

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES
(CRFD-STG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE PHYSIQUE ET APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web: www.uy1researchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL FOR SCIENCE
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
(PS-STG)

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Web site: www.uy1researchstg.cm

LABORATOIRE D'ÉNERGIE, DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

ENERGY, ELECTRICS AND ELECTRONICS SYSTEMS LABORATORY

ÉTUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS TYPES DE GÉOTHERMIE ET LEURS APPLICATIONS : CAS DE LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE À AHALA

Mémoire rédigé et soutenu en vue de l'obtention du Diplôme de «**Master of Science**» en physique

Option : Énergie et Environnement

Par :

AFANE PAUL JORDAN

Licencié en Physique

Matricule : 18Y455

Sous la direction de :

NJINGTI NFOR

&

NANA ENGO Serge Guy

Maître de conférences

Professeur

Université de Yaoundé 1

Université de Yaoundé 1

Année académique 2023-2024



REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES
(CRFD-STG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE PHYSIQUE ET APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web : www.uy1researchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL FOR SCIENCE
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
(PS-STG)

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Web site : www.uy1researchstg.cm

LABORATOIRE D'ÉNERGIE, DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

ENERGY, ELECTRICS AND ELECTRONICS SYSTEMS LABORATORY

ÉTUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS TYPES DE GÉOTHERMIE ET LEURS APPLICATIONS : CAS DE LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE À AHALA

Mémoire rédigé et soutenu en vue de l'obtention du Diplôme de «**Master of Science**» en physique

Option : Énergie et Environnement

Par :

AFANE PAUL JORDAN

Licencié en Physique

Matricule : 18Y455

Sous la direction de :

NJINGTI NFOR

&

NANA ENGO Serge Guy

Maître de conférences

Professeur

Université de Yaoundé 1

Université de Yaoundé 1

Année académique 2023-2024

DÉDICACE

À mes parents :

Le feu M. NZIE CHARLES DÉSIÉ et Mme NZOUA MIREILLE

REMERCIEMENTS

Je rends grâce au **Dieu** Tout Puissant car il me soutient depuis le début de mon existence. J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui de près comme de loin m'ont soutenu dans la réalisation de ce travail. Je pense particulièrement aux personnes mentionnées ci-après :

- * Le **Pr. NDJAKA Jean-Marie**, Chef du Département de Physique et tous les enseignants du département de physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé 1, pour la qualité de leurs enseignements.
- * Le **Pr. Elie SIMO**, chef du laboratoire d'énergie et environnement, pour la formation de qualité mise à ma disposition, pour ses enseignements et ses conseils tout au long de ces années passées qui m'ont permis de profiter de ses connaissances et ses compétences scientifiques dans le domaine.
- * Mes directeurs de mémoire **Pr. NJINGTI NFOR** et **Pr. NANA ENGO Serge Guy** pour avoir accepté de diriger ce travail, pour la pertinence du thème proposé, pour m'avoir guidé et soutenu avec patience et indulgence, pour leurs instructions enrichissantes, les précieux conseils et pour avoir mis à ma disposition les outils de collecte de données nécessaires pour réaliser ce travail.
- * Les distingués **membres du jury** qui seront chargés d'apprécier ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et de mon profond respect.
- * Le **Dr NGATCHOU Evariste**, pour son encadrement, son suivi permanent, son soutien inconditionnel et ses précieux conseils tout au long du travail.
- * Le **Dr BEKONO Boris Davy**, et le **Dr AWOMO ATEBA Jeremie** pour leurs suivis permanents et leurs encouragements.
- * Ma famille pour le soutien moral, financier et matériel mis à ma disposition jusqu'ici pour ma réussite académique. Je pense particulièrement à : ma très chère mère **Mme NZOUA Mireille**, mes tantes **Mme BILOA Lydie** épouse **MEBOMA**, **Mme ANZIE Désiré Caroline**, mon parrain **M. NDI Moïse Eric** mes sœurs **WANG Vanessa Lydie**, **MEKA'A Louise Françoise**, **ASSEN Pierrette**, et mon petit frère **NGUEMA Paul Ledoux**.

