



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique énergétique et énergie renouvelable

Par :

**M<sup>me</sup> HADJADJ Amel**

Sur le thème

---

## **Caractérisation du comportement thermique et thermo-mécanique du sol pour les applications et développement de l'énergie géothermique**

---

Soutenu publiquement le 04 juin 2025 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr LIAZID Abdelkrim	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr AMARA Sofiane	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Dr. MAMOUN Souheyla	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire 2025\2026

# *Remerciements*

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Allah pour m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à **Mr AMARA Sofiane**, mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de cette recherche. Son encadrement a été précieux pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également **Pr LIAZID Abdelkrim** et **Mme HADJI Fatiha** pour leur soutien, notamment durant la phase de préparation de ce mémoire.

Ma reconnaissance s'étend aux **membres du jury**, **Pr LIAZID Abdelkrim** et **Dr. MAMOUN Souheyla**, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail, et dont les remarques constructives ont enrichi ce travail.

Mes pensées reconnaissantes vont également à **mes collègues de travail et de classe**, pour leur esprit de camaraderie, leurs échanges constructifs et leur soutien au quotidien.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, je dis un grand merci.

**Mme HADJADJ Amel**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère famille HADJADJ*

*Mon père et à ma mère, pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs sacrifices,*

*Mes sœurs et mon frère, pour leur présence et leur encouragement constant*

*Mon mari, BEN NACER JOUFFI, pour son amour, sa patience et son soutien indéfectible tout au long de ce parcours.*

*Mon cousin, pour sa bienveillance et son appui*

*Et à mes collègues de travail, pour leur collaboration, leur écoute et leurs encouragements.*

*Merci à chacun de vous d'avoir contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'aboutissement de ce projet.*

*Mme HADJADJ Amel*

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale : .....13

## Chapitre 1- Généralités sur les énergies renouvelables

1. Introduction.....	17
2. Le réchauffement climatique .....	17
2.1 Définition simple du réchauffement climatique .....	17
2.2 Définition scientifique du réchauffement climatique .....	17
2.3 Histoire de la science climatique .....	18
2.4 Les causes du réchauffement climatique .....	20
3. Les énergies renouvelables .....	20
3.1 Énergie solaire .....	21
3.2 Énergie éolienne.....	24
3.3 Énergie hydraulique .....	25
3.4 Biomasse .....	26
3.5 Géothermie .....	27
4. Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables.....	28
5. Conclusion .....	29

## Chapitre 2- La géothermie

1. Introduction .....	31
2. La Géothermie .....	31
3. Principe de la géothermie.....	32
4. Les différents types de géothermie .....	34
5. Le gradient géothermique .....	35
6. Avantages/inconvénients .....	36
7. La géothermie en Algérie .....	37
8. Conclusion .....	37

## Chapitre 3: Etude de cas

1. Introduction.....	40
2. Etude géologique .....	40
3. Caractéristiques graphique.....	41

<b>4. Températures du sol .....</b>	<b>43</b>
<b>5. Les sites étudiés .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1 Le site de Béni Master .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 Le site de Birouana .....</b>	<b>45</b>
<b>5.3 Site de Zouia .....</b>	<b>46</b>
<b>5.4 Le site de Chbikia.....</b>	<b>46</b>
<b>5.5 Le site de Bendouma .....</b>	<b>47</b>
<b>5.6 Le site de sidi Saadâ .....</b>	<b>48</b>
<b>5.7 Le site de kirolise .....</b>	<b>48</b>
<b>6. Propriétés des sols étudiés .....</b>	<b>49</b>
<b>7. Caractéristique du fluide caloporteur .....</b>	<b>50</b>
<b>8. Simulation d'une sonde géothermique verticale .....</b>	<b>52</b>
<b>8.1 Comparaison des températures moyennes mensuelles sur 25ans .....</b>	<b>53</b>
<b>9. Graphes et interprétations de chaque site avec les différentes températures du sol (2<sup>0</sup>c -15<sup>0</sup>C -25<sup>0</sup>C).....</b>	<b>64</b>
<b>10. Comparaison de la température moyenne de fluide entre les 7 sites avec la même température du sol .....</b>	<b>80</b>
<b>11. Conclusion .....</b>	<b>85</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>88</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>90</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>93</b>

# Liste des figures

**Figure 1.1:** Les différents types d'énergies renouvelables

**Figure 1.2 :** Panneau d'énergie solaire photovoltaïque

**Figure 1.3 :** Les deux types d'énergie solaire

**Figure 1.4 :** La carte d'éclairement solaire de l'Algérie

**Figure 1.5 :** Photographie d'un champ éolien

**Figure 1.6 :** Barrage hydraulique

**Figure 1.7:** Le cycle de la biomasse

**Figure 1.8 :** Centrale électrique géothermique

**Figure 3.1 :** Situation de la wilaya de Tlemcen

**Figure 3.2 :** Situation de la wilaya Ain T'émouchent

**Figure 3.3 :** composition du sol de Béni Mester

**Figure 3.4 :** composition du sol de Birouana

**Figure 3.5 :** La composition du sol de Zouia

**Figure 3.6 :** La composition du sol de Chbikia

**Figure 3.7 :** La composition du sol de Bendouma

**Figure 3.8 :** La composition du sol Sidi Saada

**Figure 3.9 :** La composition du sol de kirolise

**Figure 3.10 :** Géothermie verticale Sol-Eau

**Figure 3.11 :** Forage SINGLE-U.

**Figure 3.12 :** L'interface du logiciel d'EED

**Figure 3.13 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 20°C (site de Béni Mester)

**Figure 3.14 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15°C (site de Béni Mester)

**Figure 3.15 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 25°C (site de Béni Mester)

**Figure 3.16 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 20°C (site de Birouana)

**Figure 3.17 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de Birouana)

**Figure 3.18 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>C (site de Birouana)

**Figure 3.19:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>C (site de Zouia)

**Figure 3.20 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de Zouia)

**Figure 3.21:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>C (site de Zouia)

**Figure 3.22 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>c (site de Chbikia)

**Figure 3.23 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>c (site de Chbikia)

**Figure 3.24 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>c (site de Chbikia)

**Figure 3.25 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>c (site de Bendouma)

**Figure 3.26 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>c (site de Bendouma)

**Figure 3.27 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour température du sol de 25<sup>0</sup>c (site de Bendouma)

**Figure 3.28:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>C (site de Sidi Saada)

**Figure 3.29:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de Sidi Saada)

**Figure 3.30:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>C (site de Sidi Saada)

**Figure 3.31:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>C (site de kirolise)

**Figure 3.32:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de kirolise)

**Figure 3.33:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>C (site de kirolise)

**Figure 3.34:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pour la 10<sup>ème</sup> année, température du sol de 2<sup>0</sup>C (des 7 sites)

**Figure 3.35:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pour la 10<sup>ème</sup> année, température du sol de 15<sup>0</sup>C (des 7 sites)

**Figure 3.36:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pour la 10<sup>ème</sup> année, température du sol de 25<sup>0</sup>C (des 7 sites)

# Liste des tableaux

**Tableau 3.1** : La différente couche du sol maghrébin

**Tableau 3.2** : Propriétés des 7sols étudié.

**Tableau 3.3** : Caractéristique d'eau

**Tableau 3.4** : Caractéristiques de forage SINGLE-U

**Tableau 3.5** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Béni Mester)

**Tableau 3.6** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Birouana)

**Tableau 3.7** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Zouia)

**Tableau 3.8** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Chbikia)

**Tableau 3.9** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Ben douma)

**Tableau 3.10** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Sidi Saadâ)

**Tableau 3.11** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Kirolise)

**Tableau 3.12** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Béni Mester)

**Tableau 3.13** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Birouana)

**Tableau 3.14** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Zouia)

**Tableau 3.15** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Chbikia)

**Tableau 3.16** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Bendouma)

**Tableau 3.17**:Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Sidi Saadâ)

**Tableau 3.18**:Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Kirolise)

**Tableau 3.19** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Béni Mester)

**Tableau 3.20** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Birouana)

**Tableau 3.21 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Zouia)

**Tableau 3.22 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Chbikia)

**Tableau 3.23:** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Bendouma)

**Tableau 3.24 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Sidi Saadâ)

**Tableau 3.25 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Kirolise)





# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent la maîtrise des consommations et la diversification des ressources d'énergie obligatoires, et donc le passage à l'utilisation et le développement des énergies renouvelables sont imminents.

On considère une énergie renouvelable toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme (solaire, par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire), mais aussi par l'hydraulique, l'éolien et la biomasse, et aussi par la géothermie qui représente le but de cette étude.

A toute époque, les manifestations naturelles de la chaleur de la Terre, telles les sources thermales, les geysers et les volcans, ont été des centres d'attraction de l'humanité. Les sources chaudes ont été utilisées depuis la haute Antiquité. Les Romains étaient les premiers à utiliser les bains thermaux et aussi les premiers à mettre au point le chauffage par le sol dans certains de leurs édifices, une technique qui s'est ensuite perdue jusqu'au 20<sup>ème</sup> siècle. De nombreuses villes ont été fondées autour de sources thermales. Plus de 99% de la masse de la terre est à une température de plus de 1000° C. Seul le 1% de la masse de la terre (c'est-à-dire les trois premiers kilomètres) est plus froid que 100° C. A la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0,065 W/m<sup>2</sup>. Cette chaleur dégagée n'a pas pour origine principale le refroidissement du globe terrestre, mais provient à 90% de la désintégration des éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) contenus dans les minéraux de la croûte [1]. L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée la géothermie, quelle que soit la température de la ressource, la profondeur à laquelle on l'exploite et l'usage que l'on en fait. On distingue trois types de géothermie [2] :

- La géothermie peu profonde à très basse température (inférieure à 50°C).
- La géothermie profonde (jusqu'à 2000 m) à basse énergie (50 à 100°C), moyenne (100 à 150°C) ou haute énergie (contexte volcanique, supérieure à 150°C).
- La géothermie très profonde (de 5000 à 10000 m) à très haute température (jusqu'à 300°C).
- La géothermie de basse et très basse énergie est utilisée pour alimenter les réseaux de chaleur (chauffage urbain).

La géothermie de moyenne et haute énergie permet de produire de l'électricité. Le fonctionnement d'une centrale géothermique repose sur l'exploitation de la chaleur présente dans le sous-sol. Cette chaleur peut être utilisée pour alimenter un réseau de chauffage, produire de l'électricité, ou encore pour les deux usages simultanément, ce qu'on appelle la cogénération.

En haute et très haute énergie, la vapeur jaillit avec assez de pression pour faire tourner une turbine, afin de produire l'électricité.

En moyenne énergie, la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire : on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre, que l'on chauffe avec l'eau géothermale. Ce fluide se charge en énergie thermique, entre en ébullition et se vaporise, faisant tourner une turbine dont le mouvement, transmis à l'alternateur, produit de l'électricité. Une centrale géothermique est donc une centrale thermique. En basse et très basse énergie, l'énergie est soutirée du sous-sol moyennant des sondes géothermiques en utilisant une pompe à chaleur. Une pompe à chaleur peut revaloriser la chaleur ambiante à relativement basse température (12°C) pour des applications à une température plus élevée (40°C) comme le chauffage des habitations ou l'eau sanitaire [3]. La pompe extrait l'énergie thermique (chaleur) d'un support (source de chaleur) à une température relativement basse et libère cette énergie thermique à une température plus élevée dans un autre support (système d'émission de chaleur). Le transport de la chaleur est assuré par un liquide (fluide caloporteur). La quantité d'énergie dont l'appareil a besoin pour ce faire est faible par rapport au rendement. 60 à 80% de l'énergie fournie par la pompe à chaleur provient de l'environnement [4].

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :Le premier chapitre est dédié aux Généralités sur les énergies renouvelables où nous exposons le réchauffement climatique et les énergies renouvelables. Dans le second chapitre nous nous étalons sur le sujet de l'énergie géothermique, nous citons ces différents types et sa multiple application. Le troisième chapitre porte sur une étude géologique approfondie de sept sites représentatifs, dont notamment Béni Master , Chbikia ,Birouana, Zouia ,Chbikia ,Bendouma,Sidi saada etKirolize. Cette analyse vise à caractériser les propriétés thermiques et mécaniques des sols, éléments déterminants pour la mise en œuvre et l'efficacité des systèmes géothermiques. L'évaluation de ces propriétés permet de mieux comprendre les conditions d'installation et les performances potentielles des dispositifs géothermiques dans chaque site étudié.

Une simulation numérique a ensuite été effectuée à l'aide du logiciel spécialisé **EED (Earth Energy Designer)**, portant sur une sonde géothermique verticale de type **Simple-U**. Trois scénarios thermiques ont été modélisés, correspondant à des températures de référence de 20 °C, 15 °C et 25 °C, dans le but d'analyser le comportement du système et d'en évaluer les performances sous diverses conditions géothermiques.

Ce travail est conclu par une synthèse générale mettant en évidence les principaux résultats obtenus et les perspectives futures de l'étude.



**Chapitre 1**  
**Généralités sur les énergies  
renouvelables.**

### 1. Introduction

Bien que la pression environnementale exhorte à la réduction de notre consommation d'énergie, la demande mondiale continue de croître sans signe de ralentissement. Quelles sont les raisons derrière cette augmentation constante de nos besoins énergétiques ?

Le terme "crise énergétique latente" est souvent évoqué dans les médias à travers le monde. Des États-Unis à l'Inde, en passant par l'Europe, les gouvernements cherchent des solutions pour répondre aux demandes croissantes de leurs populations.

En plus de cette pression croissante, il y a une nécessité impérieuse de réduire l'utilisation des énergies fossiles afin de protéger l'environnement, un objectif partagé à l'échelle mondiale. Cependant, malgré les efforts déployés pour freiner la demande énergétique, nos besoins continuent de croître de manière exponentielle. Ces tendances sous-jacentes annoncent une ère de changement sans précédent, qui touchera des millions de personnes à travers le monde.

### 2. Le réchauffement climatique

#### 2.1 Définition simple du réchauffement climatique

Le réchauffement climatique est un processus mondial de modification du climat caractérisé par une hausse générale des températures moyennes, principalement attribuée aux activités humaines. Il entraîne des changements durables dans les régimes météorologiques et les écosystèmes.

Dans sa définition la plus simple, le réchauffement climatique se réfère à l'augmentation des températures observée sur Terre depuis environ un siècle et demi, depuis le début de la Révolution Industrielle. En 2022, la température moyenne de la planète avait augmenté d'environ 1,15 °C par rapport à l'ère préindustrielle (avant 1850) [1].

#### 2.2 Définition scientifique du réchauffement climatique

D'un point de vue scientifique, le réchauffement climatique est spécifiquement lié à l'activité industrielle et à l'effet de serre.

On parle parfois de réchauffement climatique d'origine anthropique, ce qui signifie qu'il est causé par les activités humaines plutôt que des processus naturels. Les émissions de gaz à

effet de serre, résultant principalement de la combustion de combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, sont les principales responsables de cet effet.

De nombreux scientifiques étudient ce phénomène au sein du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), cherchant à comprendre comment les activités humaines contribuent au réchauffement climatique. Leurs recherches et rapports sont cruciaux pour éclairer les décideurs politiques et le public sur les implications du réchauffement climatique et les mesures à prendre pour atténuer ses effets.

### **2.3 Histoire de la science climatique**

Les premières théories sur l'effet de serre remontent à 1824, lorsque le scientifique Jacques Fourier a émis des suppositions à ce sujet. Plusieurs chercheurs, dont Claude Pouillet et John Tyndall, ont ensuite étudié et tenté de quantifier ce phénomène. Cependant, c'est à la fin du XIXe siècle que le scientifique Savante Arrhenius a mené la première expérience de validation et de quantification précise de l'effet de serre. Dans les années 1890, il a découvert que l'air contenant une concentration élevée de dioxyde de carbone retient davantage la chaleur des rayonnements solaires, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'air. Il a alors conclu que les activités industrielles, en produisant de grandes quantités de dioxyde de carbone par la combustion du charbon, contribuaient à l'accroissement de cet effet.

Les premières estimations sur l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre ont été faites par Arrhenius et d'autres scientifiques de l'époque, comme le géologue Thomas Chambelin. Ils ont avancé que doubler la concentration de ces gaz dans l'atmosphère entraînerait une augmentation de la température moyenne de 5 degrés. En 1901, Gustaf Ekholm a introduit pour la première fois le terme "effet de serre" pour décrire ce phénomène.

Pendant plusieurs décennies, ces découvertes n'ont pas été sérieusement prises en compte par la communauté scientifique. À cette époque, de nombreux spécialistes pensaient que la nature pourrait s'autoréguler et que l'impact humain sur le climat était négligeable.

Certains scientifiques estimaient même que tout excès de dioxyde de carbone serait absorbé par les océans, ce qui s'est révélé partiellement vrai. Cependant, dans les années 1940, Gilbert Plass a définitivement validé la théorie selon laquelle l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère affecte la capacité de l'air à retenir les rayonnements infrarouges et la chaleur, grâce à l'utilisation de technologies modernes. Ces avancées marquent les premières définitions du réchauffement climatique [3].

La prise de conscience du réchauffement climatique a évolué au fil du temps, passant d'une compréhension limitée à une reconnaissance mondiale de son importance. Voici comment cette prise de conscience s'est développée :

- **Débuts de la recherche:** Dans les années 1960 et 1970, les premières preuves scientifiques sur l'effet de serre et le réchauffement climatique ont émergé. Les travaux de chercheurs comme Charles David Keeling et Roger Revelle ont établi les bases de notre compréhension actuelle du phénomène.
- **Premières alarmes:** Dans les années 1970 et 1980, les scientifiques ont commencé à alerter sur les dangers potentiels du réchauffement climatique, mettant en évidence ses impacts sur les écosystèmes, les sociétés humaines et l'économie mondiale.
- **Reconnaissance internationale:** Le premier Sommet de la Terre en 1972 a marqué une étape importante en évoquant pour la première fois le réchauffement climatique lors d'une grande conférence internationale. Cela a contribué à sensibiliser les gouvernements et les décideurs politiques à l'échelle mondiale.
- **Création du GIEC:** En 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé pour étudier le réchauffement climatique de manière approfondie. Cette initiative a renforcé la crédibilité scientifique de la question et a conduit à une meilleure compréhension des causes et des conséquences du phénomène.
- **Rapports du GIEC:** Les rapports réguliers du GIEC ont joué un rôle crucial dans la diffusion des connaissances sur le réchauffement climatique. En fournissant des évaluations objectives basées sur les dernières recherches, le GIEC a contribué à éclairer les décideurs politiques et le grand public sur l'urgence d'agir.
- **Mobilisation mondiale:** Au fil des décennies, la prise de conscience du réchauffement climatique s'est renforcée grâce à la mobilisation de la société civile, des militants écologistes et des jeunes générations. Des mouvements tels que Fridays for Future et Extinction Rebellion ont attiré l'attention sur l'urgence climatique et ont appelé à des actions concrètes.

En résumé, la prise de conscience du réchauffement climatique a évolué d'une compréhension limitée à une reconnaissance mondiale de son importance, grâce aux progrès de la recherche scientifique, à la mobilisation de la société civile et à l'action concertée des gouvernements et des institutions internationales.

### 2.4 Les causes du réchauffement climatique

Elles sont principalement liées aux émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine, qui ont un impact significatif sur le climat. Ces émissions proviennent principalement des activités suivantes :

- **Production d'énergie** : La combustion des énergies fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel pour la production d'électricité et le chauffage est l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre.
- **Transports** : Les émissions de gaz à effet de serre provenant des véhicules routiers, aériens et maritimes contribuent également de manière significative au réchauffement climatique. Les moteurs à combustion interne utilisant des carburants fossiles émettent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'autres gaz à effet de serre.
- **Déforestation** : La déforestation, principalement pour l'expansion agricole et l'urbanisation, libère du dioxyde de carbone stocké dans les arbres, contribuant ainsi au réchauffement climatique.
- **Agriculture et élevage** : Les pratiques agricoles, telles que l'utilisation intensive d'engrais et l'élevage intensif de bétail, génèrent des émissions de gaz à effet de serre, notamment du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) [4]

### 3. Les énergies renouvelables

La majeure partie de l'énergie consommée dans le monde provient actuellement de sources non renouvelables telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium, qui sont des ressources limitées et épuisables.

En revanche, les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, géothermique, sont issues de sources naturelles inépuisables et durables.

Ces énergies renouvelables trouvent leurs sources dans deux principales origines : le soleil, qui est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées et de la croissance des végétaux, ainsi que la chaleur de la terre.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas une innovation récente. Depuis des millénaires, les sociétés ont exploité la chaleur du soleil, brûlé du bois ou des déchets, utilisé la chaleur terrestre dans les régions volcaniques, fait fonctionner des moulins à vent ou à eau, et exploité la force des marées.

Bien que certaines technologies plus récentes, comme les biocarburants d'origine végétale et les systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité solaire, aient émergé, seules deux énergies renouvelables occupent actuellement une part significative dans le mix énergétique mondial : la biomasse, qui comprend le bois et les déchets, représentant environ 11 %, et l'énergie hydraulique, représentant environ 2 %. Les autres sources renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique, restent encore marginales dans leur contribution globale à l'approvisionnement énergétique.



**Figure 1.1:** Les Différents types d'énergies renouvelables [4]

### Les types d'énergies renouvelables

#### 3.1 Énergie solaire

- **L'énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité via des panneaux photovoltaïques. Elle fonctionne grâce à la conversion directe des photons en électrons dans des semi-conducteurs. Cette technologie présente plusieurs avantages, notamment son faible coût de maintenance et sa capacité à répondre aux besoins énergétiques des endroits éloignés où le raccordement au réseau électrique est difficile ou coûteux. De plus, elle est respectueuse de l'environnement car elle ne produit pas de pollution. Les composants modulaires des systèmes photovoltaïques offrent également des possibilités d'intégration esthétique et innovante en architecture [5][6].

En Algérie, l'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle important dans la stratégie énergétique du pays. Le gouvernement algérien s'est engagé à accélérer le développement de cette source d'énergie. Il prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques, visant à atteindre une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2030. Ensuite, d'autres projets d'une capacité annuelle de 200 MWc sont prévus entre 2021 et 2030. [8].



