

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département: Génie Mécanique

Réf :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية

المرجع:.....

Thèse présentée en vue de
l'obtention Du Diplôme de
Doctorat en Génie Mécanique

Étude technico-économique de faisabilité des systèmes éco-énergétiques innovants

Spécialité: Énergique

Présentée par:

Abderrahmane CHETTIR

Soutenue publiquement le: 17/12/2025

Devant le jury composé de:

Mr. Adel BENCHABANE	Professeur	Président	Université de Biskra
Mr. Adnane LABED	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mr. Mohamed Taher Bouzaher	Directeur de Recherche	Examineur	CRSTRA Biskra
Mr. Hocine DJEMAI	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

ملخص - تُركز هذه الأطروحة على دراسة الجدوى التقنية والاقتصادية لأنظمة الطاقة البيئية المبتكرة القائمة على الطاقة الحرارية الأرضية (الجيوحرارية)، مع التركيز بشكل خاص على استغلال طبقة المياه الجوفية الألبينية في منطقة بسكرة بالجزائر. الهدف الرئيسي هو تقييم مدى ملاءمة وأداء حلول الطاقة الحرارية الأرضية المستدامة المُكيّفة مع سياق الطاقة الوطني، الذي لا يزال يعتمد بشكل كبير على الموارد الأحفورية. تجمع المنهجية المُتبعة بين المحاكاة العددية والتحليلات التجريبية والتقييمات المُقارنة للمبادلات الحرارية المغمورة، وخاصةً ذات الحزمة الأنبوبية والمبادل الحراري أحادي الأنبوب "Vertical Slinky". تُبرز النتائج التأثير الحاسم للمعايير الهندسية والحرارية الفيزيائية على الكفاءة ومعامل الأداء (COP)، مع تحديد ظروف التشغيل المُثلى. تُظهر الدراسة المُقارنة أن المبادل الحراري أحادي الأنبوب "Vertical Slinky" هو الخيار الأنسب من حيث الأداء والجدوى الاقتصادية لتسخير الإمكانيات المحلية للطاقة الجيوحرارية. تُوفر هذه النتائج آفاقاً واعدة لدمج هذا النوع من الطاقة في الاستراتيجية الوطنية للتحول في مجال الطاقة والتنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الجيوحرارية - الطبقة الجوفية الألبينية - المبادل الحراري الرأسي أحادي الأنبوب - المبادل الحراري ذو الحزمة الأنبوبية - الجدوى التقنية والاقتصادية

Abstract - This dissertation focuses on the techno-economic feasibility study of innovative eco-energy systems based on geothermal energy, with particular emphasis on the exploitation of the Albian aquifer in the Biskra region, Algeria. The main objective is to assess the relevance and performance of sustainable geothermal solutions adapted to the national energy context, still largely dependent on fossil resources. The adopted methodology combines numerical simulations, experimental analyses, and comparative evaluations of immersed geothermal heat exchangers, particularly the tubular bundle and the Vertical Slinky single-tube. The results highlight the decisive impact of geometrical and thermophysical parameters on efficiency and the coefficient of performance (COP), while also identifying optimal operating conditions. The comparative study demonstrates that the Vertical Slinky single-tube heat exchanger is the most suitable option in terms of both performance and economic viability for harnessing the local geothermal potential. These findings provide promising prospects for the integration of geothermal energy into the national strategy for energy transition and sustainable development.

Keywords: Geothermal energy – Albian aquifer – Vertical Slinky exchanger – Tubular bundle exchanger – Techno-economic feasibility

Résumé - Cette thèse est consacrée à l'étude technico-économique de faisabilité des systèmes éco-énergétiques innovants basés sur la géothermie, avec un accent particulier sur l'exploitation de la nappe albienne dans la région de Biskra, en Algérie. L'objectif principal est d'évaluer la pertinence et les performances de solutions géothermiques durables adaptées au contexte énergétique national, marqué par une forte dépendance aux ressources fossiles. La méthodologie adoptée combine des simulations numériques, des analyses expérimentales et des comparaisons de configurations d'échangeurs géothermiques immergés, notamment le faisceau tubulaire et le monotube Vertical Slinky. Les résultats obtenus démontrent l'influence déterminante des paramètres géométriques et thermo-physiques sur le rendement et le coefficient de performance (COP), et mettent en évidence l'existence de conditions optimales de fonctionnement. L'analyse comparative révèle que le système à échangeur monotube Vertical Slinky constitue le choix le plus approprié en termes de performance et de viabilité économique pour la valorisation de la ressource géothermique locale. Ces conclusions ouvrent des perspectives prometteuses pour l'intégration de la géothermie dans la stratégie nationale de transition énergétique et de développement durable.

Mots clés : Géothermie – Nappe albienne – Échangeur Vertical Slinky – Échangeur à faisceau tubulaire – Faisabilité technico-économique

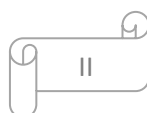
Dédicace

*À mes parents,
pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices
et leurs prières qui ont guidé mes pas jusqu'à ce jour.*

*À ma famille,
pour leur soutien constant et leur confiance en moi.*

*À mes enseignants et à tous ceux qui ont contribué,
de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Que ce modeste accomplissement soit l'expression de ma profonde
gratitude.*



Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à *Prof. Adnane Labed*, directeur de cette thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses précieux conseils, sa disponibilité constante et l'attention rigoureuse qu'il a portée à toutes les étapes de ce travail. Je lui suis également reconnaissant pour sa collaboration dans la rédaction de l'article issu de cette recherche.

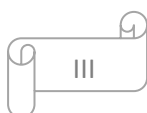
J'adresse mes sincères remerciements à *Prof. Noureddine Moummi* pour sa participation à la codirection de cette thèse.

Ma reconnaissance va également au *Comité de Formation Doctorale (C.F.D.) du département de Génie Mécanique*, pour son accompagnement et son appui tout au long de cette formation doctorale.

Je remercie chaleureusement les étudiants de Master: *Achraf Sayad, Djimouai Baaissa, Ali Kabot et Rafik Maanani* pour leur collaboration efficace et leur contribution à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à *Prof. Adel Benchabane*, pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de soutenance, ainsi qu'à *Prof. Adnane Labed, Dr. Mohamed Taher Bouzaher et Dr. Hocine Djemai*, pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche et pour leurs remarques constructives qui contribueront à enrichir ce modeste travail.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide, leurs encouragements ou leurs conseils. Qu'elles trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et de ma profonde reconnaissance.

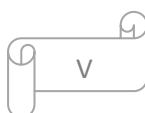


SOMMAIRE

Résumé	I
Dédicace	II
Remerciements.....	III
Table des matières	IV
Nomenclature	VIII
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XV
Introduction générale.....	1
Chapitre.1: Potentiel énergétique en Algérie	6
1. Introduction.....	7
2. Potentiels des énergies renouvelables en Algérie.....	8
2.1. Potentiel du solaire	8
2.2. Potentiel éolien.....	9
2.3. Potentiel de la biomasse	9
2.4. Potentiel de la géothermie	10
2.5. Potentiel hydraulique.....	10
3. Transition énergétique en Algérie.....	11
4. Cadre réglementaire et juridique	13
5. Programmes nationaux	14
5.1. Programme National de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité énergétique (PNEREE) de 2011	14
5.2. Énergies renouvelables du PNEREE.....	14
5.3. Réalisations dans le cadre du PNEREE de 2011	14
5.4. Programme national d'efficacité énergétique	15
5.5. Plan d'action en matière d'efficacité énergétique	15
5.6. Projet solaire de 4050 MWc du Ministère de l'Énergie	16
5.7. Appel d'offres de 150 MWc de la CREG.....	16
5.8. Appel d'offres de 50 MWc de SKTM/Sonelgaz.....	16
6. Conclusion	17
Chapitre.2: Exploitation de l'énergie géothermale; Etat de l'art	18
1. Introduction.....	19
2. La géothermie.....	20
2.1. Applications	21
2.2. Avantages et inconvénients de la géothermie	26

Sommaire

2.2.1. Avantages	26
2.2.2. Inconvénients	27
3. Etat de l'art	27
3.1. Les énergies renouvelables	27
3.2. La géothermie	29
3.3. Études numériques	31
3.4. Etudes expérimentales	34
4. Conclusion	36
Chapitre.3: Modélisation semi-analytique ECAW/ECWA	38
1. Introduction	39
2. Calcul et dimensionnement thermique du modèle proposé	40
2.1. Hypothèses de calcul	40
2.2. Paramètres caractéristiques de l'échangeur thermique eau-air	41
2.3. Propriétés thermo-physiques de l'air	42
2.4. Température ambiante de l'air	42
3. Bilan énergétique	42
3.1. Modélisation semi-analytique du transfert thermique	42
3.2. Pertes de charge à l'intérieur des tubes	45
4. Organigramme du programme	46
5. Conclusion	48
Chapitre.4: Protocole expérimentale	49
1. Introduction	50
2. Problématique	52
3. Objectifs	52
4. Modèles expérimentaux étudiés	52
4.1. Echangeur immergé à faisceau tubulaire	52
4.2. Echangeur immergé monotube (Vertical slinky)	54
5. Appareillage	56
6. Bilan énergétique et Bilan exergétique des échangeurs	58
6.1. Bilan énergétique	58
6.2. Bilan exergétique	59
6.2.1. Expression générale du bilan exergétique	59
6.2.2. Exergie associée au transfert de chaleur	59
6.2.3. Exergie du fluide d'air à l'entrée et à la sortie	59
6.2.4. Destruction d'exergie et rendement exergétique	60
6.2.5. Application aux deux géométries	60
6.2.6. Interprétation et intérêt de l'analyse exergétique	60
7. Evaluation expérimentale du rendement exergétique des échangeurs	60



Sommaire

7.1. Données expérimentales nécessaires.....	61
7.2. Calcul de l'exergie thermique utile	61
7.3. Exergie disponible à l'entrée du système	61
7.4. Exergie détruite et irréversibilités	62
7.5. Rendement exergetique expérimental	62
7.6. Application comparative aux deux géométries.....	62
7.7. Interprétation physique	62
8. Conclusion	63
Chapitre.5: Resultats et descussion.....	64
1. Introduction.....	65
2. Résultats du modèle semi-analytique	65
2.1. Influence de la matière du tube (échangeur) sur la température de l'air	65
2.2. Influence de la longueur sur la température de l'air.....	66
2.3. Influence du diamètre du tube sur la température de l'air	67
2.4. Influence du débit sur la température de l'air	69
2.5. Influence de la longueur de l'échangeur sur le coefficient de performance (COP)....	70
2.6. Influence du débit d'air sur le coefficient de performance (COP).....	71
3. Résultats expérimentaux	73
3.1. Cas du chauffage.....	73
3.1.1. Echangeurs immergés à faisceau tubulaire.....	73
3.1.1.1. Influence du débit d'air sur la température	73
3.1.1.2. Influence de la longueur sur la température	74
3.1.1.3. Influence du débit d'air sur le COP	74
3.1.2. Echangeur immergé monotube (Veritcal Slinky).....	75
3.1.2.1. Effet de la longueur sur la température de l'air	75
3.1.2.2. Rendement de l'échangeur	76
3.1.2.3. Coefficient de performance (COP)	78
3.2. Cas du refroidissement (Échangeurs à faisceau tubulaire: Figure 23)	78
3.2.1. Influence du débit d'air sur la température.....	79
3.2.2. Influence de la longueur sur la température de l'air	80
4. Calcul d'incertitude	81
4.1. Introduction.....	81
4.2. Instruments de mesure et incertitudes associées	81
4.3. Méthode de propagation des incertitudes	82
4.4. Exemple.1: Echangeur à faisceau tubulaire.....	82
4.5. Exemple.2: Echangeur monotube type “ Vertical Slinky”	82
4.6. Résumé comparatif des incertitudes.....	83

Sommaire

4.7. Discussion.....	83
5. Etude technico-économique comparative du rafraîchissement d'une habitation (160 m ²) à Biskra par WAHE à faisceau tubulaire	84
5.1. Introduction.....	84
5.2. Hypothèses de calcul	84
5.3. Méthodes de calcul et fondements théoriques	85
5.3.1. Modèle du système géothermique, consommation énergétique et analyse économique.....	88
5.3.1.1. Modèle conceptuel du système	88
5.3.1.2. Consommation énergétique du système WAHE	89
5.3.1.3. Consommation énergétique des climatiseurs électriques	89
5.3.1.4. Analyse économique comparative	89
5.3.1.5. Discussion	91
5.4. Recommandations de mise en œuvre du système WAHE à faisceau tubulaire	92
5.4.1. Dimensionnement, intégration et maintenance	92
5.4.2. Contraintes locales et adaptation saharienne	93
5.4.3. Perspectives de mise en œuvre à grande échelle.....	93
5.5. Sensibilités, limites et portée opérationnelle du système WAHE.....	94
5.5.1. Sensibilités techniques et économiques.....	94
5.5.2. Limites pratiques, scientifiques et méthodologiques	94
6. Analyse technico-économique intégrée	95
6.1. Introduction.....	95
6.2. Coût global du système géothermique	95
6.3. Coût exergétique unitaire.....	95
6.4. Rendement économique exergétique	96
6.5. Coût unitaire du kWh exergétique utile.....	96
6.6. Période de retour sur investissement (PRI)	96
6.7. Interprétation comparative.....	96
7. Conclusion	97
Conclusion générale	98
Références bibliographiques	102

NOMENCLATURE

A	Section d'écoulement (m ²)
C_{clim}	Coût de fonctionnement des climatiseurs par saison (D.A.)
C_h	Coût total d'exploitation énergétique (D.A.)
C_{pa}	Chaleur spécifique de l'air (J/kg.°C)
C_{WAHE}	Coût saisonnier de fonctionnement du système WAHE (D.A.)
$C_{p,f}$	Capacité calorifique massique du fluide caloporteur (J/Kg.K)
COP	Coefficient de performance thermique
D_h	Diamètre hydraulique (m)
d_i	Diamètre intérieur du tube (m)
E_{clim}	Consommation énergétique des climatiseurs par saison (KWh)
E_{WAHE}	Consommation énergétique du système WAHE par saison (KWh)
\dot{E}_x	Flux exergetique de l'air (W)
$\dot{E}_{x,détruite}$	Exergie détruite par les irréversibilités internes (W)
$\dot{E}_{x,entrée}$	Débits d'exergie à l'entrée du système (W)
$\dot{E}_{x,perdue}$	Exergie dissipée vers l'environnement (W)
$\dot{E}_{x,Q}$	Taux d'exergie associée à la chaleur (W)
$\dot{E}_{x,sortie}$	Débits d'exergie à la sortie du système (W)
$\dot{E}_{x,utile}$	Débit d'exergie utile (W)
e	Epaisseur du tube (mm)
e_0	Exergie spécifique de l'air (J/Kg)
e_x	Exergie spécifique de l'air (J/Kg)
h	Enthalpie spécifique de l'air (J/Kg)
h_0	Enthalpie spécifique de l'air à l'état de référence (J/Kg)
h_a	Coefficient de transfert convectif (W/m ² .K)
l	Distance entre deux tubes consécutifs (mm)

Nomenclature

L	Longueur de l'échangeur (m)
L_t	Longueur totale des tubes de l'échangeur (m)
\dot{m}_a	Débit massique de l'air (kg/s)
\dot{m}_f	Débit massique du fluide caloporteur (Kg/s)
n	Nombre total de variables indépendantes
N_{tt}	Nombre total de tubes traversés par l'air dans le faisceau tubulaire
N_u	Nombre de Nusselt
P_m	Périmètre mouillé (m)
P_r	Nombre de Prandtl
P_{tot}	Énergie totale consommée (KWh)
P_{vent}	Puissance du ventilateur (W)
Q	Puissance thermique de l'air (W)
\dot{Q}	Flux de chaleur (W)
Q_s	Puissance sensible du système WAHE (W)
Q_v	Débit volumique de l'air (m ³ /s)
R	Grandeur calculée ou résultat final
R_a	Résistance thermique de l'air (m ² .K/w)
R_e	Nombre de Reynolds
r_e	Rayon de l'eau (m)
R_{eau}	Résistance thermique de l'eau (m ² .K/w)
R_t	Résistance thermique du tube (m ² .K/w)
R_{th}	Résistance thermique totale (m ² .K/W)
r_{ei}	Rayon intérieur du tube (mm)
r_{ex}	Rayon extérieur du tube (mm)
S	Surface d'échange thermique (m ²)
s	Entropie spécifique de l'air (J/Kg.K)
s_0	Entropie spécifique de l'air à l'état de référence (J/Kg.K)
$\dot{S}_{générée}$	Taux de génération d'entropie de l'air (J/s.K)

Nomenclature

T	Température de la source thermique (K)
T_0	Température ambiante (K)
T_a	Température de l'air (°C)
T_{ae}	Température de l'air à l'entrée
T_{as}	Température de l'air à la sortie
T_e	Température de l'eau chaude (°C)
T_{ea}	Température d'entrée de l'air
T_{eau}	Température de l'eau
$T_{f,e}$	Température d'entrée du fluide caloporteur (K)
$T_{f,s}$	Température de sortie du fluide caloporteur (K)
T_{in}	Température d'entrée de l'air (°C)
T_{inlet}	Température d'entrée de l'air (K)
T_{out}	Température de sortie de l'air (°C)
T_{outlet}	Température de sortie de l'air (K)
T_w	Température de l'eau géothermale (°C)
T_{water}	Température de l'eau géothermique (K)
t	Période de fonctionnement du système EAHE par saison (h)
u_R	Incertitude composée (ou globale) sur la grandeur R
u_T	Incertitude sur les mesures de température (°C)
u_{Xi}	Incertitude-type associée à X_i
u_η	Incertitude sur les mesures de rendement
X_i	Variables indépendantes mesurées

Symboles grecs

ΔC	Différence entre C_{Clim} et C_{WAHE} (D.A.)
ΔP_e	Perte de charge par effet d'entrée et de sortie (Pa)
ΔP_i	Perte de charge totale (Pa)
ΔP_p	Perte de charge singulière (Pa)
ΔP_r	Perte de charge régulière (Pa)
ΔT_a	Différence de température de l'air (°C)
ε	Efficacité de l'échangeur
η	Rendement de l'échangeur
η_{ex}	Rendement exergetique global
λ_a	Conductivité thermique de l'air (W/m.°C)
λ_c	Conductivité thermique du tube en cuivre (W/m.°C)
λ_e	Conductivité thermique de l'eau chaude (W/m.°C)
λ_{pvc}	Conductivité thermique du tube en PVC (W/m.°C)
μ	Viscosité dynamique de l'air (Pa.s)
μ_a	Viscosité dynamique de l'air (kg/m.s)
μ_p	Viscosité dynamique de l'air à la paroi du tube (Pa.s)
ν_a	Viscosité cinématique de l'air (m²/s)
ζ	Coefficient de perte de charge locale
Ω	Coefficient de perte linéaire
θ	Angle entre le sens d'écoulement initial et final
ρ_a	Masse volumique de l'air (kg/m³)
v_{air}	Vitesse moyenne de l'air dans les tubes (m/s)
$\bar{\omega}$	Coefficient de correction de viscosité

LISTE DES FIGURES

Chapitre.2:

Figure.1: Géothermie: a) haute énergie; b) basse énergie; c) très basse énergie

Figure.2: Exemple d'une cascade d'application des ressources géothermiques

Figure.3: Principales zones géothermiques en Algérie

Figure.4: Ferme d'aquaculture de Hassi Ben Abdullah à Ouargla

Figure.5: Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité

Chapitre.3:

Figure.1: Echangeur de chaleur tubulaire géothermique eau-air

Chapitre.4:

Figure.1: Localisation géographique de la ville de Biskra

Figure.2: (a): échangeur à 4 tubes ; (b): échangeur à 6 tubes ; (c): échangeur à 8 tubes
destinés au chauffage

Figure.3: (a): échangeur à 4 tubes ; (b): échangeur à 6 tubes ; (c): échangeur à 8 tubes
destinés au rafraîchissement

Figure.4: Echangeur immergé monotube Vertical slinky

Figure.5: Capteurs de mesure de température à l'intérieur de l'échangeur

Figure.6: Thermocouples type K (0,01°C)

Figure.7: Anémomètre à fil chaud type Kimo VT300

Figure.8: Aspirateur pour le pompage d'air (Type MPF.803, 1000W)

Figure.9: Autotransformateur «Langois» variable triphasé mobile (Modèle:1500 VA,
 $\pm 1\%$ à $\pm 3\%$)

Chapitre.5:

Figure.1: Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour
deux matières différentes pendant le mois de Janvier: (a) Tea minimale; (b)
Tea moyenne

Figure.2: Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour
deux matières différentes pendant le mois de Mars: (a) T_{ea} minimale; (b) T_{ea}
moyenne

Figure.3: Influence de la longueur sur la température de l'air pendant les quatre Mois
les plus frais de l'année: Tea minimale

Figure.4: Influence de la longueur sur la température de l'air pendant les quatre Mois
les plus frais de l'année: Tea moyenne

Figure.5: variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube
pendant le mois de Décembre: (a) T_{ea} minimale; (b) T_{ea} moyenne

Figure 6: variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube
pendant le mois de Janvier: (a) Tea minimale; (b) Tea moyenne

Liste des figures

- Figure.7: variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube pendant le mois de Mars: (a) Tea minimale ; (b) Tea moyenne
- Figure.8: Influence du débit d'air sur la température de l'air (en fonction de la longueur du tube) pendant le mois de Janvier: (a) Tea minimale ; (b) Tea moyenne
- Figure.9: Influence du débit d'air sur la température de l'air (en fonction de la longueur du tube) pendant le mois de Mars: (a) Tea minimale; (b) Tea moyenne
- Figure.10: Variation du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pendant le mois de Janvier: Tea minimale
- Figure.11: Variation du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pendant le mois de Mars: Tea moyenne
- Figure.12: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Décembre: Tea minimale
- Figure.13: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Janvier: Tea minimale
- Figure.14: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Février: Tea minimale
- Figure.15: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Mars: Tea minimale
- Figure.16: Variation de la différence de température en fonction du débit d'air pour les trois échangeurs
- Figure.17: Variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents
- Figure.18: influence du débit d'air sur le COP pour les trois échangeurs
- Figure.19: Evolution de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour trois débits d'air différents
- Figure.20: Influence de la longueur sur le rendement de l'échangeur pour trois débits d'air différents
- Figure.21: Influence du débit d'air sur le rendement de l'échangeur pour différentes longueurs
- Figure.22: influence du débit sur le COP de l'échangeur
- Figure.23: Echangeur de chaleur à faisceau tubulaire immergé de 8 tubes
- Figure.24: variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour les trois échangeurs
- Figure.25: variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents
- Figure.26: Influence du débit sur le COP pour les trois échangeurs

Liste des figures

Figure.27: Schéma de principe du système géothermique à faisceau tubulaire eau–air (immersion verticale)

Figure.28: Abaissement de température ΔT pour chaque scénario

Figure.29: Puissance sensible délivrée Q_s selon les scénarios

Figure.30: Coût horaire de fonctionnement (échelle logarithmique) pour chaque Scénario

Figure.31: Comparaison de la consommation énergétique saisonnière. (WAHE vs climatiseurs)

Figure.32: Comparaison du coût saisonnier de fonctionnement (WAHE vs climatiseurs)

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre.2:

Tableau.1: Historique du développement de la géothermie en Algérie

Chapitre.3:

Tableau.1: Paramètres caractéristiques de l'échangeur thermique eau-air

Tableau.2: propriétés thermo-physiques de l'air ambiant

Tableau.3: Températures moyennes et températures minimales de l'air ambiant pendant les quatre mois les plus frais de la région de Biskra

Chapitre.4:

Tableau.1: Paramètres caractéristiques de l'échangeur à faisceau tubulaire

Tableau.2: Paramètres caractéristiques de l'échangeur monotube (Veritcal slinky)

Tableau.3: Tableau montrant la distance entre les capteurs repartis le long de l'échangeur

Chapitre.5:

Tableau.1. Instruments de mesure et incertitudes associées

Tableau.2. Ecart entre les incertitudes des deux modèles

Tableau.3. Bilan comparatif WAHE–climatiseurs électriques

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, l'énergie constitue un élément indispensable au quotidien de l'humanité. Elle représente l'étincelle qui alimente toute activité humaine et demeure un facteur déterminant du développement économique et social. Elle est, à ce titre, le pilier de l'économie moderne. Or, près de 80 % de l'énergie consommée dans le monde provient encore de sources fossiles et épuisables, telles que le pétrole, le gaz, le charbon ou encore l'uranium. La demande énergétique mondiale connaît une croissance continue résultant à la fois de l'augmentation rapide de la population et de l'expansion des activités économiques, ce qui accentue la pression sur les ressources disponibles. Cette situation génère un déséquilibre énergétique préoccupant, notamment en Europe, où la consommation dépasse largement la production locale. L'épuisement progressif des gisements pétroliers, dont les réserves sont estimées à environ une cinquantaine d'années [1], rend d'autant plus urgente la diversification du bouquet énergétique et l'exploration de solutions durables. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative prometteuse. Issues de ressources naturelles inépuisables (soleil, vent, biomasse, eau, géothermie, marées), elles permettent non seulement de réduire la dépendance aux énergies fossiles, mais également de limiter les émissions de gaz à effet de serre, notamment de dioxyde de carbone (CO₂) [2].

L'Algérie, dotée d'un important potentiel en énergies renouvelables, possède de solides atouts pour accompagner efficacement la transition énergétique nationale. Parmi ces ressources, la géothermie se distingue par sa polyvalence, puisqu'elle peut être exploitée non seulement pour le chauffage et le rafraîchissement des espaces, mais également — dans certaines configurations — pour la production d'électricité [3–6]. Dans les zones arides et sahariennes, où le maintien du confort thermique dans les bâtiments constitue un enjeu crucial, l'exploitation de l'énergie géothermique à des fins de climatisation et de chauffage apparaît comme une option stratégique [7]. De nombreuses recherches ont montré qu'à partir d'environ trois mètres de

profondeur, la température du sol tend à se stabiliser [8–10], créant ainsi des conditions favorables à l’installation de systèmes d’échangeurs géothermiques. La littérature scientifique fait également état de plusieurs travaux numériques et expérimentaux consacrés à l’analyse de ces dispositifs [11–13], qu’il s’agisse d’examiner l’influence des paramètres géométriques et de fonctionnement (profondeur, longueur, diamètre, vitesse d’écoulement) [14], d’optimiser leur couplage avec les bâtiments [15,16], ou encore de développer des modèles prédictifs de transfert thermique [17,18]. Plus récemment, de nouvelles configurations géométriques, comme les échangeurs à panier conique, ont fait l’objet d’études approfondies et ont révélé des performances encourageantes, notamment lorsqu’elles sont intégrées à des pompes à chaleur destinées à des applications agricoles [19–23].

Dans ce contexte, notre travail s’intéresse à l’évaluation technico-économique de systèmes éco-énergétiques innovants à base de géothermie, appliqués aux conditions spécifiques du climat saharien. L’étude proposée s’articule autour de deux approches complémentaires. La première repose sur une modélisation semi-analytique, réalisée sous Matlab, qui simule le comportement thermique d’un échangeur géothermique immergé eau–air à faisceau tubulaire. La seconde consiste en une investigation expérimentale menée sur des échangeurs de géométries distinctes (faisceau tubulaire et monotube de type Vertical Slinky), installés sur trois sites situés à proximité de la ville de Biskra et alimentés en permanence par de l’eau géothermique albienne à fort débit. Ces dispositifs visent à assurer le chauffage en hiver et le rafraîchissement en Été des bâtiments, tout en réduisant significativement la consommation d’énergie électrique grâce à l’exploitation d’une ressource locale, gratuite et durable.

Afin d’appréhender plus finement la qualité des échanges thermiques et les potentialités réelles de conversion énergétique, une analyse exergetique a été intégrée à la démarche globale. Celle-ci permet d’évaluer la part utile de l’énergie transférée et d’identifier les principales sources d’irrégularité ou de perte, en complément du bilan énergétique classique. Cette approche, couplée à l’analyse technico-économique, offre

une vision complète des performances globales et de la durabilité des systèmes étudiés.

L'investigation expérimentale et la modélisation ont été réalisées avec la collaboration des étudiants Achraf Sayad, Djmouai Baaissa, Ali Kabot et Rafik Maanani, dans le cadre de leurs projets de master, et s'inscrivent dans la continuité du projet PRFU « Étude de faisabilité et valorisation des systèmes énergétiques innovants de production de froid au climat saharien ».

La problématique de cette recherche peut être formulée comme suit : bien que la nappe albienne — l'un des plus importants gisements géothermiques de la région de Biskra — dispose d'eaux chaudes abondantes exploitées de manière limitée (forages, stations thermales), leur valorisation énergétique reste faible. L'utilisation d'échangeurs de chaleur géothermiques immergés dans des réservoirs alimentés par ces eaux, associés à des systèmes de ventilation adaptés, constitue une alternative novatrice pour le chauffage et la climatisation domestiques. Cette solution permettrait de concilier efficacité énergétique, durabilité et respect de l'environnement.

Dans ce cadre, les principaux objectifs poursuivis sont:

- la valorisation des ressources géothermiques mal exploitées de la nappe albienne;
- la mise en évidence d'une énergie locale, disponible, propre et renouvelable;
- la conception et l'évaluation de systèmes innovants de chauffage et de rafraîchissement adaptés au climat saharien;
- la réduction de la consommation électrique des bâtiments et la limitation des impacts environnementaux;
- l'intégration d'une approche exergétique permettant d'évaluer la qualité de l'énergie transférée et les pertes irréversibles;
- l'analyse technico-économique des systèmes développés pour évaluer leur rentabilité et leur potentiel de diffusion à plus grande échelle.

Afin de répondre à ces objectifs, ce manuscrit s'articule en cinq chapitres complémentaires:

- Le premier expose le bilan énergétique de l'Algérie en 2021, son potentiel en énergies renouvelables et les perspectives de la transition énergétique nationale, en s'appuyant notamment sur le programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (2011–2030).
- Le deuxième analyse la géothermie à travers ses applications, ses avantages et ses limites, puis présente une synthèse des travaux antérieurs sur les échangeurs géothermiques afin de situer notre recherche dans son cadre scientifique.
- Le troisième présente la modélisation semi-analytique, réalisée sous Matlab, d'un système d'échange géothermique eau–air à faisceau tubulaire, et procède à l'analyse détaillée de ses performances thermiques.
- Le quatrième décrit le protocole expérimental mené sur trois sites distincts à proximité de Biskra, avec deux configurations d'échangeurs (faisceau tubulaire et monotube Vertical Slinky), et précise la méthodologie d'évaluation énergétique et exergétique des performances.
- Le cinquième regroupe et discute les résultats issus des approches théorique et expérimentale, puis développe une analyse exergétique et technico-économique approfondie afin d'évaluer la faisabilité, la rentabilité et la durabilité des systèmes proposés.

Ainsi construite, cette thèse vise à démontrer la faisabilité technico-économique et exergétique de systèmes géothermiques innovants pour le chauffage et le rafraîchissement domestiques en climat saharien, tout en contribuant à la valorisation durable des ressources énergétiques locales.

Potentiel Energétique en Algérie

1. Introduction

L'Algérie dispose d'un patrimoine énergétique particulièrement riche et diversifié, qui constitue un atout stratégique pour son développement économique et social. Si les hydrocarbures demeurent la principale ressource exploitée, le pays possède également un potentiel considérable en énergies renouvelables, notamment solaire et éolienne, lié à l'immensité de son territoire et à son ensoleillement exceptionnel. La géothermie, encore peu valorisée, représente également une ressource prometteuse, surtout dans les régions sahariennes. La mise en valeur de ce potentiel énergétique, à travers une transition progressive vers des solutions durables et propres, s'impose aujourd'hui comme un enjeu majeur afin de satisfaire la demande énergétique en constante augmentation et de participer activement à la lutte mondiale contre les changements climatiques.

D'après le dernier bilan énergétique national publié par le Ministère de l'Énergie (édition 2022, portant sur l'année 2021), la production commerciale d'énergie primaire de l'Algérie a atteint environ 164,4 millions de tonnes équivalent pétrole (MTep), contre 144,4 MTep en 2020, soit une progression notable de près de 14 %. Cette évolution est due principalement à l'augmentation substantielle de la production de gaz naturel (+24 %). Cette croissance s'explique par la bonne performance de plusieurs gisements, la mise en service de nouvelles unités de compression (boosting HRM) ainsi que l'apport des champs récemment exploités, dans un contexte de forte demande européenne en gaz algérien.

La production de pétrole brut a également enregistré une légère progression (+1 %), en lien avec l'augmentation du quota attribué à l'Algérie dans le cadre de l'accord OPEP+, passant d'une moyenne de 900 kb/j en 2020 à près de 911 kb/j en 2021.

En revanche, la production d'électricité issue des énergies renouvelables a diminué de 4,1 % entre 2020 et 2021, pour atteindre environ 662 GWh. Cette baisse s'explique principalement par l'effondrement de la production hydroélectrique (–81 %), conséquence d'une faible pluviométrie durant l'année 2021, ainsi que par une réduction de la production photovoltaïque (–3,5 %) liée à divers problèmes techniques. Dans l'ensemble, la structure de l'offre énergétique commerciale demeure dominée par le gaz naturel, qui représente près de 60 % de la production totale, suivi du pétrole brut avec environ 29 %, tandis que les condensats, le GPL, la biomasse et l'électricité renouvelable ne contribuent qu'à une part marginale.

