *Environmental Progress&Sustainable Energy*, e14346.
23. Dunkle RV. Solar water distillation. *International Heat Transfer Conference Digital Library*. 1961.
24. Eça L, Hoekstra M. Estimation of numerical uncertainty based on grid refinement. *Journal of Computational Physics*. 2014.

25. Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2019). Computational methods for fluid dynamics. Springer.
26. FNME. Programmes de Financement des Projets d'Efficacité Énergétique. Ministère de l'Énergie; 2021.
27. Hamdane, S., Pires, L. C. C., Silva, P. D., & Gaspar, P. D. (2023). Evaluating the thermal performance and environmental impact of agricultural greenhouses using earth-to-air heat exchanger : An experimental study. *Applied Sciences*, 13(2), 1119.
28. Hammadi, S. H., & Mohammed, A. H. (2014). Application of earth tube heat exchanger and solar chimney for natural cooling system in Basrah City. *Journal for Engineering Sciences*, 23-32.
29. Hasan, M. I., Noori, S. W., & Shkariah, A. J. (2019). Parametric study on the performance of the earth-to-air heat exchanger for cooling and heating applications. *Heat Transfer—Asian Research*, 48(5), 1805-1829.
30. Hasan, M. I., & Noori, S. W. (2018). Evaluating the influence of some design and environmental parameters on the performance of earth to air heat exchanger. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 22(2), 10-29
31. IPCC. Climate Change 2021 The Physical Science Basis. Cambridge University Press; 2021.
32. ISO. ISO 10545-9 :1997 Ceramic tiles — Part 9 Determination of resistance to thermal shock. ISO; 2020.
33. ISO. ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment -Principles and framework. ISO; 2006.
34. ISO. ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment -Requirements and guidelines. ISO; 2006.
35. ISO. ISO 15686-1 :2011 Buildings and constructed assets — Service-life planning. ISO; 2019.
36. Kays WM, London AL. Compact Heat Exchangers. McGraw-Hill; 1984.
37. Khorchef, M. A., Serier, M., & Benariba, A. (2023). Optimizing Earth-Air Heat Exchangers for Sustainable Summer Cooling and Winter Heating. *exchange*, 4, 7.
38. Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion (pp. 96-116). Pergamon.
39. Li, H., Ni, L., Yao, Y., & Sun, C. (2019). Experimental investigation on the cooling performance of an Earth to Air Heat Exchanger (EAHE) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture. *Energy and Buildings*, 196, 280-292.
40. Manik, T. G., Sitorus, T. B., Pasaribu, J., Pratama, N., & Boer, W. (2020). The simulation performance analysis of the EAHE open system with finned iron pipes. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* (Vol. 725, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.
41. McKinney W. Python for Data Analysis. O'Reilly Media; 2022.
42. Miyara, A., Tarakka, R., & Ramadhani, M. A. I. (2019). Experimental Performance Analysis of Shallow Spiral-tube Ground Heat Exchangers in Series and Parallel Configurations. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 130, p. 01017). EDP Sciences.
43. NEAL. Technical Standards for Renewable Energy Projects. Ministry of Energy and Mining; 2019.
44. NIST. NIST IR 8298 Verification, Validation and Uncertainty Quantification Procedures. NIST; 2020.
45. Oberkampf WL, Roy CJ. Verification and Validation in Scientific Computing. Cambridge University Press; 2010.

46. Patankar SV. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Taylor&Francis; 1980.
47. Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M., & Zecchin, R. (2013). The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 107-116.
48. Pfafferoth J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*. 2003.
49. République Algérienne Démocratique et Populaire. Programme National des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique. Ministère de l'Énergie; 2015.
50. République Algérienne. Décret exécutif n°17-98 fixant les conditions d'octroi de l'efficacité énergétique. 2017.
51. République Algérienne. Loi n° 15-04 relative aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique. 2004.
52. République Algérienne. Stratégie Nationale de l'Environnement 2035. Ministère de l'Environnement; 2020.
53. Richardson LF. Approximate arithmetical solution by finite differences. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1911.
54. Roache PJ. Quantification of uncertainty in CFD. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1997.
55. Roache PJ. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers; 1998.
56. Rosa, N., Soares, N., Costa, J. J., Santos, P., & Gervásio, H. (2020). Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100649.
57. Saltelli A, et al. *Sensitivity Analysis in Practice*. Wiley; 2004.
58. Serageldin, A. A., Abdelrahman, A. K., & Ookawara, S. (2016). Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions : Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Conversion and management*, 122, 25-38.
59. Shah RK, Sekulić DP. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Wiley; 2003.
60. SJ, C., CL, H., & FP, H. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making methods and applications. книга.
61. Stern F, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations - Part 1 Methodology and procedures. *Journal of Fluids Engineering*. 2001.
62. Tasdelen, F., & Dagtekin, I. (2022). A numerical study on heating performance of horizontal and vertical earth-air heat exchangers with equal pipe lengths. *Thermal Science*, 26(4 Part A), 2929-2939
63. Thèse de doctorat, SAKHRI Nasreddine, ÉTUDE ET SIMULATION NUMERIQUE D'UN SYSTEME DE VENTILATION NATURELLE COMBINÉ : TOUR A VENT ET ÉCHANGEUR AIR-SOL DANS LES REGIONS ARIDES (CAS DE LA VILLE DE BECHAR), Université de Béchar, 2018.
64. UNIDO GEF. *Algeria Industrial Energy Efficiency Program*. UNIDO GEF; 2020.
65. United Nations. *Agenda 2030 for Sustainable Development*. United