**Figure 1.2** : Panneau d'énergie solaire photovoltaïque [9]

- **L'énergie solaire thermique**

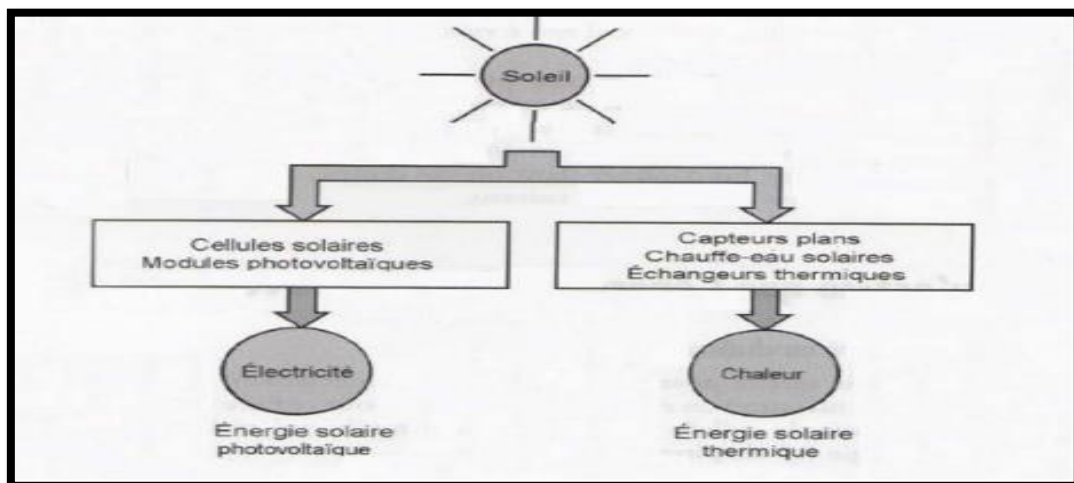
L'énergie solaire thermique consiste à convertir le rayonnement solaire en énergie thermique. Cette conversion peut être utilisée de manière directe, comme pour le chauffage d'un bâtiment, ou de manière indirecte, telle que la production de vapeur d'eau pour alimenter des turboalternateurs et générer de l'électricité. Contrairement aux cellules photovoltaïques qui utilisent le rayonnement lui-même, les systèmes de conversion thermique utilisent la chaleur transmise par rayonnement.

Dans ces systèmes, la radiation directe du soleil est concentrée par un collecteur sur un échangeur où elle est transférée à un fluide, soit en le vaporisant directement, soit en transportant la chaleur à un générateur de vapeur. Tous ces systèmes partagent des composants communs tels qu'un collecteur de chaleur, un fluide caloporteur, un évaporateur, un condenseur, une turbine et un alternateur. Souvent désignée sous le nom de "concentrating solar power" (CSP), l'énergie solaire thermique peut répondre à la demande en électricité de jour comme de nuit en étant associée à des moyens de stockage thermique ou en étant

combinée avec d'autres sources d'énergie telles que le gaz. L'Algérie compte exploiter son potentiel solaire, parmi les plus importants au monde, en lançant des projets d'envergure en énergie solaire thermique.

Entre 2016 et 2025, il est prévu que quatre centrales solaires thermiques dotées de stockage, d'une puissance totale d'environ 1 200 MW, soient mises en service. Le programme pour la période 2025-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis de 600 MW par an jusqu'en 2030.

Du fait de sa situation géographique, l'Algérie bénéficie d'un des plus grands gisements solaires au monde. La durée d'insolation sur l'ensemble du territoire national dépasse les 2000 heures par an et peut atteindre jusqu'à 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. La quantité d'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est d'environ 3 kWh/m<sup>2</sup> dans le nord et dépasse les 5,6 kWh/m<sup>2</sup> dans le Grand Sud. [8].



**Figure 1.3** : Les deux types d'énergie solaire [10]

- **Potentiel solaire en Algérie**

L'Algérie possède l'un des plus vastes gisements solaires du bassin méditerranéen. Le rayonnement solaire dans les régions côtières est influencé par les saisons, tandis que les régions sahariennes reçoivent une quantité plus importante d'énergie, mais sont également soumises à des températures atmosphériques plus élevées. En tenant compte de cette diversité, la quantité totale d'énergie solaire reçue est estimée à 169 400 TWh/an, soit environ 5000 fois la consommation annuelle d'électricité du pays. La carte de l'irradiation solaire en Algérie est illustrée dans la figure 4.

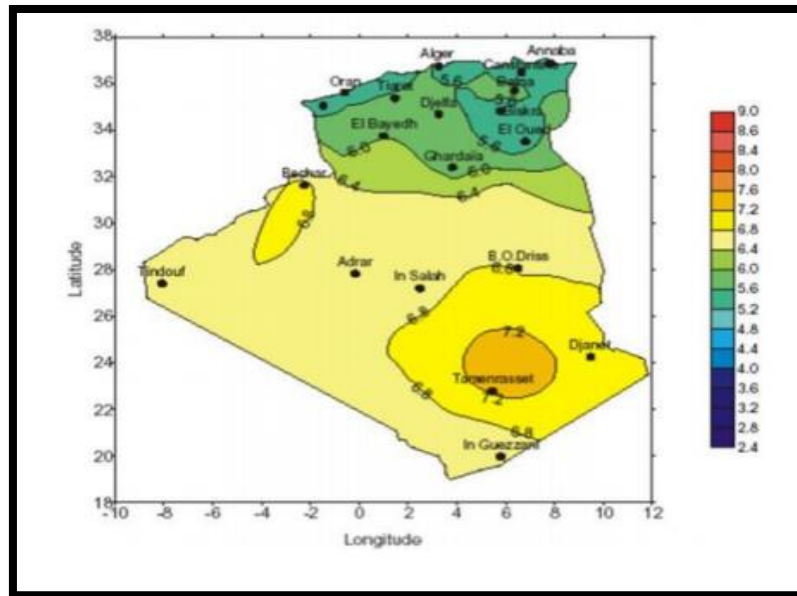


Figure 1.4 : La carte d'éclairement solaire de l'Algérie [11].

### 3.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est définie comme l'énergie produite par le vent. Elle est générée par des éoliennes, des machines électriques actionnées par le vent dans le but de produire de l'électricité. Lorsque le vent fait tourner une hélice, cela engendre de l'énergie mécanique ou électrique, ce qui peut se produire dans des zones suffisamment ventées. Cette énergie est captée par les pales des éoliennes, qui entraînent un rotor couplé à une génératrice, convertissant ainsi l'énergie mécanique en électricité. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent, ainsi que de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air (6).

En Algérie, le programme des énergies renouvelables prévoit, après des études visant à repérer les sites favorables, la mise en œuvre de plusieurs projets jusqu'en 2030, pour une puissance totale d'environ 1 700 MW. La ressource éolienne en Algérie varie considérablement d'une région à une autre, en raison de la diversité topographique et climatique du pays. Le Nord méditerranéen, avec son littoral de 1200 km et son relief montagneux composé des chaînes de l'Atlas tellien et saharien, ainsi que des plaines et des hauts plateaux de climat continental, diffère du Sud, caractérisé par un climat saharien.

La carte présentée indique que le Sud bénéficie de vitesses de vent plus élevées que le Nord, en particulier dans le Sud-est, avec des vitesses dépassant les 7 m/s et atteignant plus de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel). Dans le Nord, les vitesses moyennes sont

généralement plus faibles. Cependant, il existe des microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, ainsi que sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El Bayadh, où les vitesses varient de 6 à 7 m/s, et dans le Grand Sud où elles dépassent les 8 m/s [8].



**Figure 1.5 :** Photographie d'un champ éolien [9]

### **3.3 Énergie hydraulique :**

L'hydraulique, en tant que première source d'énergie renouvelable au monde, se distingue par sa flexibilité d'utilisation et ses avantages écologiques et économiques. Comme les anciennes roues actionnées par le flux d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydroélectriques sont entraînées par la force de l'eau passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Plus la hauteur de la chute d'eau et le débit sont importants, plus la puissance électrique produite est élevée.

Bien que les quantités totales de précipitations sur le territoire algérien soient importantes, estimées à 65 milliards de mètres cubes, elles profitent peu au pays en raison de plusieurs facteurs : un nombre limité de jours de précipitations, une concentration sur des zones restreintes, une forte évaporation et un écoulement rapide vers la mer.

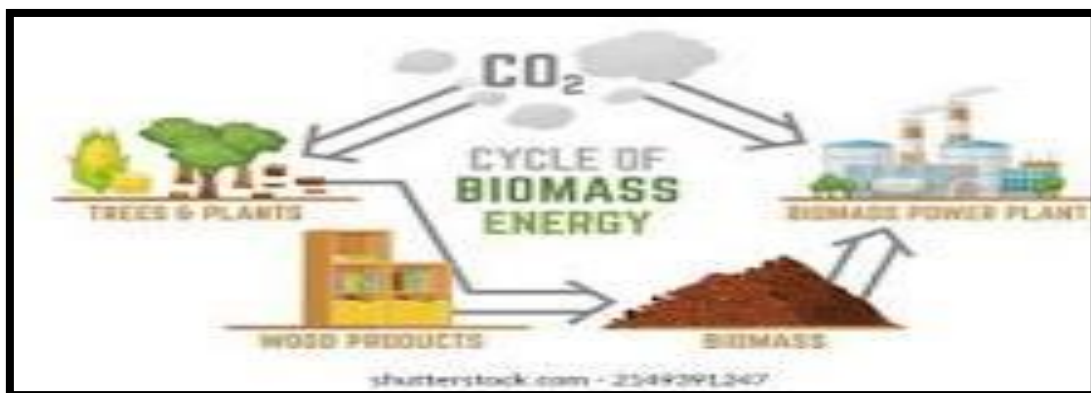
De manière générale, les ressources en eau de surface décroissent du nord au sud. Actuellement, on estime que les ressources en eau utiles et renouvelables sont d'environ 25 milliards de mètres cubes, dont environ les deux tiers proviennent des ressources en eau de surface. On recense 103 sites de barrages, avec plus de 50 barrages actuellement en exploitation [12].



**Figure 1.6 :** Barrage hydraulique [9]

### 3.4 Biomasse

L'énergie de la biomasse se divise en quatre principales catégories : la biomasse sèche (comme le bois et les déchets agricoles), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (tel que le bioéthanol, le biodiesel et les huiles végétales). En 2010, la biomasse représentait environ 7,5 % de la production énergétique mondiale. Selon les projections établies à l'époque, cette part devait atteindre 10 % à l'horizon 2020, objectif qui a été globalement atteint dans plusieurs régions du monde grâce à l'essor des politiques de transition énergétique. Le processus de production d'électricité à partir de la biomasse implique la combustion de celle-ci pour générer de la chaleur, qui chauffe ensuite de l'eau dans un réservoir, produisant ainsi de la vapeur, similaire au fonctionnement d'une cocotte-minute. Cette vapeur d'eau est ensuite libérée à haute pression, ce qui entraîne la rotation d'une turbine connectée à un alternateur. C'est cet alternateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité. Ce qui distingue particulièrement les centrales à biomasse, c'est leur capacité à produire de l'électricité à partir de matériaux dont nous n'avons plus besoin [8].



**Figure 1.7:** Le cycle de la biomasse [9].

### 3.5 Géothermie

La géothermie repose sur le principe d'exploitation de l'énergie contenue dans le sol. Partout dans le monde, la température augmente depuis la surface jusqu'au centre de la Terre. Cette augmentation de température avec la profondeur varie selon les régions géographiques, allant en moyenne de 3 °C par tranche de 100 mètres jusqu'à 15 °C voire 30 °C. Cette chaleur est principalement générée par la radioactivité naturelle des roches constituant la croûte terrestre.

L'exploitation des eaux souterraines et le développement des pompes à chaleur pourraient faire de la géothermie l'une des principales sources d'énergie durables de demain.

La collecte et l'analyse de données géologiques, géochimiques et géophysiques ont permis d'identifier plus de deux cents sources chaudes dans la partie nord de l'Algérie. Environ un tiers de ces sources (33%) affichent des températures supérieures à 45°C. Certaines sources présentent même des températures très élevées, pouvant atteindre jusqu'à 118°C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis de définir trois zones où ce gradient dépasse les 5°C par tranche de 100 mètres : la zone de Relizane et Mascara, la zone Aine Boucif et Sidi Aïssa, ainsi que la zone de Guelma et Djebel El Onk [8].



**Figure 1.8** : Centrale électrique géothermique [9].

## 4. Les avantages et Les inconvénients des énergies renouvelables

### 4.1 Avantage

Les bénéfices des énergies renouvelables sont multiples :

- **Écologie préservée** : Les énergies renouvelables réduisent considérablement les émissions de gaz à effet de serre et produisent peu voire pas de déchets, sans nécessiter de combustibles fossiles pour fonctionner. Elles contribuent ainsi à la préservation de l'environnement [9].
- **Ressources gratuites** : Les sources des énergies renouvelables telles que le soleil, le vent et l'eau sont naturelles et gratuites. Bien qu'il faille initialement investir dans des infrastructures appropriées, une fois en place, ces systèmes exploitent les ressources naturelles sans coût supplémentaire.
- **Inépuisable** : À l'échelle humaine, les ressources renouvelables telles que le rayonnement solaire, la force du vent et l'énergie hydraulique sont pratiquement illimitées, bien que leur disponibilité puisse varier selon les régions et les saisons.
- **Sécurité** : Les énergies renouvelables sont généralement associées à un faible risque d'accidents, ce qui en fait une option sûre pour la production d'énergie [11].
- **Décentralisation** : Les installations de production d'énergie renouvelable peuvent être déployées sur une grande partie du territoire, favorisant ainsi la création d'emplois locaux et réduisant la dépendance à l'égard des grands réseaux de distribution d'électricité.

### 4.2 Inconvénients

Effectivement, malgré leurs nombreux avantages, les énergies renouvelables ne sont pas exemptes d'inconvénients.

- **Impacts visuels et sonores** : Les installations d'énergies renouvelables, telles que les panneaux solaires sur les toits ou les champs éoliens près des habitations, peuvent avoir des répercussions esthétiques et sonores sur les populations locales.
- **Variabilité de la source d'énergie** : La production d'énergie solaire et éolienne est tributaire des conditions météorologiques, ce qui peut entraîner une intermittence dans la disponibilité de l'électricité, notamment lors de journées nuageuses ou de vents faibles.

- Coûts initiaux élevés : L'installation de technologies telles que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes ou les barrages hydrauliques peut nécessiter des investissements importants, bien que ces coûts soient souvent compensés par les avantages à long terme d'une source d'énergie propre et renouvelable [12].
- Impact sur l'écosystème : Certaines formes d'énergies renouvelables, comme les barrages hydroélectriques, peuvent perturber les écosystèmes locaux en modifiant le cours des rivières et en affectant la faune et la flore, par exemple en perturbant les migrations de poissons.
- Émissions de CO<sub>2</sub> associées à la fabrication : Bien que la production d'énergie renouvelable elle-même ne génère pas d'émissions de CO<sub>2</sub>, la fabrication des équipements nécessaires, tels que les panneaux photovoltaïques, peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre.
- Le faible rendement énergétique : Effectivement, les énergies renouvelables font parfois l'objet de critiques en raison de leur rendement énergétique relativement plus faible par rapport aux énergies fossiles [13].

### **5. Conclusion**

L'énergie renouvelable se distingue par son caractère naturellement reconstituable, par opposition aux sources d'énergie non renouvelables qui puisent dans des réserves finies. Ces dernières années ont été marquées par une croissance significative dans le développement et l'exploitation des énergies renouvelables. Dans les deux prochaines décennies, la viabilité de tout système énergétique dépendra d'une combinaison judicieuse entre l'utilisation efficiente des sources traditionnelles et une augmentation de la part des énergies renouvelables.



# **Chapitre 2**

# **La géothermie**

### 1. Introduction

L'énergie géothermique, puisant dans les réserves de chaleur sous la surface terrestre, offre une voie durable et constante pour la production d'électricité et de chaleur, indépendamment des conditions météorologiques ou des cycles de la journée. Cette ressource, alimentée en grande partie par la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre et par des échanges thermiques profonds, présente une diversité de températures et de profondeurs propices à une multitude d'applications. Dans de nombreuses régions, les températures souterraines avoisinent les 25-30°C à 500 mètres de profondeur, et peuvent même atteindre des valeurs bien plus élevées, dépassant parfois les 100°C voire les 200°C, en fonction des caractéristiques géologiques locales telles que le volcanisme ou la finesse de l'écorce terrestre. Cette ressource quasi inépuisable a connu un regain d'intérêt significatif ces dernières années, devenant un pilier essentiel des stratégies énergétiques futures. Ainsi, la géothermie occupe une place de plus en plus prépondérante dans les projections et les politiques énergétiques à venir.

### 2. La Géothermie

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur [1]

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé d'énergie. Celle-ci est utilisée directement ou convertie partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin de la méditerranée

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe (2). La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelée flux de chaleur) n'est pas homogène ; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre. En présence d'un flux de chaleur élevé, les eaux

souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être:

- **Geysers** : Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut. Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie.
- **Fumerolles** : Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère. Exemple Fumerolles en Italie à Larderello [3].
- **Sources thermales** : Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures élevées telles que Les sources thermales du Nord de l'Algérie. L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique. [4].

### 3. Principe de la géothermie

La géothermie est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. Voici les principes de base de la géothermie :

#### 3.1 Chaleur Terrestre

La Terre génère de la chaleur de différentes manières, notamment par la désintégration radioactive des éléments naturels et par la chaleur restante de sa formation il y a des milliards d'années.

#### 3.2 Conduction de la Chaleur

La chaleur provenant de l'intérieur de la Terre se propage vers la surface par conduction à travers les couches rocheuses.

#### 3.3 Différentes Formes d'Exploitation

- **Géothermie de Surface** : Utilisation de la chaleur proche de la surface pour le chauffage et la production d'électricité.

- **Géothermie Profonde** : Utilisation de la chaleur provenant de profondeurs plus importantes pour la production d'électricité.

### 3.4 Technologies de Conversion

La chaleur géothermique peut être convertie en électricité ou en chaleur directe à l'aide de diverses technologies telles que les turbines à vapeur, les échangeurs de chaleur, les pompes à chaleur,

### 3.5 Utilisation Durable

La géothermie est une source d'énergie renouvelable, car la chaleur du noyau terrestre est essentiellement inépuisable à l'échelle humaine.

Applications Variées : En plus de la production d'électricité et du chauffage des bâtiments, la géothermie est également utilisée pour des applications telles que les serres agricoles, les spas thermaux et même le chauffage des piscines.

En résumé, la géothermie exploite la chaleur naturelle de la Terre pour produire de l'électricité et fournir de la chaleur de manière durable et respectueuse de l'environnement [8]

L'énergie thermique, une forme d'énergie essentielle dans notre société moderne, résulte de la conversion de la chaleur en une forme d'énergie utilisable. Cette chaleur peut provenir de diverses sources, notamment du soleil, de la combustion de combustibles fossiles ou de la fission nucléaire.

Le transport de l'énergie thermique constitue un élément essentiel de l'infrastructure énergétique moderne. Il englobe l'ensemble des techniques et technologies avancées permettant d'acheminer la chaleur produite par différentes sources (telles que la biomasse, la géothermie ou la cogénération) vers les lieux de consommation.

Parmi les technologies les plus utilisées figurent les réseaux de chaleur urbains, en particulier ceux de 4e et 5e génération, qui fonctionnent à basse température pour améliorer l'efficacité énergétique. Ces réseaux utilisent des canalisations thermiquement isolées, des pompes à chaleur performantes, ainsi que des fluides caloporteurs spécialisés pour optimiser le transfert thermique. Le recours à des systèmes de stockage thermique et à des solutions numériques intelligentes (pilotage en temps réel, capteurs connectés,) permet également de renforcer la flexibilité et la stabilité du système.

L'énergie thermique ainsi transportée est utilisée dans de nombreux domaines industriels, résidentiels et commerciaux, notamment pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et les procédés thermiques.

### **4. Les différents types de géothermie**

La géothermie peut être classée en plusieurs types principaux en fonction de la profondeur à laquelle la chaleur est extraite et de l'utilisation finale de cette chaleur. Voici les principaux types de géothermie. [4]

#### **4.1 Géothermie de très basse température**

La géothermie de très basse énergie, parfois également appelée géothermie de faible enthalpie, se réfère à l'exploitation de la chaleur provenant de sources géothermiques à des températures relativement basses, souvent juste au-dessus de la température ambiante. Cette forme de géothermie est principalement utilisée pour le chauffage et la climatisation des bâtiments résidentiels et commerciaux, ainsi que pour d'autres applications de faible puissance. Comparée à d'autres formes de géothermie nécessitant des forages profonds ou des installations de centrales électriques, la géothermie de très basse énergie peut souvent être mise en œuvre à des coûts initiaux plus bas, ce qui en fait une option attrayante pour de nombreux propriétaires et entreprises. [4]

#### **4.2 Géothermie de Surface (ou basse température)**

Cette forme de géothermie exploite la chaleur relativement faible présente dans les premiers mètres sous la surface de la Terre. Elle est principalement utilisée pour le chauffage des bâtiments, le chauffage des serres agricoles, les applications de géothermie urbaine et les spas thermaux. Les systèmes de chauffage géothermiques de surface utilisent souvent des pompes à chaleur pour transférer la chaleur du sol aux bâtiments [5].

#### **4.3 Géothermie de Moyenne et Haute température**

Ces types de géothermie exploitent la chaleur située à des profondeurs plus importantes, où la température est plus élevée. La géothermie de moyenne température est utilisée pour la production d'électricité et le chauffage dans certaines régions où la chaleur du sous-sol est suffisamment élevée mais pas nécessairement à des niveaux de température très élevés. La géothermie de haute température, généralement associée aux zones géothermales et

volcaniques, est utilisée pour la production d'électricité à grande échelle grâce à des centrales géothermiques à vapeur [6] [7].

### **4.4 Géothermie Profonde (ou à très haute température)**

Ce type de géothermie exploite la chaleur provenant de profondeurs encore plus importantes, généralement atteintes par le forage de puits profonds. La géothermie profonde est principalement utilisée pour la production d'électricité à grande échelle, mais elle peut également être utilisée pour le chauffage direct dans certaines applications industrielles. Les températures dans les réservoirs géothermiques profonds peuvent être suffisamment élevées pour générer de la vapeur naturelle, ce qui est idéal pour la production d'électricité.

Ces différents types de géothermie offrent des opportunités d'exploitation adaptées aux conditions géologiques et aux besoins énergétiques spécifiques de chaque région. [6] [7]

## **5. Le gradient géothermique**

Gradient géothermique est une mesure de la variation de température à mesure que l'on s'éloigne de la surface de la Terre et que l'on descend vers le centre de la planète.

Il est généralement exprimé en degrés Celsius par kilomètre ( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) ou en kelvins par mètre ( $\text{K}/\text{m}$ ). Ce gradient est influencé par divers facteurs tels que la géologie locale, la composition du sol, la présence de fluides souterrains et le flux de chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. En géothermie, le gradient géothermique est crucial pour évaluer le potentiel de chaleur de la Terre dans le cadre de la production d'énergie géothermique. Le gradient géothermique, qui représente la rate de changement de température avec la profondeur sous la surface de la Terre, varie considérablement à travers le monde en raison de divers facteurs géologiques. En général, le gradient géothermique moyen est d'environ 25 à 30  $^{\circ}\text{C}$  par kilomètre de profondeur, mais cela peut varier considérablement selon la région.

Les zones géothermiques actives, telles que les régions volcaniques ou les zones de tectonique des plaques, ont souvent des gradients géothermiques plus élevés en raison de l'activité thermique accrue dans ces régions. Par exemple, l'Islande, une région très volcanique, a un gradient géothermique relativement élevé. D'autre part, dans les régions où il n'y a pas d'activité géothermique significative, le gradient géothermique peut être beaucoup plus faible. Par exemple, dans les plaines du Midwest aux États-Unis, le gradient géothermique est relativement bas. Il existe également des variations régionales dues à des facteurs locaux tels que la composition du sous-sol, la présence d'eau souterraine et les

mouvements tectoniques. Ces variations peuvent influencer la capacité d'une région à développer des ressources géothermiques pour la production d'énergie [5].