Concernant la consommation finale, une augmentation d'environ 8 % a été enregistrée en 2021 par rapport à 2020. Le secteur des ménages et services, qui reste le principal consommateur, a atteint près de 23,4 MTep, soit une hausse de 6,2 %, tirée par le résidentiel (+4,4 %) et le tertiaire (+12,3 %). Le secteur des transports a progressé de 7,6 %, avec une consommation estimée à 14,5 MTep, due à la relance du transport routier et à la réouverture progressive du trafic aérien, ce qui s'est traduit par une hausse de la demande en gasoil, GPL/C, essences et kérosène. De son côté, l'industrie et le BTP ont connu une croissance plus marquée (+12 %), atteignant environ 12,2 MTep, grâce notamment à la reprise des sous-secteurs liés aux matériaux de construction, à la chimie, aux industries mécaniques et à l'agroalimentaire.

La structure de la consommation finale d'énergie reste dominée par le secteur des ménages et autres (47 %), suivi du transport (29 %) et de l'industrie et BTP (24 %) [24]. Malgré un développement observable au cours des dernières années, la part des énergies renouvelables (photovoltaïque et éolien) demeure encore très faible dans le mix énergétique national, comparativement aux ressources fossiles qui conservent une position largement prépondérante.

2. Potentiels des énergies renouvelables en Algérie

2.1. Potentiel du solaire

Grâce à sa position géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus riches au monde. Le pays bénéficie d'une durée d'ensoleillement annuelle dépassant largement 2000 heures sur presque l'ensemble de son territoire, pouvant même atteindre 3900 heures dans certaines zones comme les Hauts-Plateaux et le Sahara [25]. L'énergie solaire globale journalière reçue par mètre carré varie ainsi entre 5,1 kWh au Nord et 6,6 kWh dans le Sud profond.

En ce qui concerne le rayonnement solaire direct, paramètre fondamental pour les technologies solaires thermiques à concentration (CSP), les valeurs journalières fluctuent entre environ 5,5 kWh/m² à Alger et 7,5 kWh/m² à Illizi. Ces niveaux démontrent un potentiel exceptionnel, aussi bien pour le développement du photovoltaïque que pour les applications du solaire thermique, rendant l'Algérie particulièrement bien positionnée pour exploiter efficacement cette ressource.

2.2. Potentiel éolien

Le déploiement de l'énergie éolienne s'appuie avant tout sur une évaluation fiable du potentiel venteux. En raison de la forte variabilité spatiale et temporelle du vent, il est indispensable de disposer de séries de mesures représentatives et d'analyses rigoureuses pour estimer la ressource exploitable. À cet effet, le CDER a mis en place un atlas éolien national, continuellement actualisé à partir des données recueillies sur différents sites d'observation.

Les estimations montrent qu'à une hauteur de 80 m, la vitesse moyenne du vent atteint fréquemment entre 7 et 8 m/s dans plusieurs régions méridionales, telles que Tindouf, Adrar et In Salah. Lorsqu'un site présente une densité de puissance supérieure à 300 W/m² à 50 m de hauteur, il est considéré comme économiquement favorable pour l'installation d'un parc éolien. De nombreuses zones en Algérie répondent à ce critère, ce qui confirme que la filière éolienne représente une option stratégique pour la diversification du mix énergétique national [25].

2.3. Potentiel de la biomasse

La biomasse constitue une ressource renouvelable importante, issue principalement des résidus agricoles, des déchets solides ménagers, des boues issues des stations d'épuration, ou encore des sous-produits industriels. Elle peut être exploitée à travers différents procédés de conversion — thermique, thermochimique, chimique ou biochimique. En Algérie, le potentiel bioénergétique est estimé à plus de 500 000 tonnes équivalent pétrole (Tep) [26].

Une étude a montré qu'à travers la valorisation énergétique des déchets ménagers et assimilés, il serait possible de produire plus de 1900 GWh d'électricité par an. Ce volume correspond à la consommation annuelle d'environ un million et demi de citoyens, étant donné que la consommation moyenne par habitant est estimée à 1236 kWh/an [27]. La valorisation énergétique des déchets présente également un double avantage: elle permet de réduire le volume des déchets ultimes et, par conséquent, les impacts environnementaux et sanitaires liés à leur stockage [26].

2.4. Potentiel de la géothermie

L'Algérie dispose de plus de 240 sources thermales réparties sur son territoire, traduisant un potentiel géothermique important. Les études menées à partir des données issues de forages pétroliers (BHT, DST, diagraphies) ont permis de cartographier le gradient géothermique, la conductivité thermique et le flux de chaleur.

Le gradient géothermique est estimé à environ 45 °C/km, en moyenne, mais il peut localement atteindre jusqu'à 80 °C/km. La conductivité thermique des roches peut s'élever à 4 W/m.°C, tandis que le flux géothermique varie entre 90 et 100 mW/m² selon les régions. Certaines sources, comme celle de Hammam Debagh (anciennement Hammam Meskhoutine), comptent parmi les plus chaudes au monde, avec des températures avoisinant 98 °C [28]. Ces caractéristiques confirment que la géothermie représente une option énergétique viable pour la fourniture de chaleur et, dans certains contextes favorables, pour la production d'électricité.

2.5. Potentiel hydraulique

L'énergie hydraulique demeure l'une des premières sources renouvelables exploitées dans le monde, grâce à sa souplesse d'utilisation et ses avantages économiques et environnementaux. En Algérie, les précipitations annuelles sont estimées à environ 65 milliards de m³, mais la forte variabilité climatique, la concentration géographique des pluies et les pertes par évaporation limitent l'exploitation de cette ressource.

Les ressources en eau renouvelables sont estimées à près de 25 milliards de m³, dont les deux tiers proviennent des eaux de surface. Le pays compte aujourd'hui plus de 50 barrages en exploitation sur un total de 103 sites recensés, constituant ainsi une base pour la production hydroélectrique et la gestion de l'eau [29].

3. Transition énergétique en Algérie

L'Algérie s'est engagée depuis une décennie dans une stratégie nationale de diversification énergétique, centrée sur le développement des énergies renouvelables et la promotion de l'efficacité énergétique. Cette orientation découle de la nécessité de réduire la dépendance excessive aux énergies fossiles, de répondre à la croissance rapide de la demande intérieure et de contribuer aux engagements climatiques internationaux.

Le programme actualisé des énergies renouvelables prévoit l'installation d'une capacité de 22 000 MW d'ici 2030, destinée principalement au marché national, avec la possibilité d'en exporter une partie si les conditions économiques et techniques le permettent. En parallèle, le plan d'efficacité énergétique vise une économie cumulée d'environ 63 millions de tonnes équivalent pétrole (Tep) à l'horizon 2030, grâce à l'introduction de nouvelles pratiques dans les domaines du bâtiment, du transport ainsi que de l'industrie. Ces actions devraient permettre la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), estimée à 193 millions de tonnes [30].

Afin de soutenir cette transition, plusieurs réformes réglementaires et incitations économiques ont été adoptées. Le cadre juridique repose sur une série de lois, décrets et arrêtés ministériels visant à encourager l'investissement national et étranger, notamment à travers les tarifs d'achat garantis pour les filières photovoltaïque et éolienne, valables sur 20 ans [31]. Des mécanismes d'exonérations fiscales et douanières ont également été introduits dans le but d'alléger les charges associées aux importations de composants et de favoriser le développement d'une industrie locale des équipements renouvelables.

Le premier Programme National de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PNEREE), élaboré en 2011, avait pour ambition d'atteindre une capacité installée en énergies renouvelables de 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW destinés à l'exportation [32]. Cette stratégie reposait essentiellement sur le développement des filières solaire photovoltaïque, solaire thermique à concentration et éolienne. Toutefois, la mise en œuvre concrète de ces projets a subi d'importants retards. Ainsi, les projets pilotes initialement prévus pour totaliser 110 MW n'ont conduit qu'à la réalisation effective de trois installations: une centrale hybride combinant gaz et énergie solaire à Hassi R'mel (25 MW), une centrale photovoltaïque implantée à Ghardaïa (1,1 MW) et une centrale éolienne située à Kabertène (10,2 MW).

Par la suite, une série de centrales photovoltaïques totalisant 343 MW a été lancée en 2014, réparties sur plusieurs régions, notamment les Hauts-Plateaux et le Sud. Malgré ces avancées, la réalisation des objectifs globaux est restée en deçà des ambitions initiales. En effet, le projet majeur de 4050 MWc lancé par le Ministère de l'Énergie en 2017, qui devait intégrer un volet industriel et s'appuyer sur un appel d'offres international, n'a pas connu de concrétisation [30].

Face à ces difficultés, des appels d'offres de moindre envergure ont été lancés. En 2018, la CREG a initié un appel d'offres de 150 MWc, ciblant exclusivement les entreprises algériennes, mais seules 50 MWc ont finalement été attribués, dont la majorité dans la région de Biskra. La même année, SKTM, filiale de Sonelgaz, a lancé un autre appel d'offres de 50 MWc destiné à hybrider ses centrales du Sud avec du photovoltaïque. Bien que les contrats aient été attribués, la mise en œuvre a été lente et les coûts d'investissement observés demeuraient supérieurs de plus de 30 % aux moyennes internationales pour des projets de taille comparable, en raison des contraintes logistiques, climatiques et des exigences d'intégration locale [25].

En parallèle, un important programme national d'efficacité énergétique a été défini, ciblant les principaux secteurs de consommation. Dans le bâtiment, les priorités portent sur l'isolation thermique des logements, la généralisation des chauffe-eaux solaires et des lampes basse consommation, avec un potentiel d'économie de plus de 30 millions de Tep d'ici 2030. Dans le transport, l'introduction massive du GPLc et du GNc pourrait réduire de plus de 16 millions de Tep la consommation de carburants fossiles. Enfin, dans l'industrie, des audits énergétiques et des actions correctives devraient permettre une économie équivalente à 30 millions de Tep [30].

En résumé, l'Algérie s'est dotée d'un cadre stratégique ambitieux pour accompagner sa transition énergétique, bien que sa concrétisation demeure freinée par des obstacles institutionnels, financiers et techniques. Cependant, la synergie entre les différentes sources renouvelables — solaire, éolienne, biomasse, géothermique et hydroélectrique — combinée à des programmes d'efficacité énergétique, représente une voie privilégiée pour réduire la dépendance au gaz naturel, consolider la sécurité énergétique nationale et participer activement à l'atténuation du changement climatique.

4. Cadre réglementaire et juridique

La concrétisation du programme de transition énergétique s'appuie sur un dispositif juridique et réglementaire complet, conçu pour encourager l'investissement et encadrer le développement des projets liés aux énergies renouvelables. Plusieurs textes législatifs et réglementaires en forment l'ossature.

La loi de finances complémentaire de 2011 (loi n° 11-11 du 18 juillet 2011) a renforcé le Fonds national pour les énergies renouvelables et la cogénération (FNER), alimenté par une redevance pétrolière portée de 0,5 % à 1 %. Des décrets exécutifs, adoptés entre 2011 et 2013, ont précisé les modalités de fonctionnement de ce fonds ainsi que les conditions d'octroi de primes pour soutenir la diversification de la production électrique.

Par ailleurs, des arrêtés ministériels publiés en 2014 ont fixé les tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite à partir de filières photovoltaïque et éolienne. Ces tarifs, garantis sur une période de 20 ans, visent à sécuriser les investissements et encourager la production décentralisée d'électricité renouvelable.

En complément, des mesures fiscales incitatives — telles que la réduction de la TVA et des droits de douane appliqués aux composants destinés aux équipements renouvelables — ont été instaurées pour renforcer l'industrie locale et favoriser la production nationale d'équipements solaires et éoliens [31].

Ce dispositif juridique et institutionnel traduit la volonté de l'État de créer un environnement propice à l'essor des énergies renouvelables, en associant acteurs publics et privés.

5. Programmes nationaux

5.1. Programme National de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PNEREE) de 2011

Le premier programme national spécifiquement consacré au développement des énergies renouvelables et à la promotion de l'efficacité énergétique a été adopté par le gouvernement algérien le 3 février 2011. Ce plan ambitieux visait à porter la part des énergies renouvelables à environ 40 % de la capacité nationale de production d'électricité d'ici 2030. Les projections, établies par le Ministère de l'Énergie et des Mines, tablaient sur une consommation annuelle totale de l'ordre de 150 TWh. L'objectif quantifié consistait à installer près de 22000 MW de capacités renouvelables, dont 10000 MW destinés à l'exportation [32].

5.2. Énergies renouvelables du PNEREE

La planification initiale pour les 12000 MW destinés au marché intérieur reposait sur trois filières majeures: le solaire thermique à concentration, le photovoltaïque et l'éolien. La feuille de route prévoyait quatre étapes successives: une phase pilote (2011-2013), un début de déploiement (2014-2015), une montée en puissance avec au moins 4600 MW installés à l'horizon 2020, puis une généralisation à grande échelle entre 2021 et 2030 pour atteindre les 22000 MW prévus. Il est à noter que la capacité du parc conventionnel, prévue initialement à 20000 MW en 2028, avait déjà été franchie en 2019, ce qui a rendu les projections initiales rapidement obsolètes [25].

5.3. Réalisations dans le cadre du PNEREE de 2011

Le calendrier initial n'a pas été respecté. Dès la phase pilote, seuls trois projets sur les 110 MW annoncés ont été concrétisés, pour une puissance totale de 36,3 MW. Ces réalisations incluent:

- la centrale hybride gaz-solaire thermique de Hassi R'Mel (25 MWc de solaire thermique à concentration, mise en service en 2011) [30],
- la centrale photovoltaïque de Ghardaïa (1,1 MWc intégrant quatre technologies PV, opérationnelle en 2014),

- et la centrale éolienne de Kabertène à Adrar (10,2 MWc composée de 12 aérogénérateurs, mise en service en 2014).

En dehors de ces projets limités, un programme de 343 MWc en photovoltaïque a été confié à SKTM (filiale de Sonelgaz créée en 2013), principalement pour alimenter les réseaux isolés du Sud. Ce programme a permis la mise en service de plusieurs centrales photovoltaïques implantées dans différentes régions des Hauts Plateaux et du Sud de l'Algérie, pour atteindre une capacité totale installée de 343 MWc [25,30].

5.4. Programme national d'efficacité énergétique

En parallèle, l'Algérie a mis en place un programme national d'efficacité énergétique, visant à promouvoir un usage plus rationnel des ressources et à réduire la consommation sans affecter le niveau de confort ni les performances industrielles. L'objectif est de produire les mêmes biens et services avec une consommation d'énergie moindre, grâce à des équipements performants, des comportements adaptés et des innovations technologiques.

Ce programme couvre les secteurs du bâtiment, des transports et de l'industrie, et encourage la création d'une industrie nationale spécialisée dans les équipements performants (lampes basse consommation, chauffe-eaux solaires, isolants thermiques). Les gains attendus sont significatifs: environ 63 millions de Tep à l'horizon 2030 et près de 93 millions de Tep au total au-delà de cette échéance.

5.5. Plan d'action en matière d'efficacité énergétique

Le plan d'action décliné à partir de ce programme repose sur trois axes principaux:

- Bâtiment: développement de l'isolation thermique, diffusion massive des chauffe-eaux solaires et des lampes économiques, ainsi que structuration d'une industrie locale pour ces équipements. Les économies attendues dépassent 30 millions de Tep d'ici 2030.
- Transports: promotion des carburants alternatifs comme le GPLc et le GNc, afin de réduire l'usage du gasoil et de limiter les émissions polluantes. Le gain cumulé visé atteint plus de 16 millions de Tep à l'horizon 2030.

- Industrie: amélioration des procédés et généralisation des audits énergétiques pour identifier et exploiter les gisements d'économie. Les économies prévues dépassent 30 millions de Tep.

Ce plan devrait contribuer à stabiliser la demande énergétique, améliorer le cadre de vie et générer des retombées positives en matière de création d'emplois, de richesse et de préservation de l'environnement [30].

5.6. Projet solaire de 4050 MWc du Ministère de l'Énergie

Afin de corriger les retards observés, un nouveau programme de 4050 MWc en solaire photovoltaïque a été lancé en 2017, reposant sur un dispositif d'appels d'offres compétitifs instauré par le décret exécutif n° 17-98 du 26 février 2017. Ce projet, structuré en trois lots de 1350 MWc chacun et assorti d'un volet industriel, n'a toutefois pas connu de concrétisation, faute d'investisseurs engagés.

5.7. Appel d'offres de 150 MWc de la CREG

Dans la continuité, la CREG a lancé en 2018 un appel d'offres plus modeste portant sur 150 MWc de solaire photovoltaïque, répartis en 15 centrales de 10 MWc chacune. Localisés dans les wilayas de Biskra, Ghardaïa, Ouargla et El Oued, ces projets étaient exclusivement réservés aux entreprises de droit algérien. Au final, seuls 50 MWc ont été attribués, correspondant à cinq centrales de 10 MWc dans la région de Biskra, avec un prix de cession fixé à 8,28 DA/kWh.

5.8. Appel d'offres de 50 MWc de SKTM/Sonelgaz

Simultanément, SKTM a lancé en 2018 un appel d'offres pour 50 MWc de solaire photovoltaïque destinés à l'hybridation des réseaux isolés du Sud (RIS). Neuf sites ont été sélectionnés dans les wilayas du Sud, regroupés en cinq lots. Les contrats EPC ont été signés en août 2019. Le coût d'investissement moyen, estimé à environ 1365 €/kWc, reste supérieur de 30 % aux standards internationaux. Cette différence s'explique par l'éloignement des sites, les conditions climatiques extrêmes et l'intégration de systèmes hybrides spécifiques (diesel-solaire ou gaz-solaire), ainsi que par la volonté d'encourager l'intégration d'équipements fabriqués localement [25].

6. Conclusion

En définitive, l'analyse du bilan énergétique national révèle une structure encore largement dominée par les énergies fossiles, en particulier le gaz naturel et le pétrole, qui assurent la quasi-totalité de la production et de la consommation énergétiques. Cette dépendance, conjuguée à une croissance continue de la demande intérieure, constitue un défi majeur pour la sécurité énergétique du pays.

Parallèlement, l'Algérie bénéficie d'un important potentiel en ressources renouvelables, allant du solaire — parmi les plus abondants au monde — à l'éolien prometteur dans plusieurs régions du Sud, en passant par la biomasse, la géothermie et l'hydroélectricité. Ces ressources constituent de réelles opportunités pour diversifier le mix énergétique et réduire la dépendance du pays vis-à-vis des ressources fossiles.

La stratégie nationale de transition énergétique, traduite notamment à travers le PNEREE et les programmes d'amélioration de l'efficacité énergétique, fixe des objectifs ambitieux à l'horizon 2030. Toutefois, les retards enregistrés dans la concrétisation des projets, ainsi que les contraintes financières, institutionnelles et techniques, continuent de freiner la réalisation effective de ces ambitions.

Ainsi, ce premier chapitre met en évidence la dualité du système énergétique algérien: d'un côté, une dépendance persistante aux hydrocarbures, et de l'autre, un potentiel renouvelable considérable mais encore sous-exploité. Cette situation justifie la nécessité d'approfondir l'étude des filières renouvelables et des cadres technico-économiques associés, ce qui constituera l'objet des chapitres suivants.

Exploitation de l'Energie Géothermale ; Etat de l'Art

1. Introduction

Les énergies renouvelables offrent aujourd'hui une grande variété de solutions répondant aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Dans ce contexte, la géothermie se distingue par sa disponibilité permanente et sa capacité à fournir de la chaleur quelle que soit la variabilité climatique. Issue du flux thermique naturel de la Terre, elle peut être exploitée aussi bien pour la génération d'électricité que pour des applications directes telles que le chauffage, la climatisation ou encore divers procédés industriels. Sa stabilité et son caractère durable font de cette ressource un levier stratégique, notamment dans les régions disposant de nappes profondes ou de réservoirs aquifères. L'analyse de l'état de l'art permet ainsi de mettre en évidence les avancées technologiques récentes, les différents modes d'exploitation et les perspectives de développement offertes par cette ressource dans le cadre de la transition énergétique mondiale.

La problématique énergétique mondiale se définit aujourd'hui par une double contrainte: d'une part, une augmentation soutenue et continue de la demande en énergie, et d'autre part, la nécessité impérieuse de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette conjonction de facteurs impose le développement et la mise en œuvre de solutions énergétiques durables, à faible impact environnemental et respectueuses des équilibres écologiques. Dans ce contexte, les systèmes éco-énergétiques innovants se présentent comme des alternatives sérieuses aux technologies conventionnelles, souvent plus énergivores. Leur principal intérêt réside non seulement dans l'optimisation de la consommation énergétique et la diminution des coûts d'exploitation, mais aussi dans la réduction significative des effets négatifs sur l'environnement.

Ces systèmes exploitent diverses ressources renouvelables disponibles localement, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, la biomasse, et plus particulièrement la géothermie. Cette dernière présente un atout déterminant: elle permet une fourniture de chaleur stable et continue, indépendamment des aléas climatiques et des fluctuations saisonnières. Grâce à cette constance, la géothermie s'impose comme une source d'énergie fiable et pérenne, pouvant être mobilisée aussi bien pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments que, dans certains contextes, pour la production d'électricité.

L'exploitation de cette ressource repose sur plusieurs approches technologiques, parmi lesquelles les forages géothermiques profonds, les échangeurs air-eau ou sol-eau enterrés, les pompes à chaleur géothermiques, ainsi que des systèmes hybrides associant d'autres sources renouvelables. Ces dispositifs permettent de valoriser la chaleur issue soit des couches superficielles du sol, soit des réservoirs profonds.

Le présent chapitre est consacré à l'étude de l'état de l'art de la géothermie. Il se structure autour des points suivants:

- caractérisation des différents types de ressources géothermales et de leurs propriétés thermodynamiques;
- présentation des techniques d'extraction et de conversion;
- analyse des avantages et limites de la géothermie selon le contexte géologique et climatique;
- illustration par des exemples d'applications réussies dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel.

Cette analyse permettra de positionner la géothermie comme un levier essentiel de la transition énergétique, en mettant en évidence sa contribution à la diminution des émissions de carbone et à la promotion d'un modèle de développement durable.

2. La géothermie

La géothermie constitue une énergie renouvelable issue de la chaleur emmagasinée dans les couches profondes de la Terre. À la différence d'autres sources d'énergie, elle reste indépendante des conditions météorologiques et des variations climatiques. Cette énergie naturelle se manifeste sous diverses formes telles que les volcans, les geysers, les fumerolles, les sources chaudes ou encore les mares de boue en ébullition.

On distingue généralement deux grandes catégories de géothermie:

- la haute enthalpie, caractérisée par des températures élevées, utilisée principalement pour la production d'électricité;
- la basse enthalpie, subdivisée en deux sous-types: la très basse énergie, correspondant à des températures inférieures à 30 °C et la basse énergie, exploitant une chaleur comprise entre 30 °C et 100 °C (Figure 1).

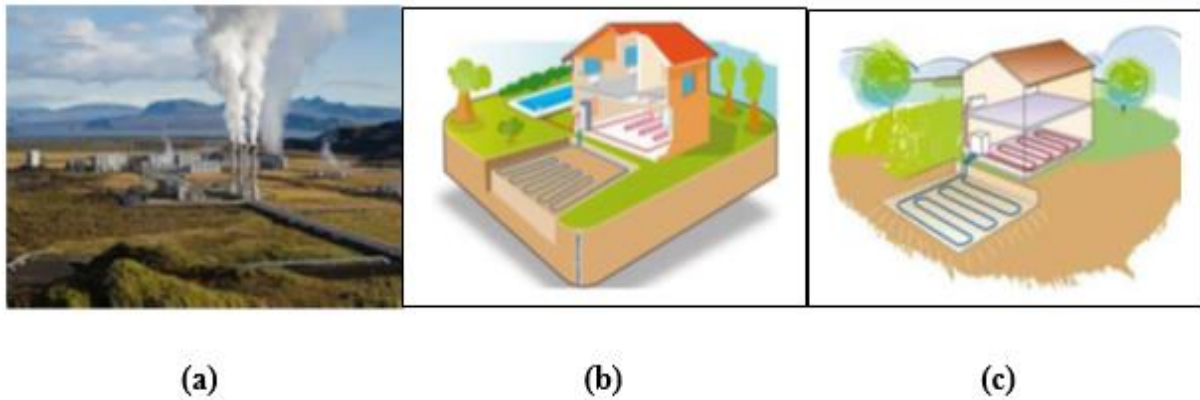


Figure.1: Géothermie: a) haute énergie; b) basse énergie; c) très basse énergie [33].

2.1. Applications

L'énergie géothermique trouve aujourd'hui des applications variées, qui dépendent à la fois des caractéristiques du fluide (température, débit, composition) et des technologies mises en œuvre pour sa valorisation. Dans le secteur du bâtiment, elle est utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage, la climatisation et même la fabrication de certains matériaux de construction. Son développement est particulièrement marqué dans les pays disposant de ressources abondantes et situées à proximité de zones densément urbanisées, tels que la Hongrie, la France, la Russie, la Chine, les États-Unis ou encore l'Islande, où près de 99 % des habitations de Reykjavik étaient déjà alimentées par la géothermie dès 1975.

L'essor de l'utilisation industrielle de cette ressource remonte à l'après Seconde Guerre mondiale. Avant cette période, son usage restait limité, notamment à l'industrie du borax en Italie. La première exploitation industrielle significative a concerné la production de papier journal à Kavereau, sur l'île du Nord en Nouvelle-Zélande. Depuis, la chaleur géothermique est mise à profit dans de nombreuses branches industrielles: séchage de matériaux (carreaux de plâtre, bois, diatomites), durcissement de dalles en béton léger (Italie), blanchisseries et teintureries, conserveries, laiteries, séchage du café (Brésil), traitement de minerais, ou encore extraction du soufre (Japon et Taïwan) [34].

Un exemple typique de valorisation en cascade des ressources géothermiques est illustré à la figure 2.

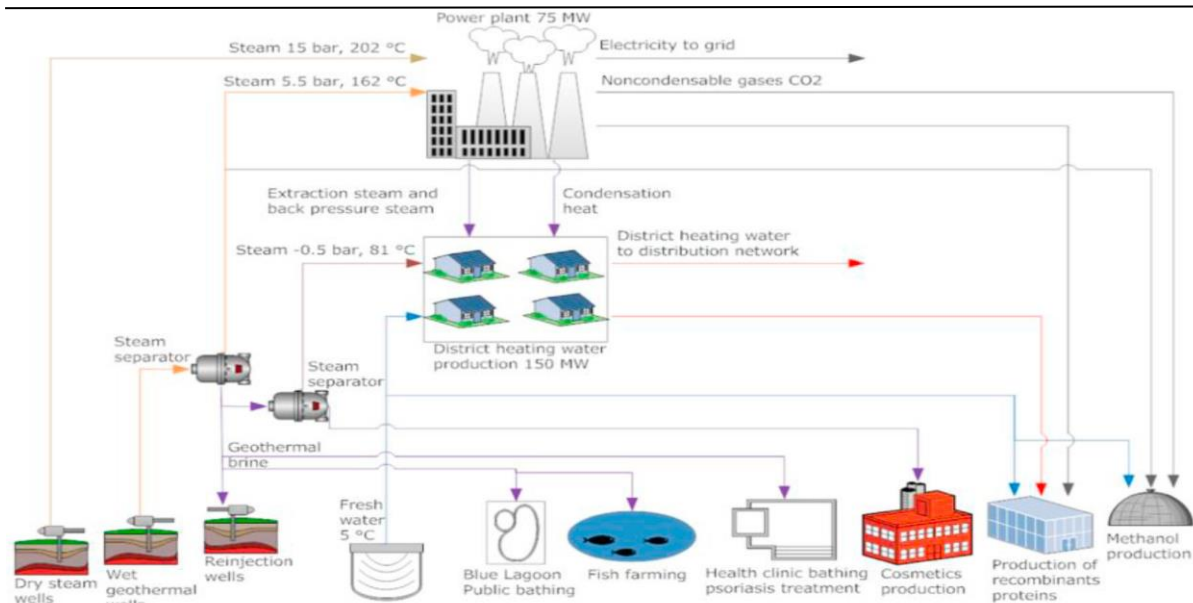


Figure.2: Exemple d'une cascade d'application des ressources géothermiques [35].

En Algérie, le potentiel géothermique est particulièrement important. Les études menées ont permis d'identifier plus de 200 sources chaudes, concentrées principalement dans les régions du Nord-Est et du Nord-Ouest, dont 37 sont classées comme hyperthermales ($T > 45\text{ °C}$). La plus chaude d'entre elles est la source de Hammam Meskhoutine, atteignant une température de 98 °C [34]. Au Sahara, le vaste réservoir gréseux de l'Albien s'étend sur une large portion du territoire national. Dans les zones désertiques du Nord-Est et de l'Ouest, les sources thermales sont plus limitées, et l'aquifère albien est surtout exploité par forage à des fins domestiques et agricoles. Les températures des eaux souterraines varient généralement entre 30 °C et 80 °C d'Ouest en Est [36].

Bien que plusieurs sources à températures élevées aient été identifiées dans la région de Biskra, plus de deux cents (200) sources thermales ont été recensées dans le nord du pays, présentant des températures relativement plus modérées. Ces sources sont exploitées principalement à des fins balnéo-thérapeutiques, tandis qu'une fraction limitée est utilisée pour le chauffage de serres agricoles [37].

Il existe également d'autres sources thermales à haute température pouvant atteindre jusqu'à 118 °C dans la région de Biskra [38]. Dans la zone étudiée, l'aquifère continental intercalaire se caractérise par un comportement artésien et représente la principale réserve d'eau souterraine du Sahara algérien (Figure 3). Cette nappe, de type libre, est surmontée par le complexe terminal, qui assure la continuité du système hydrogéologique [39].

En ce qui concerne la production énergétique, le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) a estimé le potentiel exploitable de la géothermie en Algérie à environ 700 MW, en prenant en compte le débit total des sources chaudes ainsi que celui de la nappe albiennne. Cependant, cette ressource demeure très peu valorisée et son utilisation reste marginale, aussi bien dans les secteurs agricoles qu'industriels [40].

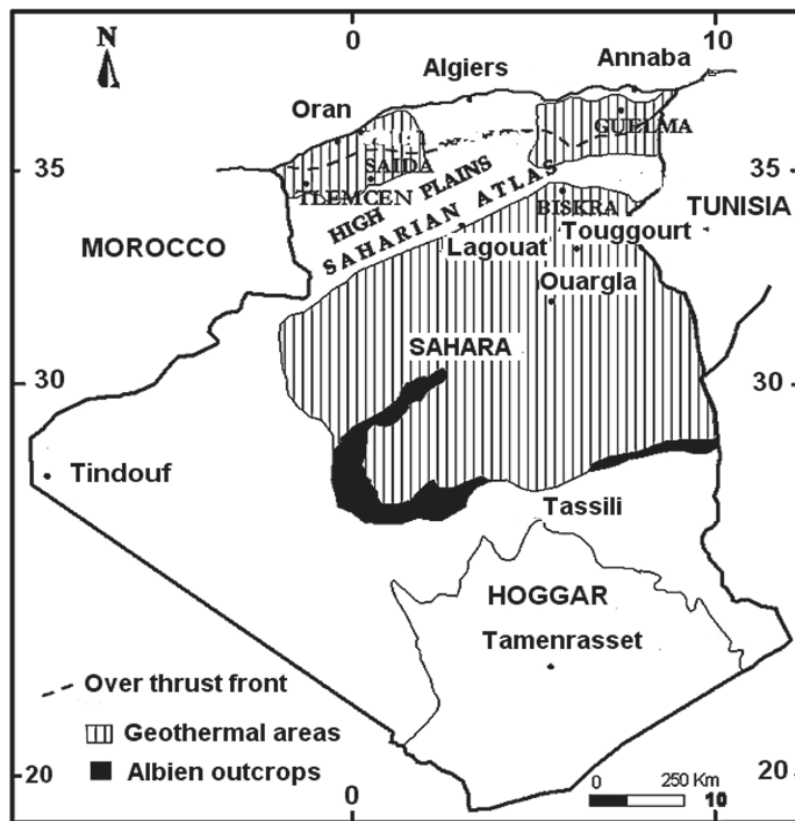


Figure.3: Principales zones géothermiques en Algérie [41].

Les eaux chaudes issues des forages, des sources thermales et des stations géothermiques de la nappe albiennne représentent l'un des potentiels géothermiques les plus importants de la région de Biskra (Sud-Est de l'Algérie). Malgré cette richesse, elles demeurent faiblement exploitées. L'utilisation d'un échangeur thermique immergé dans un réservoir, permettant de faire circuler l'air ambiant à travers ce dispositif pour assurer le chauffage des habitations, constitue une approche technologique innovante visant à valoriser une ressource énergétique durable, propre et économiquement avantageuse.