-
- * Ma petite amie **NGAH BESSALA Marie Reine** pour son soutien moral inconditionnel et sa présence à mes côtés.
 - * Toute ma promotion de physique du laboratoire d'énergie, des systèmes électriques et électroniques. En particulier mes camarades du laboratoire des experts : **BATOUANEN BEKOAKEN, NTCHATCHOU NAMI Dorcas Carelle, NDASSI NDEFFO Michael**, mes camarades **DJOU TATSA Larissa** et **TCHAKUI NDE Gide** pour les échanges édifiants et leur formidable esprit d'équipe.
 - * Ma Nièce **BILOA MAYO Lydie Océanne** pour son accompagnement lors des descentes sur la terrain.
 - * Toutes les personnes ayant disposé de leur temps pour la relecture de mon mémoire.

Que tous ceux dont les noms ne sont pas mentionnés et qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce travail, trouvent en ces mots, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Table des matières

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS	x
NOMENCLATURE	xi
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Généralités sur la géothermie	3
1.1.1 Origines des gisements géothermiques	3
1.1.2 Le gradient et le flux géothermique	4
1.1.3 Pourquoi exploiter la géothermie ?	5
1.2 Les types de géothermie	6
1.2.1 La géothermie très basse énergie	6
1.2.2 La géothermie basse énergie	6
1.2.3 La géothermie haute énergie	6
1.2.4 La géothermie très haute énergie	6
1.3 Les applications de la géothermie	7
1.3.1 La géothermie très basse énergie	7
1.3.2 La géothermie basse énergie	10
1.3.3 La géothermie haute énergie	10
1.3.4 La géothermie très haute énergie	11
1.4 La géothermie au Cameroun	14
1.4.1 Le potentiel géothermique du Cameroun	14

1.4.2	Les obstacles à la géothermie au Cameroun	16
1.5	Les puits d'eau	16
1.5.1	Les types de puits d'eau	16
1.6	Les atouts et les préjudices de la géothermie	18
1.7	Présentation de la zone d'étude : AHALA (OBAM)	19
1.7.1	Situation géographique	19
1.7.2	Le climat à AHALA	19
1.7.3	Cadres géologique et tectonique	20
1.8	Généralités sur les systèmes photovoltaïque et thermoélectrique	20
1.8.1	L'effet photovoltaïque	20
1.8.2	L'effet thermoélectrique	20
Chapitre 2	MATÉRIEL ET MÉTHODES	23
2.1	Matériel	23
2.1.1	L'ordinateur portable	23
2.1.2	Le Thermomètre LASER infrarouge	23
2.1.3	Le compteur LASER de distances	25
2.1.4	Le logiciel UTM Geo Map	26
2.1.5	Le logiciel Google Earth	27
2.1.6	Le logiciel Oasis Montaj	28
2.1.7	Le logiciel Surfer	29
2.1.8	Le logiciel Excel	30
2.1.9	Le logiciel Comsol Multiphysics	31
2.1.10	Le logiciel Matlab	32
2.1.11	Description des données	33
2.2	Méthodes	35
2.2.1	La méthode thermique	35
2.2.2	La collecte des données	36
2.2.3	Traitement des données recueillies	37
Chapitre 3	RÉSULTATS ET DISCUSSION	41
3.1	Traitement des données collectées	41
3.1.1	Variation de la température des puits du quartier Ahala (Obam)	41
3.1.2	Variation de la profondeur des puits du quartier Ahala (Obam)	43
3.1.3	Variation de l'altitude des puits du quartier Ahala (Obam)	45

3.1.4	Variation de la température avec la profondeur des puits du quartier Ahala (Obam)	47
3.1.5	Variation de la température avec l'altitude des puits du quartier Ahala (Obam)	48
3.1.6	Variation de la température des puits en fonction de la latitude et la longitude	49
3.1.7	Variation de la profondeur avec l'altitude des puits du quartier Ahala (Obam)	50
3.1.8	Répartition géographique des profondeurs des puits du quartier Ahala (Obam)	51
3.2	Détermination de la profondeur de peau	52
3.3	Simulation sur comsol du comportement d'un système hybride PV-PCM-TE-Géothermique adapté au quartier AHALA (Obam)	53
3.3.1	Comportement thermique des systèmes PV-PCM-TE et PV-PCM-TE-Géothermique	53
3.3.2	Puissance et rendement énergétique des systèmes PV-PCM-TE et PV-PCM-TE-Géothermique	55
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	57
	BIBLIOGRAPHIE	60