En résumé, le gradient géothermique dans le monde varie considérablement en fonction de la géologie locale et des conditions géothermiques spécifiques de chaque région.

### **6. Avantages/inconvénients :**

La géothermie présente plusieurs avantages et inconvénients :

#### **6.1 Avantages**

- Ressource renouvelable et durable : La chaleur provenant du noyau de la Terre est pratiquement inépuisable à l'échelle humaine, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable et durable.
- Faibles émissions de gaz à effet de serre : La géothermie produit beaucoup moins de gaz à effet de serre par unité d'énergie générée par rapport aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.
- Stabilité des coûts à long terme : Une fois les infrastructures en place, les coûts de production de l'électricité géothermique sont relativement stables, car ils ne dépendent pas des fluctuations des prix des combustibles fossiles.
- Disponibilité constante : Contrairement aux sources d'énergie intermittentes telles que l'énergie solaire et éolienne, la géothermie fournit une source d'énergie constante et fiable, car la chaleur de la Terre est toujours présente.
- Polyvalence d'utilisation : La géothermie peut être utilisée pour produire de l'électricité, chauffer et refroidir des bâtiments, ainsi que pour d'autres applications industrielles et agricoles [3][6]

#### **6.2 Inconvénients :**

- Localisation géographique limitée : Les ressources géothermiques exploitables se trouvent principalement dans des régions spécifiques où les conditions géologiques sont favorables, limitant ainsi leur disponibilité géographique.
- Investissements initiaux élevés : La mise en place des infrastructures nécessaires à l'exploitation de la géothermie, comme les puits de forage et les systèmes de distribution de chaleur, peut nécessiter des investissements initiaux élevés.

- Risque géologique : L'exploitation géothermique peut présenter des risques géologiques tels que l'activité sismique et la libération de gaz naturels, bien que ces risques soient généralement faibles par rapport à d'autres sources d'énergie fossile.
- Potentiel de déplétion : Dans certaines régions, une exploitation intensive de la géothermie peut entraîner une déplétion des réservoirs de chaleur souterrains, ce qui peut diminuer l'efficacité de la production d'énergie à long terme.
- Impact environnemental local : La construction et l'exploitation des installations géothermiques peuvent avoir un impact sur l'environnement local, notamment sur les écosystèmes terrestres et aquatiques, bien que ces impacts soient généralement moins importants que ceux des énergies fossiles. [3][6][8]

### 7 La géothermie en Algérie

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980) Les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien

Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre-Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine. En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermique qui est la nappe du Continental Intercalaire [7].

### 8 Conclusion

Aujourd'hui, l'énergie géothermique joue un rôle essentiel dans la production d'électricité à l'échelle mondiale. Elle constitue une alternative précieuse, en particulier pour les économies en développement et émergentes, en leur offrant une source d'énergie locale, renouvelable et relativement stable. Cette ressource endogène permet également de

renforcer l'autonomie énergétique des pays utilisateurs, en les protégeant partiellement des fluctuations des prix des hydrocarbures, ce qui en fait un levier stratégique dans un contexte de transition énergétique.

Bien que sa part dans la production mondiale d'électricité reste modeste — estimée à environ 0,3 à 0,5 % selon les dernières données. L'énergie géothermique connaît une croissance régulière, notamment dans les régions à fort potentiel géothermique.

Cependant, dans les pays dépourvus de réservoirs naturels de vapeur, le potentiel de la géothermie reste largement inexploité et son développement est encore à ses débuts. L'avenir de la géothermie réside dans sa capacité à être exploitée de manière économiquement viable. Si la conversion en électricité est une application importante, l'utilisation directe de la chaleur géothermique est également répandue. Cette dernière dépend davantage de facteurs tels que l'accès au marché et la concurrence avec d'autres sources de chaleur disponibles. Certains pays ont déjà réalisé des avancées significatives dans ce domaine, tant dans les économies développées que dans les économies émergentes.

L'évolution des prix des énergies fossiles, notamment des hydrocarbures, devrait continuer à favoriser l'adoption de la géothermie, tant pour la production d'électricité que pour l'utilisation directe de la chaleur géothermique. En résumé, la géothermie représente une source d'énergie attractive, prometteuse, propre et renouvelable, avec un potentiel encore largement sous-exploité.



**Chapitre 3**  
**Etude de cas**

## 1. Introduction :

La transition vers les énergies renouvelables est devenue un impératif mondial pour lutter contre le changement climatique et assurer un avenir durable pour les générations futures. Parmi ces sources d'énergie renouvelables, l'énergie géothermique se distingue par sa fiabilité et son potentiel constant. En effet, en exploitant la chaleur naturelle du sous-sol, l'énergie géothermique offre une alternative prometteuse aux combustibles fossiles. Dans cette optique, l'installation de systèmes géothermiques, tels que les sondes verticales, à une profondeur de 200 mètres, émerge comme une solution viable pour répondre aux besoins énergétiques. Cette étude se propose d'analyser la viabilité de l'énergie géothermique à une profondeur de 200mètres sur une période de 25 ans. En examinant les variations saisonnières et les tendances à long terme, cette recherche vise à évaluer le potentiel de l'énergie géothermique dans le cadre d'une transition énergétique durable.

## 2. Description géologique

### 2.1 La wilaya de Tlemcen

La région de Tlemcen (nord-ouest de l'Algérie) occupe une zone située au nord d'une ligne structurelle remarquable (accident du Sud Atlas) traversant les villes d'Agadir (Maroc) et de Gabès (Tunisie). Les roches les plus anciennes se trouvent dans les monts des Traras et dans les monts de Tlemcen (Ghar Roubane), tandis que les plus récentes se trouvent au centre, dans le bassin du Miocène de Maghnia-Sidi Bel Abbès. La litho stratigraphie primaire a fait l'objet de nombreuses études sur les coupes réalisées par les différents auteurs. Dans le Traras, elle est détaillée dans la section de l'oued Honaine sur le versant ouest de Ras Ouain. On y distingue plusieurs formations géologiques, notamment : une formation pélitique de base, des psammites bio turbés, des pélites phthanitiques, une formation flyschöide à micro-branches, des calcaires fossilifères, des dolomies à polypiers, ainsi qu'un complexe volcan sédimentaire. On pense que le granite de Nedroma est d'âge westphalien fini. Au cours de l'orogénèse hercynienne, la région a subi une intense ectogénèse poly phasique. Une couverture secondaire indigène affleure largement dans le massif des Traras et les monts de Tlemcen. Le perm triasique est une série détritique violette qui recouvre de manière non conforme la couverture primaire pliée granitisée.

Le Lias (Jurassique inférieur) commence par une formation calcaire dolomitique massive, suivie d'une formation marno-calcaire riche en failles, puis de calcaires inférieurs à silex et de

calcaires à Amaltheidae. Le Jurassique moyen ou Dogger présente moins de fossiles et des calcaires sombres avec de nombreux silex. Le Jurassique supérieur comprend à la base les argiles de Saïda recouvertes par les grès de Boumédine. Le Méga rythme est composé de plusieurs formations calcaires et calcareo-dolomitiques. Le passage au Crétacé est reconnu dans la région de l'Ouled Mimoun par la formation des argiles de Lamoricrière de l'époque berriasienne. La série Tertiaire comprend l'Eocène continental avec des gastéropodes continentaux et le Miocène marin est bien caractérisé et très développé au nord des Monts Tlemcen dans le sillon subsidés de Maghnia - Sidi Bel Abbes [4].

### **2.2 La wilaya de Ain T'émouchent :**

La région Ain T'émouchent, située à l'ouest de l'Algérie, présente une grande diversité géologique qui reflète son histoire tectonique et sa position entre deux grands ensembles géographiques : la chaîne des montagnes telliennes et la plaine côtière. La géologie de la région est marquée par la présence de formations sédimentaires datant principalement du Tertiaire et du Quaternaire, accompagnées de structures géologiques complexes, telles que des plis, failles et failles inverses, qui témoignent des phénomènes tectoniques survenus dans la région. Ces formations géologiques influencent non seulement le paysage, mais aussi les ressources naturelles de la région, comme les nappes phréatiques, les matériaux de construction, et potentiellement des gisements de minéraux. La région connaît également une activité sismique modérée, en raison de la proximité de la zone de subduction qui affecte le domaine méditerranéen.

## **3. Caractéristiques graphique**

### **3.1 La wilaya de Tlemcen**

Tlemcen, localisée au nord-ouest de l'Algérie, se trouve à une distance de 580 km de la capitale, Alger. Ses coordonnées géographiques sont une latitude de  $34,56^\circ$ , une longitude de  $-1,19^\circ$  et une altitude de 830 mètres. La ville est réputée pour son climat particulier, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers froids et rigoureux. Il convient de noter que l'influence de la mer Méditerranée, située à seulement 45 km, adoucit quelque peu ces conditions climatiques [1].



Figure 3.1 : Localisation de la wilaya de Tlemcen [1].

### 3.2 La wilaya de Ain T'émouchent

La wilaya Ain T'émouchent, située sur la côte nord-ouest de l'Algérie, à environ 450 km d'Alger, bénéficie d'une position géographique stratégique entre la mer Méditerranée et les chaînes montagneuses telliennes. Avec des coordonnées approximatives de  $35,19^\circ$  de latitude et  $1,14^\circ$  de longitude, cette région est caractérisée par un climat méditerranéen, marqué par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. L'influence directe de la mer, à proximité, adoucit les températures et procure une humidité relative importante, favorisant une végétation diversifiée. Géologiquement, Ain T'émouchent se trouve dans une zone où prédominent les formations sédimentaires du Tertiaire, issues de mouvements tectoniques complexes, notamment des plis et failles liés à l'orogénèse alpine. Ces structures géologiques façonnent le paysage, en alternant collines, plaines et vallées, et influencent les ressources en eau souterraine et les risques géologiques dans la région. Cette diversité géologique contribue également à l'exploitation de certaines ressources naturelles, tout en modérant les effets de l'érosion et des phénomènes sismiques, qui demeurent des enjeux à surveiller dans cette zone [6].



Figure 3.2 : Localisation de la wilaya Ain Témouchent [11]

#### 4. Températures du sol :

La température du sol, dans le domaine de la géothermie, se réfère à la chaleur présente dans les couches souterraines de la terre. Cette chaleur est souvent exploitée pour la production d'énergie géothermique. Elle provient principalement de la chaleur interne de la Terre et peut varier en fonction de la profondeur, de la géologie locale et d'autres facteurs. La température du sol est un élément clé dans la conception et l'efficacité des systèmes de chauffage et de refroidissement géothermiques [2].

##### 4.1 Les différentes couches du sol maghrébin

En connaissant la diffusivité thermique du sol  $D_f$ . Il devient possible d'estimer l'évolution de la température du sol en fonction du temps et de la profondeur. Cette diffusivité  $D_f$  est étroitement liée à la composition du sol, laquelle varie selon les différentes couches de la région du Maghreb. Le tableau 3.1 fournit quelques données.

Composition	Df [m <sup>2</sup> /s]
Calcaire	0.6939.10 <sup>-6</sup>
Gravier sec	0.2666.10 <sup>-6</sup>
Gravier sature	0.75.10 <sup>-6</sup>
Sable sec	0.75.10 <sup>-6</sup>
Sable sature	0.9230.10 <sup>-6</sup>
Argile/Limon sec	0.3226.10 <sup>-6</sup>
Argile/Limon sature	0.7083.10 <sup>-6</sup>

**Tableau3.1** : Les différentes couches du sol maghrébin. (3)

## 5. Les sites étudiés

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à l'étude de sept sites répartis entre deux wilayas de l'ouest d'Algérie : quatre sites situés dans la wilaya de Tlemcen et trois autres dans la wilaya de Ain T'émouchent. , avec un accent particulier sur la géothermie basse énergie. Cette forme de géothermie, qui repose sur l'exploitation des faibles températures souterraines pour des applications telles que le chauffage, la climatisation ou la production d'eau chaude sanitaire, présente un intérêt croissant en raison de ses avantages écologiques et économiques. L'objectif de cette étude est d'analyser les caractéristiques géothermiques de ces sites, d'évaluer leur potentiel d'exploitation pour un usage durable et de comparer les pratiques et solutions mises en place dans les deux wilayas. À travers cette recherche, nous visons à proposer des pistes pour promouvoir l'utilisation de la géothermie basse énergie dans ces régions, en tenant compte des spécificités locales et des besoins en matière d'énergie renouvelable.

### 5.1 Le site de Béni Master

Le premier site est celui de Béni Mester, il se distingue (caractérise) par la présence d'un sol calcaire sur les deux premières centaines de mètres (Figure3.3).

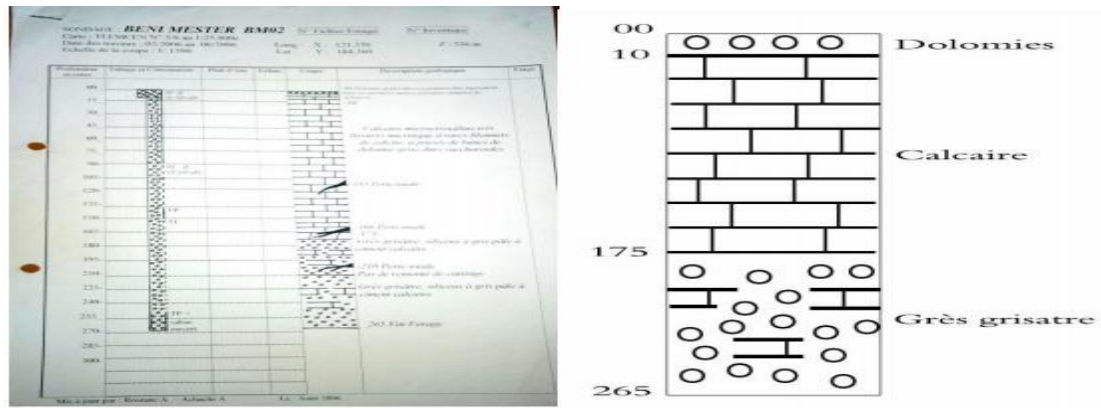


Figure 3.3 : composition du sol de Béni Mester [10]

### 5.2 Le site de Birouana (ville de TLEMCEN)

Le deuxième site, celui de Birouana, est constitué d'une alternance de marnes, de marnes gréseuses et de grès, reposant sur un substratum calcaire et dolomitique d'âge jurassique.

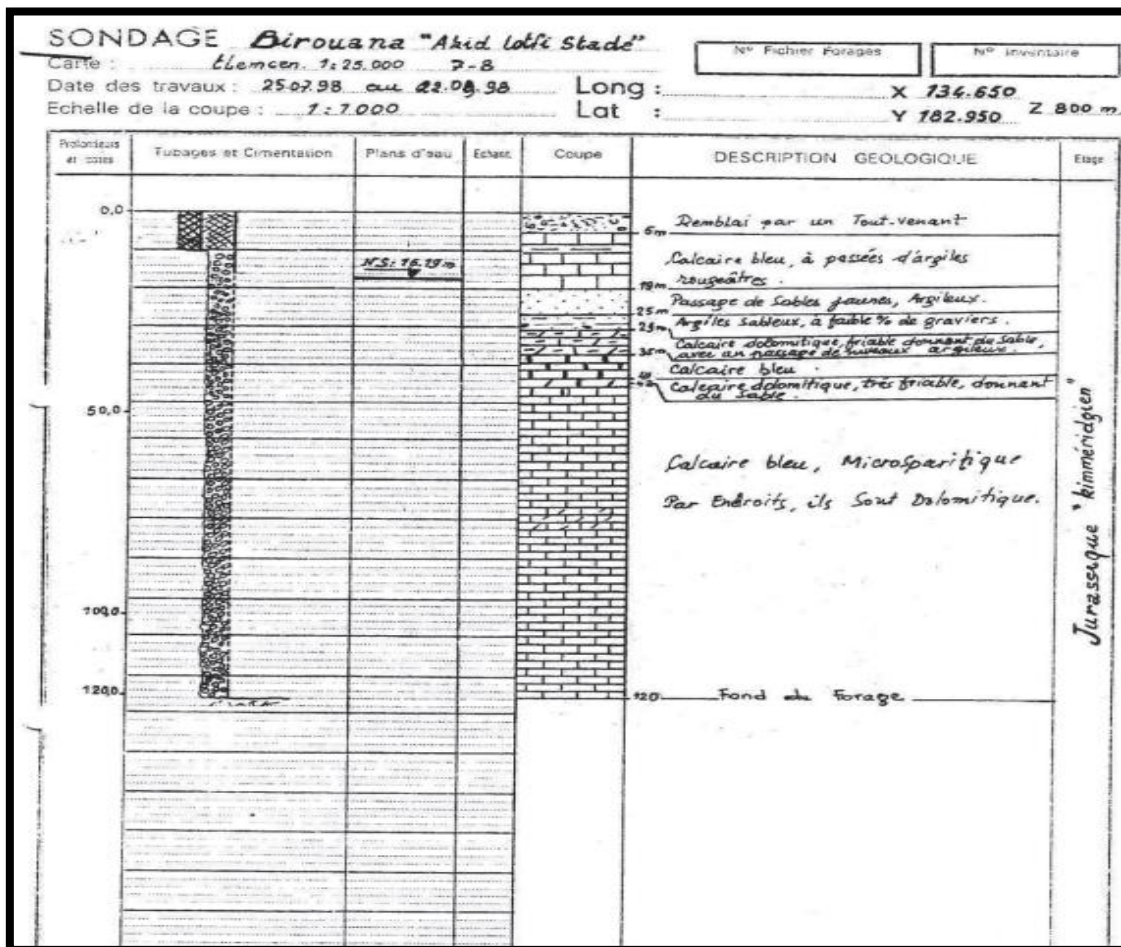


Figure 3.4 : Composition du sol de Birouana [09]

### 5.3 Site de Zouia (MAGHNIA)

Le troisième site, celui de Zouia, se distingue par la présence d'une formation géologique composée d'alternances de calcaires et de calcaires gréseux, surmontés par des marnes gréseuses. Cette succession est ensuite suivie par des alternances de marnes et de marnes gréseuses contenant des bancs calcaires discontinus. (Figure 3.5).



Figure 3.5 : la composition du sol de Zouia [7]

### 5.4 Le site de Chbikia(MAGHNIA):

Le quatrième site est celui de Chbikia, il se distingue (caractérise) par la présence d'un sol en gravier sur les deux premières centaines de mètres (Figure3.6).

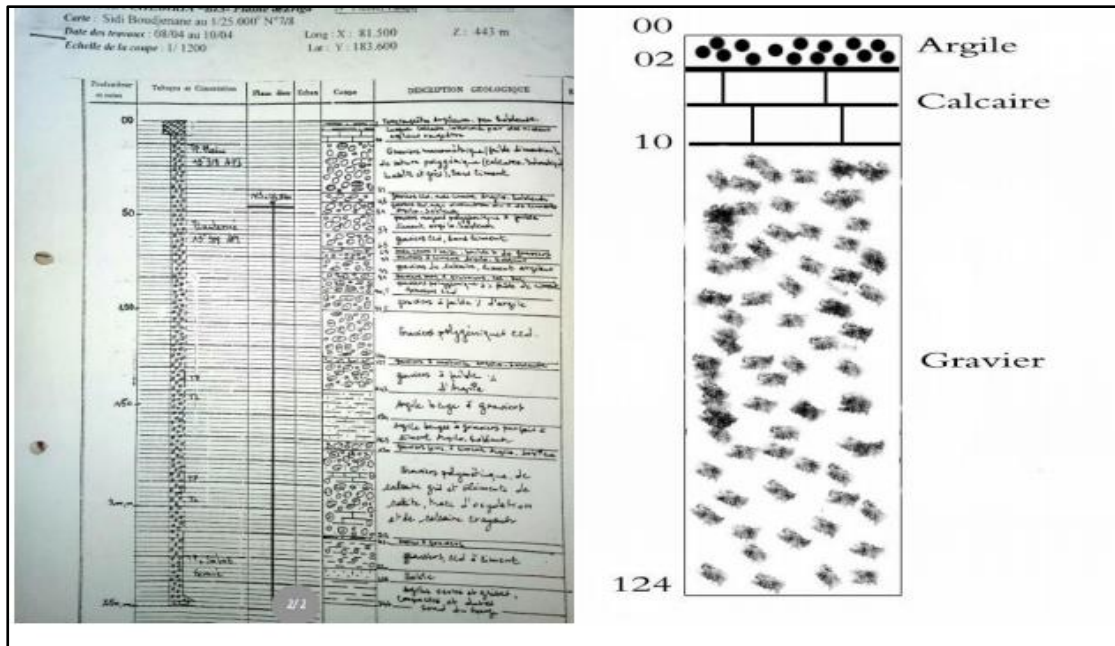


Figure 3.6 : La composition du sol de Chbikia

### 5.5 Le site de Bendouma (Ain T'émouchent)

Le forage Bendouma est situé dans la commune d'Ain Kihel. Il est constitué d'une Succession de marnes et de grès. (Figure 3.7)

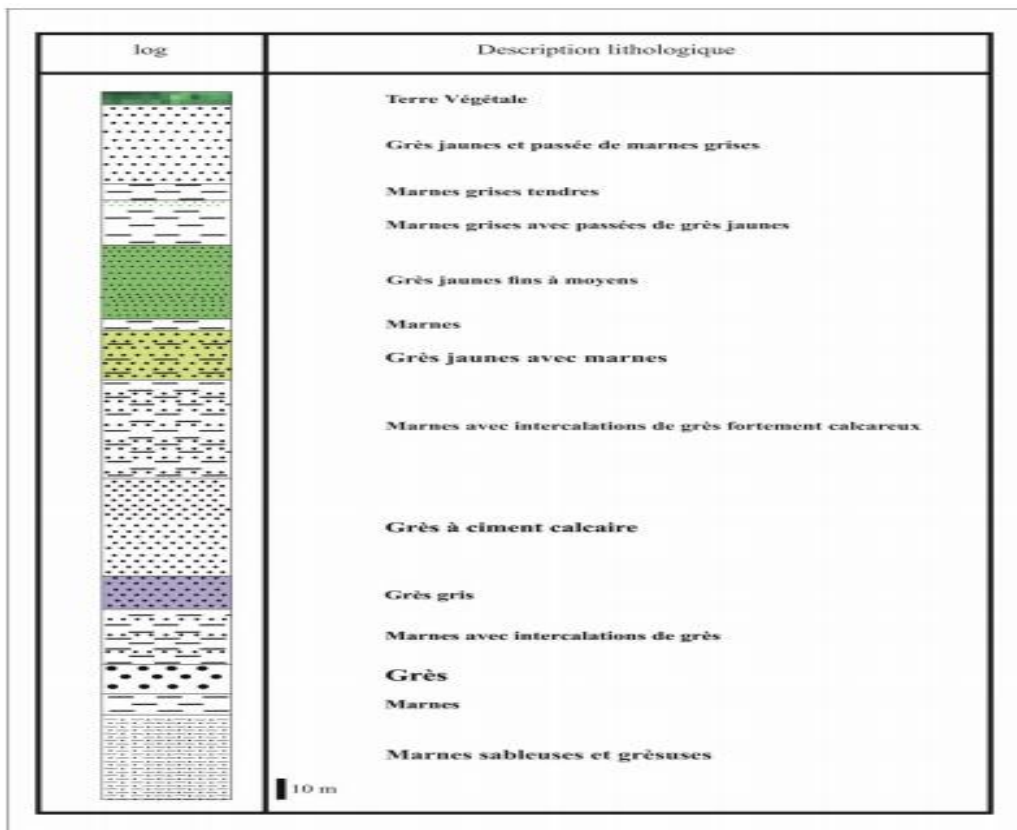


Figure 3.7 : La composition du sol de Bendouma [6]