Les principales applications de l'eau géothermique en Algérie concernent le chauffage domestique, le thermalisme et l'agriculture. Plusieurs projets pilotes ont été engagés pour exploiter la géothermie dans des usages directs, notamment pour le chauffage des habitations, des serres agricoles et l'aquaculture. Dans la zone géothermique orientale, un projet de centrale pilote est prévu à Hammam Debagh (Wilaya de Guelma). De plus, une expérience

réussie de pisciculture menée dans la région saharienne (Ouargla et Touggourt) illustre le potentiel de la géothermie à 60 °C pour des applications productives. Par ailleurs, dix-huit serres, d'une superficie totale d'environ 7 200 m², sont actuellement chauffées par des eaux géothermiques sahariennes à 57 °C. La température de la source, combinée à un débit d'environ 1 L/s, permet de maintenir une température intérieure minimale de 12 °C dans chaque serre. Les études ont également mis en évidence un potentiel géothermique considérable dans les zones sahariennes, estimé suffisant pour chauffer près de 9 000 serres, avec une consommation énergétique totale avoisinant 1 778,65 TJ/an [42].

Récemment, les fermes piscicoles du Sahara algérien utilisent l'eau géothermique de l'Albien pour produire plus de 1500 tonnes/an de Tilapia (Figure 4) [43].

Un autre petit projet a également été initié dans l'eau géothermique de Hammam Sidi Issa (46°C) en exploitant une pompe à chaleur réversible, utilisée pour chauffer et rafraîchir douze salles de classe, une bibliothèque et une cantine d'école primaire [37].



Figure.4: Ferme d'aquaculture de Hassi Ben Abdullah à Ouargla [43].

En Algérie, une part importante de la consommation d'électricité est consacrée aux besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments résidentiels et tertiaires. Par conséquent, les technologies de climatisation occupent une place prépondérante, et l'amélioration de leur efficacité énergétique constitue un enjeu majeur pour répondre aux exigences croissantes de confort [44,45].

Même si la climatisation représente un coût élevé, aussi bien dans les climats froids que chauds, elle demeure indispensable. Ainsi, la réduction des charges thermiques, notamment de chauffage, par l'exploitation de l'énergie géothermique se justifie pleinement.

Il est donc nécessaire que la géographie d'utilisation de ces technologies soit clairement définie et qu'une évaluation de leurs performances soit réalisée, en identifiant les plus efficaces selon les zones climatiques et géographiques du pays.

Selon le Bilan énergétique national 2023 publié par le Ministère de l'Énergie et des Mines et des Énergies Renouvelables (Édition 2024), la consommation finale d'énergie a atteint 54,2 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), enregistrant une hausse globale de 2,1 % par rapport à 2022. La répartition sectorielle montre une structure toujours dominée par le secteur des "Ménages et autres" (46 %), suivi par le transport (30 %), puis l'industrie et le BTP (25 %), (Figure 5).

Entre 2022 et 2023, les évolutions suivantes ont été observées:

- Une baisse de 1,9 % de la demande du secteur Ménages et autres, passant de 25,2 Mtep à 24,7 Mtep, principalement due au repli du sous-secteur résidentiel (-3 %);
- Une hausse de 5,1 % de la consommation du secteur des transports, atteignant 16,1 Mtep, tirée essentiellement par les carburants routiers;
- Une augmentation de 6,3 % dans le secteur Industrie et BTP, avec 13,4 Mtep, en lien avec la reprise de l'activité économique, notamment dans les sous-secteurs des matériaux de construction et des industries manufacturières.

Ainsi, malgré une légère contraction de la consommation résidentielle, le secteur du bâtiment demeure le principal consommateur d'électricité, représentant près de la moitié de la consommation finale nationale. Dans les habitations, l'énergie utilisée pour les systèmes de ventilation et de climatisation dépasse souvent 50 % des besoins électriques. En raison de leur efficacité et de leur faible impact environnemental, les systèmes d'échangeurs thermiques air-sol et air-eau constituent une solution prometteuse pour réduire cette dépendance [46].

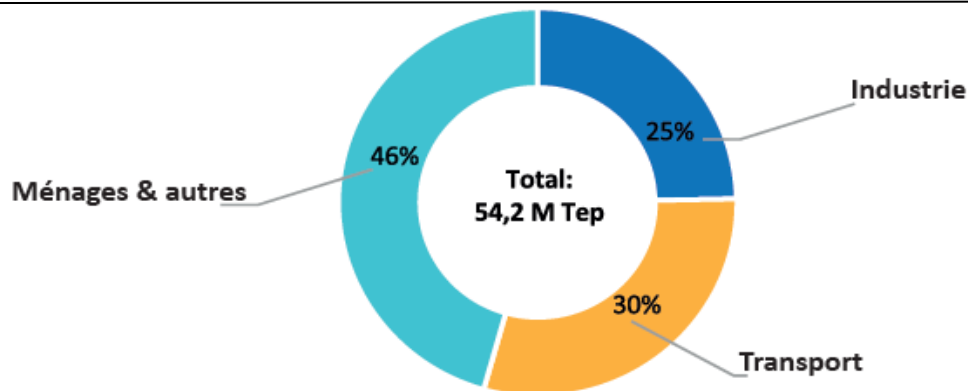


Figure.5: Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité [46].

2.2. Avantages et inconvénients de la géothermie

2.2.1. Avantages

Les avantages de l'utilisation des techniques de la géothermie sont énormes en termes de performance énergétique et d'impact écologique:

- Performance énergétique: les coefficients de performance peuvent atteindre des valeurs entre 10 et 20 (entre 2 à 4 pour des climatisations classiques);
- Maintenance restreinte;
- coût de maintenance: très faible par rapport à une climatisation classique;
- intégration possible avec d'autres systèmes de climatisation;
- coût énergétique: très faible par rapport à une climatisation classique;
- capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables;
- énergie de base, indépendant des conditions climatiques (fonctionne 24h/24, 365j/an);
- économies d'énergie: très faible consommation électrique, uniquement le ventilateur;
- écologie: aucun impact écologique, (pas de déchet, émissions gazeuses très réduites);
- ressource énergétique renouvelable locale préservant l'environnement et qui ne nécessite pas de transport (de risques de pollution).

2.2.2. Inconvénients

L'inconvénient de l'exploitation de l'énergie géothermique réside dans son installation:

- ressource naturelle du sous-sol dont l'extraction nécessite la réalisation de forages;
- coût d'investissement important comparé aux autres énergies renouvelables (travaux d'exploration, réalisation de forages);
- délai important dans la mise en valeur d'une ressource géothermique;
- comme le fluide utilisé est de l'air, la croissance de micro-organismes peut devenir l'un des inconvénients de l'utilisation d'un système de ventilation couplé à un échangeur WAHE. Cela provoque une diminution de la qualité de l'air. La condensation se produit dans les tubes. L'eau condensée doit être extraite régulièrement [47].

3. Etat de l'art

3.1. Les énergies renouvelables

Iguergazix D. [48] a analysé les perspectives de développement des énergies renouvelables en Algérie en s'appuyant sur trois axes principaux. Il a d'abord recensé les principales filières exploitables, à savoir le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie. Ensuite, il a évalué le potentiel de chaque ressource: un ensoleillement exceptionnel figurant parmi les plus élevés au monde (environ 2000 h/an), des zones propices à l'exploitation éolienne avec des vitesses moyennes de 7 à 9 m/s, plus de 200 sources thermales dont près du tiers présentent des températures supérieures à 45 °C (et atteignant jusqu'à 118 °C à Biskra), ainsi qu'un potentiel hydraulique reposant sur plus d'une centaine de barrages, dont une cinquantaine déjà en service, et une biomasse évaluée à environ 1,33 million de TEP/an. Enfin, l'auteur souligne que la stratégie nationale ambitionne la mise en place d'une filière industrielle intégrée des énergies renouvelables, visant à couvrir près de 27 % de la production électrique nationale à l'horizon 2030.

Harrouz et al. [49] se sont intéressés au potentiel solaire et éolien, en produisant des cartographies de sites favorables et une répartition géographique des centrales photovoltaïques et du parc éolien. Ils relèvent que les énergies renouvelables ne représentent encore qu'une part marginale du mix électrique national ($\approx 0,8$ %), principalement répartie

entre l'hydraulique (389 GWh), le photovoltaïque (11 GWh) et le solaire thermodynamique (58 GWh). Leur conclusion souligne la nécessité d'accélérer intelligemment la transition et d'optimiser la gestion des ressources renouvelables.

Zahraoui et al. [50], Hebri [38] et Bouraiou et al. [52] ont chacun examiné les programmes nationaux et les perspectives de la transition énergétique en Algérie. Ils rappellent que la dépendance du pays vis-à-vis des hydrocarbures demeure prépondérante ($\approx 99,5$ % du mix énergétique), tandis que la demande continue de croître à un rythme soutenu (≈ 7 % par an au cours de la dernière décennie). Pour y faire face, le Programme national de développement des énergies renouvelables (PNEREE), lancé en 2011 et actualisé en 2015 puis en 2019, a fixé un objectif de 22 GW à atteindre d'ici 2030, soit environ 27 % de la consommation nationale d'électricité. Les filières concernées incluent 13 575 MW de solaire, 2000 MW de CSP, 5010 MW d'éolien, 1 MW de bioélectricité et 15 MW de géothermie. En parallèle, le gouvernement a prévu le déploiement progressif de projets photovoltaïques totalisant 800 MWc à l'horizon 2020, puis environ 200 MWc supplémentaires par an entre 2021 et 2030. Ces auteurs soulignent le rôle prépondérant de l'énergie solaire, la nécessité de renforcer l'efficacité énergétique et d'instaurer des réformes structurelles capables de stimuler l'investissement privé tout en consolidant les compétences et les capacités techniques nationales [38,50,52].

Slimane et al. [51] ont examiné les facteurs influençant les investissements dans les énergies renouvelables en Algérie en s'appuyant sur l'approche de la valeur actuelle nette (VAN). Leur analyse révèle que la logique dominante relève davantage d'une orientation socio-économique que strictement financière, la viabilité des projets étant appréciée à travers leurs retombées sociales et environnementales plutôt qu'en fonction d'une rentabilité immédiate. Cette conclusion souligne le rôle déterminant des critères extra-financiers dans la prise de décision publique et met en avant la nécessité d'intégrer ces dimensions dans l'évaluation des futurs projets énergétiques.

3.2. La géothermie

La chaleur interne de la Terre constitue un réservoir inépuisable d'énergie thermique. Cette ressource, connue sous le nom d'énergie géothermique, a été exploitée depuis l'Antiquité à travers les sources chaudes, et elle est aujourd'hui valorisée sous deux formes principales : l'utilisation directe de la chaleur et la conversion en électricité. L'énergie géothermique est classée parmi les énergies renouvelables et présente l'avantage d'émettre très peu de CO₂. Dans le contexte des changements climatiques, son importance ne cesse de croître et elle est appelée à jouer un rôle central dans les approvisionnements énergétiques futurs. Par ailleurs, l'exploration et l'exploitation des ressources géothermiques sont devenues un domaine de recherche majeur, mobilisant des géologues, des scientifiques et un nombre croissant d'institutions publiques et privées [53].

L'utilisation de la chaleur géothermique remonte à près de 10 000 ans. Les civilisations méditerranéennes et étrusques ont été parmi les premières à exploiter les sources chaudes, la lave et les dépôts hydrothermaux pour des usages divers (outils, bains thermaux, extraction de minerais). Les Romains ont ensuite institutionnalisé le thermalisme à travers les bains publics. Plus tard, au XVIIIe siècle, la production d'acide borique à partir des fluides géothermiques est apparue, suivie au XIXe siècle par le forage de puits plus profonds (jusqu'à 300 m). Enfin, le début du XXe siècle marque l'émergence de la production d'électricité à partir des puits géothermiques [54].

En Algérie, l'importance de la géothermie a conduit plusieurs chercheurs à étudier ses potentialités.

- Fekraoui [55] a montré que les sources chaudes situées dans le Nord du pays génèrent environ 240 MWt, dont seulement 40 % sont valorisés dans dix stations thermales publiques. Outre le thermalisme, de nouveaux usages émergent : aquaculture géothermique, pompes à chaleur et production d'électricité.

- Benatallah et Nasri [56] ont étudié les sources géothermiques de la wilaya d'Adrar en développant une base de données SIG permettant une cartographie thématique des ressources. Ils concluent que la géothermie reste essentiellement limitée au thermalisme, bien qu'elle présente un potentiel pour le chauffage urbain, l'agriculture et la pisciculture.

- Lebbihiat et al. [57] ont dressé un état des lieux de la géothermie en Algérie, en analysant à la fois ses opportunités et ses contraintes. Ils soulignent que le pays dispose de

ressources de basse enthalpie relativement abondantes et qu'il occupe la première place en Afrique pour l'utilisation de la géothermie directe, avec une puissance installée de 54,64 MWt. L'essentiel de cette capacité est destiné au thermalisme (82 %), le reste étant réparti entre les pompes à chaleur, le chauffage et la pisciculture. Toutefois, le développement du secteur est demeuré quasi stagnant au cours des vingt dernières années. Ces auteurs ont également proposé un plan stratégique et un ensemble d'actions visant à relancer la dynamique de cette filière (Tableau 2.1).

- Ouali et al. [39,58] ont réalisé plusieurs travaux consacrés à la géothermie en Algérie. Dans le Sud, ils ont identifié deux principales zones géothermiques — situées respectivement à l'Est et à l'Ouest du Sahara — à partir de l'analyse des cartes représentant le gradient géothermique et le flux thermique. Ils préconisent l'exploitation de la géothermie de basse énergie, en particulier pour le chauffage des serres dans la partie nord du Sahara. Dans le Nord, leurs études ont porté sur les eaux thermales et sur l'aquifère albien, montrant que ces eaux présentent une minéralisation élevée (0,4–10 g/l) et un faciès dominé par les eaux sulfatées et chlorurées, convenant bien aux applications thermales et au chauffage direct.

- Saibi [36] a recensé plus de 240 sources thermales en Algérie, avec des températures allant de 50 °C (Sud) à 98 °C (Est). Il a estimé que près de 30 % des sources offrent une puissance exploitable de 642 MW.

- Benziada [41] a étudié les perspectives d'application de la géothermie, qui, au-delà du thermalisme et des serres, peut servir au chauffage et à la climatisation des bâtiments, au séchage des produits agricoles, à l'aquaculture et même au dessalement d'eau saumâtre.

- Ouali et al. [59] ont analysé l'exploitation de l'aquifère albien depuis 1960 et relevé plusieurs problèmes techniques : corrosion, mise à l'échelle des canalisations et remontée des nappes phréatiques. Des projets pilotes de chauffage de serres et d'aquaculture ont récemment été initiés.

- Enfin, Ouali [60] décrit le projet agricole de Touggourt (1983), où la chaleur géothermique des eaux profondes est utilisée pour le chauffage de serres modernes, l'irrigation et le contrôle automatisé du climat intérieur.

En résumé, les recherches menées montrent que la géothermie en Algérie demeure dominée par le thermalisme, mais qu'elle offre de nombreuses perspectives pour l'agriculture, la pisciculture, le chauffage et la production d'énergie, à condition d'intégrer des solutions technologiques et organisationnelles adaptées [57].

Tableau.1: Historique du développement de la géothermie en Algérie [57]

Année	Remarques
Avant 1962	Les sources géothermiques n'étaient utilisées que pour se baigner et nager dans les anciennes piscines romaines.
1967	Un programme d'exploration géothermique a été lancé par la société nationale 'SONATRACH'.
1978-1979	-La première prospection géophysique dans le Nord-est du pays. -Le premier puits géothermique a été foré dans la région de Guelma.
1980-1982	-Un programme d'exploration géothermique a été mené en se concentrant sur la zone Est du Constantinois. -La société nationale Sonelgaz a réalisé des études d'identification géothermique dans les régions de l'Est et du Nord du pays. -Un inventaire de plus de 200 sources chaudes a été recensées en Algérie.
1983	Les travaux relatifs à la valorisation des ressources géothermiques ont été poursuivis sous la coordination du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), et le programme a ensuite été élargi pour couvrir l'ensemble des régions septentrionales du pays.
1992	Première installation de chauffage de serre pour 18 serres d'une superficie totale de 7200 m ² utilisant l'eau géothermique de l'Albien dans les régions de Ouargla et Tougourt.
1995	Inventaire actualisé avec plus de 240 sources thermales identifiées dans le pays.
2005	-Une enquête a été menée sur les 240 sources chaudes enregistrées et toutes ont été identifiées comme des ressources à faible enthalpie avec une température maximale du réservoir de 120°C. -Le chauffage géothermique des locaux a été installé pour la première fois à Hammam Bouhnifia et Hammam Meskhoutine.
2008	Les premières fermes piscicoles ont été installées dans les localités de Saïda, Ouargla et Ghardaïa.
2010	-Le premier système de pompe à chaleur géothermique résidentielle a été installé dans une école primaire de la ville de Saïda. -Démarrage de l'installation de la première centrale électrique à cycle binaire dans la région de Guelma.
2015	Le premier système de climatisation a été installé en Algérie.
2018	L'inventaire mis à jour a identifié plus de 282 sources chaudes dans le pays.

3.3. Études numériques

Florides et Kalogirou [61] ont décrit différents types d'échangeurs de chaleur sol-air souterrains permettant d'exploiter la capacité calorifique du sol, généralement couplés à des pompes à chaleur pour accroître leur efficacité. Ils ont montré que, quelle que soit la saison, la température du sol à une profondeur suffisante est plus stable et favorable que celle de l'air extérieur : plus élevée en hiver et plus basse en été. Cette différence peut être utilisée pour assurer le préchauffage en hiver et le pré-refroidissement en été. L'efficacité des échangeurs augmente avec la longueur et la profondeur d'enfouissement du tuyau, tandis qu'elle diminue avec le diamètre du conduit et avec une vitesse d'air trop élevée.

Rees et al. [62] ont étudié les transferts de chaleur au sol et leur impact sur les structures en contact direct avec celui-ci. Ils ont détaillé les mécanismes fondamentaux de transfert thermique, les méthodes d'estimation des propriétés thermiques et hydrauliques des sols, ainsi que les approches analytiques et numériques pour traiter le couplage chaleur-humidité. Leur étude a notamment mis en évidence l'influence déterminante de la teneur en eau du sol sur sa conductivité thermique.

Dehina et al. [63] ont proposé un échangeur coaxial terre/eau/air horizontal (EWAHE), dans lequel de l'eau chaude circule au centre du dispositif. Après modélisation sous MATLAB et validation par un modèle CFD tridimensionnel, une étude paramétrique a permis d'évaluer l'effet des rapports de diamètres, de la conductivité du tube et des débits air/eau. Une simulation sous Trnsys pour le Sud-Est algérien a confirmé l'intérêt de ce système pour le refroidissement de l'eau chaude potable et le préchauffage de l'air des bâtiments.

Ghezloun et al. [64] ont présenté la stratégie énergétique algérienne, orientée vers le développement durable et les énergies renouvelables. Le programme national adopté prévoit qu'à l'horizon 2030, 40 % de la production électrique soit assurée par les énergies renouvelables.

Benazza et al. [65] ont réalisé une simulation numérique quasi-3D d'un échangeur géothermique horizontal pour la climatisation. Ils ont montré que le fonctionnement continu provoque une saturation thermique du sol, réduisant progressivement le flux de chaleur. L'augmentation du nombre de couches améliore linéairement l'efficacité, tandis que la profondeur et l'espacement inter-couches ont un effet limité. Pour les sols peu conducteurs, un couplage à une pompe à chaleur s'avère nécessaire.

Benhammou et Draoui [66] ont simulé un échangeur géothermique à air dans les conditions climatiques du Sud algérien. Ils ont observé que la profondeur, la longueur et la vitesse de l'air influencent fortement la performance, avec l'existence d'un diamètre de tube optimal assurant la meilleure efficacité énergétique.

Hasan et al. [67] se sont intéressés aux échangeurs à micro-canaux (MCHE). Leurs travaux ont montré qu'un accroissement du nombre de canaux améliore simultanément les performances thermiques, tout en entraînant une augmentation des pertes de charge. Les

auteurs précisent également que les configurations circulaires se distinguent par leurs meilleures performances, tant sur le plan hydraulique que thermique.

Rouag et al. [68] ont examiné la faisabilité de systèmes de refroidissement de l'air utilisant l'adsorption solaire dans la région de Biskra, en envisageant le remplacement de la tour de refroidissement sèche (DCT) par un échangeur géothermique terre-eau (EWHE). Leur modèle semi-analytique, fondé sur les fonctions de Bessel, a permis de prévoir les performances thermiques d'un échangeur air/sol (EAHE) fonctionnant en régime transitoire. Les résultats ont révélé que la saturation thermique du sol provoque une diminution progressive de l'efficacité du système, mais que dans un climat chaud et aride, cette dégradation s'opère de manière plus lente.

Dans une seconde contribution, Mehdid et al. [69] ont proposé un modèle semi-analytique amélioré (GRBM) pour prévoir les performances des EAHE en mode transitoire. Validé expérimentalement à Biskra, ce modèle a confirmé la pertinence de cette approche pour simuler l'évolution thermique du système.

Webb et Eckert [70] ont analysé l'impact de la rugosité des surfaces internes des tubes d'échangeurs de chaleur. Ils ont montré que des tubes rugueux offrent une meilleure capacité de transfert thermique par rapport à des tubes lisses, et proposé des équations générales pour dimensionner ce type d'échangeurs.

Philippe et al. [71] ont comparé trois modèles analytiques (ILS, ICS et FLS) pour décrire le transfert de chaleur transitoire à proximité des forages de pompes à chaleur géothermiques. Ils ont identifié les domaines de validité de chaque modèle et souligné l'importance de bien évaluer la longueur de forage et la température du fluide circulant.

Bejan [72] a introduit un critère de performance basé sur le nombre d'unités de génération d'entropie (NS), permettant d'évaluer la qualité énergétique des échangeurs de chaleur en termes d'exergie perdue. Ce critère constitue une approche complémentaire aux méthodes classiques de dimensionnement.

Webb [73] a étendu les critères d'évaluation de performance (PEC) pour les échangeurs utilisant des surfaces de transfert améliorées. Il a proposé une méthodologie pour optimiser la géométrie des surfaces et les conditions de fonctionnement, applicable aussi bien aux écoulements monophasés qu'aux échangeurs diphasiques.

Enfin, Moummi et al. [74] ont mené un projet pilote à Biskra portant sur un puits canadien destiné au rafraîchissement passif. À travers la modélisation et l'expérimentation, ils ont montré l'influence des propriétés du sol, du matériau du conduit et de la localisation géographique sur la température de sortie de l'air, confirmant la pertinence de cette technique dans le contexte algérien.

3.4. Etudes expérimentales

Belloufi et al. [75] ont analysé de manière détaillée le processus de refroidissement de l'air par un échangeur air/sol enterré. Ils ont proposé un modèle analytique unidimensionnel permettant de suivre l'évolution de la température le long de l'échangeur. Ce modèle a été validé par des mesures expérimentales réalisées sur site durant le mois d'août 2013. Les résultats théoriques et expérimentaux ont montré une concordance satisfaisante. Les principaux enseignements de cette étude indiquent que:

- la profondeur d'enfouissement doit être suffisante pour exploiter efficacement la température du sol;
- un échangeur air/sol seul peut assurer un confort thermique estival tout en réduisant la consommation électrique liée à la climatisation;
- Pour maintenir la fraîcheur de l'air expulsé par un échangeur vertical, il est recommandé de renforcer l'isolation thermique du conduit ou d'ajouter un dispositif d'accélération du flux d'air, qu'il soit actif ou passif.

Mahmoudi et al. [76] ont étudié l'application de l'énergie géothermique pour le chauffage et la production d'eau douce dans une unité de dessalement d'eau saumâtre intégrée à une serre. Ils ont montré que ce système présente de multiples avantages, notamment l'accroissement de la productivité agricole dans les zones arides, la disponibilité de ressources hydriques additionnelles et la promotion d'une agriculture durable à forte valeur ajoutée, moins tributaire des variations climatiques. Les auteurs soulignent que le potentiel géothermique de l'Algérie offre une opportunité réelle pour l'alimentation de telles installations.

Boutiba [34] s'est intéressé à l'accélération du durcissement du béton frais par l'utilisation de la géothermie basse énergie comme source de chaleur de traitement. Les résultats expérimentaux révèlent qu'un traitement thermique entre 60 °C et 80 °C pendant 11 heures permet d'atteindre environ 75 % des résistances mécaniques obtenues après 28 jours

de cure normale, répondant ainsi aux exigences du développement durable dans le secteur du bâtiment.

Hadjadj [77] a mené une étude expérimentale sur un échangeur hélicoïdal de chaleur eau–air (HWAHE), placé dans un puits d'eau à une profondeur de 5 m, dans la région d'El-Oued. L'analyse a examiné l'influence de la vitesse de l'air, de la longueur de l'échangeur et de la température d'entrée. Un modèle analytique a ensuite permis de prédire l'évolution thermique de l'air, les résultats théoriques présentant une bonne concordance avec les données expérimentales.

Urcheguia et al. [78] ont comparé les performances de deux systèmes de pompes à chaleur: air-eau et eau-eau couplée au sol, pour des applications de chauffage et de refroidissement. Les résultats indiquent que le système air-eau est généralement plus avantageux en termes de consommation d'énergie primaire sur une saison complète.

Belloufi et al. [79] ont par ailleurs étudié numériquement le comportement d'un échangeur air/sol (EAHE) en conditions estivales extrêmes. Ils ont montré que les performances dépendent principalement de la conductivité thermique du sol et de la vitesse de l'air. Ils signalent également que négliger le facteur de déclassement peut fausser la conception, puisque dans les cas étudiés il varie de 0 % à 35 %. Ils ont constaté que les 33 premiers mètres de l'échangeur permettent à eux seuls d'assurer environ 91 % de la réduction totale de la température.

Enfin, Hadjaj et al. [80] ont évalué expérimentalement les performances thermiques d'un échangeur eau-air constitué de canalisations hélicoïdales en PVC, immergé dans un puits à El-Oued. L'échangeur de 30 m de long et 0,06 m de diamètre a montré une capacité maximale de transfert thermique d'environ 418 W pour une vitesse d'air de 10 m/s, avec une différence de température air-entrée / air-sortie atteignant 14,1 °C.

4. Conclusion

En conclusion, le principal défi de la sécurité énergétique en Algérie réside dans la forte dépendance aux hydrocarbures et dans un modèle économique basé sur une seule ressource non renouvelable. Pour répondre à cet enjeu, le pays doit impérativement adopter une politique énergétique rigoureuse, fondée sur un mix énergétique diversifié, où les énergies renouvelables – notamment le solaire photovoltaïque – occuperaient une place prépondérante. La réussite d'une telle transition repose également sur la sensibilisation des entreprises, des collectivités locales et des citoyens.

Il s'agit désormais d'inscrire la transition énergétique nationale dans une vision stratégique à moyen et long terme, en garantissant une gouvernance efficace des ressources et des projets. Cette démarche doit s'accompagner d'une réorientation progressive de la consommation vers un modèle fondé sur l'efficacité énergétique et l'intégration d'un mix renouvelable significatif. Le renforcement de la recherche scientifique, le transfert de technologies propres et la levée des obstacles institutionnels et réglementaires sont autant de leviers indispensables pour encourager la participation du secteur privé et assurer une meilleure intégration des énergies durables. Enfin, le développement d'une industrie nationale dédiée aux énergies renouvelables, en particulier dans le domaine solaire où l'Algérie dispose d'un potentiel exceptionnel, constitue une étape clé vers la création d'un modèle économique résilient et durable [81].

Outre le développement du solaire, l'Algérie possède également un potentiel géothermique considérable. Celui-ci peut être mobilisé pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments, ainsi que, dans certaines situations, pour la production d'électricité. Dans les zones arides et désertiques, où la régulation thermique et la maîtrise de la consommation énergétique représentent un enjeu essentiel, l'exploitation de la géothermie constitue une solution à la fois durable et économiquement avantageuse.

Les études montrent qu'à partir d'une profondeur d'environ trois mètres, la température du sol reste pratiquement stable, ce qui rend possible une exploitation régulière au moyen des échangeurs air-sol (EAHE). Les performances de ces dispositifs dépendent de plusieurs paramètres, tels que le débit d'air, la profondeur d'enfouissement, ainsi que la longueur et le diamètre des conduits. Des comparaisons expérimentales entre les pompes à

chaleur géothermiques et les systèmes air/eau classiques ont révélé que la géothermie permet de réaliser des économies d'énergie avoisinant 43 % en hiver et 37 % en été, confirmant son rôle clé dans la transition énergétique [80].

Modélisation Semi-analytique

ECAW/ECWA

1. Introduction

L'étude semi-analytique présentée dans ce chapitre propose une modélisation mathématique du comportement thermique d'un échangeur géothermique eau–air tubulaire simple, sans tenir compte d'une configuration particulière (faisceau tubulaire, vertical Slinky, etc.). Le dispositif étudié est immergé dans un réservoir alimenté en continu par de l'eau chaude issue d'une station thermique ou d'un forage géothermique. La température et la conductivité thermique de l'eau alimentant le réservoir sont supposées respectivement égales à $T_e = 50\text{ °C}$ et $\lambda_e = 0,65\text{ W/m.°C}$ (Figure 1).

L'analyse est réalisée à l'aide d'un programme de calcul développé sous MATLAB, permettant de faire varier les paramètres géométriques de l'échangeur (longueur, diamètres), le type et les propriétés des matériaux du tube (PVC ou cuivre), ainsi que les conditions d'entrée (température moyenne ou minimale de l'air ambiant et débit d'air), afin d'évaluer l'impact de ces paramètres sur les performances thermiques globales du système.

Les simulations menées dans cette étude visent plus particulièrement à:

- analyser l'influence du matériau du tube (PVC / cuivre) sur la température de sortie de l'air pour les quatre mois les plus frais de l'année (Décembre à Mars) dans la région de Biskra;
- étudier l'effet de la longueur du tube sur la température de sortie de l'air pour les mêmes mois;
- examiner l'influence du diamètre du tube sur la température de sortie de l'air;
- évaluer l'impact du débit d'air ambiant sur la température de sortie de l'air;
- déterminer l'influence de la longueur de l'échangeur sur le coefficient de performance (COP);
- et enfin, analyser l'effet du débit d'air sur le COP du système, pour les deux températures caractéristiques (moyenne et minimale) de la période hivernale à Biskra.

Ces investigations permettront d'identifier les paramètres géométriques et de fonctionnement les plus déterminants sur le comportement thermo-énergétique global du système ECAW/ECWA, et de proposer des configurations optimales pour l'adaptation des échangeurs géothermiques à la période hivernale dans les conditions climatiques locales de Biskra.

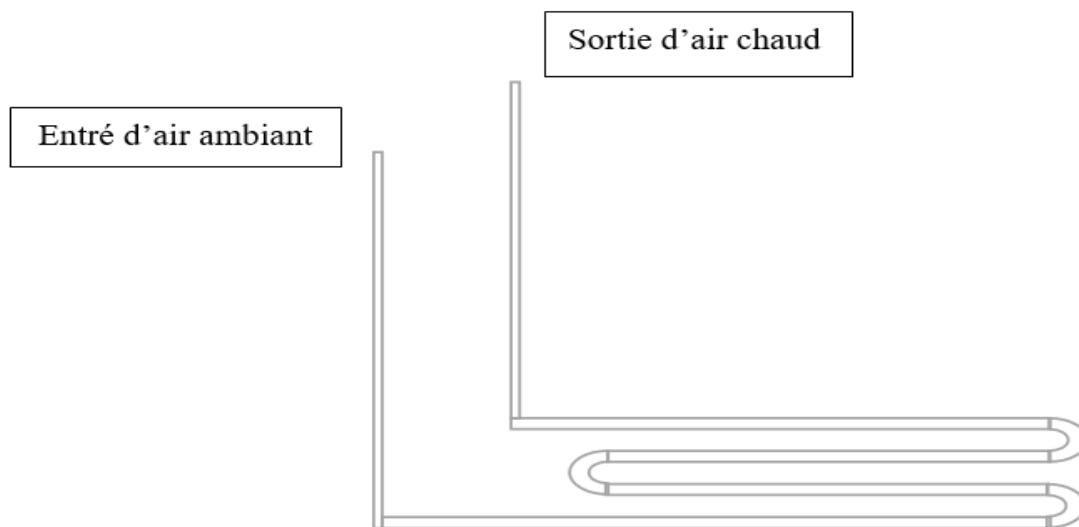


Figure.1: Echangeur de chaleur tubulaire géothermique eau-air.

2. Calcul et dimensionnement thermique du modèle proposé

2.1. Hypothèses de calcul

Afin de simplifier le modèle tout en conservant une représentativité physique satisfaisante du système étudié, plusieurs hypothèses ont été adoptées dans le cadre de la modélisation semi-analytique de l'échangeur géothermique eau-air. Ces hypothèses permettent de formuler les équations du bilan énergétique et des pertes de charge de manière analytique et de faciliter leur implémentation sous Matlab.