- 66. USGBC. LEED v4.1 Building Design and Construction. U.S. Green Building Council; 2019.
- 67. Verma, M. K., & Bansal, V. (2020). Comparative CFD analysis of helical shaped earth air pipe heat exchanger using water tube as a thermal reservoir using different pipe materials. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 10(3), 1334-1348.
- 68. Vidhi, R. (2018). A review of underground soil and night sky as passive heat sink : Design configurations and models. *Energies*, 11(11), 2941.
- 69. Raluca Hohotă, Iolanda Colda, Dumitru Enache, Mihai Găvan, Ruxandra Enache , Etude numérique des « puits canadiens » pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments , IBPSA France, Université Technique des Constructions Bucarest, Bdul. Lacul Tei nr. 124, sector 2, Bucarest, Roumanie – 020396, 2008 .



ANNEXE

Annexe 01



Annexe 02



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة غرداية
حاضنة أعمال جامعة غرداية



رقم: 299 / ح.أ.ج.غ/2025

شهادة توطين مشروع مبتكر وفق القرار 008 المعدل والمتمم للقرار 1275

أنا الممضي أسفله، السيد: د/ طالب أحمد نور الدين

مسير حاضنة الأعمال: جامعة غرداية

المقر الاجتماعي / العنوان: المنطقة العلمية، ص ب 455، غرداية، 47000، الجزائر

بتاريخ: 2025/04/10

رقم علامة الحاضنة: 1004253146

طبيعة المشروع: مؤسسة ناشئة

أشهد أن الطالب(ة) / الطلبة التالية أسماؤهم:

الإسم واللقب	الطور الدراسي	التخصص	الكلية
رحماني فوزي بلعالم وفاء	M2	طاقات متجددة و ميكانيك	العلوم والتكنولوجيا

تحت إشراف الأستاذ(ة)/الأستاذة التالية أسماؤهم:

الإسم واللقب	الرتبة	التخصص	المؤسسة
قدور عبد المجيد	أستاذ	طاقات متجددة	وحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة
كيفوش عبد السلام	أستاذ محاضر	هندسة كهربائية وأوتوماتيك	جامعة خميس مليانة

تم توطينه على مستوى حاضنة أعمال جامعة غرداية - بمشروع تحت اسم:

Design et conception d'un nouvel échangeur air-sol EAHE

خلال السنة الجامعية: 2024/2025

سلمت هذه الشهادة بطلب من المعني للإدلاء بها في حدود ما يسمح به القانون.

حرر في غرداية بتاريخ: 2025/06/23

مدير الحاضنة

مسؤول حاضنة الأعمال
* طالب أحمد نور الدين *

Annexe 03

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي والبحث

العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة غرداية كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الآلية والكهر وميكانيك

غرداية لي : 23 - 06 - 2026

شعبة : طاقات متعددة/ ميكانيك

تخصص : الطاقة الشمسية و الميكانيك

شهادة ترخيص بالتصحيح والايذاع

أنا الأستاذة(ة) تحتاه رضا

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس / ماستر / دكتوراه) المعنونة بـ:

**Design et conception d'un Nouvel Echangeur
Air-Sol EAHE**

من إنجاز الطالب (الطالبة):

رحماني فوزي

التي نوقشت/قيمت بتاريخ: 2025/12/17

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام / قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة

وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت الشروط المطلوبة

مصادقة رئيس القسم

رئيس قسم الآلية والكهر وميكانيك

عزراوي محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح

Annexe 04

Premier Axe : Présentation Globale du Projet**1. Idée Étendue du Projet (Solution Innovante Globale)****Genèse et Évolution de l'Idée :**

L'idée est née à travers les études de Master en énergies renouvelables - spécialité mécanique, où elle a commencé par l'étude du système de puits canadien et l'observation des points faibles, mais l'idée a évolué pour inclure toutes les technologies d'énergies renouvelables, spécialement mécanique.