### Le site de Sidi Saadâ (Ain T'émouchent)

Le sixième site est celui de sidi Saadâ, il se situe dans la commune d'Aghlal. Le site se distingue par alternances de calcaires et de calcaires gréseux surmontés par des marnes gréseuses et des alternances de marnes et marnes gréseuses admettant des passées calcaires d'âge plio-quaternaire. (Figure 3.8)

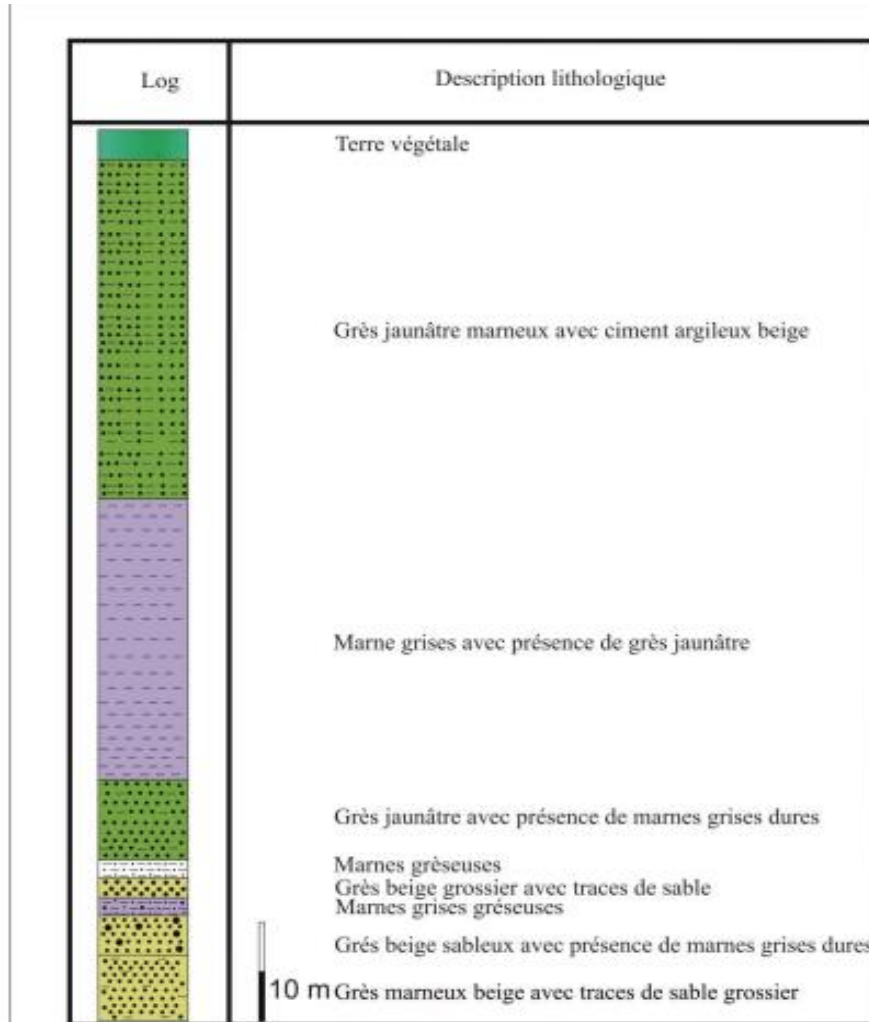


Figure 3.8 : La composition du sol Sidi Saada [6]

### 5.6 Le site de kirolise (-Ain T'émouchent)

Le septième site est celui de kirolise, il se situe dans la commune de Hammam Bou Hadjer. Le site se distingue par une succession de marnes et de grès et des calcaires marneux.

(Figure 3.9)

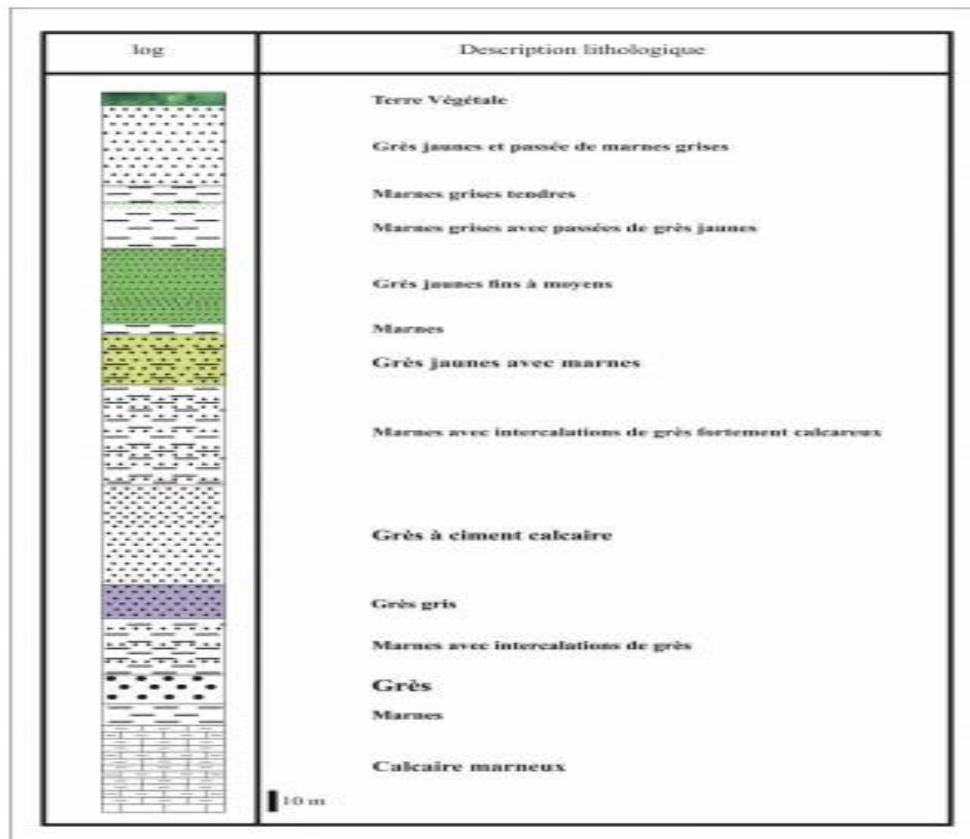


Figure 3.9 : La composition du sol de Kirolise [6]

## 6. Propriétés des sols étudiés

Le tableau 3.2 présente les caractéristiques des sols étudiés

Caractéristique	Les sites de la wilaya Tlemcen				Les sites de la wilaya Dain t'émouchent		
	. Le site de Béni Mastère	. Le site de Birouana	. Le site de Zouia	. Le site de Chbikia	. Le site de Ben douma	. Le site de Sidi Saadâ	. Le site de kirolise
Conductivité thermique	0.400 W/m. K	1.56 W/m, K	2.21W/m. K	0.40W/m.K	2.21W/m. K	2.42W/m, K	2.29W/m. K
Capacité thermique volumétrique	1.5MJ/m <sup>3</sup> .K	2.25MJ/mK	1.8MJ/mK	1.5MJ/m <sup>3</sup> K	2MJ/m <sup>3</sup> , K	2.25MJ/m <sup>3</sup> K	2MJ/m <sup>3</sup> , K
Flux de chaleur géothermique	60.00 m W/m <sup>2</sup>	60.00 mW/m <sup>2</sup>	59.23 mW/m <sup>2</sup>	59.23 <sup>2</sup> mW/m <sup>2</sup>	29.17 mW/m <sup>2</sup>	14.52 mW/m <sup>2</sup>	18.72 mW/m <sup>2</sup>

Tableau 3.2 : Propriétés des 7sols étudiés. [6][7][8][9][10].

## 7. Caractéristique du fluide caloporteur

Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau à une température de 20°C.

Conductivité thermique	0,600 W/m, K
Capacité thermique volumique	4182 J/kg, K
Masse volumique	998 kg/m <sup>3</sup>
Viscosité	0,001003 kg/m, s
Point de congélation	0,0 °C
Débitvolumique par trou de forage	0,002000 m <sup>3</sup> /s

**Tableau 3.3** : Caractéristique de l'eau [10]

### 7.1 La géothermie à sondes

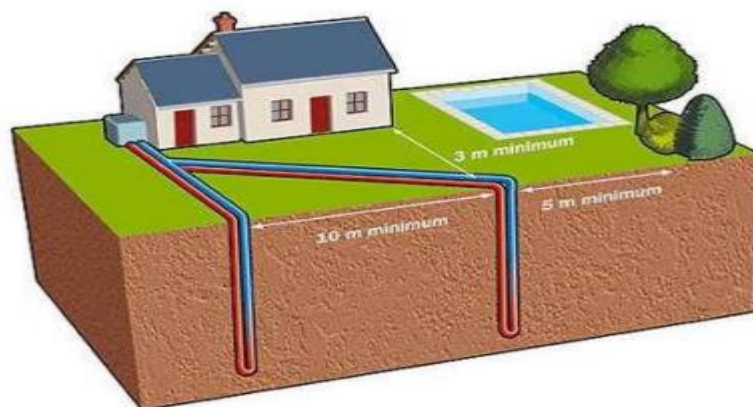
Les sondes géothermiques extraient les calories du sous-sol par le biais d'un échange thermique. Elles utilisent généralement des tubes en U en polyéthylène de 32 mm de diamètre à travers lesquels circule le liquide caloporteur. Deux principaux types de sondes sont disponibles

Les sondes horizontales qui sont installées à une profondeur d'environ 1 mètre.

Les sondes verticales qui nécessitent un forage d'au plus 200 mètres de profondeur.

### 7.2 Le type de forage

Pour notre étude nous allons utiliser le forage vertical, tel que schématisé la figure 3.10



**Figure 3.10** : Géothermie verticale Sol-Eau [4]

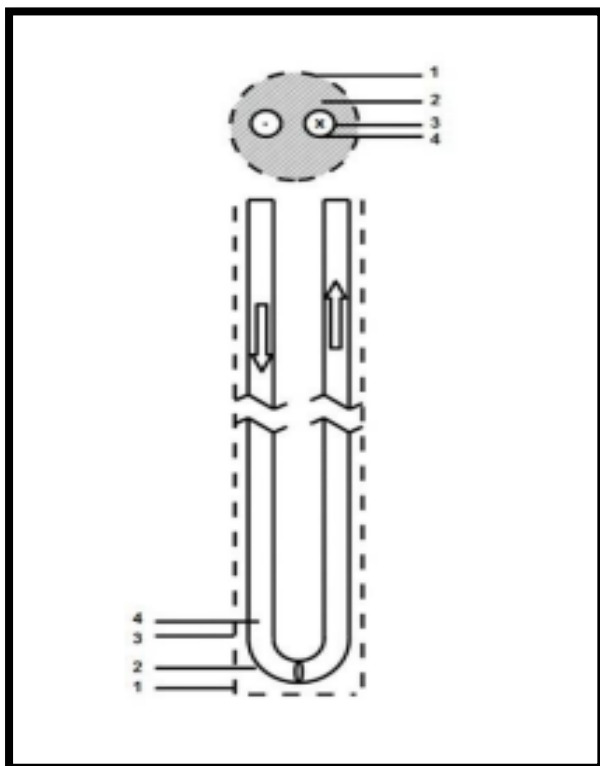
Le captage des calories par des collecteurs verticaux ou par des sondes verticales .Appelées sondes géothermiques nécessite le forage de trous espacés d'au moins 5 à 10m, réalisés à proximité de la maison ou sous celle-ci avant sa construction. Les sondes géothermiques,

constituées d'un tube en polyéthylène en forme de U, sont insérées dans les puits par groupes de tuyaux d'aller et de retour. Après l'installation des capteurs, les puits sont ensuite remplis d'un mélange de gravier partiel ou de sable fin vibré et de bentonite, sélectionné pour garantir une bonne conduction de la chaleur et une bonne protection contre les éventuels glissements de terrain, attaques de racines, etc.

Le tableau 3.4 fournit quelques caractéristiques.

Profondeur du trou de forage	200.00m
Espacement des trous de forage	10.00m
Installation de forage	SINGLE-U
Diamètre du trou de forage	0,110 m
Diamètre du tuyau en U	0,032 m
Epaisseur du tube en U	0,0030m
Conductivité thermique des tuyaux en U	0,420 W/m, K

**Tableau 3.4** : Caractéristiques de forage SINGLE-U (10)



- 1 : Paroi du trou de forage
- 2 : Coulis de ciment
- 3 : L'intérieur du tube en U
- 4 : Paroi du tube en U

**Figure 3.11** : Forage SINGLE-U.

Étant donné que la sonde verticale mesure environ 200 mètres de longueur et chaque sol sondé est constitué de matières différentes alors des caractéristiques différentes (conductivité thermique ....) seront considérées.

Une fois la composition du sol et du fluide caloporteur ainsi que le type de forage déterminés, ces données sont entrées dans le logiciel EED pour générer les résultats présentés ci-dessous (voir Tableau suivant).

### **Simulation d'une sonde géothermique verticale**

Le logiciel Earth Energy Designer (EED) est spécifiquement conçu pour la conception de forages verticaux utilisés comme échangeurs de chaleur pour les pompes à chaleur géothermiques. Son attrait réside dans sa convivialité, sa courbe d'apprentissage rapide, ses temps de calcul rapides et ses bases de données intégrées. Ces fonctionnalités en font un outil précieux pour les ingénieurs travaillant quotidiennement sur la conception de systèmes de pompe à chaleur géothermique.

EED est équipé de bases de données fournissant des paramètres essentiels du sol, tels que la conductivité thermique et la chaleur spécifique, ainsi que des informations sur les matériaux de tuyauterie et les fluides caloporteurs. Les données d'entrée comprennent les besoins moyens mensuels en chauffage et en refroidissement ainsi que la charge de pointe pour le bâtiment analysé. De plus, le programme calcule la résistance thermique du forage en fonction de la géométrie du forage, des matériaux des joints et des tuyaux. La période de simulation de 25ans a été choisie pour évaluer la variation de la température dans le sol sur une période significative.

Le logiciel (EED) est utilisé pour la conception de systèmes de chauffage et de refroidissement géothermiques, en particulier pour les pompes à chaleur géothermiques. Plus précisément, il est spécialement conçu pour concevoir des forages verticaux qui servent d'échangeurs de chaleur avec le sol. Ces échangeurs de chaleur sont essentiels pour transférer la chaleur entre le sol et le fluide circulant dans le système de pompe à chaleur, permettant ainsi de chauffer ou de refroidir un bâtiment de manière efficace et écologique. EED facilite le processus de conception en fournissant des outils pour calculer les besoins en énergie, simuler le comportement thermique du sol, optimiser la configuration des forages et estimer les performances du système géothermique [1].

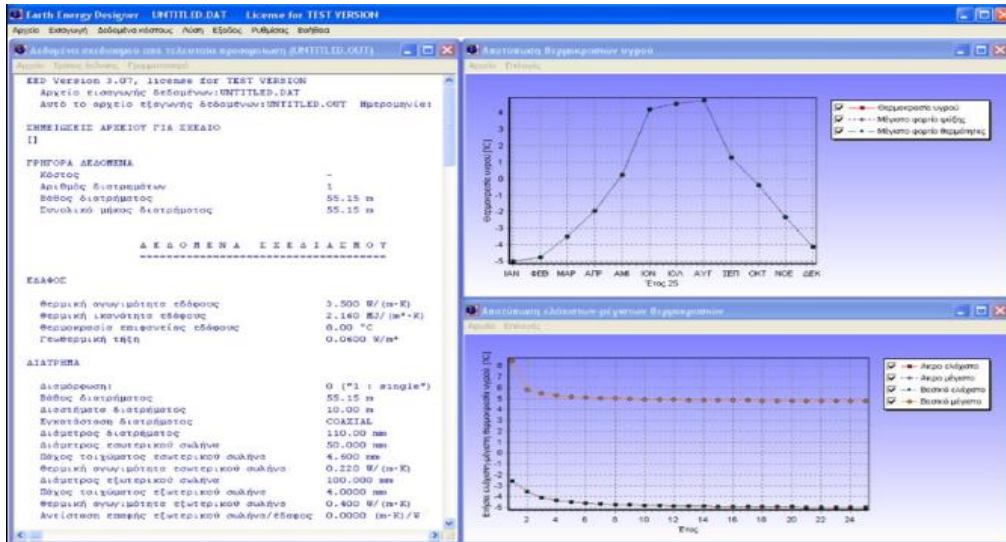


Figure 3.12 : L’interface du logiciel de EED

### 7.3 Comparaison des températures moyennes mensuelles sur 25ans :

#### i. Température 2°c

- Site de Béni Mester

Mois	1ère année	2eme année	5eme année	10eme année	25eme année
Janvier	12,48	11,48	11,04	10,78	10,47
Février	12,22	11,52	11,1	10,58	10,54
Mars	12,66	12,1	11,69	11,44	11,14
Avril	13,32	12,84	12,45	12,2	11,9
Mai	14,32	13,91	13,53	13,29	12,99
Juin	16,25	15,88	15,52	15,28	14,98
Juillet	16,46	16,13	15,78	15,54	15,24
Août	16,57	16,26	15,92	15,69	15,39
Septembre	14,86	14,58	14,25	14,01	13,72
Octobre	13,97	13,7	13,39	13,16	12,86
Novembre	12,95	12,71	12,4	12,17	11,88
Décembre	11,99	11,76	11,46	11,24	10,95

Tableau 3.5 : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Béni Mester)

• **Site de Birouana**

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	4,89	4,78	4,74	4,71	4,68
Février	4,88	4,8	4,76	4,73	4,7
Mars	4,98	4,92	4,88	4,85	4,82
Avril	5,11	5,06	5,02	4,99	4,97
Mai	5,31	5,26	5,22	5,2	5,17
Juin	5,67	5,63	5,59	5,56	5,53
Juillet	5,69	5,65	5,62	5,59	5,56
Août	5,7	5,67	5,63	5,61	5,58
Septembre	5,37	5,34	5,31	5,28	5,28
Octobre	5,21	5,19	5,15	5,13	5,1
Novembre	5,03	5,01	4,97	4,95	4,92
Décembre	4,86	4,84	4,81	4,78	4,76

**Tableau 3.6** : Températures moyennes de fluide moyennes à la fin du mois (site de Birouana)

• **Site de Zouia**

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	3,3	3,13	3,05	3,01	2,96
Février	3,29	3,16	3,09	3,04	3
Mars	3,45	3,35	3,28	3,23	3,19
Avril	3,66	3,57	3,51	3,47	3,42
Mai	3,97	3,89	3,83	3,79	3,74
Juin	4,55	4,48	4,42	4,38	4,33
Juillet	4,58	4,52	4,46	4,42	4,38
Août	4,6	4,55	4,49	4,45	4,4
septembre	4,07	4,02	3,97	3,93	3,88
Octobre	3,82	3,77	3,72	3,68	3,63
novembre	3,53	3,49	3,43	3,39	3,35
décembre	3,26	3,22	3,17	3,13	3,08

**Tableau 3.7** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Zouia)

• **Site de Chbikia**

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	12,29	11,29	10,85	10,59	10,28
Février	12,03	11,33	10,91	10,65	10,35
Mars	12,47	11,9	11,5	11,25	10,95
Avril	13,12	12,65	12,26	12,01	11,71
Mai	14,13	13,71	13,74	13,09	12,79
Juin	16,06	15,69	15,33	15,09	14,79
Juillet	16,27	15,93	15,58	15,35	15,05
Août	16,38	16,07	15,73	15,5	15,2
septembre	14,67	14,38	14,05	13,82	13,53
Octobre	13,77	13,51	13,19	12,96	12,67
novembre	12,76	12,51	12,2	11,98	11,69
décembre	11,8	11,57	11,27	11,04	10,86

**Tableau 3.8** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Chbikia)

• **Site de Ben douma**

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	1,95	1,78	1,7	1,66	1,61
Février	1,94	1,81	1,74	1,69	1,65
Mars	2,1	2	1,93	1,88	1,83
Avril	2,31	2,22	2,15	2,11	2,06
Mai	2,61	2,54	2,47	2,43	2,38
Juin	3,19	3,12	3,06	3,02	2,97
Juillet	3,22	3,16	3,1	3,06	3,01
Août	3,24	3,19	3,13	3,09	3,04
septembre	2,72	2,67	2,61	2,57	2,52
Octobre	2,47	2,42	2,36	2,33	2,28
novembre	2,18	2,13	2,08	2,04	2
décembre	1,91	1,87	1,082	1,78	1,73

**Tableau 3.9** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Ben douma)

- Site de Sidi Saadâ

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	1,32	1,16	1,09	1,05	1
Février	1,3	1,19	1,12	1,08	1,04
Mars	1,45	1,36	1,3	1,26	1,21
Avril	1,65	1,57	1,51	1,47	1,43
Mai	1,94	1,78	1,81	1,77	1,73
Juin	2,48	2,42	2,36	2,32	2,28
Juillet	2,51	2,46	2,4	2,36	2,32
Août	2,53	2,48	2,43	2,39	2,35
septembre	2,04	1,99	1,94	1,9	1,86
Octobre	1,8	1,76	1,71	1,67	1,63
novembre	1,53	1,49	1,44	1,41	1,36
décembre	1,28	1,24	1,19	1,16	1,12

**Tableau 3.10** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Sidi Saadâ)

- Site de Kirolise

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	1,48	1,31	1,24	1,19	1,15
Février	1,46	1,34	1,27	1,23	1,18
Mars	1,62	1,52	1,46	1,42	1,37
Avril	1,83	1,75	1,68	1,64	1,49
Mai	2,13	2,05	1,99	1,95	1,91
Juin	2,69	2,63	2,57	2,53	2,48
Juillet	2,72	2,67	2,61	2,53	2,52
Août	2,74	2,69	2,63	2,6	2,55
septembre	2,23	2,18	2,13	2,09	2,04
Octobre	1,98	1,93	1,88	1,85	1,8
novembre	1,7	1,65	1,61	1,57	1,53
décembre	1,44	1,4	1,35	1,31	1,27