- **Géométrie simplifiée:** L'échangeur étudié est représenté par un tube unique de configuration simple et aléatoire, immergé dans une cuve d'eau géothermale maintenue à température constante $T_e=50$ °C. Cette représentation permet de s'affranchir de la complexité géométrique des configurations réelles (faisceaux tubulaires, serpentins verticaux ou horizontaux, etc.) et de se concentrer sur les mécanismes essentiels du transfert thermique entre l'air et l'eau.
- **Régime permanent:** Les échanges thermiques sont considérés à l'état stationnaire. Les températures de l'eau, de l'air et du tube ne varient pas au cours du temps.
- **Propriétés physiques constantes:** Les propriétés thermophysiques des fluides (densité, chaleur spécifique, conductivité thermique, viscosité) sont supposées constantes dans la plage de températures considérée.

- Écoulement monodimensionnel: L'air circule à l'intérieur du tube selon un écoulement unidirectionnel le long de l'axe du conduit. Le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) est déterminé à partir du nombre de Reynolds.
- Résistances thermiques radiales prises en compte: Le transfert de chaleur global entre l'eau chaude et l'air froid traverse successivement trois résistances:
 - la convection interne (air \rightarrow paroi interne du tube),
 - la conduction à travers le matériau du tube,
 - la convection externe (paroi externe du tube \rightarrow eau).

Cette décomposition permet de comparer les performances thermiques des matériaux de tube (PVC et cuivre).

- Flux thermique uniforme: Le flux de chaleur à la paroi interne du tube est supposé uniforme sur toute la longueur de l'échangeur, ce qui constitue une hypothèse couramment admise pour ce type de systèmes.
- Isolation thermique du réservoir: Les pertes de chaleur vers l'extérieur du réservoir sont négligées. L'eau géothermale est considérée parfaitement brassée et homogène en température.
- Conditions hydrauliques: La pression de sortie de l'air est supposée atmosphérique. Les pertes de charge sont uniquement dues au frottement visqueux le long du tube, sans tenir compte des pertes singulières (entrées, coudes, raccords).

2.2. Paramètres caractéristiques de l'échangeur thermique eau-air

Les paramètres thermiques et géométriques caractérisant l'échangeur thermique eau-air sont résumés dans le tableau 1. ci-après:

Tableau.1: Paramètres caractéristiques de l'échangeur thermique eau-air

Matériau	Conductivité thermique du tube (W/m.°C)	Epaisseur du tube (mm)	Longueur de l'échangeur (m)	Rayon extérieur du tube (mm)	Rayon intérieur du tube (mm)	Diamètre intérieur du tube (m)
PVC	$\lambda_t = 0,16$	$e = 3$	$L=45$	$r_{ex} = 58 ; 78 ; 103$	$r_i = 55 ; 75 ; 100$	$d_i=0.11 ; 0.15 ; 0.20$
Cuivre	$\lambda_c = 380$	$e = 3$	$L=45$	$r_{ex} = 58 ; 78 ; 103$	$r_i = 55 ; 75 ; 100$	$d_i=0.11 ; 0.15 ; 0.20$

2.3. Propriétés thermo-physiques de l'air

Les caractéristiques thermiques et physiques de l'air ambiant, utilisées pour la modélisation et le calcul des échanges de chaleur, sont présentées dans le tableau 2 ci-après:

Tableau.2: propriétés thermo-physiques de l'air ambiant

Température d'entrée (°C)	Conductivité thermique (W/m.°C)	Viscosité dynamique (kg/m.s)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.°C)	Débit massique (kg/s)
T _{ae} = 7 ; 8 ; 11 ; 12 ; 13 ; 17	$\lambda_a = 0,024$	$\mu_a = 1.9.10^{-5}$	$\rho_a = 1.225$	C _{pa} = 1007	$\dot{m}_a = 0.05 ; 0.07 ; 0.09 ; 0.11 ; 0.13 ; 0.15$

2.4. Température ambiante de l'air

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est d'évaluer la température de l'air à la sortie de l'échangeur. À cette fin, le fonctionnement du dispositif a été simulé durant les quatre mois les plus froids de l'année, correspondant à la période hivernale. Deux températures de l'air ambiant — la moyenne et la minimale — ont été retenues (Tableau 3), afin d'analyser le comportement de l'échangeur aussi bien de jour que de nuit. Une série de simulations numériques a été réalisée en faisant varier plusieurs paramètres d'entrée, dans le but d'examiner la viabilité et la performance de cette solution technologique.

Tableau.3: Températures moyennes et températures minimales de l'air ambiant pendant les quatre mois les plus froids de la région de Biskra

Mois	Décembre	Janvier	Février	Mars
Température ambiante minimale de l'air (°C)	8	7	8	11
Température ambiante moyenne de l'air (°C)	13	12	13	17

3. Bilan énergétique

3.1. Modélisation semi-analytique du transfert thermique

Les équations employées dans la présente modélisation semi-analytique sont établies sur la base des principes fondamentaux du transfert de chaleur et de la thermodynamique appliquée, tels que détaillés dans les travaux de Rouag [82], Mehdid et al. [83], Doumenc [84], Debacq [85] et De Paepe et Janssens [86]. Les formulations relatives aux nombres adimensionnels (Reynolds, Prandtl, Nusselt) et aux résistances thermiques s'appuient sur les approches classiques exposées par Ede [87] et Jannot [88], tandis que les expressions des bilans énergétiques et des performances thermiques s'inspirent des cours de Bonnefoy [89].

Enfin, la validation des paramètres expérimentaux et la comparaison avec des études réalisées dans des conditions climatiques proches (El Oued, Algérie) se réfèrent aux travaux récents de Hadjadj et al. [90].

Sur cette base, le bilan énergétique appliqué à deux sections infinitésimales séparées d'une distance dx peut s'exprimer comme suit:

$$\dot{m}_a C_{p_a} (T_a(x) - T_a(x + dx)) = \frac{(T_a(x) - T_e)}{R_{th}} dx \quad (1)$$

La résistance thermique totale reliant l'air circulant à l'intérieur du tube et l'eau environnante de l'échangeur eau-air est donnée par la relation suivante:

$$R_{th} = R_{eau} + R_a + R_t \quad (2)$$

La résistance thermique associée au transfert convectif entre l'air s'écoulant dans le tube et sa paroi interne est évaluée selon l'expression suivante:

$$R_a = \frac{1}{h_a S} = \frac{1}{h_a 2\pi L r_i} \quad (3)$$

$$\text{avec: } h_a = \frac{Nu \lambda_a}{d_i} \quad (4)$$

Le nombre de Nusselt caractérisant l'écoulement de l'air à l'intérieur du tube est défini par l'équation (8) pour le régime correspondant:

$2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ et $0.5 \leq Pr \leq 10^6$: écoulement en régime turbulent;

$$Re = \frac{\rho_a v_a D_h}{\mu_a} \quad (5)$$

$$D_h = \frac{4A}{P_m} = 4 \frac{(\pi d_i^2 / 4)}{\pi d_i} = d_i \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\mu_a c_{p_a}}{\lambda_a} \quad (7)$$

$$Nu = 0.023 . Re^{0.8} . Pr^{0.4} \quad (8)$$

La résistance thermique du matériau constitutif du tube s'exprime à l'aide de la relation suivante:

$$R_t = \frac{\ln(r_{ex}/r_i)}{2\pi \lambda_t L} \quad (9)$$

La résistance thermique du fluide externe (eau) est, quant à elle, calculée selon l'équation suivante:

$$R_{eau} = \frac{\ln(r_e/r_{ex})}{2\pi\lambda_e L} \quad (10)$$

Après avoir divisé l'équation (1) par dx , on obtient la forme différentielle suivante:

$$C_{pa} \frac{dt}{dx} = \frac{(T_a(x) - T_e)}{R_{th}} \quad (11)$$

Donc,

$$T_a(x) = C \cdot \exp\left(\frac{-x}{\dot{m}_a C_{pa} R_{th}}\right) + T_e \quad (12)$$

Enfin, la constante d'intégration C est déterminée en appliquant la condition aux limites appropriée, décrite comme suit:

Pour $x=0$

$$T_a(x) = T_{ae} \rightarrow C = T_{ae} - T_e \quad (13)$$

D'où

$$T_a(x) = (T_{ae} - T_e) \exp\left(\frac{-x}{\dot{m}_a C_{pa} R_{th}}\right) + T_e \quad (14)$$

$$\text{Avec : } \dot{m}_a = \rho_a Q_v \quad (15)$$

L'équation (14) peut être aussi écrite comme suit:

$$T_a(x) = (T_{ae} - T_e) \exp\left(\frac{-x}{\rho_a C_{pa} Q_v R_{th}}\right) + T_e \quad (16)$$

La puissance thermique est donnée par l'équation:

$$Q = \dot{m}_a C_{pa} \Delta T_a \quad (17)$$

$$\text{Avec : } \Delta T_a = T_e - T_a(x) \quad (18)$$

Le coefficient de performance thermique s'exprime par:

$$COP = COP_{chaud} = \frac{\text{puissance thermique utile}}{\text{énergie fournie}} = \frac{|Q|}{W} = \frac{T_{chaud}}{T_{chaud} - T_{froid}} \quad (19)$$

L'efficacité de l'échangeur est définie comme le rapport de la chute de température de l'air entre la sortie et l'entrée de l'échangeur et la différence entre les températures de l'eau et de l'air d'entrée.

$$\varepsilon = \frac{(T_{as} - T_{ae})}{(T_{eau} - T_{ae})} \quad (20)$$

3.2. Pertes de charge à l'intérieur des tubes

Dans un échangeur de chaleur, les pertes de charge dans les conduits internes résultent de l'ensemble des résistances rencontrées par le fluide lors de son écoulement. Elles comprennent à la fois les pertes à l'entrée et à la sortie de l'échangeur, ainsi que les pertes régulières (le long des sections droites) et les pertes singulières (au niveau des coudes, changements de direction ou de section). L'expression générale de la perte de charge totale s'écrit alors comme suit:

$$\Delta P_i = \Delta P_e + \Delta P_r + \Delta P_p \quad (21)$$

La perte de charge associée à l'entrée et à la sortie de l'échangeur correspond aux résistances locales rencontrées par le fluide lors de son passage dans ces zones. Elle peut être exprimée par la relation suivante:

$$\Delta P_e = \frac{3}{4} \rho_{air} V_{air}^2 \quad (22)$$

La perte de charge engendrée par les frottements le long de l'échangeur résulte des interactions entre le fluide et la paroi interne des tubes, et s'exprime selon la relation suivante:

$$\Delta P_r = \frac{\Omega}{2} \frac{L_t}{\bar{\omega}} \rho_{air} V_{air}^2 \quad (23)$$

- Pour: $2100 \leq Re \leq 10^5$, on applique la formule de BLASIUS:

$$\Omega = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (24)$$

- Pour: $10^5 \leq Re \leq 10^6$, on applique la formule de HERMAN:

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 Re^{-0.3} \quad (25)$$

Le coefficient de correction de viscosité $\bar{\omega}$ est donné pour le régime turbulent par:

$$\bar{\omega} = \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad (26)$$

La perte de charge due aux changements de direction est:

$$\Delta P_P = \xi \frac{\rho_{air} V_{air}^2 N_{tt}}{4} \quad (27)$$

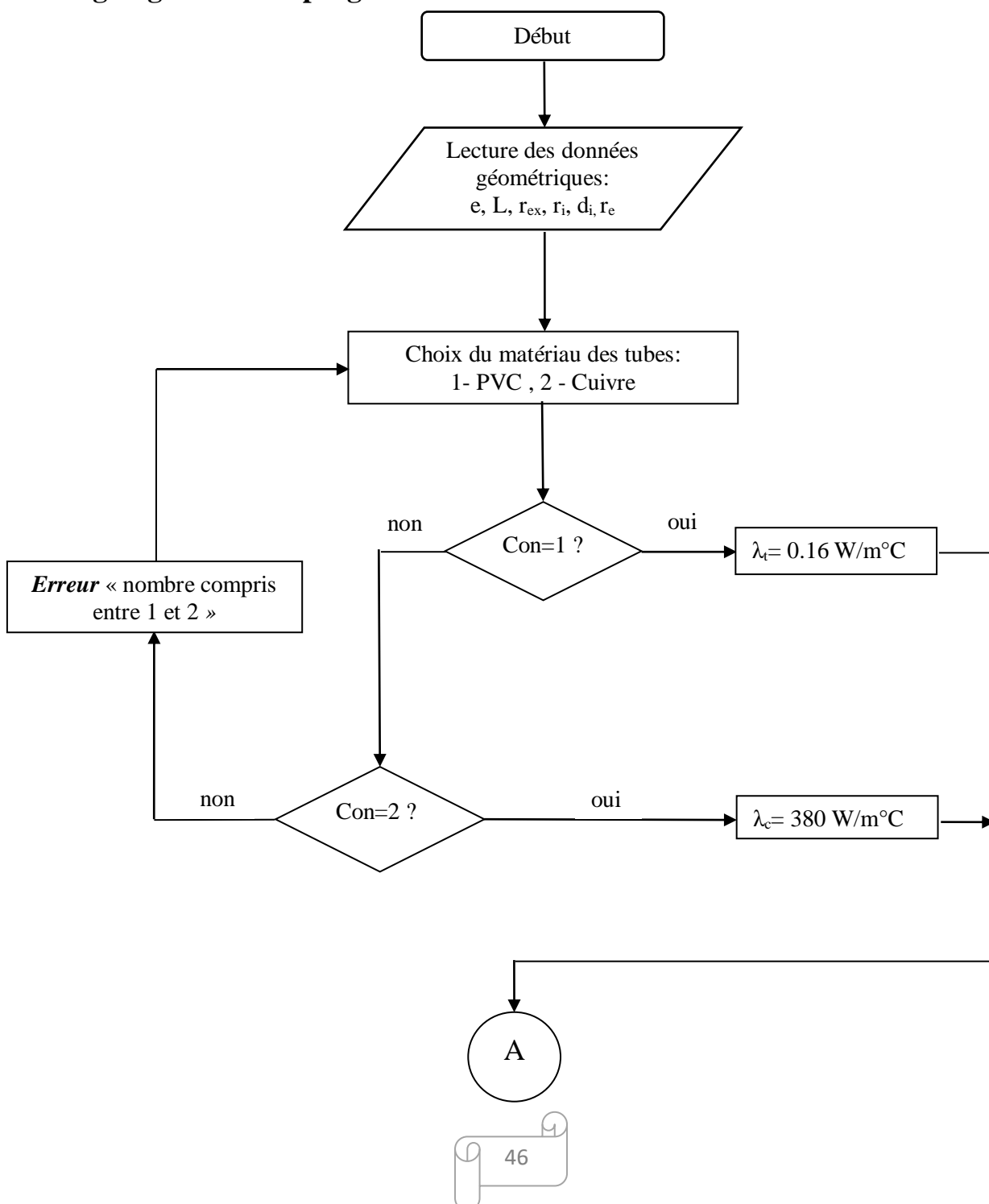
Où ξ est le coefficient de pertes de charge régulière, il est exprimé par:

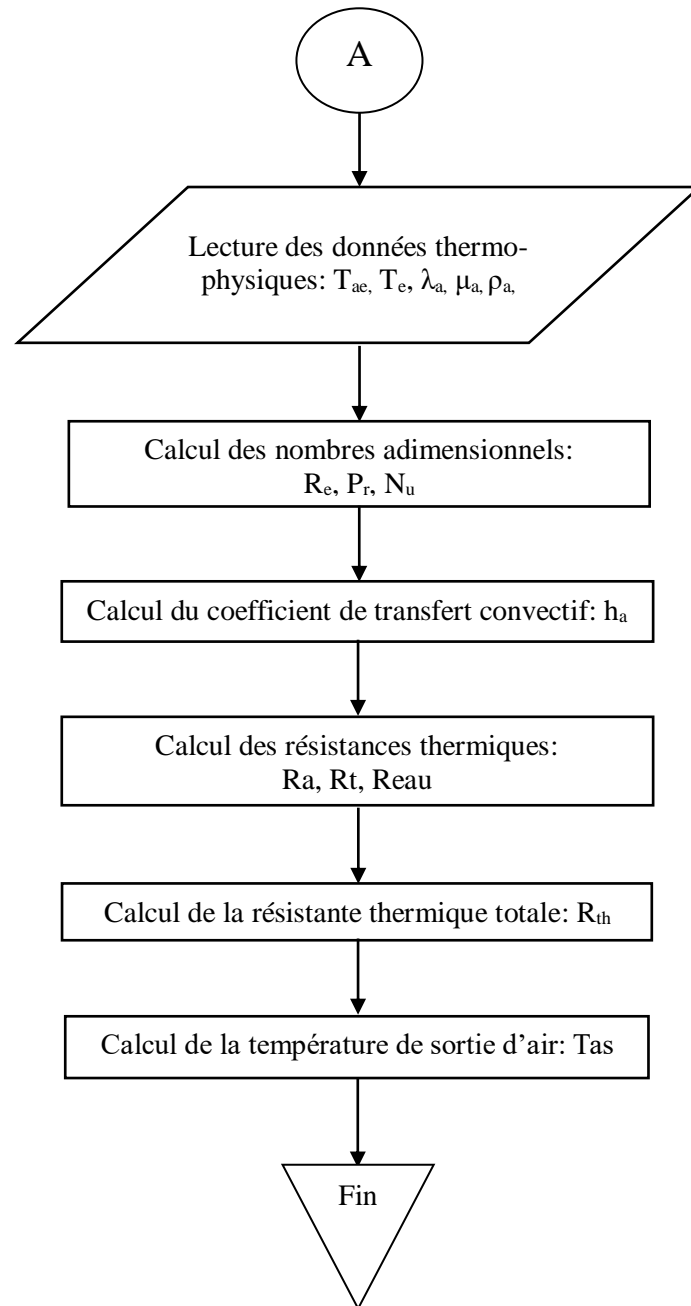
$$\xi = \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2 \sin^4 \frac{\theta}{2} \quad (28)$$

Avec θ : Angle entre le sens d'écoulement initial et final.

Les équations (21) à (28) sont établies à partir des formulations de Webb et Eckert [91], et des corrélations de frottement de Blasius et Herman [92].

4. Organigramme du programme





5. Conclusion

En résumé, la modélisation numérique du système étudié a permis d'analyser et de prévoir son comportement à partir de la résolution des équations de transfert de chaleur, tout en faisant varier les paramètres thermiques et physiques caractéristiques de l'échangeur et de son environnement. Les résultats numériques obtenus à l'aide du code MATLAB ont été correctement validés par confrontation aux données expérimentales. En outre, plusieurs simulations ont été effectuées pour diverses conditions d'entrée, afin d'évaluer la viabilité de cette approche technologique tout au long de la période hivernale dans la région de Biskra.

Protocole Expérimental

1. Introduction

Le cas d'étude et d'analyse se situe dans le triangle formé par Ourelal, Bouchagroune et Lioua, dans la wilaya de Biskra, ville saharienne d'Algérie localisée à 34°48' de latitude Nord et 05°44' de longitude Est (Figure 1).

L'expérimentation a été conduite avec le concours des étudiants: Achraf Sayad, Dj mouai Baissa et Ali Kabot, dans le cadre de la réalisation de leurs projets de master, ainsi qu'au sein du projet PRFU A11N01UN070120230001, intitulé «Etude de faisabilité et valorisation des systèmes énergétiques innovants de production de froid au climat saharien».

Concernant le potentiel géothermique national, les études indiquent l'existence de plus de deux cents sources chaudes, concentrées principalement dans les régions du Nord-Est et du Nord-Ouest du pays, dont trente-sept sont classées hyperthermales ($T > 45\text{ °C}$). La plus chaude d'entre elles est celle de Hammam Meskhoutine, dont la température atteint 98 °C. Le réservoir gréseux albien, situé dans la région saharienne, s'étend sur une grande partie du territoire national. Dans le désert du Nord-Est et de l'Ouest, les sources thermales sont relativement rares, et l'aquifère albien y est principalement exploité par des forages à usage domestique ou agricole. La température des eaux varie entre 30 °C et 80 °C, d'Ouest en Est.

Bien que plusieurs sources à température élevée aient été observées dans la zone entourant Biskra, plus de deux cents (200) autres sources ont été recensées dans le Nord du pays, présentant des températures plus modérées. Ces dernières sont utilisées essentiellement à des fins balnéologiques, tandis que leur emploi pour le chauffage de serres reste encore marginal.

Il convient de noter que certaines sources géothermales de la région de Biskra atteignent localement 118 °C [31]. Dans cette même région, l'aquifère continental intercalaire se présente sous la forme d'un réservoir artésien, constituant la plus vaste réserve d'eau souterraine du Sahara algérien. Cette nappe, dite libre, est surmontée du complexe terminal, qui forme la principale couverture hydraulique de l'ensemble géothermique régional.



Figure.1: Localisation géographique de la ville de Biskra [93].

Située à une altitude moyenne d'environ 88 m au-dessus du niveau de la mer, la ville de Biskra se caractérise par un climat aride marqué par des contrastes thermiques prononcés. Les Etés y sont particulièrement chauds et secs, avec des températures moyennes avoisinant $43,5^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative moyenne de 12 %. En revanche, les hivers sont froids, la température minimale moyenne descendant jusqu'à 4°C , tandis que l'humidité relative peut atteindre près de 89 %. Les précipitations y sont faibles et irrégulières, ne dépassant pas une trentaine de jours par an, ce qui classe Biskra dans la zone aride selon l'indice d'aridité de Martonne.

Durant les mois d'Eté — de Juin à Septembre — les températures maximales moyennes varient généralement entre $36,5^{\circ}\text{C}$ et 39°C . Les mois de novembre à avril, en revanche, présentent des conditions hivernales plus rigoureuses, avec des températures minimales comprises entre $8,4^{\circ}\text{C}$ et $11,7^{\circ}\text{C}$. L'ensoleillement est très élevé, atteignant environ 7680 Wh/m^2 sur un plan horizontal en juillet, correspondant à près de 383 heures d'ensoleillement mensuel, soit plus de 12 heures par jour. En hiver, l'ensoleillement diminue, atteignant un minimum en décembre avec environ 2712 Wh/m^2 et une durée moyenne d'exposition solaire de 219 heures par mois (environ 7 heures par jour). Ces conditions extrêmes traduisent la rigueur climatique propre à la région de Biskra [93].

2. Problématique

Les eaux chaudes issues des forages, des sources thermales et des stations balnéaires de la nappe albienne représentent l'un des gisements géothermiques les plus importants de la région de Biskra (Sud-Est de l'Algérie). Cependant, cette ressource naturelle demeure largement sous-exploitée, aussi bien comme source d'énergie renouvelable que comme réserve d'eau utilisable pour les besoins domestiques ou agricoles, en raison de sa température relativement élevée. Dans cette optique, le recours à un échangeur de chaleur installé dans un bassin contenant l'eau géothermique, à travers lequel circule un flux d'air destiné à être diffusé à l'intérieur des habitations pour assurer le chauffage ou le rafraîchissement, constitue une approche technologique novatrice permettant de valoriser une énergie locale, propre et durable.

3. Objectifs

- Revaloriser les eaux des gisements géothermiques mal exploitées;
- Obtenir une énergie disponible, durable, propre et gratuite;
- mettre l'accent sur un nouveau système géothermique pour le chauffage ou le rafraîchissement domestique;
- évaluer les échanges thermiques et les performances des échangeurs étudiés;
- réduire la consommation de l'énergie électrique et préserver l'environnement.

4. Modèles expérimentaux étudiés

4.1. Echangeur immergé à faisceau tubulaire

Le premier modèle expérimental proposé, dont les paramètres caractéristiques sont résumés dans le tableau 1, correspond à trois échangeurs de chaleur géothermiques à faisceau tubulaire composés respectivement de 4, de 6 et de 8 tubes. Ils fonctionnent selon un principe eau-air et immergés horizontalement dans un réservoir alimenté en continu par une eau chaude issue d'un forage situé dans la commune d'Ourllal, à environ deux kilomètres de la limite administrative de Bouchagroune, à l'Ouest de la ville de Biskra. Ce forage, d'une profondeur supérieure à 3400 mètres, délivre une eau dont la température de sortie est estimée à environ 67°C (Figure 2). Cette configuration technologique vise à réduire la consommation d'énergie électrique utilisée pour le chauffage des bâtiments résidentiels, des locaux publics et des stations thermales, en exploitant directement la ressource géothermique locale. Le même dispositif peut également être employé pour le rafraîchissement des

habitations. À cet effet, l'échangeur est immergé, durant la période estivale (mois de Juillet), dans une eau plus fraîche ($\approx 19^\circ\text{C}$) issue d'un forage agricole localisé dans la commune de Lioua, à l'Ouest de Biskra (Figure 3). Les résultats expérimentaux obtenus indiquent que le gain énergétique dépend principalement de la longueur de l'échangeur et du débit d'air traversant le dispositif. Ce différentiel thermique peut atteindre jusqu'à 20°C entre l'entrée et la sortie, démontrant ainsi la faisabilité technique et l'efficacité de la solution proposée.

Tableau.1: Paramètres caractéristiques de l'échangeur à faisceau tubulaire [94]

Matériau	Conductivité thermique ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	Epaisseur du tube (mm)	Longueur d'un tube (m)	Distance entre deux tubes consécutifs (mm)	Diamètre intérieur du tube (mm)
PVC	$\lambda_t = 0,16$	$e = 01$	$L=1$	$l=78$	$d_i=32$



(a)



(b)



(c)

Figure.2: (a): échangeur à 4 tubes ; (b): échangeur à 6 tubes ;
(c): échangeur à 8 tubes destinés au chauffage (source: l'auteur).

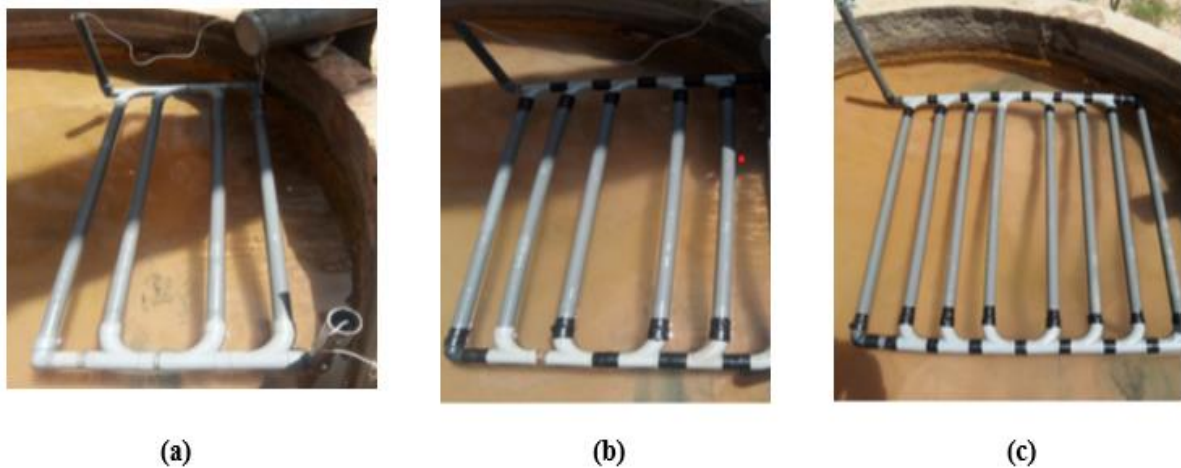


Figure.3: (a): échangeur à 4 tubes ; (b): échangeur à 6 tubes ;
(c): échangeur à 8 tubes destinés au rafraîchissement (source: l'auteur).

4.2. Echangeur immergé monotube (Vertical slinky)

Le second modèle expérimental, dont les paramètres caractéristiques sont résumés dans le tableau 2, correspond à un échangeur de chaleur géothermique monotube (Vertical Slinky) fonctionnant selon un principe eau–air et immergé dans un réservoir alimenté en continu par une eau chaude issue d'un forage situé dans la commune de M'lili, à l'Ouest de la wilaya de Biskra (Figure 4). L'objectif principal de ces essais expérimentaux est d'optimiser les dimensions et les performances thermiques de l'échangeur, en exploitant la chaleur de l'eau albienne pour le chauffage des locaux, la température à la sortie du forage étant évaluée à environ 68 °C. Pour cette étude, un échangeur d'une longueur de 30 mètres a été utilisé, équipé de plusieurs capteurs installés à différentes sections du tube, afin de mesurer la température de l'air chauffé le long de son parcours (Figure 5).

Tableau.2: Paramètres caractéristiques de l'échangeur monotube (Veritcal slinky)

Matériau	Conductivité thermique (W/m. °C)	Epaisseur du tube (mm)	Longueur du tube (m)	Capteurs de température depuis l'entrée (m)	Diamètre intérieur du tube (mm)
PEHD	$\lambda_t = 0.42$	e = 01	L=30	T à : 3.5 ; 8.5 ; 14.5 ; 18.5 ; 21.5	di=32



Figure.4: Echangeur immergé monotube Vertical slinky (source: l'auteur).



Figure.5: Capteurs de mesure de température à l'intérieur de l'échangeur (source: l'auteur).

Pour mesurer la température à l'intérieur de l'échangeur, nous avons installé cinq capteurs répartis le long de sa longueur, comme indiqué dans le tableau 3 suivant:

Tableau.3: Tableau montrant la distance entre les capteurs repartis le long de l'échangeur

Capteur de température	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
La distance depuis l'entrée du tube (m)	3.5	8.5	14.5	18.5	21.5

5. Appareillage

Les expériences sont réalisées en utilisant des thermocouples de type K, présentant une précision de $0,01^{\circ}\text{C}$ (Figure 6), pour la mesure des températures ambiantes, d'entrée, de sortie et à l'intérieur du tube (Cas du Vertical Slinky) de l'échangeur. La température de l'eau géothermale est mesurée à l'aide d'un thermomètre à mercure de haute sensibilité, garantissant une bonne stabilité de lecture.

Le débit d'air est mesuré à l'aide d'un anémomètre à fil chaud de type Kimo VT300, offrant une précision de $\pm 3 \%$ de la lecture $\pm 10 \text{ m}^3/\text{h}$ pour la mesure du débit volumique et de $\pm 3 \%$ de la lecture $\pm 0,1 \text{ m/s}$ pour la mesure de la vitesse (Figure 7).

Le pompage de l'air est assuré par un aspirateur électrique (Type MPF.803, 1000 W) (Figure 8), permettant d'imposer un flux d'air contrôlé à travers le tube de l'échangeur.

Afin d'ajuster la vitesse de rotation du moteur de l'aspirateur et donc de réguler avec précision le débit d'air circulant dans le circuit expérimental, un autotransformateur variable triphasé mobile « Langois » (Modèle: 1500 VA, précision $\pm 1 \%$ à $\pm 3 \%$) est utilisé (Figure 9). Cet autotransformateur permet de faire varier la tension d'alimentation appliquée à l'aspirateur, assurant ainsi une modulation progressive du débit d'air sans perturber la stabilité électrique du système. Cette configuration garantit un contrôle précis et reproductible des conditions expérimentales, indispensable à l'étude de l'influence du débit d'air sur les échanges thermiques et les pertes de charge dans l'échangeur.



Figure.6: Thermocouples type K ($0,01^{\circ}\text{C}$).



Figure.7: Anémomètre à fil chaud type Kimo VT300.



Figure.8: Aspirateur pour le pompage d'air (Type MPF.803, 1000W).



Figure.9: Autotransformateur «Langois» variable triphasé mobile
(Modèle:1500 VA, $\pm 1\%$ à $\pm 3\%$).

6. Bilan énergétique et Bilan exergétique des échangeurs

6.1. Bilan énergétique

Les deux types d'échangeurs étudiés — à faisceau tubulaire et monotube de type Vertical Slinky — obéissent aux mêmes principes thermodynamiques de base décrits précédemment dans la section 3.1 consacrée à la modélisation semi-analytique du transfert thermique.

Ainsi, les équations relatives au bilan énergétique, aux résistances thermiques, aux nombres adimensionnels (Reynolds, Prandtl, Nusselt) et à la puissance thermique utile s'appliquent de manière identique aux deux géométries, moyennant une adaptation des paramètres géométriques et hydrodynamiques spécifiques à chaque configuration.

Les différences résident essentiellement dans:

- la disposition géométrique des conduits (parallèles dans le faisceau tubulaire, hélicoïdale verticale dans le *Vertical Slinky*);
- les conditions d'écoulement et d'échange convectif (valeurs de h_a , R_{th} , et ΔT);
- et la surface d'échange totale effective, qui influence la puissance thermique transférée $Q = \dot{m}_a C_{p,a} \Delta T_a$.

Ces relations énergétiques constituent la base de l'évaluation expérimentale des performances thermiques réelles des deux systèmes.

6.2. Bilan exergetique

L'analyse exergetique vient compléter l'approche énergétique en intégrant la dimension qualitative de l'énergie transférée.

Elle permet de quantifier les pertes irréversibles et de déterminer la part réellement utilisable de l'énergie échangée dans un environnement défini par sa température de référence T_0 .