LISTE DES FIGURES

1.1	Variation de la température en fonction de la profondeur [4].	4
1.2	L'intérieur de la Terre [5]	5
1.3	Les applications de la géothermie [7]	7
1.4	Maison écologique avec piscine et chauffage d'une habitation [9]	8
1.5	Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur [10]	9
1.6	Serre écologique à énergie géothermique [10]	9
1.7	Principe de fonctionnement d'un alternateur dans une centrale [13]	11
1.8	Description simplifiée d'un transformateur [13]	12
1.9	Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique à vapeur sèche [14] .	12
1.10	Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique à vapeur humide [14]	13
1.11	Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique hydrothermale [14] .	13
1.12	Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique profonde stimulée [14]	14
1.13	Ligne volcanique du Cameroun et localisation de Woulndé [15]	15
1.14	Représentation de la répartition géographique des puits à Obam Ahala [19] . .	19
1.15	Illustration des effets photovoltaïque (a) et thermoélectrique (b) [25]	21
2.1	Thermomètre LASER infrarouge [27]	24
2.2	Le Télémètre LASER de distances [28]	25
2.3	Présentation de l'interface du logiciel UTM Geo Map [29]	26
2.4	Présentation de l'interface du logiciel Google Earth [30]	27
2.5	Présentation de l'interface du logiciel Oasis Montaj [31]	28
2.6	Présentation de l'interface du logiciel Surfer [32]	29
2.7	Présentation de l'interface du logiciel Excel [31]	30
2.8	Présentation de l'interface du logiciel Comsol Mulyipysics [34]	31
2.9	Présentation de l'interface du logiciel Matlab [35]	32
2.10	Mesure de la température d'un puits	36
2.11	Mesure de la profondeur d'un puits	36

2.12	Système hydride PV-PCM-TE modélisé sur Comsol Multiphysics	39
3.1	Distribution des températures dans les puits d’Ahala (Obam)	41
3.2	Distribution des températures dans les puits d’Ahala (Obam)	42
3.3	Distribution des profondeurs des puits d’Ahala (Obam)	43
3.4	Répartition de l’altitude des puits d’Ahala (Obam)	45
3.5	Répartition 2D de l’altitude des puits d’Ahala en fonction de la latitude et la longitude	46
3.6	Répartition 3D de l’altitude des puits d’Ahala en fonction de la latitude et la longitude	46
3.7	Variation de la température avec la profondeur des puits à Ahala (Obam)	47
3.8	Variation de la température des puits d’Ahala (Obam) en fonction de l’altitude .	48
3.9	Carte 2D des contours isothermes de Ahala (Obam)	50
3.10	Variation de la profondeur des puits d’Ahala (Obam) en fonction de l’altitude .	51
3.11	Carte 2D des contours d’iso-dépression de Ahala	52
3.12	Évolution des températures des deux descentes en fonction de la profondeur des puits	53
3.13	Résultats de la simulation	55
3.14	Variation de la puissance et du rendement énergétique en fonction du rayonne- ment solaire	55

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Avantages et inconvénient de la géothermie	18
2.1	Données des puits du quartier Ahala (Obam)	33
2.2	Dimensions physiques des matériaux utilisés	38
2.3	Propriétés des matériaux de la cellule photovoltaïque	39
2.4	Propriétés des matériaux thermoélectriques	39
2.5	Propriétés du matériau à changement de phase	39
3.1	Valeurs des paramètres de simulation	54