**Tableau 3.11** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de kirolise)

ii. Temperature 15<sup>0</sup>c

• Site de Béni Mester

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	25,48	24,48	24,04	23,78	23,47
Février	25,22	24,52	24,1	23,85	23,54
Mars	25,66	25,1	24,69	24,44	24,14
Avril	26,23	25,84	25,45	25,2	24,9
Mai	27,32	26,91	26,53	26,29	25,99
Juin	29,25	28,88	28,52	28,28	27,98
Juillet	29,46	29,16	28,78	28,54	28,24
Août	29,57	29,26	28,92	28,69	28,39
septembre	27,86	27,58	27,25	27,01	26,72
Octobre	26,97	26,7	26,39	26,16	25,86
novembre	25,95	25,71	25,4	25,17	24,88
décembre	24,99	24,76	24,46	24,24	23,95

Tableau 3.12 : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Béni Mester)

• Site de Birouana

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	17,46	17,3	17,23	17,19	17,14
Février	17,45	17,33	17,26	17,22	17,18
Mars	17,6	17,51	17,44	17,4	17,36
Avril	17,8	17,72	17,66	17,62	17,57
Mai	18,09	18,02	17,96	17,92	17,87
Juin	18,63	18,57	18,51	18,47	18,43
Juillet	18,66	18,61	18,55	18,51	18,47
Août	18,68	18,63	18,57	18,54	18,49
septembre	18,18	18,14	18,08	18,05	18
Octobre	17,95	17,9	17,85	17,82	17,77
novembre	17,67	17,63	17,58	17,55	17,51
décembre	17,42	17,38	17,34	17,3	17,26

Tableau 3.13 : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Birouana)

• Site de Zouia

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	16,3	16,13	16,05	16,01	15,96
Février	16,29	16,16	16,09	16,04	16
Mars	16,45	16,35	16,28	16,23	16,19
Avril	16,66	16,57	16,51	16,47	16,42
Mai	16,97	16,89	16,83	16,79	16,74
Juin	17,55	17,48	17,42	17,38	17,33
Juillet	17,58	17,52	17,46	17,42	17,38
Août	17,6	17,55	17,49	17,45	17,4
septembre	17,07	17,02	16,97	16,93	16,88
Octobre	16,82	16,77	16,72	16,68	16,63
novembre	16,53	16,49	16,43	16,39	16,35
décembre	16,26	16,22	16,17	16,13	16,08

**Tableau 3.14 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Zouia)

• Site de Chbikia

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	25,29	24,29	23,85	23,59	23,28
Février	25,03	24,33	23,91	23,65	23,35
Mars	25,47	24,9	24,5	24,25	23,95
Avril	26,12	25,65	25,26	25,01	24,71
Mai	27,13	26,71	26,34	26,09	25,79
Juin	29,06	28,69	28,33	28,09	27,79
Juillet	29,27	28,93	28,58	28,35	28,09
Août	29,38	29,07	28,73	28,5	28,2
Septembre	27,67	27,38	27,05	26,82	26,53
Octobre	26,77	26,51	26,19	25,96	25,67
Novembre	25,76	25,51	25,2	24,98	24,69
Décembre	24,8	24,57	24,27	24,04	23,73

**Tableau 3.15 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Chbikia)

• Site de Bendouma

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	14,95	14,78	14,7	14,66	14,61
Février	14,94	14,81	14,74	14,69	14,65
Mars	15,1	15	14,93	14,88	14,83
Avril	15,31	15,22	15,15	15,11	15,06
Mai	15,61	15,54	15,47	15,43	15,38
Juin	16,19	16,12	16,06	16,02	15,97
Juillet	16,22	16,16	16,1	16,06	16,01
Août	16,24	16,19	16,13	16,09	16,04
Septembre	15,72	15,67	15,61	15,57	15,52
Octobre	15,47	15,42	15,36	15,33	15,28
Novembre	15,18	15,13	15,08	15,04	15
Décembre	14,91	14,87	14,82	14,78	14,763

**Tableau 3.16** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Bendouma)

• Site de Sidi Saadâ

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	14,32	14,16	14,09	14,05	14
Février	14,3	14,19	14,12	14,08	14,04
Mars	14,45	14,36	14,3	14,26	14,21
Avril	14,65	14,57	14,51	14,47	14,43
Mai	14,94	14,87	14,81	14,77	14,73
Juin	15,48	15,42	15,36	15,32	15,28
Juillet	15,51	15,46	15,4	15,36	15,32
Août	15,53	15,48	15,43	15,39	15,35
Septembre	15,04	14,99	14,94	14,9	14,86
Octobre	14,8	14,76	14,71	14,67	14,63
Novembre	14,53	14,49	14,44	14,41	14,36
Décembre	14,28	14,24	14,19	14,16	14,12

**Tableau 3.17**:Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Sidi Saadâ)

- sites de kirolise

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	14,48	14,31	14,24	14,19	14,15
Février	14,46	14,34	14,27	14,23	14,18
Mars	14,62	14,52	14,46	14,42	14,37
Avril	14,83	14,75	14,68	14,64	14,59
Mai	15,13	15,05	14,99	14,95	14,89
Juin	15,69	15,63	15,57	15,53	14,48
Juillet	15,72	15,67	15,61	15,57	15,52
Août	15,74	15,69	15,63	15,6	15,55
Septembre	15,23	15,18	15,13	15,09	15,04
Octobre	14,98	14,94	14,88	14,85	14,80
Novembre	14,7	14,66	14,61	14,57	14,53
Décembre	14,44	14,4	14,35	14,31	14,27

**Tableau 3.18:** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de kirolise)

iii. **Temperature 25<sup>0</sup>c**

- **Site de Béni Mester**

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	35,48	34,48	34,04	33,78	33,47
Février	35,22	34,52	34,1	33,85	33,54
Mars	35,66	35,1	34,69	34,44	34,14
Avril	36,32	35,84	35,45	35,2	34,9
Mai	37,32	36,91	36,53	36,29	35,99
Juin	39,25	38,88	38,52	38,28	37,98
Juillet	39,46	39,13	39,01	38,54	38,24
Août	39,57	39,26	38,92	38,69	38,39
Septembre	37,86	37,58	37,25	37,01	36,72
Octobre	36,97	36,7	36,39	36,16	35,86
Novembre	35,95	35,71	35,4	35,17	34,88
Décembre	34,99	34,76	34,46	34,24	33,95

**Tableau 3.19 :** Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Béni Mester)

• **Site de Birouana**

Mois	1ère année	2ème année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	27,46	27,3	27,23	27,19	27,14
Février	27,45	27,33	27,26	27,22	27,18
Mars	27,6	27,51	27,44	27,4	27,36
Avril	27,8	27,72	27,66	27,62	27,57
Mai	28,09	28,02	27,96	27,92	27,87
Juin	28,63	28,57	28,51	28,47	28,43
Juillet	28,66	28,61	28,55	28,51	28,47
Août	28,68	28,63	28,57	28,54	28,49
Septembre	28,18	28,14	28,08	28,05	28
Octobre	27,95	27,9	27,85	27,82	27,77
Novembre	27,67	27,63	27,58	27,55	27,51
Décembre	27,42	27,38	27,34	27,3	27,26

**Tableau 3.20** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Birouana)

**iv. Site de Zouia**

Mois	1ère année	2ème année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	26,3	26,13	26,05	26,01	25,96
Février	26,29	26,16	26,09	26,04	26
Mars	26,45	26,35	26,28	26,23	26,19
Avril	26,66	26,57	26,51	26,47	26,42
Mai	26,97	26,98	26,83	26,79	26,74
Juin	27,55	27,48	27,42	27,38	27,33
Juillet	27,58	27,52	27,46	27,42	27,38
Août	27,6	27,55	27,49	27,45	27,4
Septembre	27,07	27,02	26,97	26,93	26,88
Octobre	26,82	26,77	26,7	26,68	26,63
Novembre	26,53	26,49	26,43	26,39	26,35
Décembre	26,26	26,22	26,17	26,13	26,08

**Tableau 3.21** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Zouia)

• Site de Chbikia

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	35,25	34,29	33,85	33,59	33,28
Février	35,09	34,33	33,91	33,65	33,35
Mars	35,47	34,9	34,5	34,25	33,95
Avril	36,12	35,65	35,26	35,01	34,71
Mai	37,16	36,71	36,34	36,09	35,79
Juin	39,06	38,69	38,33	38,09	37,79
Juillet	39,27	38,93	38,53	38,35	38,05
Août	39,38	39,07	38,73	38,5	38,2
Septembre	37,67	37,38	37,05	36,82	36,53
Octobre	36,77	36,51	36,19	35,96	35,67
Novembre	35,76	35,51	35,2	34,94	34,69
Décembre	34,8	34,57	34,27	34,04	33,76

**Tableau 3.22** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Chbikia)

• Site de Bendouma

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	24,95	24,78	24,7	24,66	24,61
Février	24,94	24,81	24,74	24,69	24,65
Mars	25,1	25	24,93	24,88	24,83
Avril	25,31	25,22	25,15	25,11	25,06
Mai	25,61	25,54	25,47	25,43	25,38
Juin	26,19	26,12	26,06	26,02	25,97
Juillet	26,22	26,16	26,1	26,06	26,01
Août	26,24	26,19	26,13	26,09	26,04
Septembre	25,72	25,67	25,61	25,57	25,52
Octobre	25,47	25,42	25,36	25,33	25,28
Novembre	25,18	25,13	25,08	25,04	25
Décembre	24,91	24,87	24,82	24,78	24,73

**Tableau 3.23**: Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Bendouma)

• Site de Sidi Saadâ

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	24,32	24,16	24,09	24,05	24
Février	24,3	24,19	24,12	24,08	24,04
Mars	24,45	24,36	24,3	24,26	24,21
Avril	24,65	24,57	24,51	24,47	24,43
Mai	24,94	24,87	24,81	24,77	24,73
Juin	25,48	25,42	25,36	25,32	25,28
Juillet	25,51	25,46	25,4	25,36	25,32
Août	25,53	25,48	25,43	25,39	25,35
Septembre	25,04	24,99	24,94	24,9	24,86
Octobre	24,8	24,76	24,71	24,67	24,63
Novembre	24,53	24,49	24,44	24,41	24,36
Décembre	24,38	24,24	24,19	24,16	24,12

**Tableau 3.24** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de Sidi Saadâ)

• Site de kirolise

Mois	1ère année	2eme année	5ème année	10ème année	25ème année
Janvier	24,48	24,31	24,24	24,19	24,15
Février	24,46	24,34	24,27	24,23	24,18
Mars	24,62	24,52	24,46	24,42	24,37
Avril	24,83	24,75	24,68	24,64	24,59
Mai	25,13	25,05	24,99	24,95	24,91
Juin	25,69	25,63	25,57	25,53	25,48
Juillet	25,72	25,67	25,61	25,57	25,52
Août	25,74	25,69	25,63	25,6	25,55
Septembre	25,23	25,18	25,13	25,09	25,04
Octobre	24,98	24,94	24,88	24,85	24,8
Novembre	24,7	24,66	24,61	24,57	24,53
Décembre	24,44	24,4	24,35	24,31	24,27

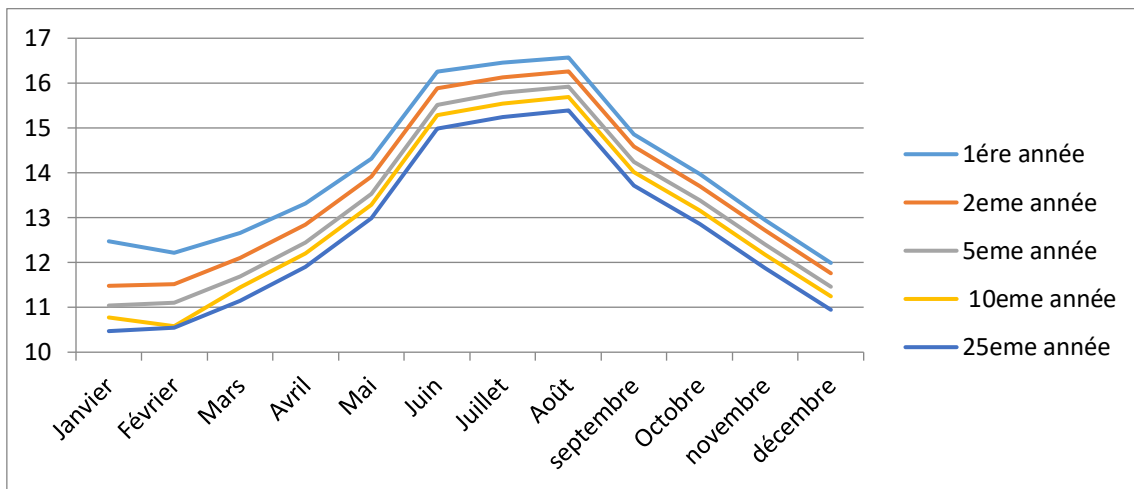
**Tableau 3.25** : Températures moyennes de fluide à la fin du mois (site de kirolise)

## 8. Graphes et interprétations de chaque site avec les différentes températures du sol (2c°-15c°-25c°) :

### ➤ Le site de Béni Mester

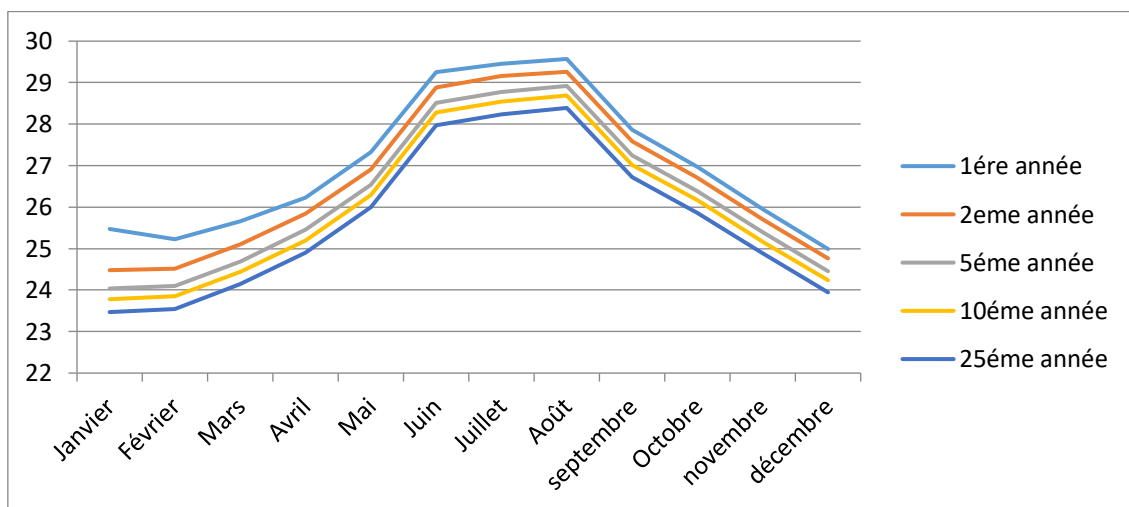
Le graphique illustre la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème année). La température de la surface du sol est constante à 2°C, 15°C, 25°C.

#### • Temperature 2<sup>0</sup>c



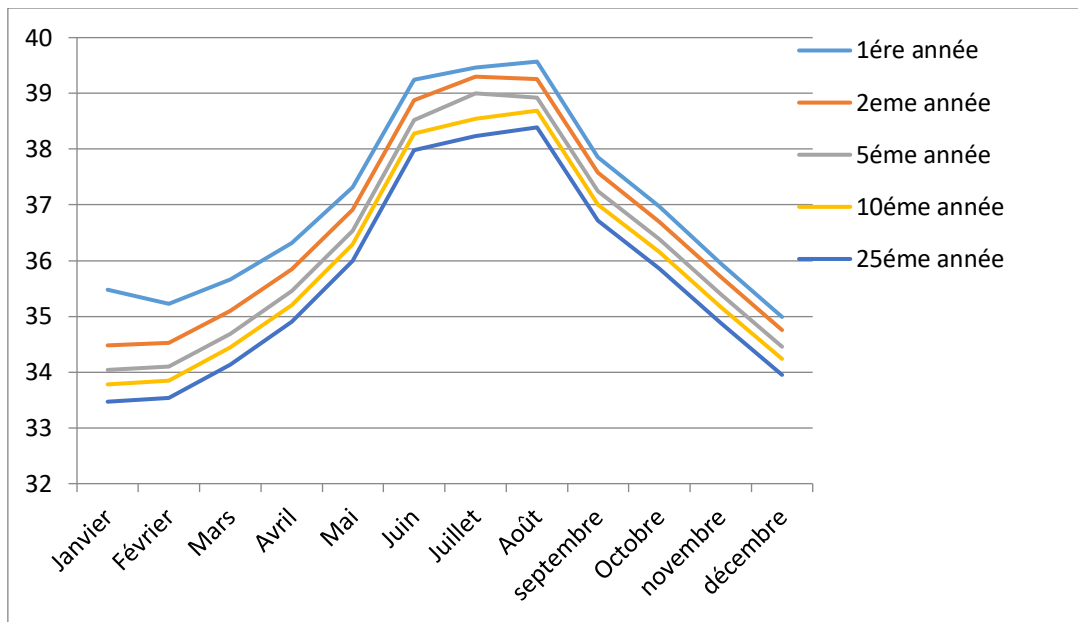
**Figure 3.13 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>c (site de Béni Mester)

#### • Temperature 15<sup>0</sup>c



**Figure 3.14 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de Béni Mester)

• **Temperature 25°C**



**Figure 3.15** : La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 25°C (site de Béni Mester)

**Interprétation :**

- **Variation Saisonnière Prononcée** : Toutes les courbes montrent une variation saisonnière marquée, avec des températures minimales en janvier et février, et des températures maximales en juillet et août. Cela reflète l'influence du cycle saisonnier sur la température du sol.
- **Stabilisation Progressive** : Au fil des années (de la 1ère à la 25ème), on observe une convergence des courbes. Cela suggère que le système atteint un régime thermique plus stable, où les variations annuelles deviennent moins prononcées.
- **Écart de Température** : L'écart entre les températures minimales et maximales est plus important lors des premières années de fonctionnement. Cela indique que le système est initialement plus sensible aux variations de température de surface.
- **Influence de la Profondeur** : Malgré la profondeur de 200 mètres, l'influence des variations de température de surface reste significative. Cela souligne l'importance de la conductivité thermique du sol et du débit du fluide caloporteur.

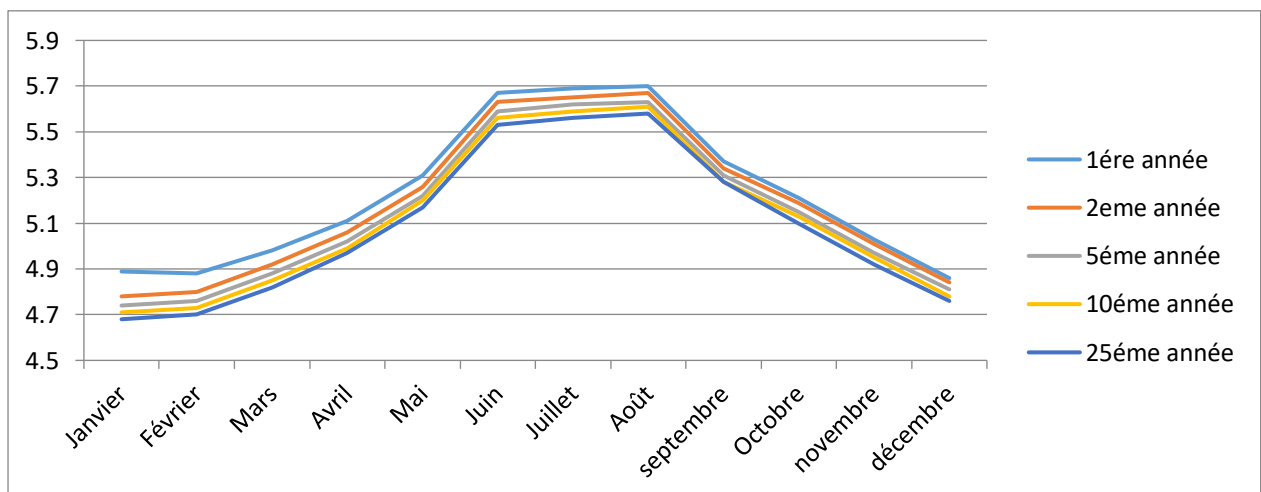
### Interprétation Détaillée par Mois

- **Hiver (Janvier-Février) :** Les températures sont les plus basses, car le sol a été refroidi pendant les mois précédents. On observe une légère augmentation de la température du fluide au fil des années, indiquant une meilleure stabilisation du système.
- **Printemps (Mars-Mai) :** Les températures augmentent progressivement, suivant la tendance de la température de surface. L'écart entre les courbes des différentes années diminue, signe d'une stabilisation.
- **Été (Juin-Août) :** Les températures atteignent leur maximum. Le pic en juillet/août est légèrement décalé par rapport au pic de température de surface, en raison de l'inertie thermique du sol.
- **Automne (Septembre-Décembre) :** Les températures diminuent progressivement, suivant la baisse de la température de surface. La convergence des courbes se poursuit, indiquant une stabilisation continue.

#### ➤ Le site de Birouana

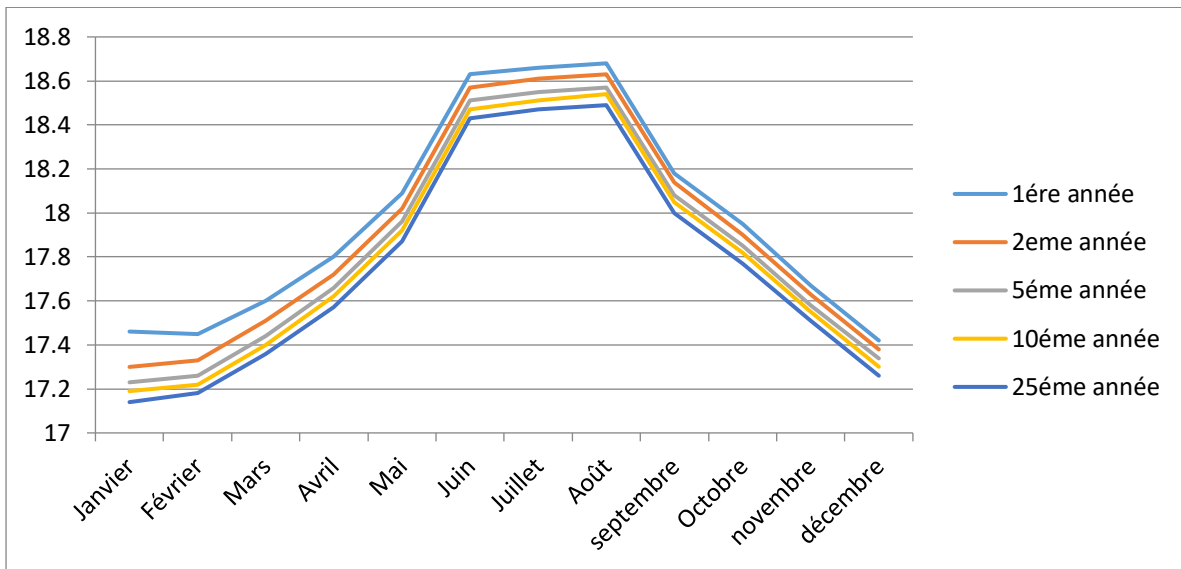
- **Temperature 2<sup>0</sup>c**

- Le graphique montre la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème) sur le site de Birouana. La température de la surface du sol est constante à 2°C, 15°C, 25°C.