6.2.1. Expression générale du bilan exergetique

Pour un système ouvert fonctionnant en régime permanent, le bilan exergetique s'écrit:

$$\dot{E}_{x,\text{entrée}} - \dot{E}_{x,\text{sortie}} = \dot{E}_{x,\text{perdue}} + \dot{E}_{x,\text{détruite}} \quad (1)$$

avec:

- $\dot{E}_{x,\text{entrée}}$ et $\dot{E}_{x,\text{sortie}}$: débits d'exergie à l'entrée et à la sortie du système (W);
- $\dot{E}_{x,\text{perdue}}$: exergie dissipée vers l'environnement;
- $\dot{E}_{x,\text{détruite}}$: exergie détruite par les irréversibilités internes.

6.2.2. Exergie associée au transfert de chaleur

L'exergie liée à un flux thermique \dot{Q} échangé avec une source à température T dans un environnement à T_0 s'exprime par:

$$\dot{E}_{x,Q} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2)$$

Cette relation indique la part du flux de chaleur effectivement convertible en travail utile.

6.2.3. Exergie du fluide d'air à l'entrée et à la sortie

L'exergie spécifique d'un fluide à température T et pression P est donnée par:

$$e_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

où h et s désignent respectivement l'enthalpie et l'entropie du fluide, et h_0 , s_0 leurs valeurs à l'état de référence (T_0, P_0) .

Le débit d'exergie correspondant s'écrit:

$$\dot{E}_x = \dot{m} e_x \quad (4)$$

avec \dot{m} le débit massique du fluide ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

6.2.4. Destruction d'exergie et rendement exergetique

L'exergie détruite par génération d'entropie dans l'échangeur est formulée comme:

$$\dot{E}_{x,\text{détruite}} = T_0 \dot{S}_{\text{générée}} \quad (5)$$

Le rendement exergetique global du système s'exprime alors par:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,\text{utile}}}{\dot{E}_{x,\text{entrée}}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x,\text{détruite}}}{\dot{E}_{x,\text{entrée}}} \quad (6)$$

6.2.5. Application aux deux géométries

Les relations (1) à (6) s'appliquent indifféremment:

- à l'échangeur à faisceau tubulaire, caractérisé par plusieurs conduits parallèles assurant un large contact fluide-paroi;
- et au monotube Vertical Slinky, où le fluide circule dans une spire verticale continue.

Les différences géométriques influencent principalement les termes T , \dot{m} et h , ce qui se traduit par des variations de l'exergie utile et du rendement exergetique global.

6.2.6. Interprétation et intérêt de l'analyse exergetique

L'analyse exergetique complète le bilan énergétique en:

- identifiant les sources d'irréversibilité au sein des échangeurs;
- évaluant la qualité thermodynamique des flux d'énergie échangés;
- et permettant une comparaison rationnelle des performances des deux systèmes étudiés sous le climat de Biskra.

Ainsi, le rendement exergetique constitue un indicateur plus pertinent que le simple COP pour apprécier la performance globale et la durabilité du système géothermique.

7. Evaluation expérimentale du rendement exergetique des échangeurs

L'évaluation expérimentale du rendement exergetique vise à déterminer la part d'exergie utile effectivement transférée du fluide caloporteur vers le milieu d'échange, en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement. Cette approche permet de relier directement les grandeurs mesurées (températures, débits, pressions) aux performances thermodynamiques globales des systèmes étudiés.

7.1. Données expérimentales nécessaires

Les mesures expérimentales réalisées sur les deux échangeurs portent principalement sur:

- les températures d'entrée et de sortie du fluide d'air: $T_{a,e}$ et $T_{a,s}$;
- les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur: $T_{f,e}$ et $T_{f,s}$;
- le débit massique de l'air \dot{m}_a et celui du fluide \dot{m}_f ;
- les pressions et pertes de charge hydrauliques associées.

Ces grandeurs expérimentales permettent de calculer les bilans énergétiques et exergétiques, ainsi que les rendements correspondants.

7.2. Calcul de l'exergie thermique utile

L'exergie utile échangée par le fluide caloporteur sur un intervalle de température donné s'écrit:

$$\dot{E}_{x,\text{utile}} = \dot{m}_f C_{p,f} [(T_{f,e} - T_{f,s}) - T_0 \ln(\frac{T_{f,e}}{T_{f,s}})] \quad (7)$$

où:

- $C_{p,f}$ est la capacité calorifique massique du fluide caloporteur;
- $T_{f,e}$ et $T_{f,s}$ sont respectivement les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur (K);
- T_0 est la température de référence de l'environnement (K).

Cette relation permet d'évaluer la fraction exergétique du flux de chaleur réellement transférée de manière utile.

7.3. Exergie disponible à l'entrée du système

L'exergie totale disponible à l'entrée du système est donnée par:

$$\dot{E}_{x,\text{entrée}} = \dot{m}_f C_{p,f} [(T_{f,e} - T_0) - T_0 \ln(\frac{T_{f,e}}{T_0})] \quad (8)$$

Cette grandeur représente la quantité maximale d'exergie que le fluide peut théoriquement fournir si toutes les transformations étaient réversibles.

7.4. Exergie détruite et irréversibilités

L'exergie détruite au sein de l'échangeur, due aux pertes thermiques et aux irréversibilités internes (convection, conduction, mélange), se calcule par la différence:

$$\dot{E}_{x,\text{détruite}} = \dot{E}_{x,\text{entrée}} - \dot{E}_{x,\text{utile}} \quad (9)$$

Elle traduit la dégradation de la qualité énergétique du flux de chaleur au cours du processus d'échange.

7.5. Rendement exergétique expérimental

Le rendement exergétique global des échangeurs s'exprime alors par le rapport:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,\text{utile}}}{\dot{E}_{x,\text{entrée}}} \quad (10)$$

Cette grandeur, toujours inférieure à 1, reflète la performance thermodynamique effective du dispositif. Un rendement exergétique élevé indique une faible destruction d'exergie et donc un bon niveau de réversibilité du transfert.

7.6. Application comparative aux deux géométries

L'application des équations (7) à (10) aux deux types d'échangeurs permet de comparer directement leur performance exergétique:

- Pour l'échangeur à faisceau tubulaire, la surface d'échange plus importante favorise un meilleur transfert thermique, mais les pertes de charge plus élevées augmentent les irréversibilités.
- Pour le monotube Vertical Slinky, la configuration hélicoïdale limite les pertes de pression et améliore la stabilité thermique, ce qui peut se traduire par un rendement exergétique supérieur, surtout à faible débit.

Les valeurs expérimentales de η_{ex} obtenues permettront ainsi d'établir la hiérarchie de performance entre les deux dispositifs étudiés sous le climat de Biskra.

7.7. Interprétation physique

L'analyse expérimentale du rendement exergétique fournit des informations précieuses sur:

- la qualité thermodynamique du transfert de chaleur;
- le niveau d'irréversibilité interne lié à la conception et au régime de fonctionnement;
- et la cohérence énergétique globale du système géothermique étudié.

Ces résultats expérimentaux constituent la base de l'évaluation technico-économique ultérieure (chapitre 5), où les performances exergetiques seront croisées avec les coûts d'installation et d'exploitation pour identifier la configuration la plus efficiente et durable.

8. Conclusion

Ce chapitre a décrit le cadre expérimental de l'étude menée dans la région de Biskra, dont le fort potentiel géothermique offre des perspectives prometteuses pour la valorisation énergétique de la nappe albienne. Les dispositifs testés, à savoir les échangeurs à faisceau tubulaire et le modèle monotube de type "Vertical Slinky", ont permis d'évaluer l'efficacité du transfert thermique entre l'eau géothermique et l'air circulant. Les résultats obtenus ont mis en évidence des écarts de température notables, confirmant la faisabilité technique et l'intérêt de ces configurations pour des applications de chauffage ou de rafraîchissement domestique. Ces essais expérimentaux constituent ainsi une base essentielle pour la validation et la calibration des modèles semi-analytiques développés par la suite.

Résultats et Discussion

1. Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus à partir d'une approche combinée, semi-analytique et expérimentale, visant à évaluer les performances thermiques et énergétiques de différents systèmes d'échange géothermique air-eau. La partie semi-analytique s'appuie sur un modèle de transfert de chaleur permettant de simuler le comportement thermique des échangeurs en fonction de divers paramètres géométriques et opérationnels. Elle offre ainsi une compréhension approfondie des phénomènes de conduction et de convection intervenant dans les régimes de chauffage et de refroidissement. Parallèlement, une campagne expérimentale a été menée sur trois sites distincts situés à proximité de la ville de Biskra, caractérisés par des conditions géothermiques et climatiques représentatives du contexte saharien. Ces expérimentations ont porté sur deux configurations d'échangeurs géothermiques:

- des échangeurs immergés à faisceau tubulaire, destinés à étudier l'effet du nombre de tubes, du débit d'air et de la longueur sur les performances thermiques et le coefficient de performance (COP);
- un échangeur monotube de type "Vertical Slinky", conçu pour analyser l'influence de la longueur et du débit sur la température de l'air, le rendement et le COP.

Les résultats issus de ces deux approches sont ensuite comparés et discutés afin d'identifier les écarts entre la modélisation et les observations réelles, d'expliquer les phénomènes physiques sous-jacents, et de proposer des critères d'optimisation adaptés aux conditions locales. Enfin, une évaluation technico-économique vient conclure l'étude pour apprécier la faisabilité et la rentabilité du système de chauffage et de rafraîchissement géothermique à l'échelle résidentielle.

2. Résultats du modèle semi-analytique

2.1. Influence de la matière du tube (échangeur) sur la température de l'air

Les figures 1 et 2 illustrent la comparaison des performances thermiques de l'échangeur au cours des mois de Janvier et de Mars, respectivement, pour un débit d'air de $80 \text{ m}^3/\text{h}$. Deux matériaux ont été considérés pour la fabrication du tube: le PVC et le cuivre. L'analyse des courbes obtenues montre que les températures de sortie de l'air sont très proches pour les deux configurations. Cette température augmente progressivement avec la longueur de l'échangeur et atteint une valeur maximale d'environ $46 \text{ }^\circ\text{C}$ lorsque la longueur du tube atteint 45 m. Ces résultats démontrent que l'utilisation du PVC constitue une option particulièrement avantageuse, compte tenu de son faible coût, de sa bonne résistance à la

corrosion et de sa compatibilité avec les milieux thermaux, souvent agressifs vis-à-vis des métaux.

Des tendances similaires ont été observées pour les autres mois de la saison froide; toutefois, afin d'éviter une surcharge du manuscrit, seules les courbes correspondant à Janvier (le mois le plus froid) et à Mars (le plus chaud de la période étudiée) ont été retenues pour illustration.

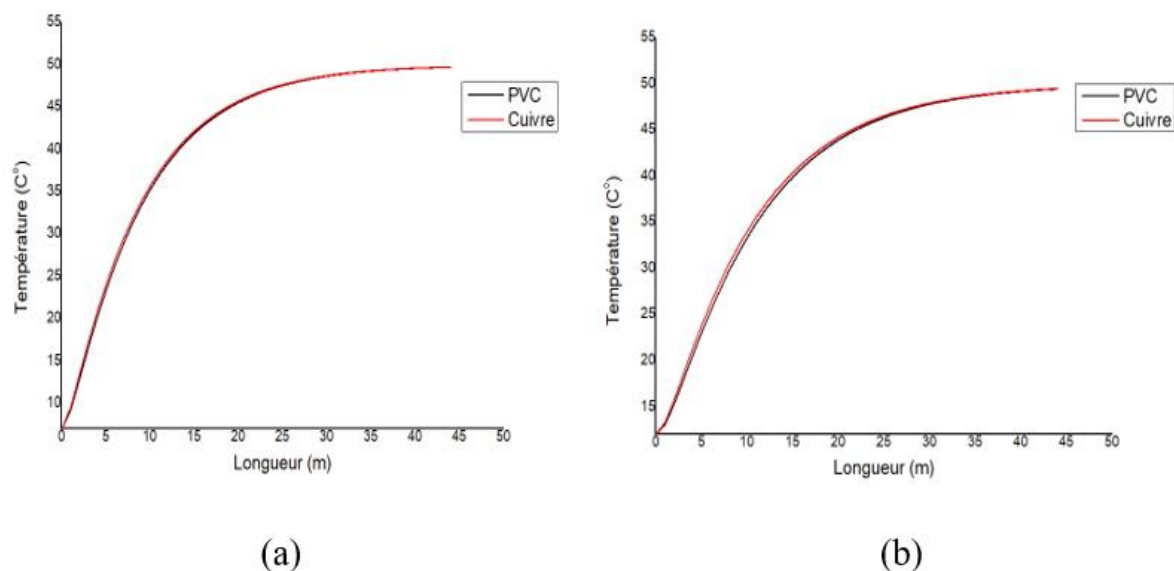


Figure.1: Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour deux matières différentes pendant le mois de Janvier: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

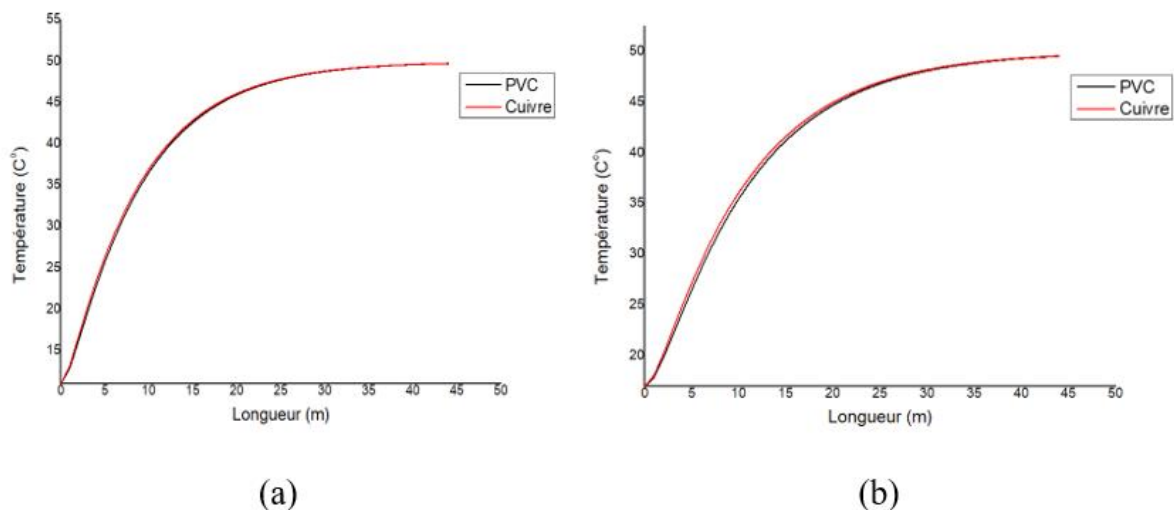


Figure.2: Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour deux matières différentes pendant le mois de Mars: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

2.2. Influence de la longueur sur la température de l'air

L'examen comparatif des courbes des figures 3 et 4, correspondant à un débit d'air maintenu à 0,05 kg/s, montre que, pour les températures ambiantes minimale et moyenne enregistrées durant les quatre mois les plus frais de l'année, la variation de la température de sortie présente un comportement similaire. Dans les deux situations, l'allongement de

l'échangeur induit une élévation quasi linéaire de la température, avec un maximum avoisinant 50 °C pour une longueur de 45 m. Ce comportement traduit l'efficacité accrue du transfert thermique avec l'augmentation de la surface d'échange, jusqu'à atteindre une limite imposée par les conditions thermiques du milieu environnant.

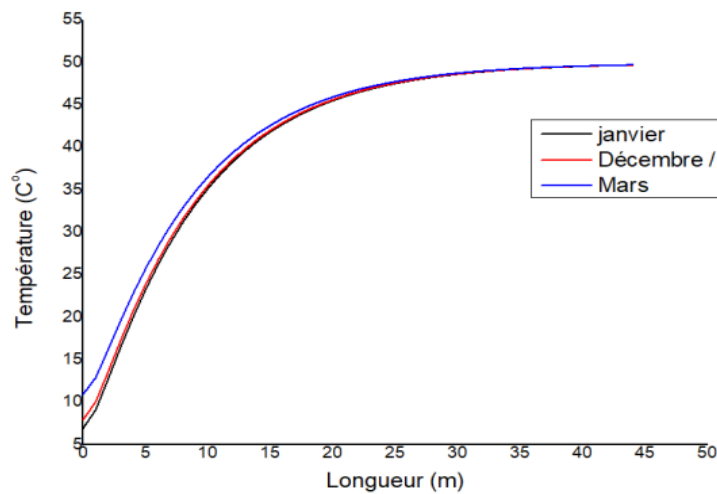


Figure.3: Influence de la longueur sur la température de l'air pendant les quatre Mois les plus frais de l'année: Tea minimale.

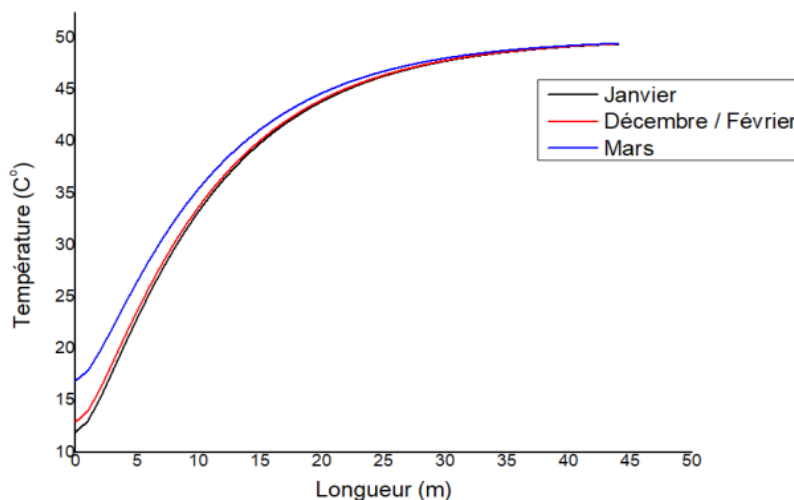


Figure.4: Influence de la longueur sur la température de l'air pendant les quatre Mois les plus frais de l'année: Tea moyenne.

2.3. Influence du diamètre du tube sur la température de l'air

Les figures 5, 6 et 7 présentent la variation de la température de l'air en sortie de l'échangeur en fonction du diamètre des tubes (0,11 ; 0,15 et 0,20 m) pour trois mois représentatifs de la saison froide — Décembre, Janvier et Mars —, sous deux conditions de température ambiante: minimale et moyenne. L'ensemble des courbes révèle une même évolution: la température de l'air chauffé diminue à mesure que le diamètre du tube augmente. Le transfert de chaleur le plus efficace est observé pour le plus petit diamètre

($D=0,11$ m) associé à la plus grande longueur du tube ($L = 45$ m), permettant d'atteindre une température maximale d'environ 50°C .

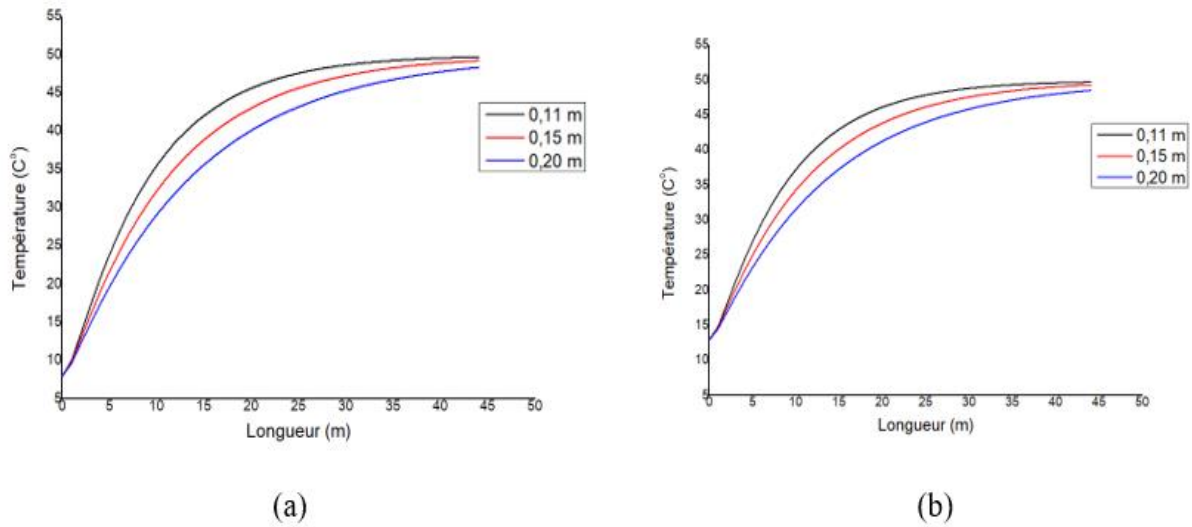


Figure.5: variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube pendant le mois de Décembre: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

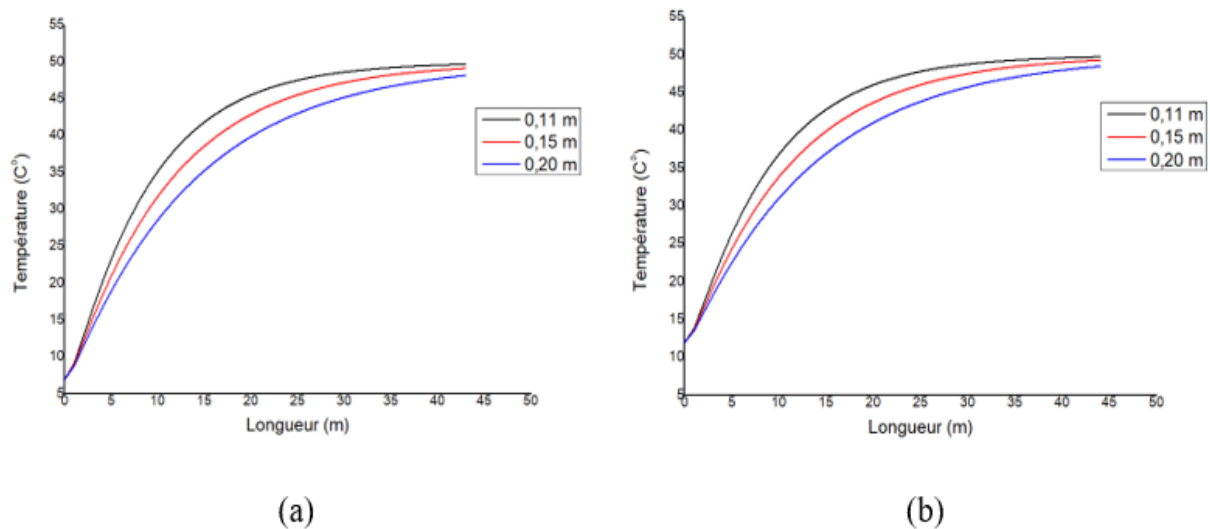


Figure 6: variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube pendant le mois de Janvier: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

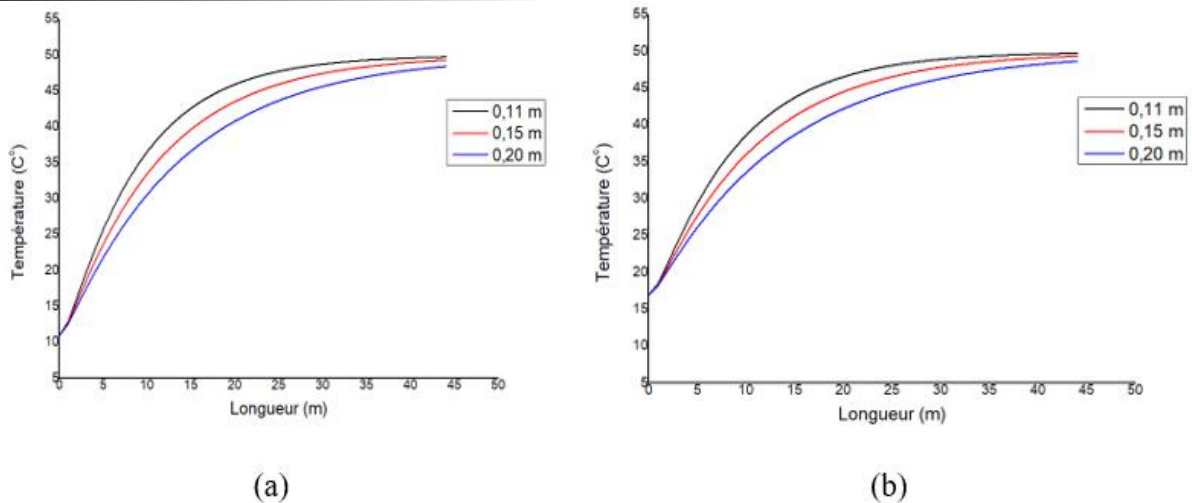


Figure.7: variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube pendant le mois de Mars: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

2.4. Influence du débit sur la température de l'air

L'analyse des deux figures 8 et 9 met en évidence l'influence conjointe du débit d'air et de la longueur de l'échangeur. Pour l'ensemble des conditions étudiées, une diminution du débit d'air entraîne une élévation de la température de sortie, en raison d'un temps de séjour plus long favorisant le transfert thermique. La température maximale observée ($T_{max} = 50$ °C) est atteinte pour le débit le plus faible ($Q_m = 0,05$ kg/s) combiné à la plus grande longueur de tube ($L = 45$ m), et ce pour les deux niveaux de température ambiante considérés.

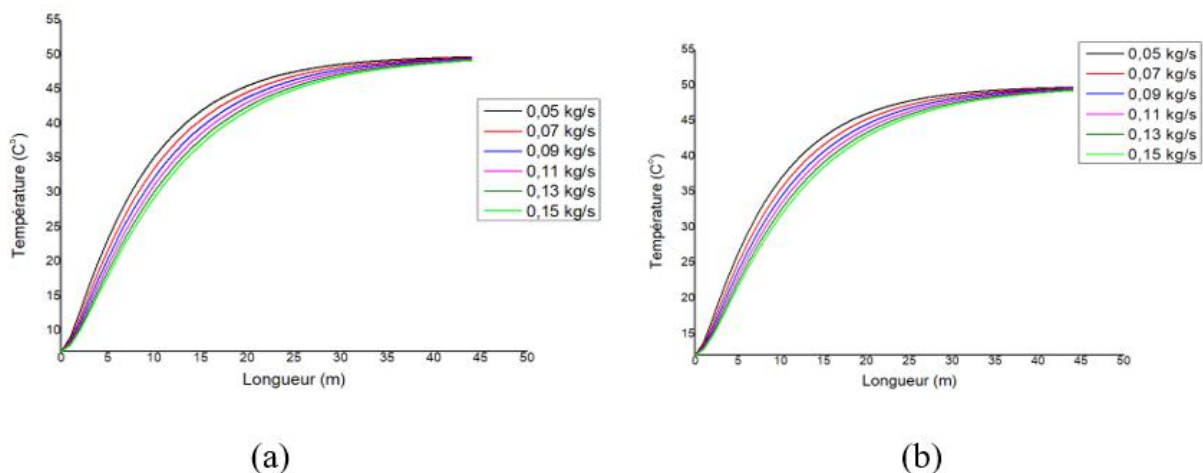


Figure.8: Influence du débit d'air sur la température de l'air (en fonction de la longueur du tube) pendant le mois de Janvier: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

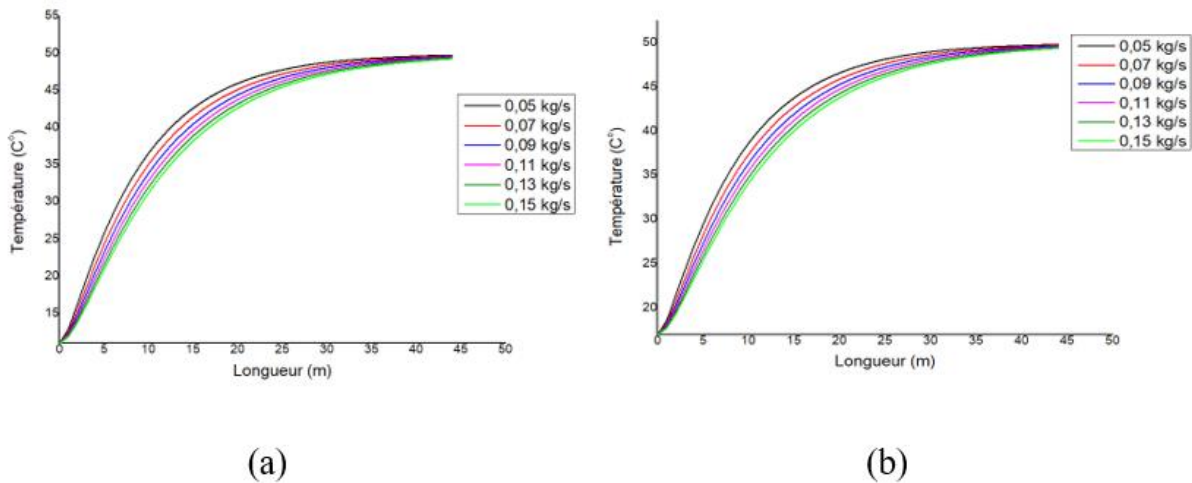


Figure.9: Influence du débit d'air sur la température de l'air (en fonction de la longueur du tube) pendant le mois de Mars: (a) T_{ea} minimale ; (b) T_{ea} moyenne.

D'après les résultats obtenus, la longueur de l'échangeur constitue un facteur favorable au transfert de chaleur entre l'eau chaude et l'air chauffé, tandis que le diamètre et le débit agissent en sens inverse, réduisant ce transfert. La température maximale en sortie ($T_{max}=50^{\circ}\text{C}$) est atteinte pour une longueur maximale de 45 m, associée au plus petit diamètre (0,11 m) et au débit minimal (0,05 kg/s).

2.5. Influence de la longueur de l'échangeur sur le coefficient de performance (COP)

Le coefficient de performance (COP) représente un indicateur clé de l'efficacité de l'échangeur, car il traduit le rapport entre l'énergie thermique utile restituée et l'énergie dépensée pour son fonctionnement.

L'analyse des figures 10 et 11 met en évidence une augmentation progressive du COP avec la longueur du conduit, atteignant une valeur maximale proche de 17,5 lorsque la longueur atteint 45 mètres.

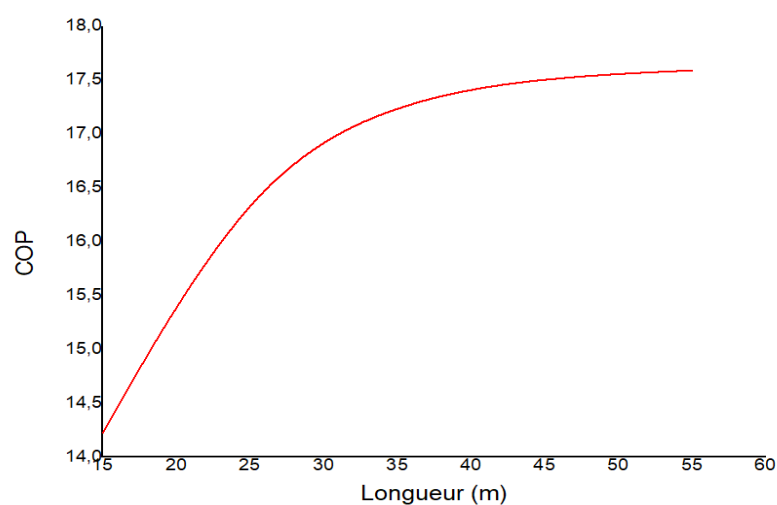


Figure.10: Variation du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pendant le mois de Janvier: T_{ea} minimale.

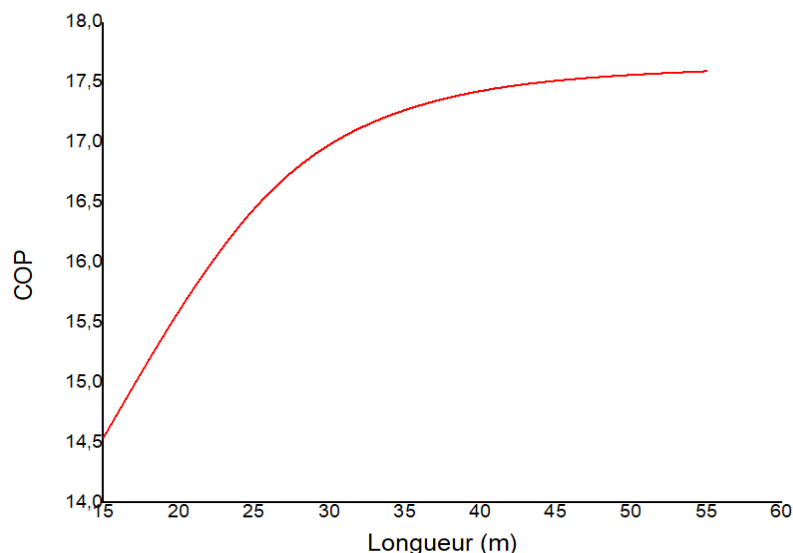


Figure.11: Variation du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pendant le mois de Mars: T_{ea} moyenne.