Notre institution est un bureau d'études spécialisé dans l'analyse et la conception de projets d'échangeurs thermiques pour usines, exploitations agricoles, habitations. Notre équipe a développé un modèle innovant de conduites en céramique pour efficacité accrue, fabriquées sous supervision dans usine partenaire.

Portée Globale des Solutions Innovantes :

a) Développement d'Appareils de Refroidissement et d'Humidification : Appareils unitaires/intégrés, techniques locales traditionnelles, intégration urbanistique, climatisation durable matériaux naturels.

b) Systèmes Intégrés : Puits canadien amélioré matériaux naturels, refroidisseur/rafraîchisseur air, refroidisseur eau potable, intégration énergies renouvelables (solaire).

2. Alignement avec la Vision Nationale 2030/2050

Focus Stratégique : Accompagnement vision énergétique 2030/2050, conservation énergie, export fossile.

Objectifs Nationaux : Projets énergies renouvelables, partenaires entrepreneurs/consommateurs, compatibilité transition énergétique, réduction coûts 50%.

Objectifs Long Terme : Centre recherche/accompagnement étudiants, optimisation échangeur, atelier fabrication.

3. Valeurs Proposées Globales

Économie Connaissance : Entreprise innovante, économie connaissance/marché, technologies nouvelles.

Patrimoine Culturel : Matériaux locaux, cultures/urbanisme locaux, modèles construction adaptés.

Identité Nationale : Réduction coûts, intégration locale, environnement créativité locale.

4. Stratégie de Développement Global

Protection Consommateur : Études habitudes, solutions pratiques, soutien distribution énergie.

Approche Scientifique : R&D, brevets, séminaires, comité scientifique spécialisé.

Deuxième Axe : Aspects Innovants Globaux**1. Nature des Innovations Multiples**

Techniques Traditionnelles : Développement refroidissement local, revival savoir

traditionnel, intégration technologie moderne.

Conception Architecturale : Formes artistiques, adaptation goûts locaux/mondiaux, préservation urbanistique.

2. Domaines d'Innovation Étendus

Résidentiel/Commercial : Appareils unitaires/intégrés, refroidissement naturel faible consommation, solaire.

Agricole/Environnemental : Agriculture/élevage, atmosphère adaptée.

Troisième Axe : Analyse Stratégique Globale du Marché

1. Segments de Marché Multiples

Gouvernemental/Institutionnel : Transition énergétique, politiques énergétiques, protection consommateur.

Commercial/Résidentiel : Institutions/foyers, promoteurs durables, agriculteurs.

2. Stratégie Marketing Globale

Institutionnel : Conseils/études comités, événements renouvelables, expositions/conférences.

Quatrième Axe : Plan de Développement et Production Globale

1. Processus de Développement Intégré

Technique : Refroidissement/humidification, échange thermique, matériaux naturels.

Pratique : Exécutables/maintenables, simplification contrôle, réduction coûts.

2. Partenariats Stratégiques Globaux

Fabrication : Usines éléments, fournisseurs services, entrepreneurs exécution.

Cinquième Axe : Plan Financier Étendu

1. Structure des Coûts

Postes	Montant Annuel DA
Salaires R&D	4 800 000
Équipements	2 400 000
Brevets	720 000
Laboratoires	1 200 000
Prototypes	960 000

Postes	Montant Annuel DA
Événements	480 000
Consultations	640 000
Total	11 200 000

2. Sources de Revenus

Sources	Revenus DA
Études	12 000 000
Licences	8 400 000
Appareils	15 600 000
Consultations	6 000 000
Formation	4 200 000
Conceptions	5 800 000
Rationalisation	3 600 000
Total	55 600 000

3. Rentabilité Prévue

Indicateur	Année 1	Année 2	Année 3
Revenus	35M	55.6M	82M
Coûts	16.5M	22.4M	28M

Indicateur	Année 1	Année 2	Année 3
Bénéfice	18.5M	33.2M	54M

Sixième Axe : Prototype Expérimental Global

Phase 1 : Développement technologies mécaniques, refroidissement traditionnel.

Phase 2 : Prototypes multiples, intégration urbanistique, économie énergie.

Phase 3 : Application nationale, autosuffisance technique.

Objectifs Performance :

Techniques : Coûts -50%, matériaux locaux, adaptation climatique, solaire.

Environnementaux : Biodégradables, empreinte carbone, patrimoine architectural.

Économiques : Export fossile, emplois locaux, industrie renouvelables.