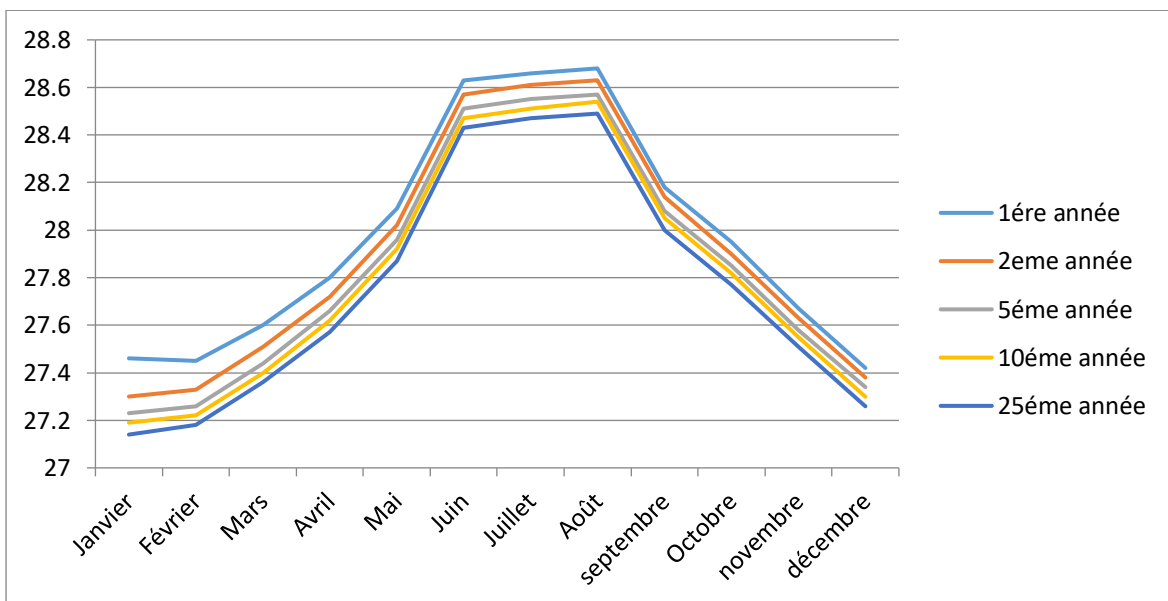
**Figure 3.16 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>C (site de Birouana)

• **Temperature15<sup>0</sup>c :**



**Figure 3.17 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de Birouana)

• **Temperature25<sup>0</sup>c :**



**Figure 3.18 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol du 25<sup>0</sup>C (site de Birouana)

## Interprétation

- **Variation Saisonnière Légère** : Les courbes montrent une variation saisonnière légère, avec des températures minimales en hiver et des températures maximales en été. L'écart entre les températures minimales et maximales est relativement faible.
- **Stabilisation Progressive** : Les courbes convergent progressivement vers une valeur stable. Après 25 ans, les variations saisonnières sont encore visibles, mais elles sont plus faibles qu'au début.
- **Influence de la Profondeur** : La profondeur de 200 mètres semble atténuer les variations de température de surface, mais l'influence saisonnière reste perceptible.
- **Écart de Température** : L'écart entre les températures minimales et maximales est plus important lors des premières années de fonctionnement. Cela indique que le système est initialement plus sensible aux variations de température de surface.

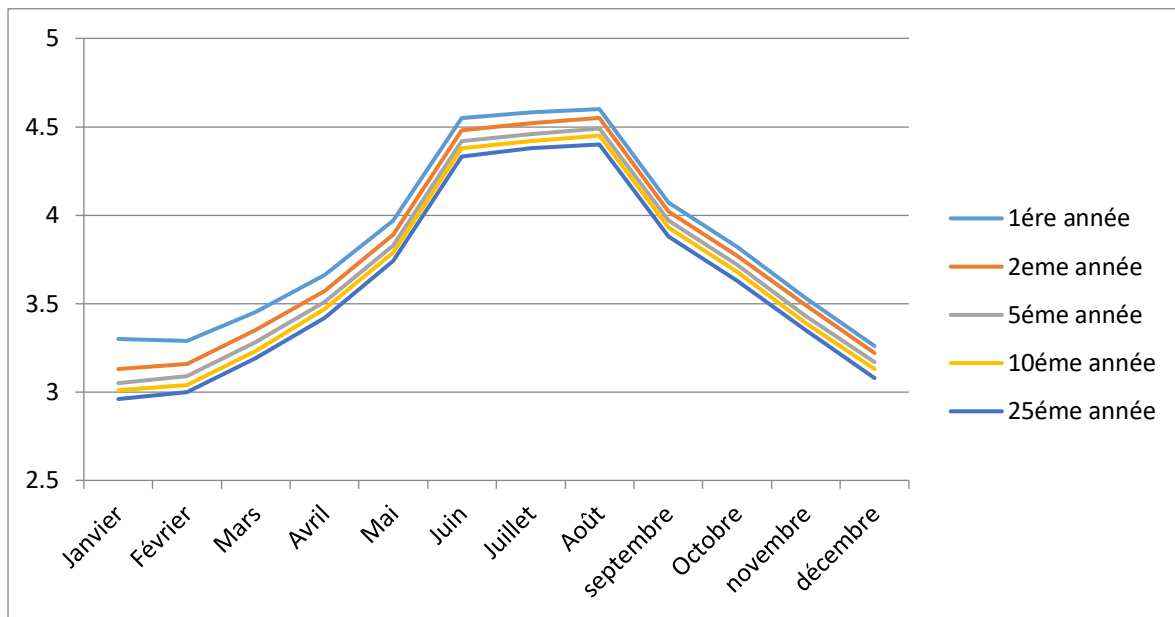
### Interprétation Détaillée par Mois

- **Hiver (Janvier-Février)** : Les températures sont les plus basses, la convergence des courbes est visible, indiquant une meilleure stabilisation au fil des années.
- **Printemps (Mars-Mai)** : Les températures augmentent progressivement, suivant la tendance de la température de surface. L'écart entre les courbes diminue, mais reste faible.
- **Été (Juin-Août)** : Les températures atteignent leur maximum, Le pic est bien marqué en juillet/août, avec une légère diminution au fil des années.
- **Automne (Septembre-Décembre)** : Les températures diminuent progressivement, revenant aux valeurs hivernales. La convergence des courbes se poursuit, mais les variations restent faibles.

### ➤ Le site de Zouia

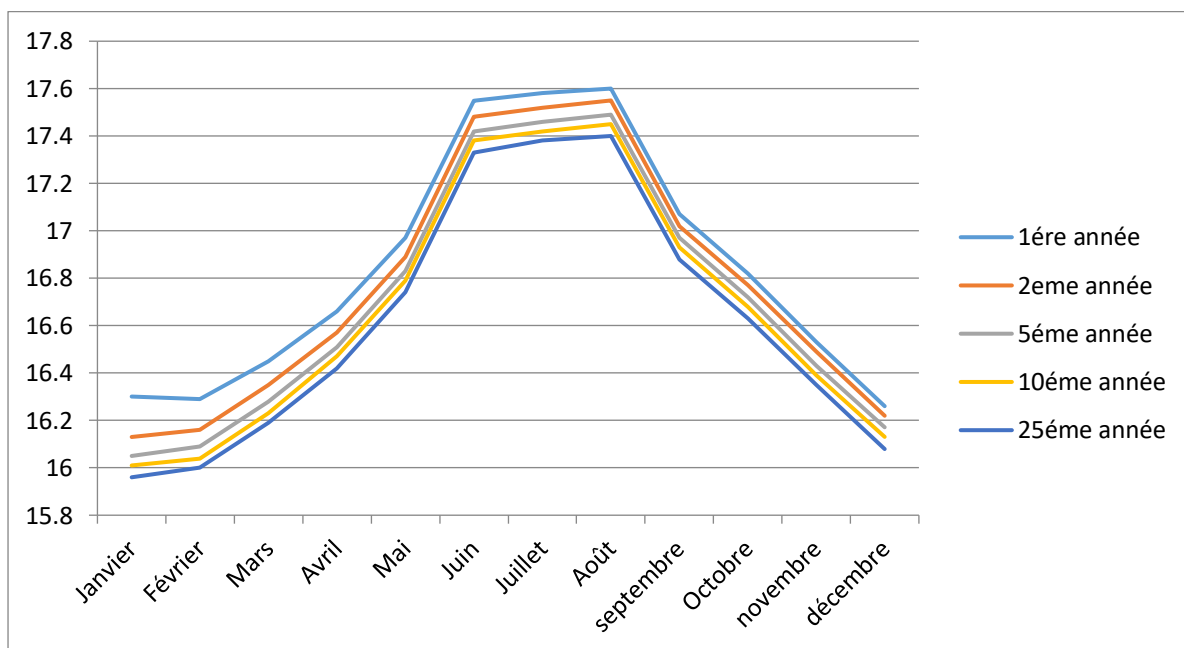
Les figures 3.18 à 3.20 montrent la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème année) sur le site de Zouia. La température de la surface du sol est constante à 2°C, 15°C, 25°C.

• **Temperature 2<sup>0</sup>c**



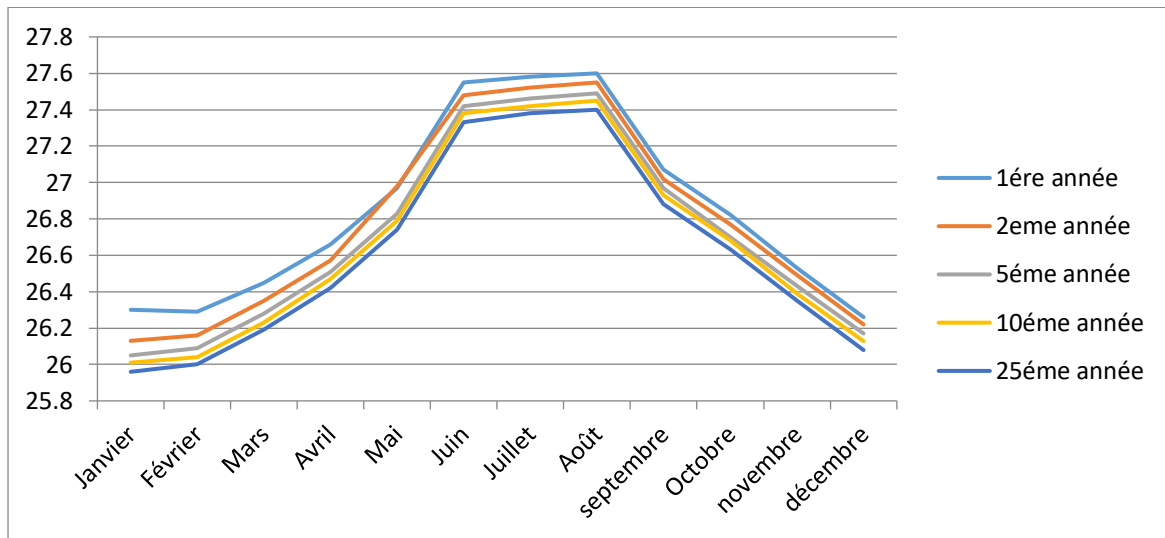
**Figure 3.19:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour température du sol 2<sup>0</sup>C (site de Zouia)

• **Temperature 15<sup>0</sup>c**



**Figure 3.20 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de Zouia)

• **Temperature 25°C**



**Figure 3.21:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 25°C (site de Zouia)

**Interprétation :**

**Variation Saisonnière Légère :** Les courbes montrent une variation saisonnière légère, avec des températures minimales en hiver et des températures maximales en été. L'écart entre les températures minimales et maximales est relativement faible, de l'ordre de 1,5°C.

- **Stabilisation Très Rapide :** Les courbes convergent très rapidement vers une valeur stable. Dès la 5ème année, les variations sont presque négligeables, suggérant que le système atteint un équilibre thermique très vite.
- **Influence de la Profondeur Prédominante :** La profondeur de 200 mètres semble jouer un rôle majeur dans la stabilité thermique. Les variations de température en surface sont fortement atténuées à cette profondeur.
- **Températures Basses et Stables :** Les températures moyennes du fluide caloporteur sont basses et stables, oscillant autour de 3 à 4,5°C ;16 à 17.5°C ;26 à 27.5°C.

**Interprétation Détaillée par Mois**

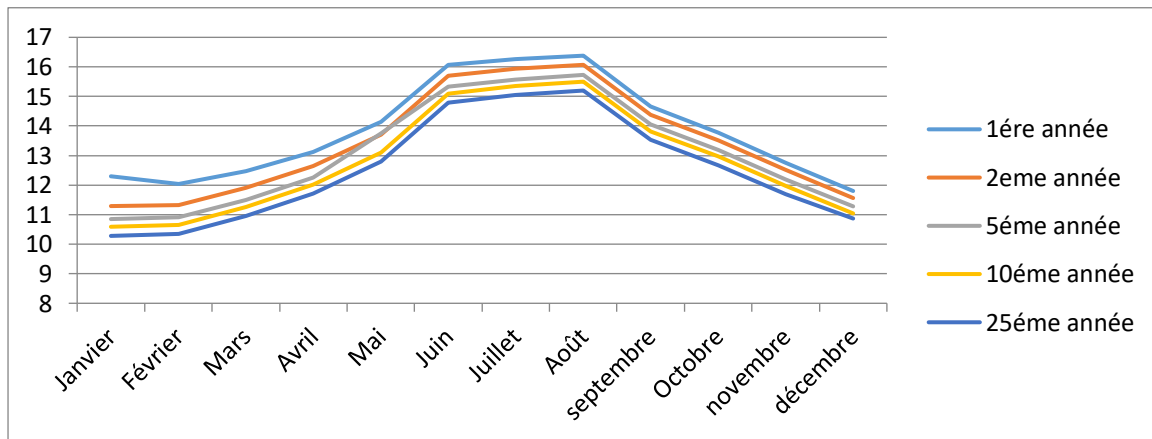
- **Hiver (Janvier-Février) :** Les températures sont les plus basses, mais restent très proches de la valeur moyenne. La différence entre les années est négligeable.
- **Printemps (Mars-Mai) :** On observe une légère augmentation de la température, mais très faible. Les courbes des différentes années sont presque confondues.

- **Été (Juin-Août)** : Les températures atteignent leur maximum, mais la hausse est très modérée. La stabilité entre les années est remarquable.
- **Automne (Septembre-Décembre)** : Les températures diminuent légèrement, revenant à la valeur de base. La convergence des courbes est totale.

### Le site de Chbikia

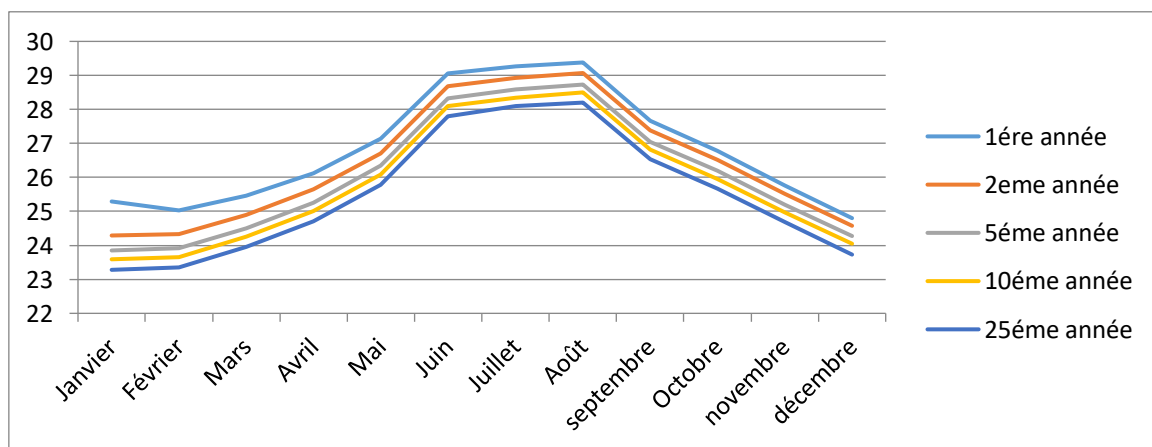
Les figures 3.21 à 3.23 montrent la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème) sur le site de Chbikia. La température de la surface du sol est constante à 2°C, 15°C, 25°C.

#### • Temperature 2<sup>0</sup>c



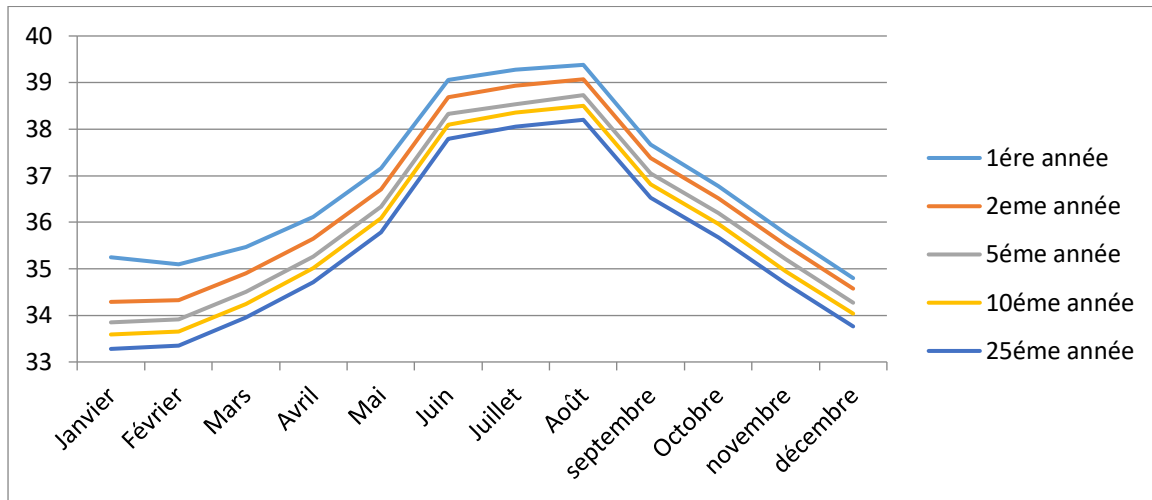
**Figure 3.22** : La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>c (site de Chbikia)

#### • Temperature 15<sup>0</sup>c



**Figure 3.23** : La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>c (site de Chbikia)

• **Temperature 25<sup>0</sup>c**



**Figure 3.24** : La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup> c (site de Chbikia)

**Interprétation :**

**Variation Saisonnière Prononcée :** Les courbes montrent une variation saisonnière significative, avec des températures minimales en hiver et des températures maximales en été. Cela indique une influence notable des variations de température de surface malgré la profondeur de 200 mètres.

- **Stabilisation Progressive :** Au fil des années, les courbes sont convergentes, indiquant une stabilisation progressive du système. Cependant, même après 25 ans, les variations saisonnières restent importantes.
- **Écart de Température Important :** L'écart entre les températures minimales et maximales est relativement élevé, de l'ordre de 5 à 6°C. Cela suggère une forte sensibilité aux variations de température de surface.
- **Températures Moyennes :** Les températures moyennes du fluide caloporteur sont relativement élevées, oscillant entre 10°C et 16°C ; 23°C et 29°C ; 37 et 39°C.

**Interprétation Détaillée par Mois**

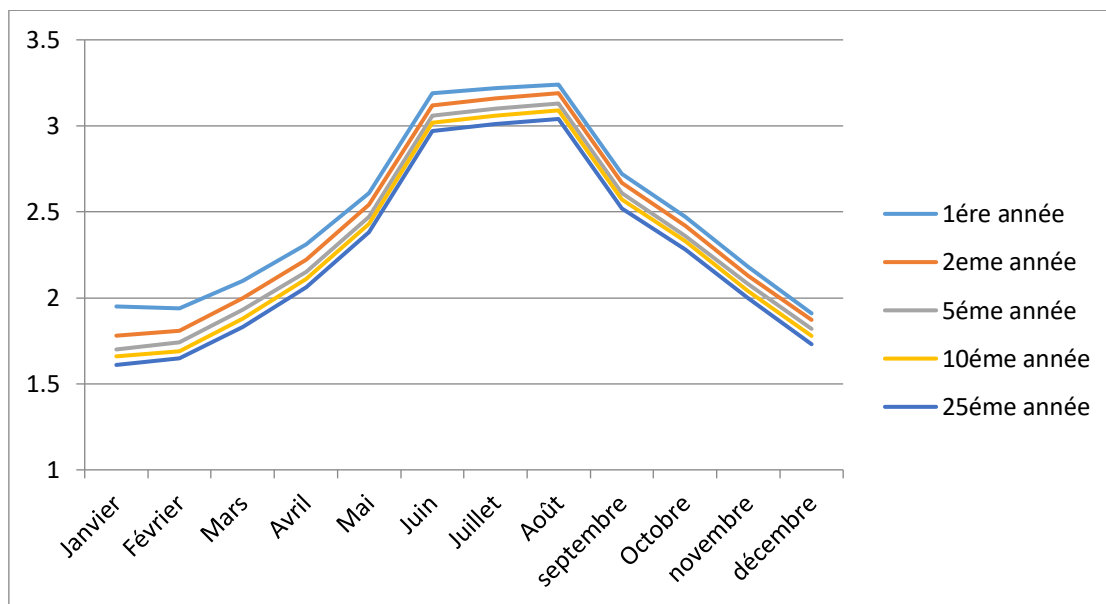
- **Hiver (Janvier-Février) :** Les températures sont les plus basses, mais restent supérieures à 10°C ; 23°C ; 37°C /. La convergence des courbes est visible, indiquant une meilleure stabilisation au fil des années.

- **Printemps (Mars-Mai) :** Les températures augmentent rapidement, suivant la tendance de la température de surface. L'écart entre les courbes diminue, mais reste significatif.
- **Été (Juin-Août) :** Les températures atteignent leur maximum. Le pic est bien marqué en juillet/août, avec une légère diminution au fil des années.
- **Automne (Septembre-Décembre) :** Les températures diminuent progressivement, revenant aux valeurs hivernales. La convergence des courbes se poursuit, mais les variations restent importantes.