2.6. Influence du débit d'air sur le coefficient de performance (COP)

L'analyse des figures 12 à 15 met en évidence que le coefficient de performance augmente lorsque la vitesse de l'air diminue, en raison d'un temps de séjour plus long dans l'échangeur. On remarque également que l'utilisation du cuivre comme matériau de la conduite conduit à de meilleures performances par rapport au PVC. Enfin, il convient de noter qu'à grande longueur de tube (45 m dans notre étude), la température de l'air atteint sa valeur maximale ($\approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), ce qui se traduit par un COP maximal d'environ 17,5.

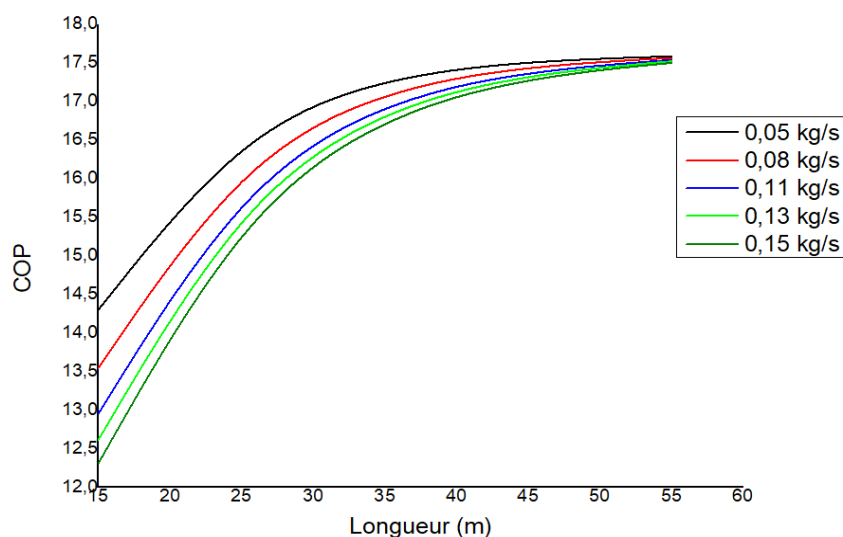


Figure.12: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Décembre: T_{ea} minimale.

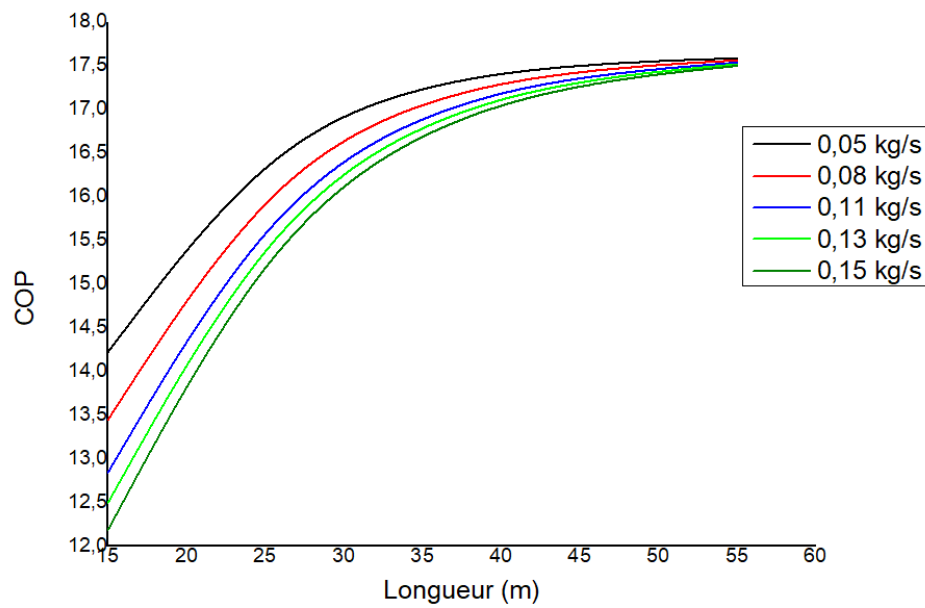


Figure.13: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Janvier: T_{ea} minimale.

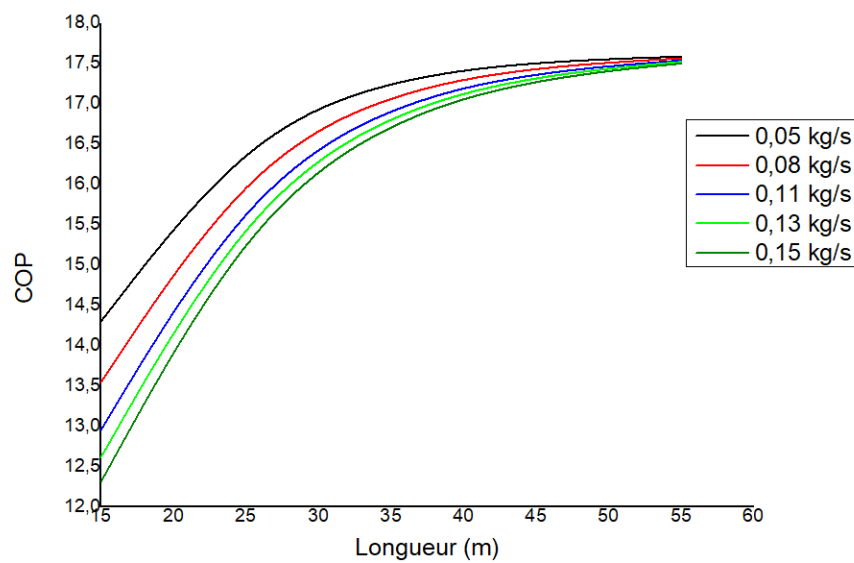


Figure.14: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Février: T_{ea} minimale.

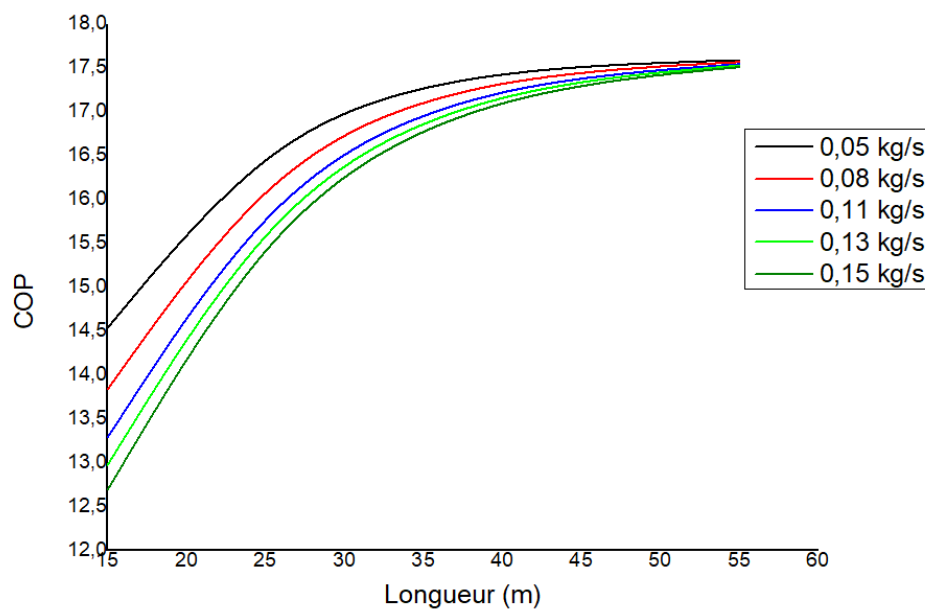


Figure.15: Evolution du coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits pendant le mois de Mars: T_{ea} minimale.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Cas du chauffage

3.1.1. Echangeurs immergés à faisceau tubulaire

3.1.1.1. Influence du débit d'air sur la température

L'analyse de la figure 16 met clairement en évidence qu'une augmentation du débit d'air entraîne une diminution de l'écart de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur. Nous remarquons, en outre, que la multiplication du nombre de tubes apporte une nette amélioration du phénomène de transfert thermique.

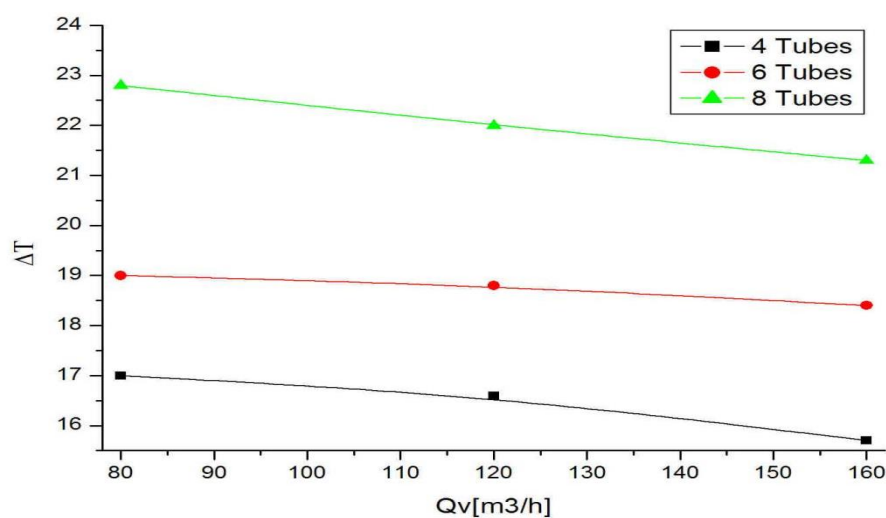


Figure.16: Variation de la différence de température en fonction du débit d'air pour les trois échangeurs.

3.1.1.2. Influence de la longueur sur la température

L'expertise de la figure 17 montre que l'allongement de la longueur de l'échangeur entraîne une nette augmentation proportionnelle de la différence de température.

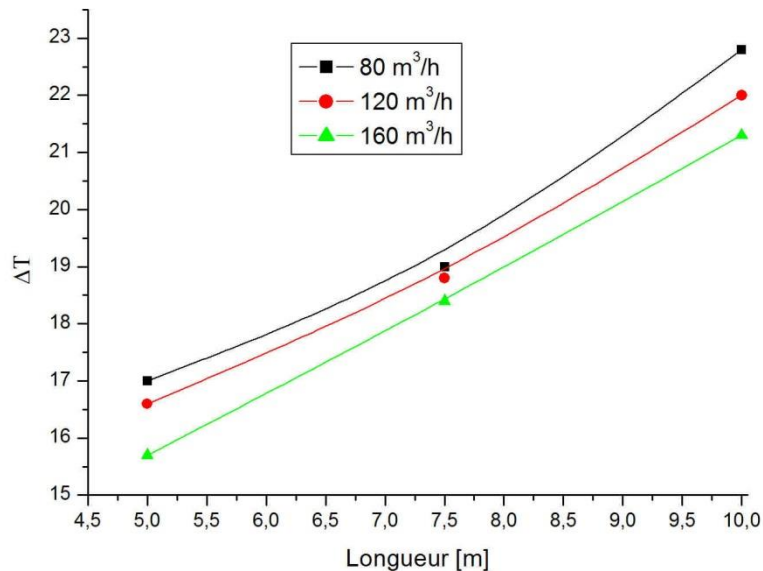


Figure.17: Variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents.

3.1.1.3. Influence du débit d'air sur le COP

Contrairement aux résultats issus des simulations numériques, l'analyse de la courbe de la figure 18 met en évidence que le coefficient de performance (COP) tend à s'accroître avec l'augmentation du débit d'air, et qu'une amélioration notable est observée lorsque le nombre de tubes augmente. Les valeurs du COP enregistrées en phase de chauffage atteignent environ 3,2 ; 3,8 et 4,5 respectivement pour les échangeurs à 4, 6 et 8 tubes, à un débit maximal de 160 m³/h.

L'écart constaté entre les prédictions numériques et les observations expérimentales s'explique par les hypothèses simplificatrices adoptées dans la modélisation. En effet, les modèles théoriques ne prennent pas toujours en compte l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques et thermiques réels qui se manifestent à des débits élevés. L'augmentation du débit d'air accroît la vitesse d'écoulement à l'intérieur des tubes, ce qui améliore le coefficient de convection et favorise un transfert de chaleur plus intense. Bien que la différence de température entre l'air et l'eau tende alors à diminuer en sortie, le débit massique plus élevé compense cette réduction et augmente la puissance thermique totale transférée.

A faible débit, le temps de séjour de l'air est plus long, ce qui accentue les pertes thermiques latérales, alors qu'à débit élevé, ces pertes deviennent proportionnellement moins importantes. Par ailleurs, les corrélations empiriques utilisées pour estimer le coefficient de convection sont souvent limitées et sous-évaluent la dépendance de celui-ci à la vitesse de l'air. Le modèle théorique ne considère pas non plus certains effets secondaires, tels que les microturbulences, le nettoyage dynamique des parois internes des tubes ou encore les variations de puissance du ventilateur. Enfin, sur le plan expérimental, la puissance thermique réellement transférée croît plus rapidement que la consommation électrique nécessaire au fonctionnement, ce qui explique l'augmentation globale du COP observée pour des débits plus élevés.

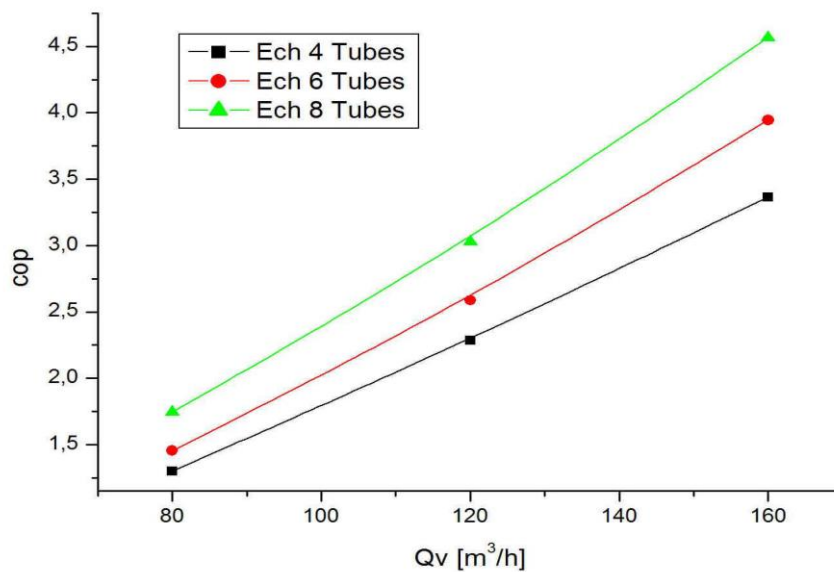


Figure.18: influence du débit d'air sur le COP pour les trois échangeurs.

3.1.2. Echangeur immergé monotube (Vertical Slinky)

3.1.2.1. Effet de la longueur sur la température de l'air

Le graphique 19 illustre l'influence de la longueur de l'échangeur de chaleur sur la température de l'air chauffé. Il apparaît clairement que l'allongement de l'échangeur entraîne une élévation progressive de la température de l'air en sortie. Cette température évolue de manière quasi linéaire avec la longueur du tube et atteint une valeur maximale avoisinant 67 °C pour une longueur de 21,5 m.

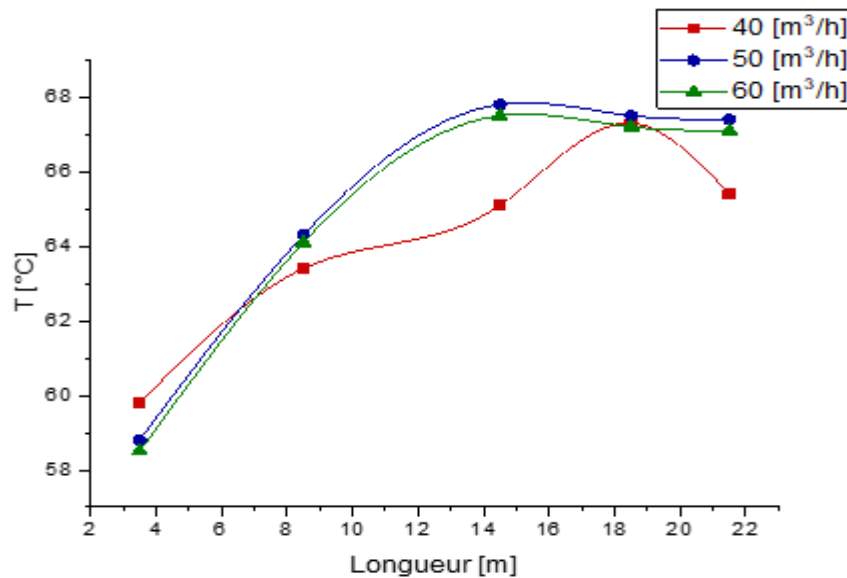


Figure.19: Evolution de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour trois débits d'air différents.

3.1.2.2. Rendement de l'échangeur

Pour ce type d'échangeur, on a opté de calculer à la fois le rendement et le coefficient de performance. Ce choix est basé sur le fait que le rendement seul pourrait donner l'impression qu'un échangeur est très performant thermiquement alors que son COP est mauvais si la consommation des auxiliaires est trop importante. Le COP seul pourrait être élevé dans certaines conditions (faible débit, faible consommation électrique) alors que le rendement thermique est faible, ce qui signifierait que l'échangeur n'exploite pas pleinement le potentiel d'échange. Ensemble, ils permettent d'identifier le point de fonctionnement optimal (compromis entre transfert thermique et consommation énergétique) et de faire une analyse complète: performance intrinsèque (rendement) et performance opérationnelle réelle (COP).

Le rendement de l'échangeur est défini par la relation suivante:

$$\eta = \frac{T_{outlet} - T_{inlet}}{T_{water} - T_{inlet}} [90]$$

L'analyse des courbes des deux figures 20 et 21 qui illustrent respectivement l'influence de la longueur pour trois débits d'air différents ($Q_v = 40, 50$ et $60 \text{ m}^3/\text{h}$) et du débit pour différentes longueurs ($L = 3.5, 8.5, 14.5, 18.5$ et 21.5 m) sur l'efficacité de l'échangeur, montre clairement que celle-ci augmente avec ces deux paramètres jusqu'à un certain point critique avant de commencer par se stabiliser. Cela indique qu'il existe une longueur et un débit optimums ($L \approx 18 \text{ m}$ et $Q_v \approx 50 \text{ m}^3/\text{h}$) où l'efficacité maximale est atteinte avant que toute augmentation supplémentaire n'entraîne une amélioration minime de l'efficacité. Ce comportement traduit la compétition entre l'augmentation de

surface/coefficient convectif et les limitations imposées par la résistance thermique globale et la diminution du différentiel de température utile. Cette synthèse est d'une importance cruciale pour la conception et l'optimisation des performances d'un tel système.

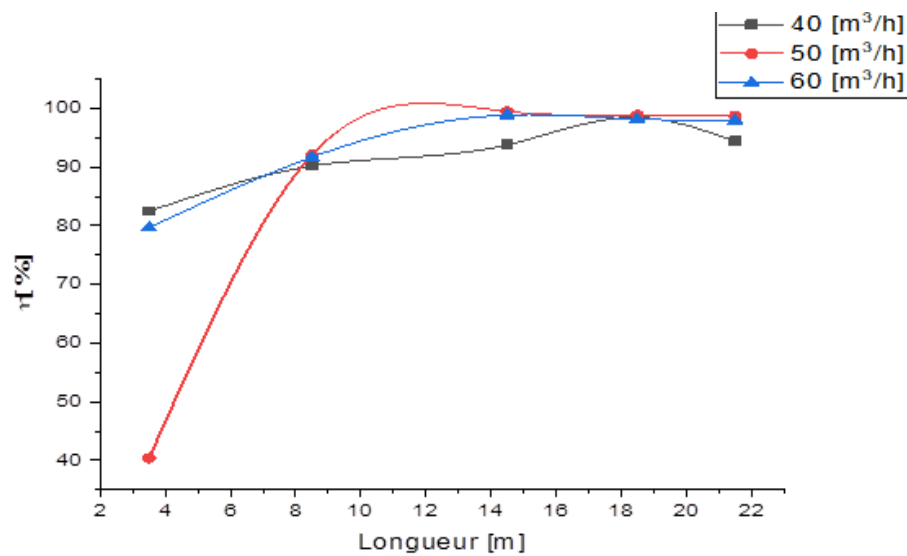


Figure.20: Influence de la longueur sur le rendement de l'échangeur pour trois débits d'air différents.

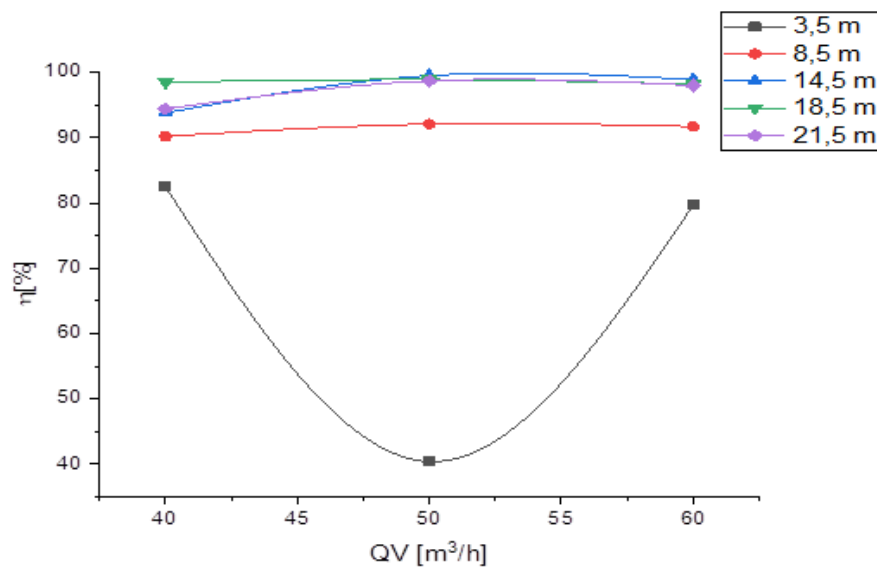


Figure.21: Influence du débit d'air sur le rendement de l'échangeur pour différentes longueurs.

3.1.2.3. Coefficient de performance (COP)

L'analyse des courbes de la figure 22, met en évidence que, pour chacune des cinq longueurs testées ($L = 3.5, 8.5, 14.5, 18.5$ et 21.5 m), le COP augmente avec le débit d'air jusqu'à atteindre un point critique correspondant au COP maximal (27.5), où Q_v ($52.5 \text{ m}^3/\text{h}$) et L (14.5 m) sont optimums. Au-delà de ce débit optimal, l'augmentation supplémentaire du débit n'entraîne qu'une amélioration marginale, en raison de la limitation du transfert thermique par des résistances internes (paroi, interface eau-tube) et de la réduction du temps de séjour de l'air. Ce comportement illustre la présence d'un optimum de fonctionnement, où le compromis entre transfert de chaleur et pertes énergétiques liées à la ventilation est le plus favorable.

La comparaison des résultats obtenus pour le rendement et le COP avec ceux relatifs à l'influence de la longueur et du débit sur la température, pour un échangeur monotube «Vertical Slinky», met en évidence la présence d'un maximum bien marqué. Celui-ci correspond à des conditions optimales, soit une longueur d'environ 18,5 m et un débit proche de $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

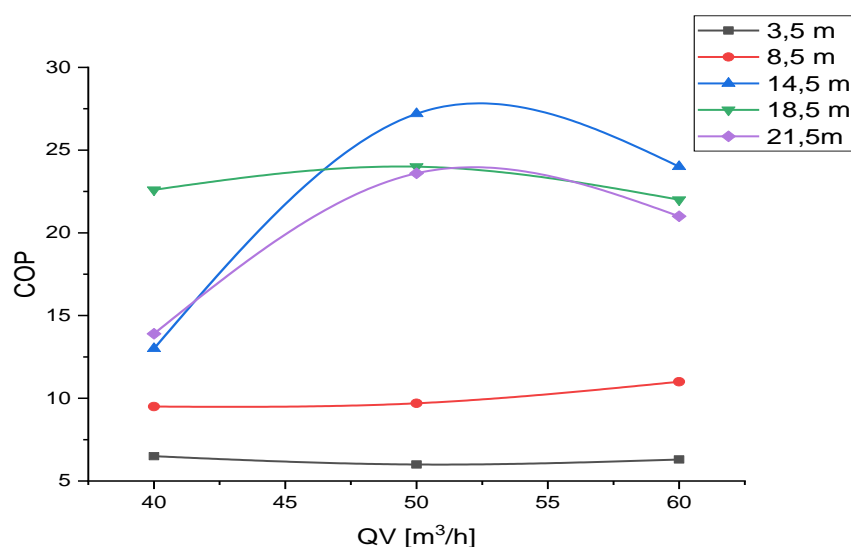


Figure.22: influence du débit sur le COP de l'échangeur.

3.2. Cas du refroidissement (Échangeurs à faisceau tubulaire: Figure 23)

L'analyse comparative des courbes de la figure 18 et celles de la figure 26 représentant respectivement l'effet du débit sur le COP, en modes chauffage et refroidissement, pour trois échangeurs immergés à faisceau tubulaire de longueurs distinctes, montre que les deux régimes présentent une évolution similaire: le COP croît avec l'augmentation du débit d'air. Cette tendance s'explique par l'amélioration du transfert thermique due à une convection forcée plus intense. Néanmoins, pour toutes les longueurs étudiées, les valeurs du COP en chauffage demeurent significativement supérieures à celles

observées en refroidissement, traduisant un rendement globalement plus favorable dans ce mode de fonctionnement.



Figure.23: Echangeur de chaleur à faisceau tubulaire immergé de 8 tubes.

3.2.1. Influence du débit d'air sur la température

L'analyse de la figure 24 met en évidence qu'une augmentation du débit d'air entraîne une diminution de l'écart de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur. Elle montre également qu'une augmentation du nombre de tubes améliore sensiblement l'efficacité du rafraîchissement.

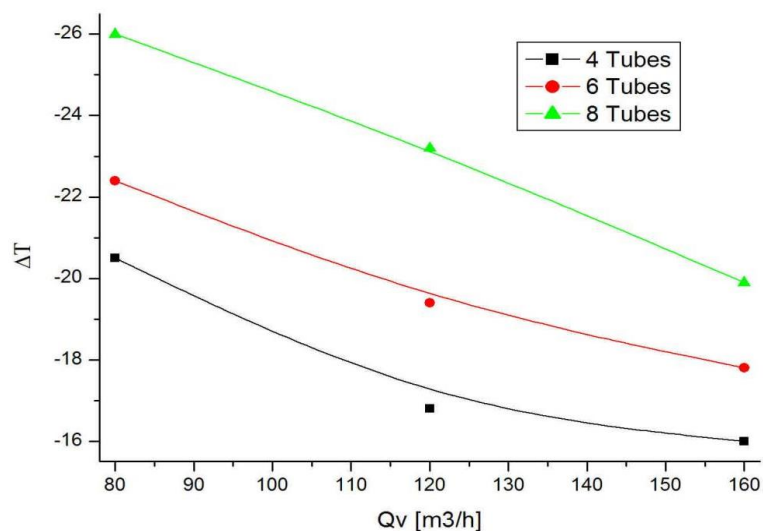


Figure.24: variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour les trois échangeurs.

3.2.2. Influence de la longueur sur la température de l'air

La figure 25 présente l'influence de la longueur de l'échangeur sur la différence de température de l'air chauffé pour divers débits d'air. On constate que plus la longueur de l'échangeur augmente, plus l'écart de température s'élève.

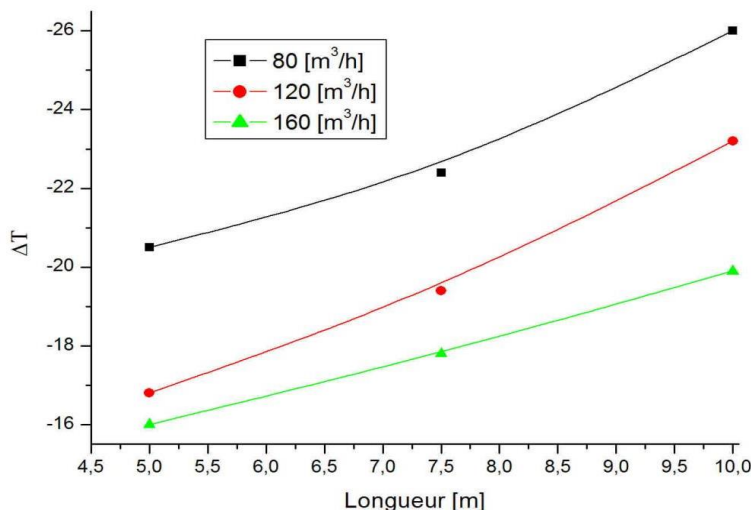


Figure.25: variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents.

On observe, d'après la courbe de la figure 26, que le coefficient de performance (COP) croît avec l'augmentation du débit d'air, et que l'accroissement du nombre de tubes améliore sensiblement les performances globales du système. Les valeurs obtenues du COP pendant la phase de refroidissement sont respectivement de 2,4 ; 2,7 et 3,1 pour les échangeurs à 4, à 6 et à 8 tubes, à un débit maximal de 160 m³/h.

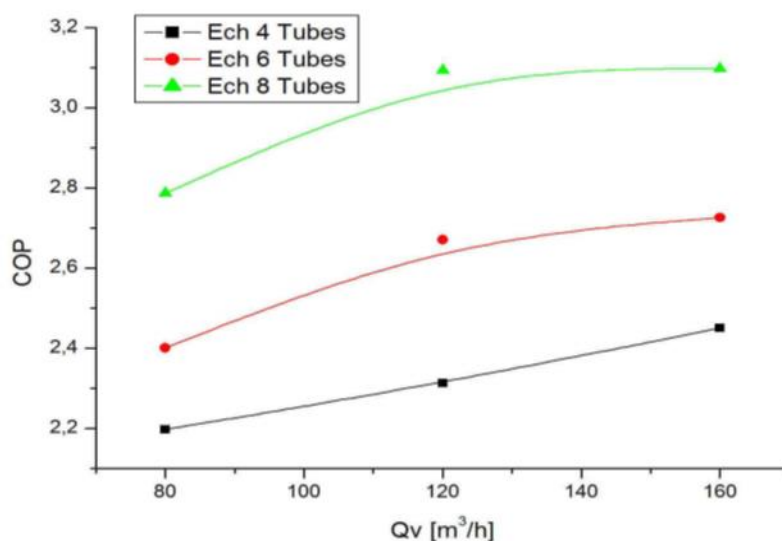


Figure.26: Influence du débit sur le COP pour les trois échangeurs.

4. Calcul d'incertitude

4.1. Introduction

Le calcul d'incertitude réalisé dans cette section permet d'évaluer la précision globale des résultats expérimentaux obtenus sur les deux configurations d'échangeurs étudiées: le modèle à faisceau tubulaire et le modèle monotube de type "Vertical Slinky". Ce calcul repose sur la méthode de propagation quadratique des erreurs, qui quantifie l'influence des incertitudes instrumentales sur les grandeurs calculées telles que la différence de température ΔT et le rendement thermique η .

Les équations employées pour l'évaluation et la propagation des incertitudes expérimentales dans cette étude reposent sur les principes de la théorie classique des erreurs et sur les recommandations du Guide ISO/IEC 98-3 (GUM, 2008) [95]. La méthode de combinaison quadratique des incertitudes élémentaires appliquée aux grandeurs calculées (ΔT , T_{out} , η , etc.) est largement utilisée dans les études expérimentales de transfert thermique. Elle permet de relier les incertitudes des variables mesurées (températures, débits, conductivités, longueurs, etc.) à celles des résultats dérivés, selon l'approche proposée par Holman [96] et Taylor [97]. En complément, les travaux de Moffat [98] et de Coleman & Steele [99] ont servi de référence pour le traitement et la validation des incertitudes globales dans les expériences de thermique et de mécanique des fluides. Ces approches sont reconnues dans la littérature scientifique pour leur rigueur et leur compatibilité avec les protocoles expérimentaux normalisés.