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- * **MW** : Mégawatt
- * **LVC** : Ligne volcanique du Cameroun
- * **LASER** : Light amplification by stimulated emission radiation
- * **UTM** : Universal transverse mercator
- * **GPS** : Global positioning system
- * **MNT** : Modèle numérique de terrain
- * **VBA** : Visual basic application
- * **PV** : Photovoltaïque
- * **PCM** : Phase change material
- * **TEG** : Thermoelectric generator
- * **EVA** : Ethylène vinyl acetate
- * **PV-PCM** : Potovoltaïc system integrated with phase change material
- * **PV-PCM-TE** : Potovoltaïc system integrated with phase change material and thermoelectric system

NOMENCLATURE

- * λ : Le coefficient de conductivité thermique en W/m.K
- * α : Le coefficient Seebeck en volt par kelvin (V/K)
- * μ : La vitesse des transferts de chaleur en watt (W)
- * ρ : La masse volumique en kilogramme par litre (kg/L)
- * δt : La variation élémentaire du temps en seconde (s)
- * ΔT : La variation élémentaire de la température en Kelvin (K)
- * ∇T : Le laplacien de la température en kelvin par mètre carré (K/m²)
- * $\vec{n}$: Le vecteur normal à la surface élémentaire
- * $\overrightarrow{\text{grad}}(T)$: Le gradient de températures en Kelvin (K)
- * δT : La variation élémentaire de la température en Kelvin (K)
- * dQ : La variation élémentaire de la quantité de chaleur en joule (J)
- * T : La température en Kelvin (K)
- * dS : La surface élémentaire en mètre carré (m²)
- * t : Le temps en seconde (s)
- * dt : La variation élémentaire du temps en seconde (s)
- * A : La production de chaleur libérée par les roches en joule (J)
- * K_0 : La diffusivité thermique en mètre carré par seconde (m²/s)
- * C_p : La chaleur spécifique en joule par kilogramme Kelvin (J/kg.K)
- * U_{CF} : La tension délivrée par le générateur thermoélectrique en volt (V)
- * T_C : La température du corps chaud du générateur thermoélectrique en Kelvin (K)
- * T_F : La température du corps froid du générateur thermoélectrique en Kelvin (K)

RÉSUMÉ

L'énergie est au cœur du développement technico-économique du monde. Actuellement, environ 70% de la production énergétique mondiale est assurée grâce aux sources d'énergies fossiles dont l'épuisement et les effets néfastes sur l'environnement ne sont plus à démontrer. Dans le contexte de la crise énergétique mondiale, les politiques de réduction des émissions des gaz à effet de serre ont entraîné un gain d'intérêt pour les énergies vertes. La géothermie est susceptible d'y contribuer de manière significative à travers sa puissance globale estimée à 30 milliard de kilowatts et ses nombreuses applications. Cependant, l'énergie géothermique est sous-exploitée à travers le monde en général (elle représente moins de 3% de la production énergétique) et au Cameroun en particulier. En effet, très peu d'études ont été menées en vue de mettre en évidence le potentiel géothermique du Cameroun. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail dont l'objectif est d'évaluer le potentiel géothermique superficiel de la ville de Yaoundé, plus précisément à Ahala afin de déterminer les applications de la géothermie peu profonde adaptées à cette zone. Pour y parvenir, on a fait usage de la méthode thermique qui comprend les appareils tels que le thermomètre laser infrarouge, le compteur de distance et le GPS pour prélever respectivement les températures, les profondeurs, et les coordonnées géographiques des puits. Les logiciels Excel, Oasis Montaj, Surfer, Matlab et Comsol Multiphysics ont permis de traiter les données collectées. Il en ressort que la valeur positive de la covariance inter-variable entre la température et la profondeur des puits (2,44) montre que la température évolue dans le même sens que la profondeur. Aussi, les températures des puits au mois de Mars sont plus élevées que celles de Mai, preuve que le climat influence la température des puits. En outre, la profondeur adaptée à l'exploitation de la géothermie très basse énergie au quartier Ahala est d'environ 13,2 m comprise dans l'intervalle expérimental 12,7 m - 14,5 m. À cette profondeur, la géothermie peu profonde présente une application directe à savoir l'optimisation d'un système PV-PCM-TE. En réduisant température du corps froid du TEG, cela devrait augmenter le gradient de température, par conséquent la puissance électrique du PV-PCM-TE car ces deux paramètres sont proportionnels d'après l'effet Seebeck.