### Le site de Bendouma

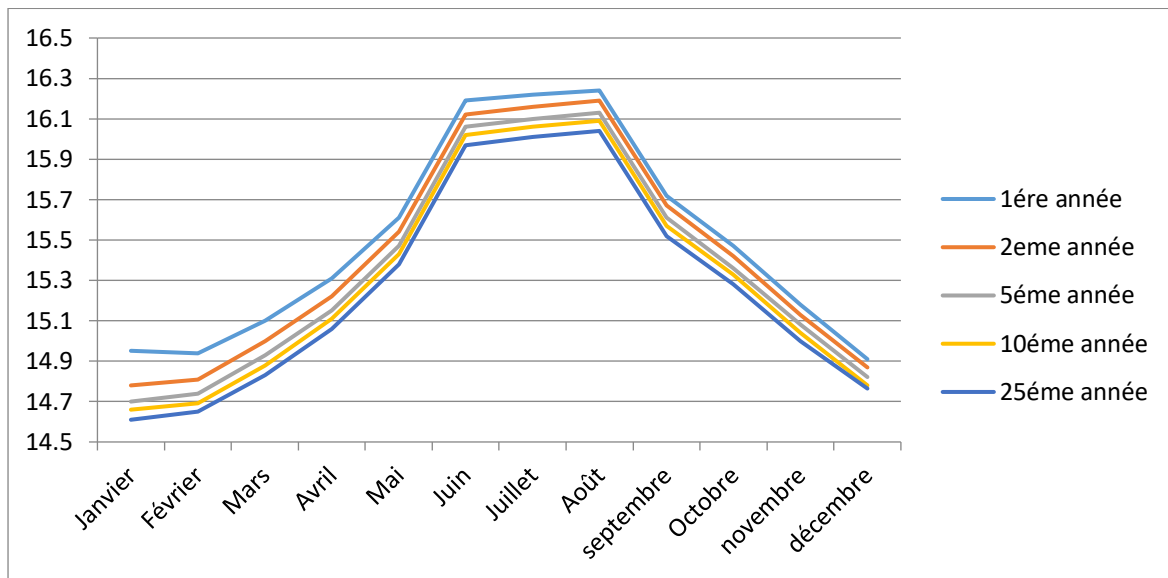
Les figures 3.24 à 3.26 montrent la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème) sur le site de Bendouma. La température de la surface du sol est constante à 2°C ; 15°C ; 25°C.

- **Temperature 20c**



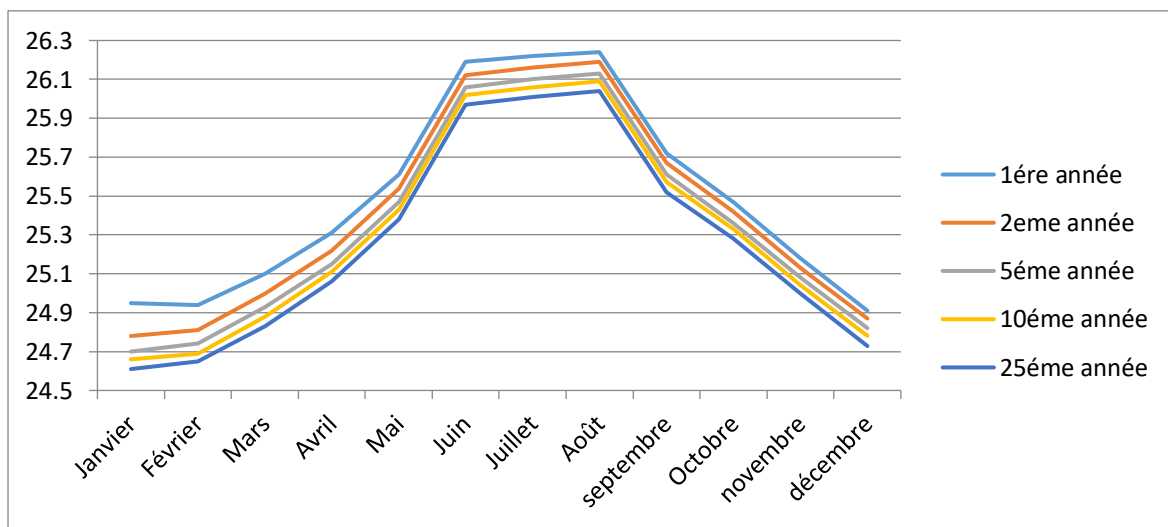
**Figure 3.25 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25 ans pour une température du sol de 20°C (site de Bendouma).

• **Temperature15<sup>0</sup>c**



**Figure 3.26 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans une pour température du sol de 15<sup>0</sup>c (site de Bendouma)

• **Temperature25<sup>0</sup>c**



**Figure 3.27 :** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>c (site de Bendouma)

**Interprétation :**

- **Variation Saisonnière Légère :** Les courbes montrent une variation saisonnière légère, avec des températures minimales en hiver et des températures maximales en été. L'écart entre les températures minimales et maximales est relativement faible, de l'ordre de 1,5°C.

- **Stabilisation Très Rapide** : Les courbes convergent très rapidement vers une valeur stable. Dès la 5ème année, les variations sont presque négligeables, suggérant que le système atteint un équilibre thermique très vite.
- **Influence de la Profondeur Prédominante** : La profondeur de 200 mètres semble jouer un rôle majeur dans la stabilité thermique. Les variations de température en surface sont fortement atténuées à cette profondeur.
- **Températures Basses et Stables** : Les températures moyennes du fluide caloporteur sont basses et stables, oscillant autour de 14,5 à 16,2°C.

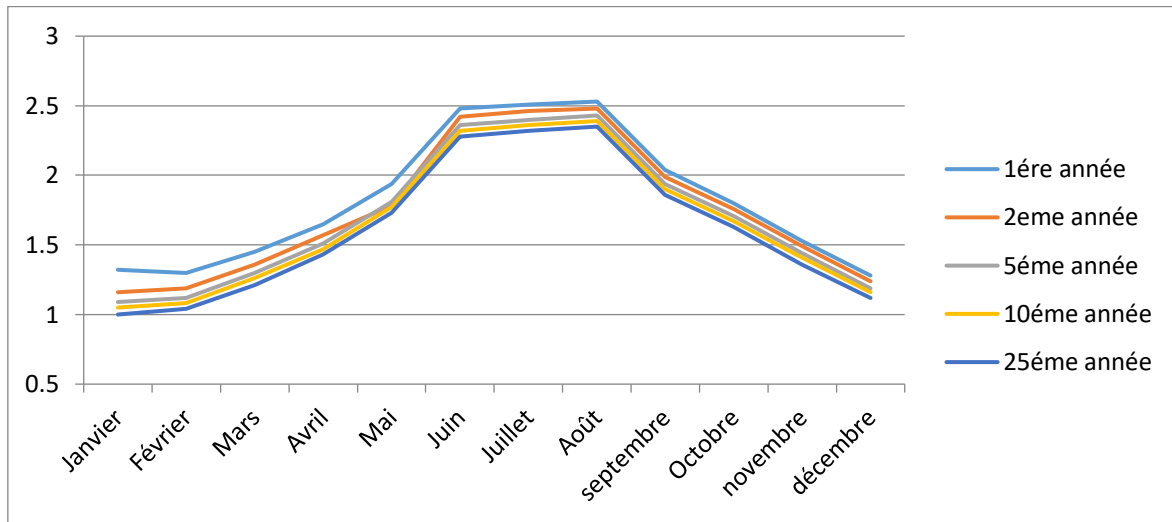
### Interprétation Détaillée par Mois

- **Hiver (Janvier-Février)** : Les températures sont les plus basses, mais restent très proches de la valeur moyenne. La différence entre les années est négligeable.
- **Printemps (Mars-Mai)** : On observe une légère augmentation de la température, mais très faible. Les courbes des différentes années sont presque confondues.
- **Été (Juin-Août)** : Les températures atteignent leur maximum, mais la hausse est très modérée. La stabilité entre les années est remarquable.
- **Automne (Septembre-Décembre)** : Les températures diminuent légèrement, revenant à la valeur de base. La convergence des courbes est totale.

#### ➤ **Le site de sidi Saadâ**

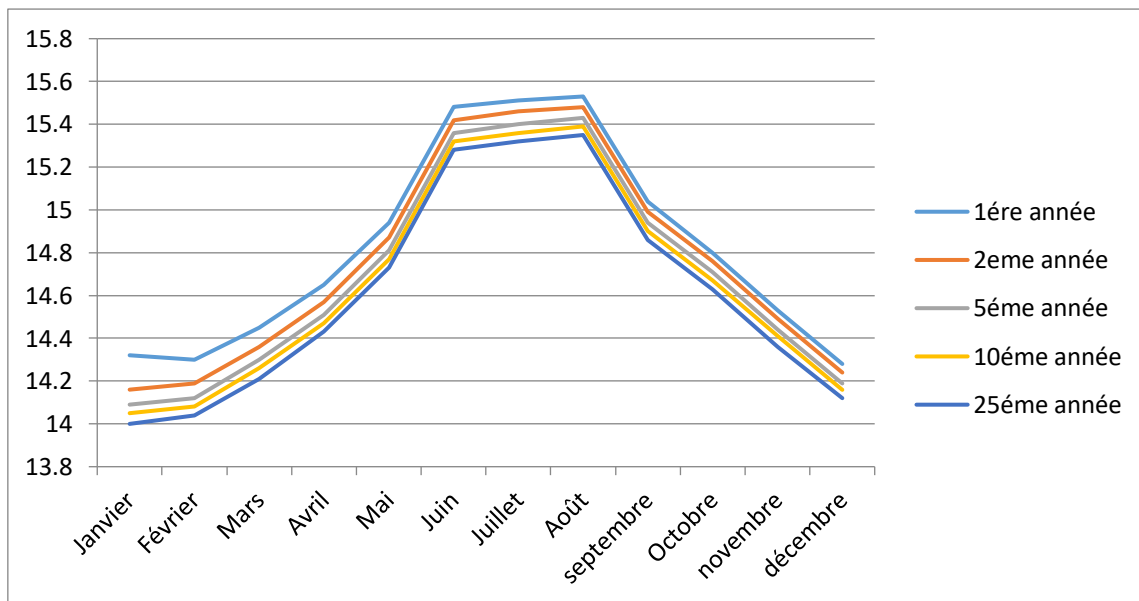
Les figures 3.27 à 3.29 montrent la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème année) sur le site de Saada. La température de la surface du sol est constante à 2°C ; 15°C ; 25°C.

• **Temperature 2<sup>0</sup>c**



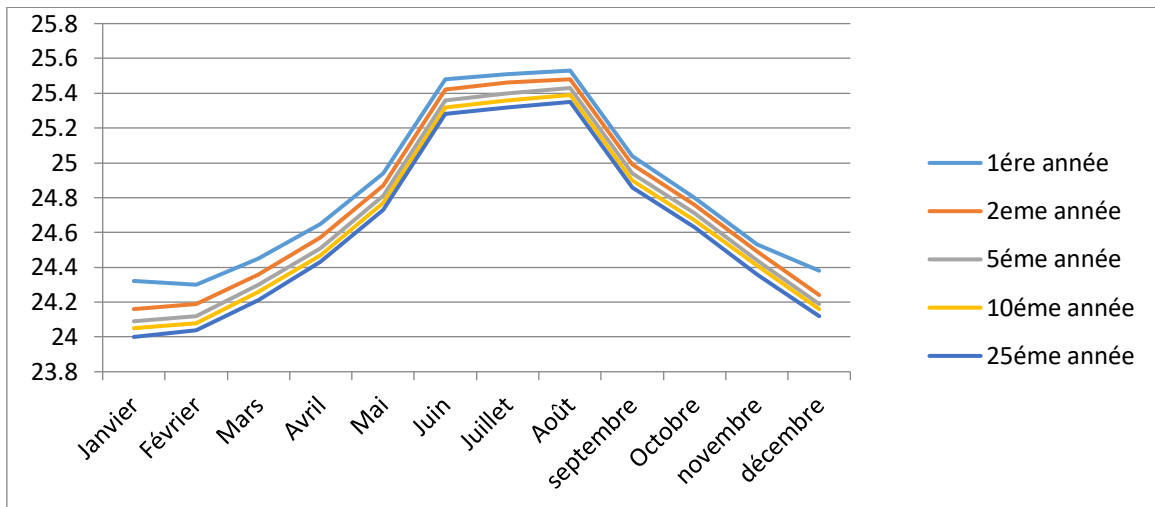
**Figure 3.28:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>C (site de sidi Saadâ)

• **Temperature 15<sup>0</sup>c**



**Figure 3.29:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de sidi Saadâ)

- **Temperature25<sup>0</sup>c**



**Figure 3.30:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>C (site de sidi Saadâ)

### Interprétation :

**Variation Saisonnière Très Faible :** Les courbes montrent une variation saisonnière extrêmement faible, avec des températures minimales en hiver et des températures maximales en été. L'écart entre les températures minimales et maximales est minime, de l'ordre de 1,5°C.

- **Stabilisation Très Rapide :** Les courbes convergent très rapidement vers une valeur stable. Dès la 5ème année, les variations sont presque négligeables, suggérant que le système atteint un équilibre thermique très vite.
- **Influence de la Profondeur Prédominante :** La profondeur de 200 mètres semble jouer un rôle majeur dans la stabilité thermique. Les variations de température en surface sont fortement atténuées à cette profondeur.
- **Températures Basses et Stables :** Les températures moyennes du fluide caloporteur sont basses et stables, oscillant autour de 24 à 25°C.

### Interprétation Détaillée par Mois

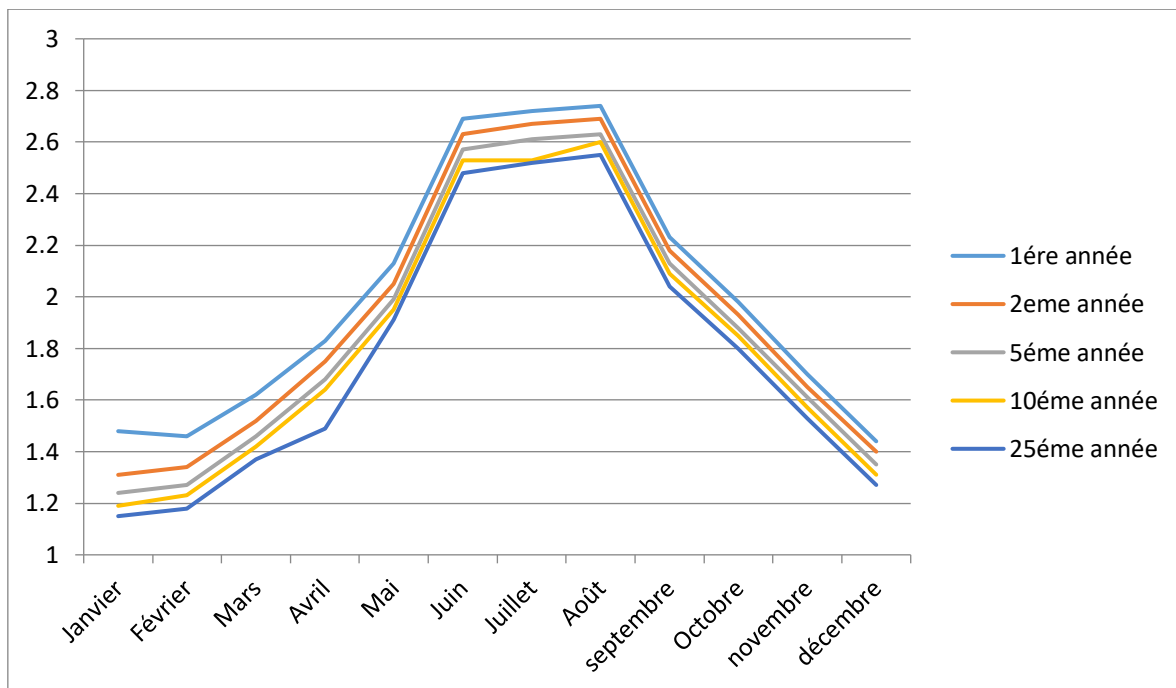
- **Hiver (Janvier-Février) :** Les températures sont les plus basses, mais restent très proches de la valeur moyenne. La différence entre les années est négligeable.
- **Printemps (Mars-Mai) :** On observe une légère augmentation de la température, mais très faible. Les courbes des différentes années sont presque confondues.

- **Été (Juin-Août) :** Les températures atteignent leur maximum, mais la hausse est très modérée. La stabilité entre les années est remarquable.
- **Automne (Septembre-Décembre) :** Les températures diminuent légèrement, revenant à la valeur de base. La convergence des courbes est totale.

### Le site de kirolise

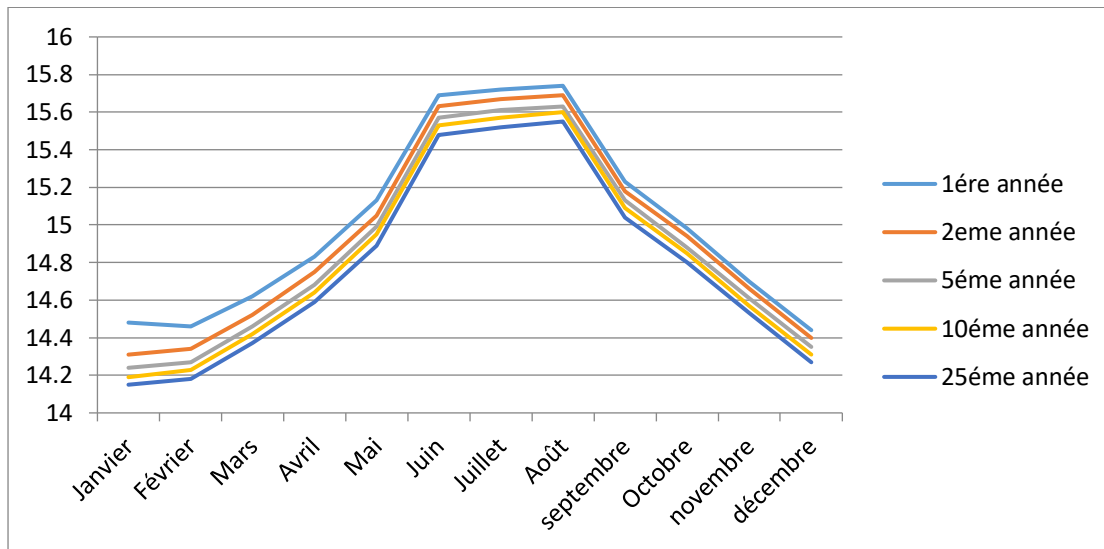
Les figures 3.30 à 3.32 montrent la variation de la température moyenne du fluide caloporteur à la sortie d'un forage géothermique simple en U, sur une profondeur de 200 mètres, pour différentes années de fonctionnement (de la 1ère à la 25ème année) sur le site de Kirolise. La température de la surface du sol est constante.

- **Temperature2<sup>0</sup>c**



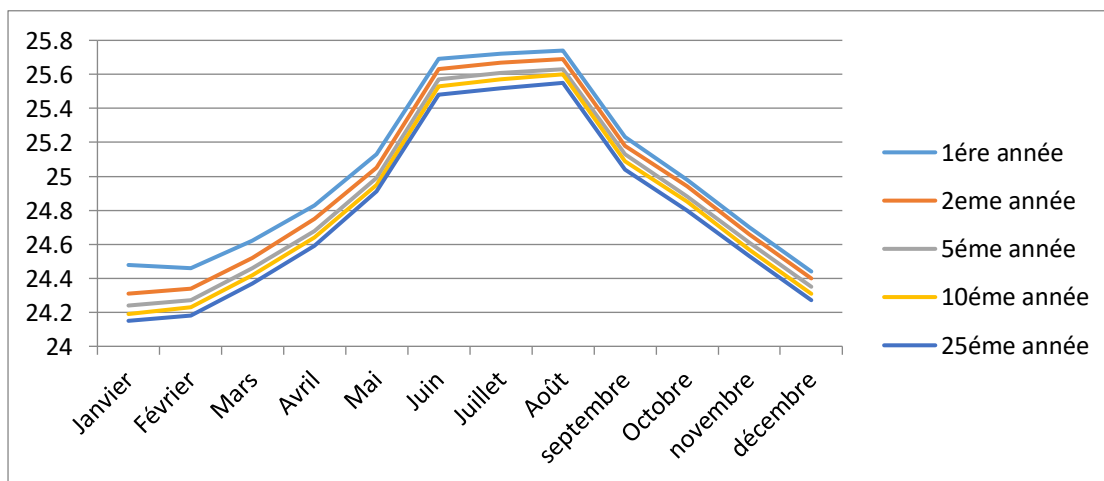
**Figure 3.31:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 2<sup>0</sup>C (site de kirolise)

• **Temperature15<sup>0</sup>c**



**Figure 3.32:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 15<sup>0</sup>C (site de kirolise)

• **Temperature25<sup>0</sup>c**



**Figure 3.33:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pendant 25ans pour une température du sol de 25<sup>0</sup>C (site de kirolise)

**Interprétation**

- **Variation Saisonnière Très Faible :** Les courbes montrent une variation saisonnière très faible, avec des températures minimales en hiver et des températures maximales en été. L'écart entre les températures minimales et maximales est minime, de l'ordre de 1,5°C.

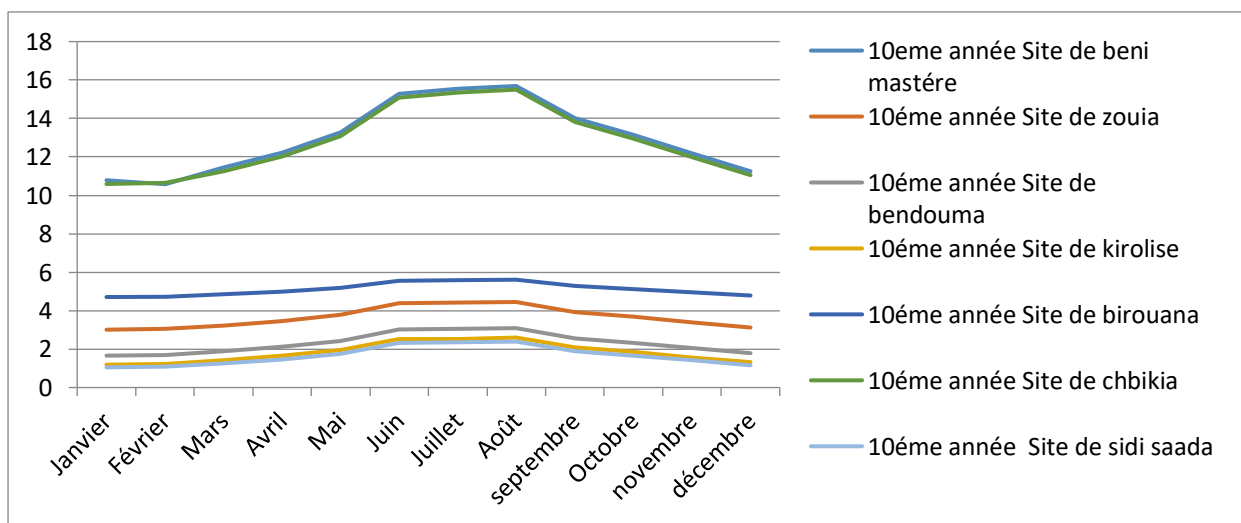
- **Stabilisation Très Rapide** : Les courbes convergent très rapidement vers une valeur stable. Dès la 5ème année, les variations sont presque négligeables, suggérant que le système atteint un équilibre thermique très vite.
- **Influence de la Profondeur Prédominante** : La profondeur de 200 mètres semble jouer un rôle majeur dans la stabilité thermique. Les variations de température en surface sont fortement atténuées à cette profondeur.
- **Températures Basses et Stables** : Les températures moyennes du fluide caloporteur sont basses et stables, oscillant autour de 24 à 25°C.