4.2. Instruments de mesure et incertitudes associées

Les dispositifs expérimentaux utilisés pour la mesure des différentes grandeurs sont résumés dans le tableau 1, ci-dessous:

Tableau.1. Instruments de mesure et incertitudes associées

Instrument de mesure	Grandeur mesurée	Précision / incertitude	Remarques
Thermocouples type K	Températures d'entrée, de sortie, et internes (°C)	$\pm 0,01$ °C	Installés à différentes positions selon le modèle
Thermomètre à mercure	Température de l'eau géothermale (°C)	$\pm 0,01$ °C	Haute stabilité de lecture
Anémomètre à fil chaud (Kimo VT300)	Débit volumique (m ³ /h) et vitesse (m/s)	± 3 % de la lecture ± 10 m ³ /h / $\pm 0,1$ m/s	Mesure du flux d'air
Aspirateur (MPF.803, 1000 W)	Pompage et circulation d'air	—	Assure le flux d'air dans le tube
Autotransformateur « Langois » (1500 VA)	Réglage du débit d'air (tension)	± 1 % à ± 3 %	Régulation progressive du flux d'air

4.3. Méthode de propagation des incertitudes

Pour une grandeur $R = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, l'incertitude composée est donnée par:

$$u_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \cdot u_{X_i} \right)^2} \quad (1)$$

et l'incertitude relative correspondante:

$$\frac{u_R}{R} \times 100(\%) \quad (2)$$

4.4. Exemple.1: Echangeur à faisceau tubulaire

a) Données expérimentales (chauffage – période hivernale)

- Température d'entrée de l'air: $T_{in} = 14,0^\circ C$
- Température de sortie : $T_{out} = 31,0^\circ C \rightarrow$ d'après les résultats expérimentaux:

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} = 17,0^\circ C \quad (3)$$

- Température de l'eau géothermale: $T_w = 67,0^\circ C$
- Incertitude sur les mesures de température: $u_T = \pm 0,01^\circ C$

b) Calcul du rendement thermique:

$$\eta = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_w - T_{in}} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{31 - 14}{67 - 14} = \frac{17}{53} = 0,3207$$

c) Propagation des incertitudes:

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_{out}} = \frac{1}{T_w - T_{in}}, \frac{\partial \eta}{\partial T_{in}} = -\frac{T_w - T_{out}}{(T_w - T_{in})^2}, \frac{\partial \eta}{\partial T_w} = -\frac{T_{out} - T_{in}}{(T_w - T_{in})^2} \quad (5)$$

d) Substitution numérique:

$$u_\eta = \sqrt{\left(\frac{1}{53} \times 0,01 \right)^2 + \left(\frac{(67 - 31)}{53^2} \times 0,01 \right)^2 + \left(\frac{17}{53^2} \times 0,01 \right)^2}$$

$$u_\eta \approx 2,4 \times 10^{-4}$$

$$\eta = 0,3207 \Rightarrow \frac{u_\eta}{\eta} = 0,075\%$$

Incetitude relative sur le rendement du faisceau tubulaire: $\pm 0,08\%$.

4.5. Exemple.2: Echangeur monotube type “ Vertical Slinky”

a) Données expérimentales

- Température d'entrée de l'air: $T_{in} = 14,0^\circ C$
- Température de sortie: $T_{out} = 67,0^\circ C$ (pour $L = 21,5$ m)
- Température de l'eau géothermale: $T_w = 68,0^\circ C$
- Rendement expérimental observé (pour $L \approx 18$ m, $Q_v \approx 50$ m³/h) : $\eta = 0,97$

- Incertitude sur la température : $u_T = \pm 0,01^\circ\text{C}$

b) Vérification numérique:

$$\eta = \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}{T_w - T_{\text{in}}} = \frac{67 - 14}{68 - 14} = \frac{53}{54} = 0,981 \approx 98,1\%$$

Ce résultat confirme la cohérence avec la valeur expérimentale de 97 %, compte tenu des incertitudes de mesure.

c) Propagation des incertitudes

$$u_\eta = \sqrt{\left(\frac{1}{54} \times 0,01\right)^2 + \left(\frac{(68 - 67)}{54^2} \times 0,01\right)^2 + \left(\frac{53}{54^2} \times 0,01\right)^2}$$

$$u_\eta \approx 2,2 \times 10^{-4}$$

$$\eta = 0,981 \Rightarrow \frac{u_\eta}{\eta} = 0,022\%$$

Incertitude relative sur le rendement du modèle Vertical Slinky: $\pm 0,02\%$.

4.6. Résumé comparatif des incertitudes

Le tableau 2 montre que les écarts entre les incertitudes des deux modèles demeurent faibles, confirmant la précision et la reproductibilité des mesures expérimentales.

Tableau.2. Ecarts entre les incertitudes des deux modèles

Modèle d'échangeur	Grandeur évaluée	Valeur expérimentale	Incertitude absolue	Incertitude relative
Faisceau tubulaire	Rendement η	0,321	$\pm 0,00024$	$\pm 0,08\%$
Monotube "Vertical Slinky"	Rendement η	0,981	$\pm 0,00022$	$\pm 0,02\%$

4.7. Discussion

Les faibles valeurs d'incertitude obtenues ($\leq \pm 0,1\%$) montrent que les erreurs instrumentales ont une influence négligeable sur la fiabilité des résultats expérimentaux. Le principal facteur d'incertitude provient du contrôle du débit d'air via l'autotransformateur et des fluctuations du signal de l'anémomètre à fil chaud. Toutefois, la stabilité thermique de l'eau géothermale et la répétabilité des mesures de température assurent une excellente cohérence des données. Ces résultats confirment la robustesse expérimentale des deux systèmes étudiés et la validité scientifique des conclusions tirées sur leurs performances thermiques.

5. Etude technico-économique comparative du rafraîchissement d'une habitation (160 m²) à Biskra par WAHE à faisceau tubulaire

5.1. Introduction

La région de Biskra, située au nord du Sahara algérien, se distingue par un climat aride et particulièrement chaud durant la saison estivale. Entre la mi-Mai et la mi-Septembre, les températures dépassent fréquemment les 45 °C à l'ombre, rendant le recours à des systèmes de rafraîchissement indispensable pour assurer le confort thermique des habitations.

Traditionnellement, ce besoin est satisfait par l'utilisation de climatiseurs électriques. Bien que performants, ces dispositifs présentent deux inconvénients majeurs: une forte consommation énergétique et un coût d'exploitation élevé, aggravés par la demande accrue en période de pointe.

Dans cette optique, l'exploitation des ressources naturelles locales, notamment la géothermie de faible enthalpie, apparaît comme une alternative prometteuse. La région de Biskra bénéficie de la présence de nombreux forages artésiens dont l'eau présente une température quasi constante d'environ 18,5 °C tout au long de l'année. Cette ressource représente une opportunité énergétique durable, susceptible de réduire considérablement la dépendance aux systèmes électriques conventionnels.

L'étude qui suit vise à évaluer la faisabilité technico-économique de l'utilisation d'un échangeur air-eau géothermique à faisceau tubulaire (WAHE) pour le rafraîchissement d'une habitation de 160 m², et à la comparer à l'option classique des climatiseurs électriques.

5.2. Hypothèses de calcul

Afin d'assurer la cohérence des comparaisons, les hypothèses suivantes ont été adoptées pour les simulations et les estimations économiques:

- Surface de l'habitation: 160 m²
- Température extérieure moyenne en été: 45 °C
- Température intérieure de confort: 27 °C
- Température de l'eau géothermique: 18,5 °C
- Dimensions du bassin: 2,5 m × 1,75 m × 2 m
- Échangeur à faisceau tubulaire: tubes en PVC de 0,05 m de diamètre et de 100 m de longueur totale, disposés verticalement dans le bassin
- Ventilateur: puissance nominale 0,25 kW

- Cas de référence: trois climatiseurs électriques ($2 \times 18000 \text{ BTU} = 5,3 \text{ kW}$ et $1 \times 12000 \text{ BTU} = 3,5 \text{ kW}$, soit une puissance totale de $8,8 \text{ kW}$)
- Durée de fonctionnement estimé: 10 h/jour pendant 120 jours , soit environ 1200 heures par saison

Ces hypothèses permettent d'établir une base réaliste de comparaison entre le système géothermique (WAHE) et le système de climatisation classique, aussi bien en termes de performances thermiques que de coûts de fonctionnement.

5.3. Méthodes de calcul et fondements théoriques

L'évaluation des performances énergétiques du système étudié repose sur les équations fondamentales du transfert de chaleur et du calcul de la puissance sensible. Ces relations permettent de quantifier les échanges thermiques entre l'air et le fluide géothermique, ainsi que d'estimer les coûts énergétiques associés à l'exploitation du dispositif.

La différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur souhaité est exprimée par:

$$\Delta T = T_{ext} - T_{int} \quad (6)$$

La puissance sensible du système est calculée selon:

$$Q_s = \dot{m}_{air} \times C_{p,air} \times \Delta T \quad (7)$$

où le débit massique d'air est donné par:

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \times \dot{V} \quad (8)$$

Le coût horaire d'exploitation est ensuite estimé en fonction de la puissance électrique consommée:

$$C_h = P_{tot} \times Tarifs \quad (9)$$

Enfin, l'efficacité globale de l'échangeur est déterminée par:

$$\varepsilon = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{eau}} \quad (10)$$

Les équations employées pour le calcul des grandeurs thermiques et énergétiques du système géothermique reposent sur les principes fondamentaux du transfert de chaleur et de la thermodynamique appliquée. Ces formulations, largement reconnues dans la littérature scientifique, s'appuient sur les travaux de Coleman et Steele [99], Incropera et al. [100], Çengel et Ghajar [101] et Bejan [102], qui détaillent les bilans énergétiques des échanges convectifs air-eau et les expressions de la puissance sensible.

Les relations adoptées pour la détermination du débit massique d'air, de la puissance utile transférée et de l'efficacité globale de l'échangeur sont conformes aux approches analytiques classiques issues de ces références, assurant ainsi la rigueur expérimentale et la validité physique des résultats.

Enfin, l'évaluation du coût horaire d'exploitation repose sur les tarifs officiels de la Sonelgaz [103], garantissant la cohérence économique des comparaisons effectuées dans cette étude.

Afin d'illustrer la performance énergétique et économique du système géothermique à faisceau tubulaire comparée à celle des climatiseurs électriques conventionnels, le tableau 3 présente une synthèse des résultats obtenus pour différents scénarios de fonctionnement du WAHE.

Tableau.3. Bilan comparatif WAHE–climatiseurs électriques

Scénario	ε	\dot{V} (m ³ /s)	ΔT (°C)	Q_s (kW)	Coût horaire (DA/h)
WAHE S1	0,65	0,75	6	5,5	5
WAHE S2	0,72	0,85	7	6,8	6
WAHE S3	0,80	1,00	8	8,1	7
Climatiseurs électriques	-	-	18	8,8	158

Ces résultats mettent clairement en évidence que, pour un débit d'air modéré ($\approx 0,85$ m³/s), le WAHE offre une puissance sensible de 6 à 8 kW, soit des valeurs proches de celles fournies par les climatiseurs électriques, mais avec une consommation électrique jusqu'à 30 fois inférieure.

Les figures 27 à 30 illustrent successivement:

- le schéma de principe du système (Figure 27);
- l'évolution du ΔT selon les scénarios (Figure 28);
- la puissance sensible délivrée (Figure 29);
- et le coût horaire de fonctionnement (Figure 30).

L'analyse de ces courbes montre que l'augmentation du débit d'air favorise un meilleur abaissement de température. De plus, le coût horaire du WAHE reste inférieur à 10 DA/h, contre 158 DA/h pour les climatiseurs. Ces différences traduisent l'intérêt énergétique et économique du système géothermique étudié.

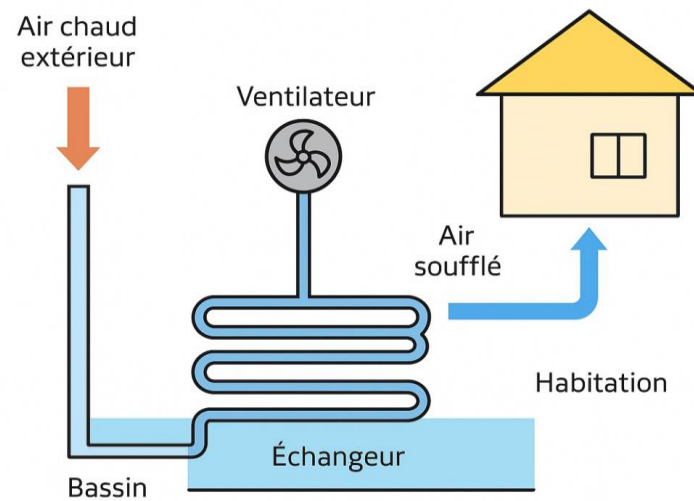


Figure.27: Schéma de principe du système géothermique à faisceau tubulaire eau-air (immersion verticale).

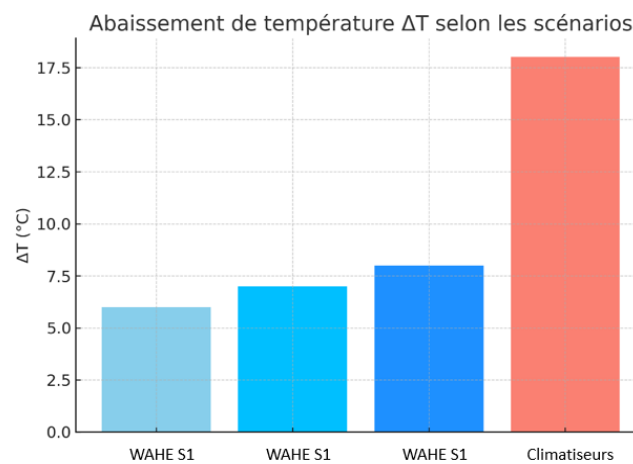


Figure.28: Abaissement de température ΔT pour chaque scénario.

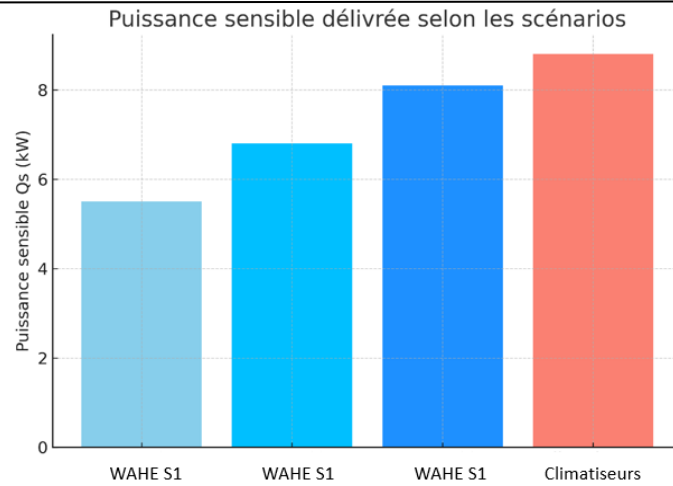


Figure.29: Puissance sensible délivrée Q_s selon les scénarios.

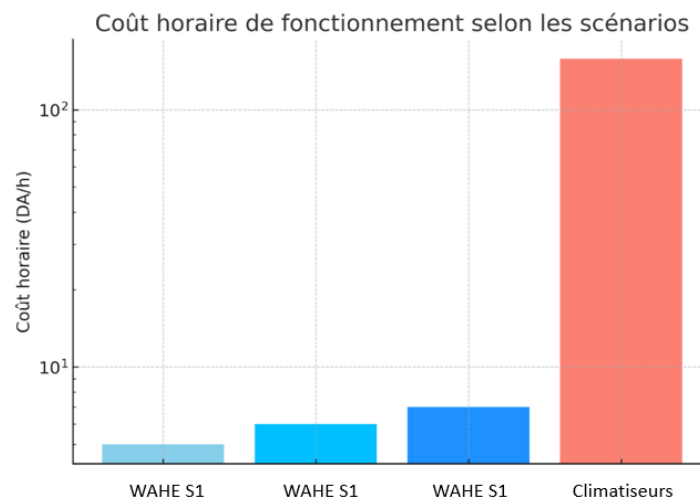


Figure.30: Coût horaire de fonctionnement (échelle logarithmique) pour chaque scénario.

5.3.1. Modèle du système géothermique, consommation énergétique et analyse économique

5.3.1.1. Modèle conceptuel du système

Le système WAHE repose sur un échangeur à faisceau tubulaire immergé dans une eau géothermique à température stable ($\approx 18,5$ °C). L'air chaud extérieur, aspiré à environ 45 °C, traverse un conduit au contact des tubes froids, entraînant un transfert de chaleur par convection entre l'air et l'eau.

Le modèle suppose un régime permanent, un écoulement d'air uniforme et une efficacité globale ε reflétant les pertes thermiques et les résistances de transfert. La ressource géothermique, issue d'un forage artésien, est considérée comme quasi inépuisable à l'échelle du fonctionnement saisonnier.

5.3.1.2. Consommation énergétique du système WAHE

Le seul consommateur électrique du système est le ventilateur, dont la puissance est de 0,25 kW. Sur une période de fonctionnement de 1200 h par saison, la consommation totale est:

$$E_{WAHE} = P_{vent} \times t = 0,25 \text{ kW} \times 1200 \text{ h} = 300 \text{ kWh}$$

En considérant un tarif résidentiel moyen de 5 DA/kWh [103], le coût saisonnier s'élève à:

$$C_{WAHE} = 300 \text{ kWh} \times 5 \text{ DA/kWh} = 1500 \text{ DA/saison}$$

5.3.1.3. Consommation énergétique des climatiseurs électriques

Pour comparaison, trois climatiseurs électriques ($2 \times 18000 \text{ BTU} = 5,3 \text{ kW} + 1 \times 12000 \text{ BTU} = 3,5 \text{ kW}$, soit $P_{tot} = 8,8 \text{ kW}$) fonctionnent dans les mêmes conditions temporelles.

L'énergie consommée est:

$$E_{Clim} = 8,8 \text{ kW} \times 1200 \text{ h} = 10\,560 \text{ kWh}$$

Le coût correspondant est:

$$C_{Clim} = 10\,560 \text{ kWh} \times 5 \text{ DA/kWh} = 52\,800 \text{ DA/saison}$$

5.3.1.4. Analyse économique comparative

La comparaison directe entre les deux systèmes étudiés met clairement en évidence l'avantage économique du dispositif géothermique. En effet, le système WAHE à faisceau tubulaire ne consomme que 300 kWh par saison, contre 10 560 kWh pour les climatiseurs électriques traditionnels. Si l'on considère un tarif résidentiel moyen de 5 DA/kWh, le coût d'exploitation saisonnier du WAHE est estimé à 1500 DA, alors que celui des climatiseurs atteint 52 800 DA.

$$\begin{aligned} E_{WAHE} &= 0,25 \times 1200 = 300 \text{ kWh} \\ E_{Clim} &= 8,8 \times 1200 = 10\,560 \text{ kWh} \\ \Delta C &= 52\,800 - 1\,500 = 51\,300 \text{ DA/saison} \end{aligned}$$

L'économie réalisée s'élève donc à 51 300 DA par saison estivale, ce qui correspond à une réduction d'environ 97 % de la facture énergétique. Autrement dit, pour chaque dinar dépensé par le système géothermique, les climatiseurs nécessitent plus de trente fois cette somme pour assurer un service équivalent de confort thermique.

Sur le plan environnemental, cette économie d'énergie se traduit par une réduction de plus de 10 000 kWh par saison, ce qui correspond à une diminution importante des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité en Algérie, encore majoritairement issue du gaz naturel. Le système WAHE s'impose ainsi non seulement comme une solution économiquement avantageuse, mais également comme une technologie durable et écologiquement responsable, adaptée aux zones à fort ensoleillement et à climat extrême comme celle de Biskra.

La Figure 31 illustre la comparaison de la consommation énergétique saisonnière entre les deux systèmes. On y observe que le WAHE, avec seulement 300 kWh/saison, consomme environ 35 fois moins d'énergie que les climatiseurs électriques de référence (10560 kWh/saison). Cette représentation graphique met en évidence, d'un seul coup d'œil, l'ordre de grandeur des économies d'énergie permises par la solution géothermique.

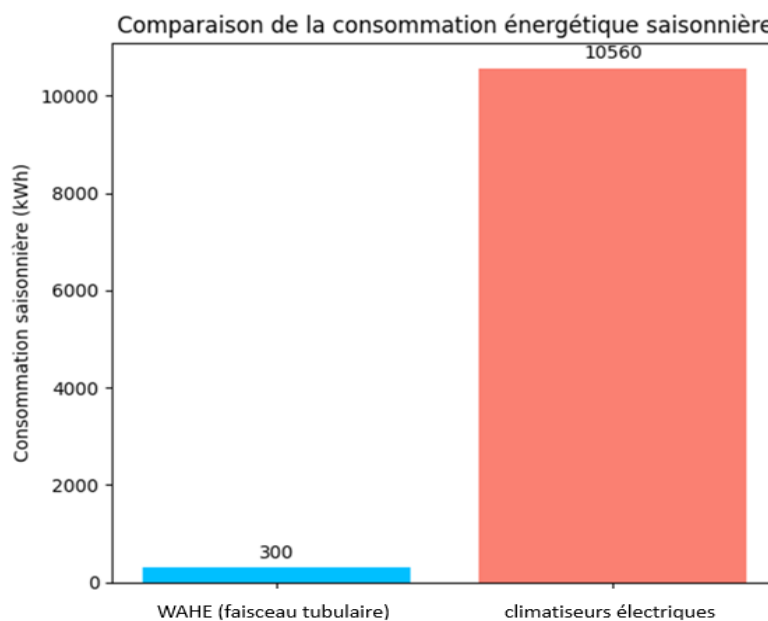


Figure.31: Comparaison de la consommation énergétique saisonnière. (WAHE vs climatiseurs).

De même, la Figure 32 met en parallèle les coûts saisonniers opérationnels (en DA/saison). Le contraste est saisissant: alors que le fonctionnement des climatiseurs nécessite plus de 52 800 DA chaque Eté, celui du WAHE ne dépasse pas 1500 DA. Ce graphique illustre visuellement la supériorité économique du système géothermique, qui offre un confort thermique équivalent pour une dépense énergétique et financière presque négligeable.

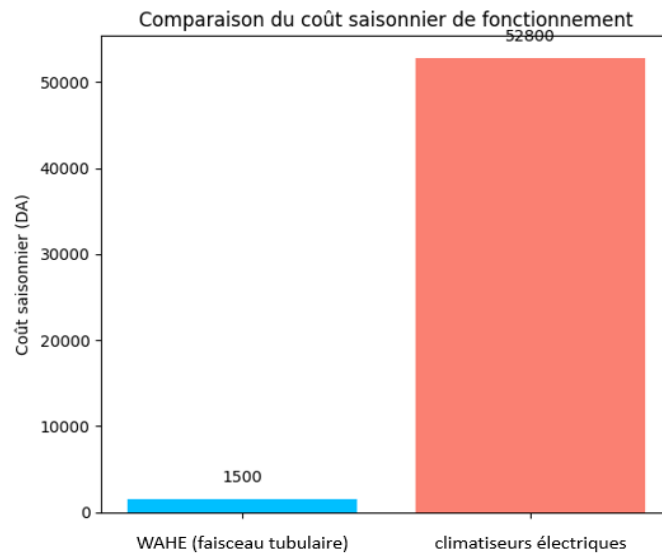


Figure.32: Comparaison du coût saisonnier de fonctionnement (WAHE vs climatiseurs).

En conclusion, l'analyse économique comparative met en lumière la pertinence technico-économique du WAHE à faisceau tubulaire pour le rafraîchissement des habitations sahariennes. Sa sobriété énergétique, son faible coût d'exploitation et sa compatibilité avec les ressources géothermiques locales en font une solution prometteuse pour la transition énergétique des régions arides.

5.3.1.5. Discussion

L'analyse globale met en évidence l'avantage considérable du système WAHE à faisceau tubulaire par rapport aux climatiseurs électriques conventionnels. En termes de consommation énergétique, le rapport est de 1 à 35, tandis que du point de vue économique, les économies annuelles dépassent les 50 000 DA pour une habitation moyenne.

Ces résultats démontrent que le recours à la géothermie de faible enthalpie représente une solution compétitive, durable et parfaitement adaptée au contexte saharien. Cependant, la performance réelle du système dépend de plusieurs facteurs: la conception du faisceau, la qualité de l'installation, le contrôle du débit d'air et la constance de la ressource géothermique.

5.4. Recommandations de mise en œuvre du système WAHE à faisceau tubulaire

5.4.1. Dimensionnement, intégration et maintenance du système

Le bon fonctionnement d'un échangeur eau-air à faisceau tubulaire (WAHE) repose avant tout sur un dimensionnement adéquat et une intégration judicieuse dans l'habitation. Ces deux aspects conditionnent directement la performance thermique, la fiabilité et la durabilité du système.

Sur le plan du dimensionnement, le choix des matériaux et des configurations géométriques est essentiel. Le PVC (polychlorure de vinyle) est privilégié pour la fabrication des tubes en raison de sa résistance à la corrosion, de son faible coût, de sa légèreté et de sa large disponibilité sur le marché local. Les essais réalisés ont montré qu'un diamètre extérieur de 32 à 40 mm, une épaisseur de 2 à 3 mm et une longueur unitaire de 2 m par tube constituent un compromis optimal entre résistance mécanique et efficacité thermique. L'ensemble des tubes est disposé verticalement dans un bassin d'environ 2 m de profondeur, assurant une immersion totale et stable du faisceau.

Le nombre total de tubes dépend du débit d'air à traiter pour atteindre la température de confort intérieur. Pour une habitation de 160 m² à Biskra, un faisceau de 100 à 120 tubes permet de garantir une surface d'échange suffisante tout en maîtrisant les coûts d'installation. Le bassin géothermique doit être dimensionné pour accueillir ce faisceau (par exemple 2,5 m × 1,75 m × 2 m) et alimenté en continu par l'eau géothermique de la nappe albienne, dont la température moyenne avoisine 18,5 °C.

Le ventilateur joue un rôle clé dans le maintien du confort intérieur. Un extracteur centrifuge ou hélicoïdal d'une puissance modérée (≈ 250 W) est recommandé afin de garantir un débit d'air suffisant tout en limitant la consommation électrique. Son intégration dans un local technique isolé permet de réduire les pertes thermiques et les nuisances sonores.

Concernant l'intégration dans l'habitation, la distribution de l'air rafraîchi doit être assurée par des conduits isolés desservant les principales pièces. Un système de by-pass est conseillé pour permettre l'entrée directe de l'air extérieur lorsque les conditions climatiques le permettent (nuit, mi-saison). L'ensemble doit être conçu pour faciliter la maintenance et garantir une efficacité énergétique optimale.

La maintenance du WAHE constitue un aspect important de sa pérennité. Un nettoyage périodique du bassin est nécessaire pour éviter l'accumulation de sédiments ou de dépôts organiques. Les tubes doivent être inspectés régulièrement afin de vérifier leur étanchéité et l'absence de colmatage. De même, le ventilateur doit faire l'objet d'un entretien préventif pour maintenir son rendement et prolonger sa durée de vie. Enfin, un suivi régulier des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur permet d'ajuster le débit d'air en fonction des besoins réels et des conditions extérieures.

5.4.2. Contraintes locales et adaptation saharienne

L'implantation du WAHE dans un environnement saharien tel que celui de Biskra requiert certaines précautions d'adaptation. Le rayonnement solaire intense et les températures estivales élevées imposent de protéger le bassin contre l'ensoleillement direct, afin de limiter le réchauffement de l'eau de surface. Un abri ou une couverture flottante légère peut remplir cette fonction sans entraver les échanges thermiques.

La gestion de la ressource géothermique doit être raisonnée, notamment lorsque la même eau est utilisée pour l'irrigation des palmeraies. L'approche la plus durable consiste à recourir à un circuit ouvert avec récupération, où l'eau est rejetée après usage vers des bassins d'irrigation ou d'évaporation.

Sur le plan électrique, il est recommandé de sécuriser le fonctionnement du ventilateur contre les microcoupures fréquentes du réseau saharien. L'utilisation de batteries tampons ou de petits modules photovoltaïques peut assurer une alimentation de secours, garantissant ainsi la continuité du rafraîchissement même en cas de défaillance du réseau.

5.4.3. Perspectives de mise en œuvre à grande échelle

A l'échelle résidentielle, la généralisation du WAHE dans la région de Biskra représente une perspective prometteuse. Ce système permettrait de réduire significativement la demande électrique estivale de pointe, contribuant ainsi à la stabilité du réseau Sonelgaz. Les ménages bénéficieraient d'une réduction notable de leurs dépenses énergétiques, renforçant leur pouvoir d'achat et leur autonomie énergétique.

Sur un plan plus global, le développement du WAHE s'inscrit dans la stratégie nationale de transition énergétique. En valorisant une ressource géothermique locale, abondante et renouvelable, il favorise un modèle de climatisation durable et écologique, parfaitement adapté aux conditions climatiques sahariennes.

5.5. Sensibilités, limites et portée opérationnelle du système WAHE

5.5.1. Sensibilités techniques et économiques

La performance du WAHE à faisceau tubulaire est influencée par plusieurs paramètres techniques. La température de l'eau géothermique, bien que relativement stable autour de 18,5 °C, peut varier en fonction de la profondeur du puits ou d'un éventuel mélange avec des eaux superficielles plus chaudes. Une augmentation de quelques degrés réduit sensiblement le gradient thermique entre l'air et l'eau, et donc l'efficacité du transfert.

Le débit d'air est un autre facteur crucial: un débit insuffisant entraîne un faible brassage et limite la puissance de rafraîchissement, tandis qu'un débit excessif réduit le temps de contact entre l'air et les parois des tubes, diminuant le rendement thermique global. De même, la disposition géométrique du faisceau tubulaire (espacement, densité, immersion) influence directement la surface d'échange disponible.

Sur le plan économique, la viabilité du WAHE dépend du tarif de l'électricité appliqué par Sonelgaz. Une augmentation du prix de l'énergie renforcerait encore l'intérêt du système géothermique. Le coût d'installation initial (principalement celui du bassin et des tubes en PVC) reste modéré comparé aux systèmes de climatisation conventionnels, mais il doit être anticipé dès la conception du projet. Enfin, la durée de la saison chaude joue un rôle déterminant dans la rentabilité: plus la période estivale est longue, plus le système s'amortit rapidement.

5.5.2. Limites pratiques, scientifiques et méthodologiques

Malgré ses atouts, le WAHE présente certaines contraintes d'application. Il dépend directement de la présence d'une ressource géothermique accessible, condition nécessaire mais non universelle. De plus, la réalisation d'un bassin dédié exige un espace minimal, ce qui peut limiter l'installation dans les parcelles urbaines restreintes.

L'eau géothermique de la nappe albiennaise contient parfois des dépôts minéraux (sels, fer, etc.) susceptibles d'encrasser partiellement les tubes. Une maintenance préventive devient alors essentielle. Par ailleurs, le système ne permet pas une régulation fine de la température pièce par pièce, contrairement aux climatiseurs modernes, ce qui limite le confort individuel mais reste acceptable dans une logique de rafraîchissement global et écologique.

D'un point de vue scientifique, les modèles semi-analytiques utilisés reposent sur certaines hypothèses simplificatrices (régime permanent, homogénéité du fluide, absence de pertes latérales). Ces approximations peuvent engendrer de légères divergences entre les prédictions et les mesures expérimentales. De plus, les données climatiques utilisées proviennent de moyennes saisonnières: des pics extrêmes de température pourraient altérer

ponctuellement les performances. Enfin, l'analyse économique actuelle se concentre sur les coûts d'exploitation saisonniers et ne tient pas encore compte de l'investissement initial.

6. Analyse technico-économique intégrée

6.1. Introduction

L'analyse technico-économique intégrée vise à relier les performances énergétiques et exergétiques mesurées expérimentalement aux coûts réels d'installation, d'exploitation et de maintenance.

Elle constitue une étape essentielle pour apprécier la faisabilité et la rentabilité globale des systèmes géothermiques innovants étudiés, notamment les deux configurations de WAHE à faisceau tubulaire et WAHE monotube Vertical Slinky.

L'objectif principal est de déterminer, à partir des résultats énergétiques et exergétiques expérimentaux, la configuration offrant le meilleur compromis entre efficacité thermodynamique, coût d'exploitation et retour sur investissement.

6.2. Coût global du système géothermique

Le coût total d'un système géothermique s'exprime par la relation suivante :

$$C_{total} = C_{investissement} + C_{exploitation} + C_{maintenance} \quad (11)$$

où:

- $C_{investissement}$: coût initial (forage, échangeur, pompes, installation);
- $C_{exploitation}$: coût annuel d'électricité pour la circulation des fluides et les auxiliaires;
- $C_{maintenance}$: frais d'entretien périodique.

Cette formulation permet une évaluation complète du coût du cycle de vie du système.

6.3. Coût exergétique unitaire

Le coût exergétique unitaire de l'énergie utile produite est défini par:

$$C_{ex} = \frac{C_{total}}{\dot{E}_{x,utile} \times t_{fonctionnement}} \quad (12)$$

avec:

- $\dot{E}_{x,utile}$: exergie utile moyenne fournie (W);
- $t_{fonctionnement}$: durée annuelle de fonctionnement (h/an).

Ce paramètre traduit le coût réel associé à la production d'exergie utile, permettant une comparaison directe entre les deux configurations.

6.4. Rendement économique exergetique

L'efficacité économique du système, intégrant la performance exergetique, peut être exprimée sous la forme:

$$\eta_{eco-ex} = \frac{\dot{E}_{x,utile}}{C_{total}} \quad (13)$$

Cette grandeur relie la performance thermodynamique à l'investissement économique. Plus sa valeur est élevée, plus le système exploite efficacement les ressources financières pour produire de l'exergie utile.

6.5. Coût unitaire du kWh exergetique utile

Le coût du kilowattheure exergetique utile s'évalue selon:

$$C_{kWh,ex} = \frac{C_{total}}{E_{x,utile,annuelle}} \quad (14)$$

avec:

$$E_{x,utile,annuelle} = \dot{E}_{x,utile} \times t_{fonctionnement,annuel} \quad (15)$$

Cet indicateur (en DA/kWh) permet d'apprécier la compétitivité économique du système géothermique par rapport aux systèmes conventionnels de climatisation électrique, souvent plus coûteux en énergie.