Mots clés : énergie, géothermie, température, covariance inter-variable, optimisation

ABSTRACT

Energy is at the heart of the world's technical and economic development. At present, around 70% of the world's energy is produced from fossil fuels, whose depletion and harmful effects on the environment are well documented. In the context of the global energy crisis, policies to reduce greenhouse gas emissions have led to a growing interest in green energies. Geothermal energy is likely to make a significant contribution to this, with its estimated global capacity of 30 billion kilowatts and its many applications. However, geothermal energy is under-exploited throughout the world in general (it represents less than 3% of energy production) and in Cameroon in particular. In fact, very few studies have been carried out to identify Cameroon's geothermal potential. It is within this framework that the present work falls, the objective of which is to evaluate the surface geothermal potential of the city of Yaoundé, more specifically in Ahala (Obam), in order to determine the shallow geothermal applications suitable for this area. To achieve this, we used the thermal method, which includes devices such as infrared laser thermometers, distance counters and GPS to collect the temperatures, depths and geographical coordinates of the wells, respectively. Excel, Oasis Montaj, Surfer, Matlab and Comsol Multiphysics were used to process the data. The positive value of the inter-variable covariance between temperature and well depth (2.44) shows that temperature evolves in the same direction as depth. Also, well temperatures in March are higher than those in May, showing that climate influences well temperatures. In addition, the depth suitable for exploiting very low-energy geothermal energy in the Ahala district is around 13.2m, within the experimental range of 12.7m-14.5m. At this depth, shallow geothermal energy has a direct application, namely the optimisation of a PV-PCM-TE system. By reducing the TEG cold body temperature, this should increase the temperature gradient, and consequently the electrical power of the PV-PCM-TE, as these two parameters are proportional according to the Seebeck effect.

Keywords : energy, geothermal, temperature, inter-variable covariance, optimization

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie est un pilier fondamental du développement mondial, affectant directement la croissance économique, la réduction de la pauvreté, l'accès aux technologies de pointe, la sécurité alimentaire et environnementale. Un accès équitable et durable à l'énergie est donc essentiel pour assurer une croissance inclusive à long terme à l'échelle mondiale. En effet, les principales sources d'énergie sont : les énergies fossiles (le pétrole, le charbon et les gaz naturels) et les énergies vertes (l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice, et la biomasse). Toutefois, les sources traditionnelles d'énergie posent un défi en termes d'impact environnemental (pollution atmosphérique à travers l'effet de serre) et de sécurité énergétique. Face à la croissance exponentielle de la demande énergétique mondiale, les politiques de réduction des émissions des gaz à effet de serre ont entraîné un gain d'intérêt pour les énergies décarbonnées. Au même titre que les énergies solaires, éoliennes et hydraulique, la géothermie est susceptible d'y contribuer dans un grand nombre de pays, de manière significative du fait de ses nombreuses applications.

La géothermie est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et par extension la technique qui vise à l'exploiter. L'utilisation de la géothermie vise à capter le flux thermique que constitue la chaleur de la terre et de la transporter jusqu'à la surface à des fins utiles. Ainsi, la géothermie est l'outil scientifique ayant permis d'envisager l'exploitation et la maîtrise de cette immense source d'énergie. Cependant, les énergies renouvelables sont sous-exploitées (elles représentent moins de 30% de la production énergétique mondiale en 2023). Particulièrement, l'énergie géothermique est très peu utilisée à travers le monde en général (moins de 3%) [14] et au Cameroun en particulier. Aussi, très peu d'études ont été menées en vue de mettre en exergue le potentiel géothermique du Cameroun ainsi que les applications possibles de cette dernière dans ce pays.