### Interprétation Détaillée par Mois

- **Hiver (Janvier-Février)** : Les températures sont les plus basses, mais restent très proches de la valeur moyenne. La différence entre les années est négligeable.
- **Printemps (Mars-Mai)** : On observe une légère augmentation de la température, mais très faible. Les courbes des différentes années sont presque confondues.
- **Été (Juin-Août)** : Les températures atteignent leur maximum, mais la hausse est très modérée. La stabilité entre les années est remarquable.
- **Automne (Septembre-Décembre)** : Les températures diminuent légèrement, revenant à la valeur de base. La convergence des courbes est totale.

## 9. Comparaison de la température moyenne du fluide entre les 7 sites avec la même température du sol

### ➤ Température du sol 2°C à la 10<sup>e</sup> année



**Figure 3.34:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pour la 10<sup>e</sup> année, température du sol 2°C (des 7 sites).

## Interprétation

### Observations Générales

- Différences de Température: Comme précédemment, le site de Béni Master et Chbikia présentent des températures nettement plus élevées que les autres sites.
- Variations Saisonnières : Tous les sites montrent une variation saisonnière, mais l'amplitude est plus faible qu'avec une température de surface de 2°C.
- Groupement des Sites: Les sites de Zouia, Kirolise, Bendouma, Sidi Saada et Birouana restent groupés, avec des variations similaires.

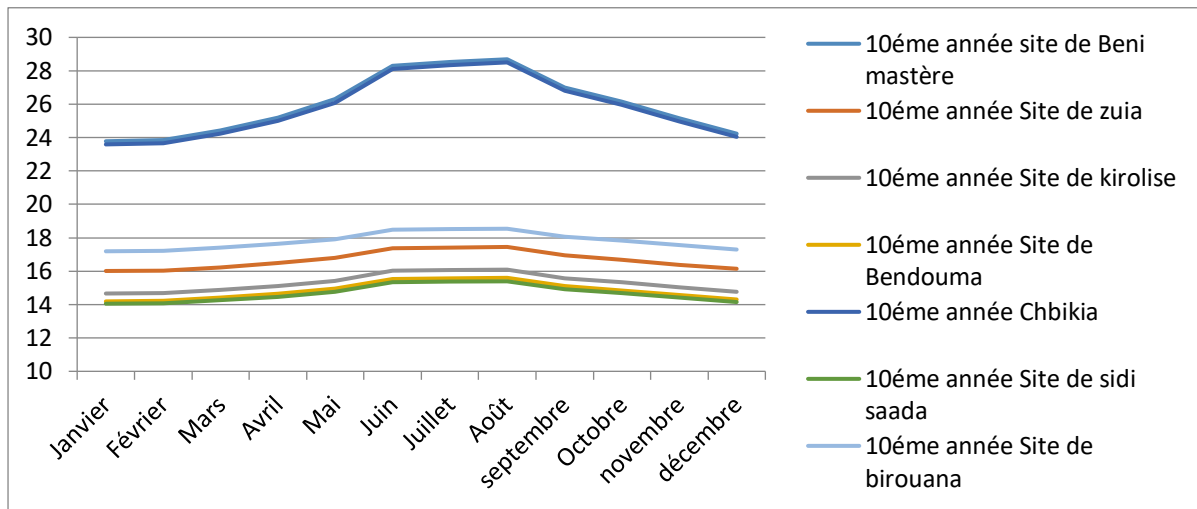
### Analyse Site par Site

- Béni Master, Chbikia :
  - Ces deux sites restent les plus chauds, ce qui confirme une source de chaleur locale ou des conditions géologiques particulières.
  - L'amplitude des variations saisonnières est réduite, mais reste significative.
  - Zouia, Kirolise, Bendouma, , Sidi Saada et Birouana :
  - Ces sites montrent des températures très basses, proches de la température de surface.
  - Les variations saisonnières sont très faibles, ce qui indique une forte atténuation de l'influence de la température de surface.

#### ➤ Conclusion

La basse température de surface de 2°C a un impact significatif sur les températures de tous les sites, mais Béni master reste plus chaud, ce qui confirme des conditions locales particulières.

➤ **Température du sol 15°C à la 10<sup>e</sup> année**



**Figure 3.35:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pour la 10<sup>e</sup> année, température du sol 15°C (des 7 sites)

**Interprétation**

**Observations Générales**

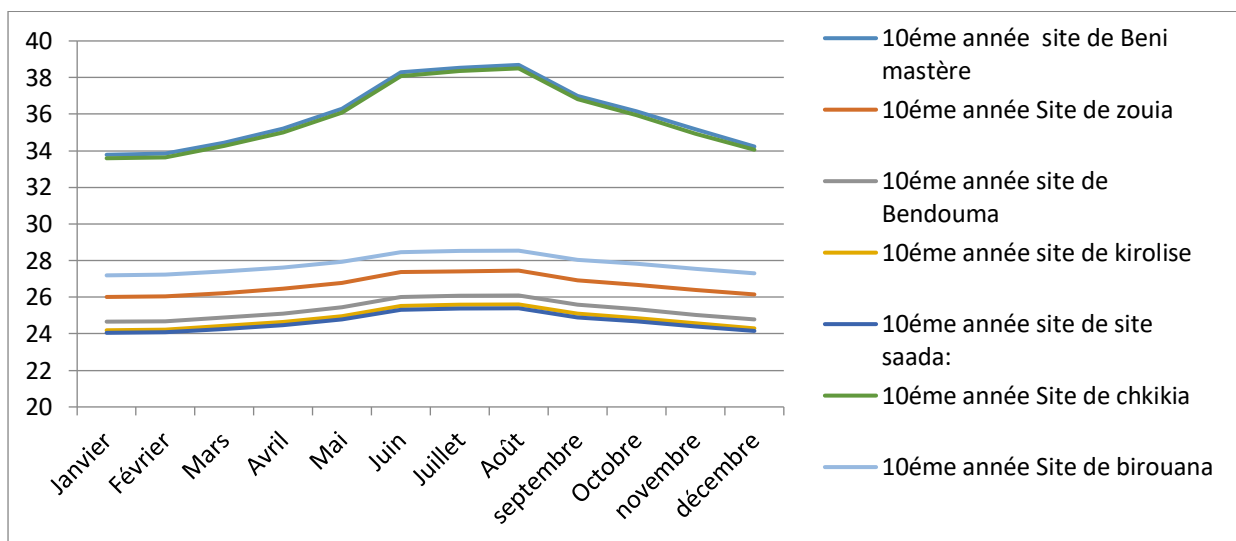
- Différences de Température : Il existe une différence de température notable entre les sites. Le site de Béni Master et Chbikia présentent les températures les plus élevées, tandis que les autres sites montrent des températures plus basses et plus groupées.
- Variations Saisonnières : Tous les sites montrent une variation saisonnière de la température, avec des températures plus élevées en été (juin, juillet, août) et plus basses en hiver (janvier, février, décembre).
- Amplitude des Variations : L'amplitude des variations saisonnières est plus importante pour le site de Béni Master et le site de Chbikia que pour les autres sites.
- Groupement des Sites : Les sites de Zouia, kirolise, Bendouma, Sidi Saada et Birouana présentent des températures assez similaires et des variations saisonnières comparables.

**Analyse Site par Site**

- Béni Master et Chbikia :
  - Ces deux sites présentent les températures les plus élevées, ce qui peut indiquer une meilleure conductivité thermique du sol, un débit de fluide plus faible, ou une source de chaleur supplémentaire à proximité.

- L'amplitude des variations saisonnières est importante, ce qui suggère une sensibilité accrue aux variations de température de surface.
- Zouia, Kirolise, Bendouma, , Sidi Saada et Birouana:
  - Ces sites montrent des températures plus basses et plus groupées, ce qui peut indiquer des conditions géologiques similaires, une conductivité thermique plus faible, ou un débit de fluide plus élevé.
  - Les variations saisonnières sont plus faibles, ce qui suggère une atténuation de l'influence des variations de température de surface.

➤ **Température du sol 25°C à la 10<sup>e</sup> année**



**Figure 3.36:** La variation de la température du fluide caloporteur en fonction des mois pour la 10<sup>e</sup> année, température du sol 25°C (des 7 sites)

**Interprétation**

**Analyse Comparative Générale**

La figure 3.35 présente les températures moyennes mensuelles du fluide caloporteur pour sept sites différents, après 10 ans de fonctionnement d'un forage géothermique en U de 200 mètres de profondeur avec une température du sol 25°C. On observe des variations significatives entre les sites, indiquant des conditions géothermiques locales distinctes.

**Groupement des Sites par Comportement Thermique**

On peut regrouper les sites en fonction de leur comportement thermique :

- **Groupe à Températures Élevées et Fortes Variations (Béni Mastère, Chbikia) :**  
Ces sites présentent les températures les plus élevées et les plus fortes variations saisonnières. Cela suggère une plus grande sensibilité aux variations de température de surface, malgré la profondeur de 200 mètres.
- **Groupe à Températures Moyennes et Variations Modérées (Zouia, Birouana) :**  
Ces sites montrent des températures moyennes et des variations saisonnières plus modérées. Ils représentent un comportement intermédiaire entre les deux autres groupes.
- **Groupe à Températures Basses et Très Faibles Variations (Bendouma .Kirolise, Sidi Saada) :** Ces sites affichent les températures les plus basses et les variations saisonnières les plus faibles. Cela indique une grande stabilité thermique à cette profondeur, avec une atténuation significative des variations de température de surface.

### Interprétation Détaillée par Groupe

- **Béni Mastère et Chbikia**
  - Températures élevées, atteignant près de 39°C en été.
  - Fortes variations saisonnières, avec un écart de plus de 5°C entre l'hiver et l'été.
  - Indique une possible influence d'une conductivité thermique élevée ou d'un débit de fluide plus important, favorisant le transfert de chaleur depuis la surface.
- **Zouia, Birouana**
  - Températures moyennes, oscillant autour de 26-27°C.
  - Variations saisonnières modérées, avec un écart d'environ 1,5°C.
  - Représente un comportement intermédiaire, avec une influence modérée des variations de température de surface.
- **Bendouma .Kirolise et Sidi Saada**
  - Températures basses, autour de 24-25°C.
  - Très faibles variations saisonnières, avec un écart inférieur à 0,5°C.
  - Indique une grande stabilité thermique, probablement due à des conditions géologiques locales spécifiques (par exemple, présence d'une nappe phréatique stable).

## 10. Conclusion

L'analyse comparative des températures moyennes mensuelles du fluide caloporteur à travers les sept sites étudiés révèle une grande diversité dans le comportement thermique, influencée par des facteurs géologiques locaux et des propriétés physiques du sous-sol. Trois groupes distincts émergent, chacun présentant des caractéristiques thermiques propres, et cette classification nous permet de mieux comprendre l'impact des conditions géothermiques locales sur le fonctionnement d'un forage géothermique en U.

- **Sites à températures élevées et fortes variations saisonnières** (Béni Mastère et Chbikia) montrent une forte sensibilité aux fluctuations saisonnières. Ces variations sont liées à une conductivité thermique plus élevée du sol ou à un débit plus important du fluide caloporteur, permettant ainsi une meilleure transmission de la chaleur depuis la surface. Ce comportement suggère un gradient géothermique plus élevé, ce qui pourrait influencer les performances du forage.
- **Sites à températures moyennes et variations modérées** (Zouia et Birouana)
- Ils représentent une situation intermédiaire, avec un comportement thermique plus stable mais toujours affecté par les variations saisonnières. Ce groupe pourrait indiquer un équilibre entre l'influence de la température de surface et la conductivité thermique des sols.

**Sites à températures basses et faibles variations saisonnières** (Bendouma, Kirolise, et Sidi Saada) Ils font état d'une grande stabilité thermique, probablement en raison de conditions géologiques spécifiques, telles que la présence de nappes phréatiques ou de sols moins conducteurs. Ces sites sont moins influencés par les températures de surface, ce qui assure une plus grande constance dans le fonctionnement du forage géothermique.

En somme, cette étude souligne l'importance de la géologie locale dans la performance des systèmes géothermiques. La conductivité thermique du sol, le gradient géothermique, ainsi que la présence de nappes d'eau souterraines et la configuration du débit du fluide caloporteur, sont des éléments clés pour comprendre les différences observées. Ces résultats peuvent également orienter les choix d'implantation des forages géothermiques en fonction des conditions géologiques spécifiques de chaque site.

Après avoir comparé les comportements thermiques des différents sites, notre étude a mis en évidence que **Béni Mastère** et **Chbikia** sont les sites les plus appropriés pour un forage géothermique en U, dans la mesure où **ils offrent les températures les plus élevées**, atteignant près de 39°C en été. Bien que ces sites présentent des **variations saisonnières relativement fortes** (avec un écart supérieur à 5°C entre l'hiver et l'été), ces températures élevées constituent un atout majeur pour maximiser l'efficacité du système géothermique, notamment dans le cadre de la production de chaleur ou d'énergie.

A decorative graphic of a scroll with a blue outline and grey shading on the top and left edges, framing the central text.

# Conclusion générale

### Conclusion générale :

Cette étude met en évidence l'importance déterminante de la géologie locale dans l'efficacité des systèmes géothermiques. L'analyse comparative des comportements thermiques des différents sites étudiés révèle que les sites de **Béni Mastère** et de **Chbikia** présentent un potentiel thermique supérieur en matière de transfert de chaleur. En conséquence, ces deux sites s'avèrent les plus appropriés et **les plus recommandés** pour la mise en œuvre du projet de forage géothermique en U.

Ce travail a permis d'explorer en profondeur les avantages et les défis associés à l'utilisation de la **géothermie basse énergie** comme solution énergétique alternative. À travers l'analyse des différentes technologies et des données recueillies, il apparaît que la géothermie basse énergie représente une source d'énergie **efficace, durable et écologique**, offrant une réponse significative aux enjeux actuels liés à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La **géothermie basse énergie** se distingue par son **efficacité énergétique élevée** et sa capacité à fournir de la chaleur de manière continue et prévisible, indépendamment des conditions climatiques extérieures. En exploitant la chaleur naturellement stockée dans le sous-sol, elle présente un **rendement énergétique supérieur** à de nombreux systèmes de chauffage conventionnels, tels que les chaudières à gaz ou à fioul. En outre, elle est particulièrement adaptée aux besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels, tout en garantissant une consommation d'énergie maîtrisée.

En tant **qu'énergie propre**, la géothermie permet de réduire considérablement l'empreinte carbone des secteurs résidentiel et tertiaire. Contrairement aux sources d'énergie fossile, son utilisation ne génère aucune émission directe de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique. De plus, la géothermie constitue une ressource **renouvelable et locale**, ce qui renforce la sécurité énergétique des territoires et réduit la dépendance aux importations d'énergies fossiles.

Néanmoins, bien que la géothermie basse énergie présente de nombreux avantages, son adoption nécessite un investissement initial relativement élevé, ce qui peut constituer un frein pour certains acteurs. Toutefois, l'évolution technologique continue et la réduction des coûts

d'installation devraient rendre cette solution de plus en plus accessible et compétitive sur le marché des énergies renouvelables.

En conclusion, la **géothermie basse énergie** représente une **solution énergétique prometteuse** et incontournable pour un avenir énergétique plus **durable** et respectueux de l'environnement. Son intégration à grande échelle dans les systèmes énergétiques des bâtiments, des quartiers et des collectivités locales constitue un levier essentiel pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de transition vers un modèle énergétique plus propre, plus efficace et plus résilient.

## Références bibliographiques

### Chapitr1 :

- [1] Sara SAHNOUNE ; « Le changement climatique ; Conséquence du développement Durable », Revue EL - Études de développement économique, Volume :04, p01-18,2021
- [2] kridercherif ; « Le réchauffement climatique », Revue EL - Études de développement économique, Volume : 7, p41-42,2012.
- [3]. Guy Blanchet et Roger Goulier, « Le réchauffement climatique entre mythes et réalités », Géoconfluences, juillet 2004.
- <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient2.htm>
- [4]. <http://la-biomasse.e-monsite.com/pages/introduction-les-differents-types-d-energies-ren>
- [5] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.ouvelables.html. Consulter le 09/06/2022.
- [6] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard, Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années, Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [7] L. Leclercq, Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [8]. K. Belmokhtar, "Contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène" Doctorat en génie électrique, université du Québec, 2015.
- [9] <https://www.istockphoto.com> « photo »energierenovlable.
- [10] <https://opera-energie.com/energie-solaire/cnsulter> le 18/03/2022.
- [11] Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [12] Azizi Yasmina ; « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride » Thèse de doctorat, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA, 2019.
- [13] BENGOURAIN ISSAM ; « Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelable », mémoire de master, Université AboubakrBelkaïd, Tlemcen, 2022.

## Chapitre2 :

- [1] Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande
- [2] Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement, 2005 : Les énergies renouvelables, la géothermie. Rapport d'activité 2005.
- [3] BenchemsaIssame ; « L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique », mémoire de master, université de bajimokhtar, anaba,2017.
- [4] Garneau M. et FauteuxM., 2006 : Geysers et sources thermales.
- [5] :<http://www.geothermie.ch/index.php?p=geothermique>.
- [6] : Idriss Benghezala, « Contribution à l'étude des Performances Dynamiques et Thermiques d'un Echangeur Enterré", Mémoire de magistère 2014.
- [7] : Touil Abdelhak., 'Étude Numérique D'un Échangeur Géothermique Eau -Sol.' Mémoire de Master (2018).
- [8] : Julien Heintz (CETIAT). Michaël Blazy (Anjos Ventilation). Ivan Bordas (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d'informations) "janvier 2008.

## Chapitre3 :

- [1] M A Boukli Hacene, N E Chabane Sari, B Benyoucef, S Amara, « L'impact Environnemental d'une Habitation Écologique », Revue des Energies Renouvelables. Vol 13, N°10; p 545-559 (2010).
- [2] M. E. A. Boukli Hacene, R. Laroui, H. Rozale, et A. Chahed, « Thermal simulation of the ground source heat pump used for energy needs of a bioclimatic house in Tlemcen City (western Algeria) », Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff., p. 1-15, sept. 2019, doi : 10.1080/15567036.2019.1671918. 07014, 2019, doi : 10.1051/e3sconf/20198507014.
- [3] M. B. Benyoucef, « Aspects Energétiques, Economiques et Environnementaux d'une Habitation Ecologique », p. 175.
- [4]<https://www.istockphoto.com> « photo » énergiégeothermie. (5) Sara Sahnoune ; « Le changement climatique ; Conséquence du développement Durable », Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, Annaba ,2019
- [6] Baraa Yousra Bensnane ; « Détermination du flux de chaleur dans la région d'Ain temouchent », Mémoire de Master, Université Aboubekre Belkaid , Tlemcen ,2020
- [7] Abdulkarim Abass Omar ; « Estimation du flux de chaleur dans la région de Tlemcen (Algérie) », Mémoire de Master, Université Aboubekre Belkaid , Tlemcen ,2019
- [8 ] Meriem brixi Gormat et Amina Doudi; « Estimation du flux de chaleur à partir des mesures de température dans deux forages de la région de zouia (wilaya de Tlemcen) »,

Diplôme de Master professionnel, Université Aboubekre Belkaid , Tlemcen ,2022

[9] Mohammed El Amine Boukli Hacene ; « aspect énergétique, économique et environnementaux d'une habitation Ecologique » Thèse de doctorat en physique, Université Aboubekre Belkaid , Tlemcen

[10] Ennebati Soumia ; « Application des pompes a chaleur géothermique pour le site de Tlemcen » Mémoire master en Physique , Université Aboubekre Belkaid , Tlemcen ,2020

[11]<http://De> decoupageadministrativalgerie.blogspot.com.mo.

## Résumé

La géothermie basse énergie émerge comme une solution cruciale dans la transition mondiale vers des sources d'énergie renouvelables. Cette étude se concentre sur le potentiel géothermique de la région de Tlemcen (4cites) et Ain t'émouchent (3cites) en Algérie, en examinant son applicabilité dans un contexte de réchauffement climatique croissant. Divisée en trois parties, cette recherche commence par un aperçu du réchauffement climatique et des énergies renouvelables, suivie d'une analyse approfondie de la géothermie et de son potentiel en Algérie. Ensuite, une simulation détaillée d'un forage géothermique à Tlemcen et Ain t'émouchent sont présentées, utilisant le logiciel Earth Energy Designer pour évaluer les variations saisonnières de la température du fluide caloporteur sur une période de 25 ans. Les résultats mettent en évidence le potentiel prometteur de la géothermie dans la région de tlemcen, offrant des perspectives encourageantes pour des applications telles que le chauffage urbain et la production de l'énergie. En conclusion, cette étude souligne l'importance stratégique de la géothermie basse énergie dans la lutte contre le changement climatique et la promotion d'un développement énergétique durable.

## *Abstract*

Low-energy geothermal energy is emerging as a crucial solution in the global transition towards renewable energy sources. This study focuses on the geothermal potential of the Tlemcen region (4 cities) and Aïn Témouchent (3 cities) in Algeria, examining its applicability in the context of increasing climate change. Divided into three parts, the research begins with an overview of climate change and renewable energy, followed by an in-depth analysis of geothermal energy and its potential in Algeria. Subsequently, a detailed simulation of a geothermal well in Tlemcen and Aïn Témouchent is presented, using the Earth Energy Designer software to assess the seasonal variations in the temperature of the heat transfer fluid over a 25-year period. The results highlight the promising potential of geothermal energy in the Tlemcen region, offering encouraging prospects for applications such as district heating and energy. In conclusion, this study underscores the strategic importance of low-energy geothermal energy in the fight against climate change and the promotion of sustainable energy development.

ملخص

تظهر الطاقة الجيوحرارية ذات الطاقة المنخفضة كحل حاسم في التحول العالمي نحو مصادر الطاقة المتجددة. تركز هذه الدراسة على الإمكانات الجيوحرارية في منطقة تلمسان (4 مدن) ومنطقة عين تيموشنت (3 مدن) في الجزائر، مع دراسة قابليتها للتطبيق في سياق الاحترار المناخي المتزايد. تنقسم هذه الدراسة إلى ثلاثة أجزاء، تبدأ بمراجعة حول الاحترار المناخي والطاقة المتجددة، تليها دراسة معمقة للطاقة الجيوحرارية وإمكاناتها في الجزائر. بعد ذلك، يتم تقديم محاكاة مفصلة لحفر بئر جيوحراري في تلمسان وعين تيموشنت، باستخدام برنامج "Earth Energy Designer" لتقييم التغيرات الموسمية في درجة حرارة سائل النقل الحراري على مدى 25 عامًا. تظهر النتائج أن هناك إمكانات واعدة للطاقة الجيوحرارية في منطقة تلمسان، مما يفتح آفاقًا مشجعة لتطبيقات مثل التدفئة الحضرية وإنتاج الطاقة. وفي الختام، تبرز هذه الدراسة الأهمية الاستراتيجية للطاقة الجيوحرارية ذات الطاقة المنخفضة في مكافحة تغير المناخ وتعزيز التنمية المستدامة للطاقة..