6.6. Période de retour sur investissement (PRI)

La période de retour sur investissement (Payback Period) est déterminée par:

$$PRI = \frac{C_{investissement}}{E_{x,utile,annuelle} \times P_{enr}} \quad (16)$$

où P_{enr} est le prix du kWh d'énergie substituée (électricité du réseau ou autre source conventionnelle).

Une valeur faible de PRI traduit un amortissement rapide de l'investissement initial.

6.7. Interprétation comparative

L'application des équations (11) à (16) aux résultats expérimentaux conduit aux constats suivants:

- L'échangeur à faisceau tubulaire présente une bonne efficacité thermique, mais un coût d'installation plus élevé dû à sa structure plus complexe.
- Le système Vertical Slinky, en revanche, bénéficie d'un coût initial réduit et de pertes hydrauliques moindres, ce qui améliore son rendement exergetique global.
- En termes de coût exergetique unitaire, le Vertical Slinky se montre plus performant, traduisant une meilleure rentabilité sur le cycle de vie du système.

Ainsi, la configuration monotube Vertical Slinky se distingue comme la solution la plus adaptée au contexte climatique semi-aride de Biskra, conciliant simplicité de mise en œuvre et performance énergétique durable.

En conclusion, l'intégration de la dimension exergétique dans l'analyse technico-économique permet une évaluation plus complète et réaliste de la performance globale des systèmes géothermiques.

L'approche exergétique, en associant la qualité de l'énergie à son coût réel, montre clairement que le WAHE de type Vertical Slinky offre un équilibre optimal entre efficacité, durabilité et viabilité économique, confirmant son potentiel pour le rafraîchissement et le chauffage des bâtiments en climat chaud et sec.

7. Conclusion

L'ensemble des analyses expérimentales, énergétiques, exergétiques et technico-économiques menées dans ce chapitre permet de dégager une vision complète et intégrée de la performance du système géothermique WAHE sous le climat chaud et sec de Biskra.

Les résultats montrent que les deux configurations étudiées — le faisceau tubulaire et le monotube Vertical Slinky — assurent une amélioration notable du confort thermique intérieur tout en réduisant considérablement la consommation d'énergie conventionnelle.

Le système à faisceau tubulaire se distingue par sa capacité d'échange thermique élevée et sa stabilité opérationnelle, tandis que le modèle Vertical Slinky présente une conception plus simple, un coût d'installation plus faible et une efficacité exergétique supérieure, confirmant ainsi son aptitude à une utilisation domestique à grande échelle.

L'évaluation technico-économique intégrée met en évidence la rentabilité à long terme du WAHE comparativement aux climatiseurs électriques, avec des économies d'énergie supérieures à 90 % et une réduction substantielle des émissions de CO₂. Ces performances traduisent la pertinence du recours à la géothermie de faible profondeur comme solution durable pour le rafraîchissement passif des bâtiments sahariens.

En somme, les résultats obtenus démontrent que le WAHE représente non seulement une alternative viable aux systèmes de climatisation conventionnels, mais également un levier stratégique pour la mise en œuvre d'une politique énergétique locale fondée sur la sobriété, la valorisation des ressources naturelles et la durabilité environnementale.

Cette étude ouvre enfin la voie à des perspectives d'optimisation du dimensionnement et d'intégration hybride avec d'autres sources renouvelables (solaire thermique ou photovoltaïque), afin d'accroître encore l'autonomie énergétique des bâtiments dans les régions arides.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources fossiles, la volatilité des marchés énergétiques et l'urgence climatique, la transition vers des systèmes énergétiques durables constitue aujourd'hui un impératif stratégique. L'Algérie, dont le modèle énergétique reste dominé par les hydrocarbures, se trouve confrontée à la nécessité de diversifier ses sources d'énergie tout en garantissant la sécurité de son approvisionnement. Parmi les ressources renouvelables disponibles, la géothermie de faible profondeur se distingue comme une solution prometteuse, particulièrement adaptée aux conditions climatiques des régions sahariennes où les besoins en confort thermique sont élevés.

La présente recherche s'inscrit dans cette perspective et vise à évaluer la faisabilité technico-économique de systèmes éco-énergétiques innovants basés sur la géothermie, appliqués au cas de la nappe albiennne dans la région de Biskra. L'étude a porté sur la conception, la modélisation et l'expérimentation de deux configurations d'échangeurs air-eau géothermiques (WAHE) destinés au rafraîchissement passif des habitations : un modèle à faisceau tubulaire et un modèle monotube de type *Vertical Slinky*. L'approche adoptée combine la modélisation semi-analytique, développée sous MATLAB, et une validation expérimentale sur site, permettant d'évaluer de manière intégrée les performances thermiques, exergétiques et économiques des systèmes proposés.

Les résultats obtenus ont montré que les deux configurations assurent une amélioration notable du confort thermique intérieur tout en réduisant significativement la consommation d'énergie conventionnelle. Le système à faisceau tubulaire présente une performance thermique élevée et une stabilité opérationnelle remarquable, tandis que le modèle *Vertical Slinky* se distingue par une conception simple, un coût d'installation réduit et une efficacité exergétique supérieure, le rendant particulièrement adapté aux applications domestiques. L'analyse technico-économique intégrée a confirmé la rentabilité à long terme de ces solutions, avec une

Conclusion générale

réduction de plus de 90 % de la consommation électrique par rapport aux climatiseurs classiques, soit près de 10 tonnes de CO₂ évitées par saison pour une seule habitation à Biskra. Ces résultats démontrent le potentiel réel de la géothermie de faible profondeur pour le rafraîchissement passif des bâtiments en climat chaud et sec.

Sur le plan scientifique, cette étude a permis d'établir une modélisation semi-analytique robuste et adaptée aux conditions locales, tout en identifiant les paramètres clés influençant les échanges thermiques et la performance globale du système. Sur le plan technique, elle a prouvé la faisabilité du couplage air-eau géothermique à partir de la nappe albiennaise, contribuant ainsi à la valorisation d'une ressource naturelle encore peu exploitée. Sur le plan économique et environnemental, elle a mis en évidence la pertinence du recours à la géothermie comme levier de sobriété énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en cohérence avec les objectifs de transition énergétique nationale.

Certaines limites subsistent néanmoins. Les prototypes expérimentaux réalisés en PVC et PEHD ont montré une résistance limitée face aux hautes températures de l'eau géothermique, et la modélisation sous MATLAB ne permet pas de reproduire intégralement la complexité des phénomènes hydrodynamiques et des pertes réelles. Ces contraintes ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche : le développement d'échangeurs fabriqués à partir de matériaux plus performants (cuivre, aluminium ou composites thermiquement conducteurs), l'étude de la corrosion et de la qualité chimique des eaux géothermiques, la mise au point de systèmes de régulation automatique pour optimiser le confort thermique et la consommation, ainsi que l'intégration hybride du WAHE avec d'autres sources renouvelables, telles que le solaire thermique ou photovoltaïque.

En définitive, les travaux réalisés démontrent que la géothermie de faible profondeur représente une alternative durable, techniquement fiable et économiquement compétitive aux systèmes de climatisation conventionnels. Le système WAHE étudié s'impose comme une solution robuste, écologique et parfaitement adaptée aux contraintes des régions sahariennes. Il contribue non

Conclusion générale

seulement à la réduction de la demande en électricité et des émissions de CO₂, mais aussi à la valorisation d'un potentiel énergétique local encore sous-exploité.

Cette recherche constitue ainsi une contribution scientifique et pratique majeure en faveur du développement durable et de la souveraineté énergétique nationale, tout en ouvrant la voie à de nouvelles perspectives de recherche et d'innovation dans le domaine de la géothermie appliquée aux bâtiments.

Références bibliographiques

- [1] M. Mimoune, Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies, Mémoire de master, Université des Trois-Rivières, Québec, Canada, mars 2016.
URL <https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/7854/1/031261729.pdf>.
- [2] B. Multon, L'énergie sur la Terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique, *Revue 3EI*, pp. 29–38, 1998.
URL https://hal.science/hal-00674076v1/file/Energie_3EI_1998.pdf.
- [3] C. G. Cvetkovski, Modelling of flow and heat transport in vertical loop ground heat exchangers, University of Windsor, 2014.
URL <https://uwindsor.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/e31d5985-dc61-4efb-a570-f3ad3cafea0c/content>.
- [4] J. Sobti, S. K. Singh, Earth–air heat exchanger as a green retrofit for Chandigarh — a critical review, *Geothermal Energy*, vol. 3, no. 1, p. 14, 2015.
DOI <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0034-4>.
URL <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s40517-015-0034-4.pdf>.
- [5] O. Leyla, A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4483–4490, 2011.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.103>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111003480>.
- [6] M. Jahangiri, S. Pahlavan, A. A. Shamsabadi, A. Khechekhouche, Feasibility study of solar water heaters in Algeria: A review, *Journal of Solar Energy Research*, pp. 135–146, 2018.
URL https://jsr.ut.ac.ir/article_67424_89aac3fd09f4579cf81271eb5c9b9c77.pdf.
- [7] K. K. Agrawal, M. Bhardwaj, R. Misra, G. D. Agrawal, V. Bansal, Optimization of operating parameters of earth air tunnel heat exchanger for space cooling: Taguchi method approach, *Geothermal Energy*, vol. 6, no. 1, p. 10, 2018.
DOI <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0097-0>.
URL <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s40517-018-0097-0.pdf>.
- [8] Z. Liu, H. Yu, T. Yang, L. Roccamena, P. Sun, S. Li, G. Zhang, M. El Mankibi, Numerical modeling and parametric study of a vertical earth-to-air heat exchanger system, *Energy*, vol. 172, pp. 220–231, 2019.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.098>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219301185>.
- [9] M. Rohit, B. Vikas, A. G. Das, M. Jyotirmay, A. T. K., CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, vol. 103, pp. 266–277, 2013.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.041>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261912006824>.

- [10] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal, J. Mathur, Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling, *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 5, pp. 645–648, 2010. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.001>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778809002850>.
- [11] S. Ouali, M. Hadjia, A. Ait-Ouali, K. Salhi, A. Malek, Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l’Algérie, *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 21, no. 1, pp. 54–61, 2018. DOI <https://doi.org/10.54966/jreen.v21i1.669>. URL <http://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/669>.
- [12] A. Sehli, A. Hasni, M. Tamali, The potential of earth–air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria, *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 496–506, 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.061>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212008314>.
- [13] A. O. Benelkadi, A. Kaabeche, Y. Bakelli, Étude de faisabilité technico-économique des centrales photovoltaïques en Algérie, *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 21, no. 2, pp. 181–198, 2018. DOI <https://doi.org/10.54966/jreen.v21i2.681>. URL <http://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/681>.
- [14] M. Benhammou, B. Draoui, M. Hamouda, Improvement of the summer cooling induced by an earth-to-air heat exchanger integrated in a residential building under hot and arid climate, *Applied Energy*, vol. 208, pp. 428–445, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.012>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917314241>.
- [15] Y. Belloufi, A. Brima, S. Zerouali, R. Atmani, F. Aissaoui, A. Rouag, N. Moumami, Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode, *International Journal of Heat and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 279–288, 2017. DOI <https://doi.org/10.18280/ijht.350208>. URL <https://www.researchgate.net/publication/318056227>.
- [16] A. Atia, A. Hadjadj, B. Benhaoua, N. Lebbihiat, A. Brima, A review of studies on geothermal energy system applied on sub-Saharan climate regions, *Water and Energy International*, vol. 60, no. 5, pp. 63–68, 2017. URL <https://www.researchgate.net/publication/320537573>.
- [17] B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici, A. Sahli, Étude d’un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar, *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 15, no. 3, pp. 465–478, 2012. URL https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v015_n3_texte_10.pdf.
- [18] S. Barakat, A. Ramzy, A. Hamed, S. El Emam, Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system, *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 137–146, 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.060>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890415011693>.

[19] N. Naili, I. Attar, M. Hazami, A. Farhat, Experimental analysis of horizontal ground heat exchanger for Northern Tunisia, *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2012. DOI <http://dx.doi.org/10.4236/jectc.2012.23005>.

URL <http://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=22370>).

[20] H. Boughanmi, M. Lazaar, S. Bouadila, A. Farhat, Thermal performance of a conic basket heat exchanger coupled to a geothermal heat pump for greenhouse cooling under Tunisian climate, *Energy and Buildings*, vol. 104, pp. 87–96, 2015.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.004>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815301201>).

[21] H. Boughanmi, M. Lazaar, A. Farhat, A. Guizani, Evaluation of soil thermal potential under Tunisian climate using a new conic basket geothermal heat exchanger: Energy and exergy analysis, *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 912–925, 2017.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.204>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431116327466>).

[22] G. Huang, X. Yang, Y. Liu, C. Zhuang, H. Zhang, J. Lu, A novel truncated cone helix energy pile: Modelling and investigations of thermal performance, *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1241–1256, 2018.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.020>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817302578>).

[23] G. Kappler, J. B. Dias, F. Haeberle, P. R. Wander, C. A. M. Moraes, R. C. E. Modolo, Study of an earth-to-water heat exchange system which relies on underground water tanks, *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 1236–1246, 2019.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.004>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811831067X>).

[24] Ministère de l'Énergie et des Mines, Bilan énergétique national 2021, Édition 2022.

URL

https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan_energetique_2021_63df78f2b775e.pdf).

[25] N. Yassaa, M. Khelif, Transition énergétique en Algérie : leçons, état des lieux et perspectives pour un développement accéléré des énergies renouvelables, Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique, 2020.

URL <https://easyfairsassets.com/sites/67/2021/11/Rapport-transition-energetique-en-Algerie-Dec-2020.pdf>).

[26] A. Akbi, S. Bouchaib, M. Saber, M. A. Aziza, Biomass Energy, Algerian Renewable Energy Resource Atlas, 1^{re} édition, Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), 2019.

URL <https://www.cder.dz/download/ATLAS%20final.pdf>).

[27] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2016, IEA, Paris, 2016.

URL <https://iea.blob.core.windows.net/assets/680c05c8-1d6e-42ae-b953-68e0420d46d5/WEO2016.pdf>).

[28] S. Ouali, K. Bouzidi, K. Imessad, A. Ait-Ouali, *Geothermal Energy, Algerian Renewable Energy Resource Atlas*, 1^{re} édition, Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), 2019.

URL <https://www.cder.dz/download/ATLAS%20final.pdf>.

[29] F. Fadila, Potentiels et perspectives des énergies renouvelables en Algérie (Expériences de certains pays), *Revue Organisation et Travail*, vol. 11(1), pp. 401–413, 2022.

URL <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/147/11/1/187519>.

[30] Ministère de l'Énergie, des Mines et des Énergies Renouvelables, *Énergies nouvelles, renouvelables et maîtrise de l'énergie*, site officiel du MEMER, 2021.

URL <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.

[31] A. Hebri, Le programme des énergies renouvelables en Algérie : vers une efficacité énergétique d'ici 2030, *Revue Cahiers Économiques*, vol. 8(2), pp. 351–362, 2018.

URL <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/51691>.

[32] Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM), Extrait du Bulletin MEM, 25 avril 2011.

URL https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_020_19.pdf

[33] S. Ouali, *Etude géothermique du sud de l'Algérie*, Mémoire de Magister, Université M'hamed Bouguerra, Boumerdès, 2005.

URL <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/996/1/Ouali%2C%20Salima.pdf>.

[34] A. Boutiba, *Application industrielle de la géothermie basse énergie dans le traitement thermique des bétons*, in *Proc. 5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER)*, *Proceeding of Engineering and Technology*, vol. 30, pp. 56–59, 2017.

URL <https://www.academia.edu/37123956/>.

[35] D. Moya, C. Aldás, P. Kaparaju, *Geothermal energy: power plant technology and direct heat applications*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 889–901, 2018.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.047>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118304830>.

[36] H. Saibi, *Geothermal resources in Algeria*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2544–2552, 2009.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.019>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109001014>.

[37] World Energy Council, *World Energy Resources: Geothermal*, 2013.

URL

https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf.

[38] A. Hebri, *Le programme des énergies renouvelables en Algérie vers une efficacité énergétique d'ici 2030*, *Cahiers Économiques*, vol. 8, no. 2, pp. 351–362, 2018.

URL <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/51691>.

- [39] S. Ouali, A. Khellaf, K. Baddari, *Etude des ressources géothermiques du Sud de l'Algérie*, Revue des Energies Renouvelables, vol. 9, no. 4, pp. 297–306, 2006.
DOI <https://doi.org/10.54966/jreen.v9i4.839>.
URL <https://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/839>.
- [40] A. Boudghene Stambouli, Z. Khat, S. Flazi, Y. Kitamura, *A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 4445–4460, 2012.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.031>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112003061>.
- [41] B. Mébrouk, *The prospects for geothermal application in Algeria*, in Progress in Sustainable Energy Technologies: Generating Renewable Energy, pp. 567–573, 2014.
DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-07896-0_34.
URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-07896-0_34.
- [42] A. Ait Ouali, A. Ayadi, D. Maizi, A. Issaadi, S. K. Ouali, K. Imessaad, *Updating of the most important Algerian geothermal provinces*, Proc. World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, Apr. 26–May 2, 2020.
URL <https://www.researchgate.net/publication/337160938>.
- [43] R. Corner, H. Fersoy, V. Crespi, *Integrated agri-aquaculture in desert and arid lands — Learning from case studies from Algeria, Egypt and Oman*, Fisheries and Aquaculture Circular No. 1195, FAO, Cairo, 2020.
DOI <http://dx.doi.org/10.4060/ca8610en>.
URL <https://openknowledge.fao.org/items/088307cd-2164-46a0-a489-eb8efb78fb5f>.
- [44] F. Guellai, A. Labed, N. Moumami, C. Mahboub, *Measurement and Analysis of Thermal-Hydraulic Performance of Curved and Plate Flat Solar Air Heaters; A Comparative Study*, Instrumentation and Measure (I2M), 18(6): 553–558, 2019.
DOI <http://dx.doi.org/10.18280/i2m.180606>.
URL <https://www.iieta.org/journals/i2m/paper/10.18280/i2m.180606>.
- [45] A. Labed, N. Moumami, K. Aoues, A. Benchabane, *Solar drying of henna (Lawsonia inermis) using different models of solar flat plate collectors: an experimental investigation in the region of Biskra (Algeria)*, Journal of Cleaner Production, 112: 2545–2552, 2016.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.058>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615015255>.
- [46] Ministère de l'Énergie et des Mines et des Énergies Renouvelables, *Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité. Bilan énergétique national (Année 2023)*, Édition 2024.
URL https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan_energetique_2023_6763e8ed2d76d.pdf.
- [47] O. Hamdi, *Contribution à l'étude de l'efficacité d'un système géothermique (air-sol) placé dans une zone aride — cas de la région de Biskra*, Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université Mohamed Khider — Biskra, 2020.
URL <https://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/5203>.

- [48] W. I. Dahmoun, *Énergies renouvelables : l'un des pivots du développement durable en Algérie*, International Journal of Advanced Research on Planning and Sustainable Development, 4(1): 46–68, 2021.
DOI {<https://doi.org/10.21608/ijarpsd.2021.187269>}.
URL {https://ijarpsd.journals.ekb.eg/article_187269.html}.
- [49] A. Harrouz et al., *Renewable Energy in Algeria and Energy Management Systems*, International Journal of Smart Grid (ijSmartGrid), 2(1), March 2018.
DOI {<https://doi.org/10.20508/IJSMARTGRID.V2I1.10.G9>}.
URL {https://www.academia.edu/98068066/Renewable_Energy_in_Algeria_and_Energy_Management_Systems}.
- [50] Zahraoui Y, Basir Khan MR, AlHamrouni I, Mekhilef S, Ahmed M. (2021). Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review. *Energies*, 14(9): 2354.
DOI {<https://doi.org/10.3390/en14092354>}.
URL {<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2354>}.
- [51] Sefiane S, Mahi Nour El Hoda, Henni A. (2022). Financial or Socio-Economic Feasibility? Potential Assessment of Renewable Energy Investment in Algeria. *Journal of Asian Energy Studies*, 6(1): 48–58.
DOI {<https://doi.org/10.24112/jaes.060004>}.
URL {<https://ejournals.lib.hkbu.edu.hk/index.php/jaes/article/view/2038>}.
- [52] Bouraiou A, Neçaibia A, Boutasseta N, Mekhilef S, Dabou R, Ziane AS, Attoui I, Mostefaoui M, Touaba O. (2019). Status of Renewable Energy Potential and Utilization in Algeria. *Journal of Cleaner Production*, 246: 119011.
DOI {<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119011>}.
URL {<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619338818?via%3Dihub>}.
- [53] Stober I, Bucher K. (2013). *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
DOI {https://doi.org/10.1007/978-3-642-13352-7_2}.
URL {https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/978-3-642-13352-7_2}.
- [54] Azhar M, Zaidi AA, Nasser MN, Noorollahi Y, Uzair M. (2022). Historical overview of geothermal energy. In: *Utilization of thermal potential of abandoned wells — Fundamentals, Applications, and Research*. Academic Press, pp. 3–10.
DOI {<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90616-6.00001-4>}.
URL {<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323906166000014?via%3Dihub>}.
- [55] Fekraoui A. (2010). Geothermal Activities in Algeria. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25–29 April 2010.
URL {<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0117.pdf>}.

[56] Benatallah A, Nasri B. (2012). Study of Geothermal Sources and Potential Using GIS in Adrar site, Algeria. *Proceedings of the 4th African Rift Geothermal Conference 2012*, Nairobi, Kenya, 21–23 November 2012.

URL <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ARGeo/2012/Benatallah.pdf>.

[57] Lebbihiat N, Atia A, Arici M, Meneceur N. (2021). Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures. *Journal of Cleaner Production*, 302: 126950.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126950>.

URL

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621011690?via%3Dihub>.

[58] Ouali S, Hadjiat MM, Ait-Ouali A, Salhi K, Malek A. (2018). Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. *Revue des Énergies Renouvelables*, 21(1): 54–61.

DOI <https://doi.org/10.54966/jreen.v21i1.669>.

URL <https://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/669>.

[59] Ouali S, Benaïssa Z, Belhamel M, Khellaf A, Baddari K, Djeddi M. (2011). Impact of Integrated Clean Energy on the Future of the Mediterranean: Exploitation of Albian geothermal water in South Algeria. *Energy Procedia*, 6: 101–109.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.012>.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211014238>.

[60] Ouali S. (2021). Chauffage de serres agricoles par la chaleur géothermique dans la région de Touggourt. *Bulletin des Énergies Renouvelables*, 52: 6–8.

URL https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber52_06_08.pdf.

[61] Florides G, Kalogirou S. (2007). Ground heat exchangers — A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32(15): 2461–2478.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>.

URL

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148107000092?via%3Dihub>.

[62] Rees SW, Adjali MH, Zhou Z, Davies M, Thomas RH. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(3): 213–265.

DOI [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00018-0).

URL

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032199000180?via%3Dihub>.

[63] Dehina K, Mokhtari AM, Souyri B. (2020). Energy modelling of a new co-current coaxial earth–water to air heat exchanger: Case study: Heating of house in Biskra — Algeria. *Geothermics*, 87: 101836.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101836>.

URL

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375650519303736?via%3Dihub>.

- [64] Ghezloun A, Saidane A, Oucher N, Merabet H. (2015). Actual Case of Energy Strategy In Algeria and Tunisia. *Energy Procedia*, 74: 1561–1570.
DOI <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.720>>.
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215014885?via%3Dihub>>.
- [65] Benazza A.Y., Retiel N., Aichouba M., Laouedj S. (2013). Étude de l'efficacité d'un échangeur géothermique horizontal. *Communication Science et Technologie*, 11(2): 68–77.
URL <<https://www.asjp.cerist.dz/en/article/183009>>.
- [66] Benhammou M, Draoui B. (2012). Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. *Revue des Énergies Renouvelables*, 15(2): 275–284.
DOI <<https://doi.org/10.54966/jreen.v15i2.319>>
URL <<https://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/319/1477>>
- [67] Hasan MI, Rageb AA, Yaghoubi M, Homayoni H. (2009). Influence of channel geometry on the performance of a counter flow microchannel heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(8): 1607–1618.
DOI <<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.004>>
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072909000052?via%3Dihub>>
- [68] Rouag A, Benchabane A, Labed A, Belhadj K, Boulouf N. (2016). Applicability of a solar adsorption cooling machine in semiarid regions: proposal of supplementary cooler using earth–water heat exchanger. *International Journal of Heat and Technology*, 34(2): 281–286.
DOI <<https://doi.org/10.18280/ijht.340218>>
URL <https://iieta.org/sites/default/files/Journals/IJHT/34.2_18.pdf>
- [69] Mehdid CE, Benchabane A, Rouag A, Moumami N, Melhegue MA, Moumami A, Brima A. (2018). Thermal design of Earth-to-air heat exchanger. Part II: a new transient semi-analytical model and experimental validation for estimating air temperature. *Journal of Cleaner Production*, 198: 1536–1544.
DOI <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.063>>
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618320365>>
- [70] Webb RL, Eckert ERG. (1972). Application of rough surfaces to heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(9): 1647–1658.
DOI <[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90095-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90095-6)>
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0017931072900956>>
- [71] Philippe M, Bernier M, Marchio D. (2009). Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes. *Geothermics*, 38(4): 407–413.
DOI <<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.07.002>>
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375650509000431>>
- [72] Bejan A. (1978). General criterion for rating heat-exchanger performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21(5): 655–658.
DOI <[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(78)90064-9)>
URL <https://d1wqtxs1xzle7.cloudfront.net/40873411/general_criterion_for_rating_heat-exchanger__performance__1-libre.pdf>

- [73] Webb RL. (1981). Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24(4): 715–726.
DOI [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90015-6)
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0017931081900156?via%3Dihub>
- [74] Moumami N, Benfatah H, Hatraf N, Moumami A, Youcef Ali S. (2010). Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra. *Revue des Énergies Renouvelables*, 13(3): 399–406.
DOI <http://dx.doi.org/10.54966/jreen.v13i3.208>
URL <https://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/208>
- [75] Belloufi Y, Brima A, Atmani R, Moumami N, Aissaoui F. (2016). Étude théorique et expérimentale du rafraîchissement de l'air par un échangeur géothermique air/sol. *Larhyss Journal*, 13(1): 121–137.
URL <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/download/370/380>
- [76] Mahmoudi H, Spahis N, Goosen MF, Ghaffour N, Drouiche N, Ouagued A. (2010). Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: a case study from Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1): 512–517.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.038>
URL <https://asjp.cerist.dz/en/article/55315>
- [77] Hadjadj A. (2021). Étude de la faisabilité technique et économique de l'installation d'un échangeur de chaleur géothermique dans la région d'El Oued — Algérie. *Thèse de doctorat*, Université d'El-Oued, Algérie.
URL <https://theses-algerie.com/2122965490658238/these-de-doctorat/universite-hammalakhdar-eloued/etude-de-la-faisabilite-technique-et-economique-de-linstallation-dun-echangeur-de-chaleur-geothermique-dans-la-region-del-ouedalgerie>
- [78] Urchueguía JF, Zacarés M, Corberán JM, Montero A, Martos J, Witte H. (2008). Comparison between the energy performance of a ground-coupled water-to-water heat pump system and an air-to-water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast. *Energy Conversion and Management*, 49: 2917–2923.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.001>
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890408000939>
- [79] Belloufi Y, Zerouali S, Rouag A, Aissaoui F, Atmani R, Brima A, Moumami N. (2022). Transient assessment of an earth air heat exchanger in warm climatic conditions. *Geothermics*, 104: 102442.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102442>
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037565052200092X>
- [80] Hadjadj A, Benhaoua B, Atia A, Khechekhouche A, Lebbihiat N, Rouag A. (2020). Air velocity effect on the performance of geothermal helicoidally water-air heat exchanger under El Oued climate, Algeria. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20: 100548.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100548>
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904920300688>

- [81] Tagrerout M, Atmania H. (2021). Le mix énergétique : un outil de la sécurité énergétique en Algérie. *ASJP*, 16(1): 228–243.
URL <https://asjp.cerist.dz/en/article/158218>
- [82] A. Rouag, Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
URL http://thesis.univ-biskra.dz/2961/1/Th%C3%A8se_2017.pdf.
- [83] C. E. Mehdi, A. Benchabane, A. Rouag, N. Moumami, M. A. Melhegue, A. Moumami, A. Brima, Thermal design of Earth-to-air heat exchanger. Part II: A new transient semi-analytical model and experimental validation for estimating air temperature, *Journal of Cleaner Production*, vol. 198, pp. 1536–1544, 2018.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.063>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618320365>.
- [84] F. Doumenc, Éléments de thermodynamique et thermique – II, Thermique, Version 1.2, Licence de Mécanique L2, Université Pierre et Marie Curie, France, 2009–2010.
URL http://www.fast.u-psud.fr/~doumenc/la200/CoursThermique_L2.pdf.
- [85] M. Debaq, Unités, dimensions et nombres adimensionnels, École d'ingénieur, CNAM Paris, France, 2008.
URL <https://hal.science/cel-02020110v1/file/unites.pdf>.
- [86] M. De Paepe, A. Janssens, Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 4, pp. 389–397, 2003.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00113-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00113-5).
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778802001135>.
- [87] A. J. Ede, An introduction to heat transfer principles and calculations. Forced convection, pp. 76–117, Pergamon Press, 1967.
DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-013517-5.50010-X>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978008013517550010X>.
- [88] Y. Jannot, Transferts thermiques, 2^e année, École des Mines de Nancy, France, 2012.
URL <https://geniecivilpdf.com/wp-content/uploads/pdf/backup/thermique.pdf>.
- [89] O. Bonnefoy, Machines thermiques – Éléments de cours, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2014–2015.
URL https://www.oemse.fr/~bonnefoy/Public/Machines_Thermiques-EMSE.pdf.
- [90] A. Hadjadj, B. Benhaoua, A. Atia, A. Khechekhouch, N. Lebbihiat, A. Rouag, Air velocity effect on the performance of geothermal helicoidally water–air heat exchanger under El Oued climate, Algeria, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 20, 100548, 2020.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100548>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904920300688>.

- [91] R. L. Webb, E. R. G. Eckert, Application of rough surfaces to heat exchanger design, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, no. 9, pp. 1647–1658, 1972.
DOI <[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90095-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90095-6)>.
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0017931072900956>>.
- [92] M. I. Hasan, A. A. Rageb, M. Yaghoubi, H. Homayoni, Influence of channel geometry on the performance of a counter flow microchannel heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 8, pp. 1607–1618, 2009.
DOI <<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.004>>.
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072909000052>>.
- [93] A. Hanafi, D. Alkama, *Stratégie d'amélioration du confort thermique d'une place publique d'une ville saharienne (Biskra/Algérie)*, *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 19, no 3, pp. 465–480, 2016.
DOI <<https://doi.org/10.54966/jreen.v19i3.585>>.
URL <<https://www.researchgate.net/publication/376323693>>.
- [94] A. Chettir, A. Labed, N. Moummi, A. Sayad, *Feasibility Study of New Geothermal System for Heating Premises and Thermal Complexes: Experimental Investigation of Water–Air Heat Exchanger in the East of Algeria*, *Annals of West University of Timisoara – Physics*, vol. 66, no 1, pp. 1–16, 2024.
DOI <<https://doi.org/10.2478/awutp-2024-0001>>.
URL <<https://sciendo.com/article/10.2478/awutp-2024-0001>>.
- [95] ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995), International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
URL
<https://www.bsigroup.com/contentassets/fb7f1499fa6f43c6b9084be8c2378bc9/iso_iec_guide_98-3_2008e---uncertainty-of-measurement---part-3-guide-to-the-expression-of-uncertainty-in-measurement-gum1995.pdf>.
- [96] J. P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, 8^e édition, McGraw-Hill, 2012.
URL
<https://www.academia.edu/72823844/Experimental_Methods_for_Engineers_J_P_Holman>.
- [97] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2^e édition, University Science Books, 1997.
URL <<https://faculty.kfupm.edu.sa/phys/aanaqvi/Taylor-An%20Introduction%20to%20Error%20Analysis.pdf>>.
- [98] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988.
DOI <[https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)>.
URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089417778890043X>>.

- [99] H. W. Coleman, W. G. Steele, Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, 3^e édition, John Wiley & Sons, 2009.
DOI <https://doi.org/10.1002/9780470485682>.
URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470485682>.
- [100] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7^e édition, Wiley, 2011.
URL <https://books.google.dz/books?id=vvyIoXEywMoC>.
- [101] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5^e édition, McGraw-Hill, 2015.
URL <https://ostad.nit.ac.ir/payaidea/ospic/file8973.pdf>.
- [102] A. Bejan, Convection Heat Transfer, 4^e édition, Wiley, 2013.
URL [https://sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/Adrian%20Bejan\(auth.\)-Convection%20Heat%20Transfer,%20Fourth%20Edition%20\(2013\).pdf](https://sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/Adrian%20Bejan(auth.)-Convection%20Heat%20Transfer,%20Fourth%20Edition%20(2013).pdf).
- [103] Sonelgaz, Tarifs de l'électricité en Algérie, 2023.
URL <https://algerie-electricite.com/faq/prix-kwh#:~:text=Dans%20le%20cadre%20des%20particuliers,compteur%20s'effectue%20chaque%20trimestre>.