Pour y remédier, l'objectif général fixé est d'évaluer le potentiel géothermique superficiel de la ville de Yaoundé, plus précisément dans la zone d'Ahala (Obam) afin de déterminer les applications de la géothermie peu profonde adaptées à cette région. Pour atteindre ce but, il faut répondre à la question suivante : quels sont les facteurs influençant la variation des températures

des puits et comment la géothermie superficielle peut-elle être utilisée à Ahala ? Les hypothèses ci-dessous sont formulées en vue d'apporter une réponse à la question de recherche :

- La variation de la température des puits dépend de leur profondeur.
- Cette variation dépend de la position géographique des puits.
- Elle est fonction des caractéristiques géologiques du sous-sol et du climat de la zone étudiée.
- Les applications possibles de la géothermie très basse énergie à Ahala sont le chauffage des serres agricoles, le confort thermique.

Spécifiquement, il sera question de vérifier l'effectivité de la variation des températures des puits d'Ahala, la profondeur de peau ainsi que répertorier les sites potentiels d'une quelconque exploitation de la géothermie peu profonde dans ce quartier.

Le présent travail d'initiation à la recherche est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre intitulé revue de la littérature présente les généralités sur la géothermie, ses applications et le quartier Ahala qui est la zone d'investigation. Quant au deuxième chapitre il rend compte des différents matériels et méthodes utilisés pour mener à bien le travail. Pour ce qui est du troisième chapitre, il comprend l'ensemble des résultats obtenus ainsi que l'analyse et la discussion de ces derniers.

REVUE DE LA LITTÉRATURE

INTRODUCTION

Les politiques de réduction des émissions des gaz à effet de serre ont entraîné un gain d'intérêt pour les énergies décarbonées. Au même titre que les énergies solaires, éoliennes et hydrauliques, la géothermie est susceptible d'y contribuer dans un grand nombre de pays, de manière significative selon les ressources et la demande. En effet, la géothermie est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et par extension la technique qui vise à l'exploiter [1]. Présenter les généralités, les domaines d'applications de la géothermie et notre zone d'étude (Ahala) est la tâche qui nous incombe dans ce chapitre.

1.1 Généralités sur la géothermie

1.1.1 Origines des gisements géothermiques

Un **gisement géothermique** est une concentration de la chaleur terrestre naturelle dans le sol ou le sous-sol que l'on peut exploiter en construisant une mine souterraine et des puits de forage. La terre est active [2]. Elle possède une chaleur interne qui provient de trois principales sources :

- **La chaleur de désintégration** (l'essentiel de la chaleur) : elle est liée à la présence d'éléments radioactifs (les isotopes participants le plus au dégagement de chaleur sont l'uranium 238, le thorium 32 et le potassium 40) dans les matériaux constitutifs de la Terre. Ces matériaux présents dès la formation du globe se désintègrent par radioactivité, mécanisme s'accompagnant d'une libération importante de chaleur [3].
- **La chaleur latente de cristallisation du noyau liquide terrestre** : ce dernier est un mélange de fer (79%), de nickel et est constitué d'une partie solide et d'une enveloppe liquide des mêmes métaux. La solidification de celle-ci est exothermique (elle dégage de la chaleur). Ainsi, avec le refroidissement terrestre, le métal liquide du noyau va cristalliser à la surface de la graine, dégageant ainsi de la chaleur en quantité suffisante [3].

- **La chaleur initiale (20% à 24% de la chaleur interne)** : l'énergie accumulée lors de la formation du système solaire il y a 4,56 milliards d'années. L'agglomération sous l'effet de la gravitation de poussières en blocs de plus en plus gros et les impacts qui ont suivi ont généré de la chaleur. Celle-ci est restée confinée dans les profondeurs terrestres et constitue des énormes réservoirs de chaleur [3].

1.1.2 Le gradient et le flux géothermique

La température du sol augmente globalement avec la profondeur évidemment en faisant abstraction des variations thermiques superficielles d'origine climatique qui affectent cette température selon leur périodicité quelques mètres ou dizaines de mètres de profondeur : c'est le gradient géothermique. Les mesures récentes de ce dernier avec la profondeur (voir figure 1.1), ont montré que cette valeur n'était pas uniforme à la surface du globe. Elle varie entre 10 et 30°C par kilomètre dans la plupart des régions, peut atteindre 100°C/km à l'équateur et peut être localement beaucoup plus forte au niveau des sites très particuliers notamment au voisinage des volcans [4].

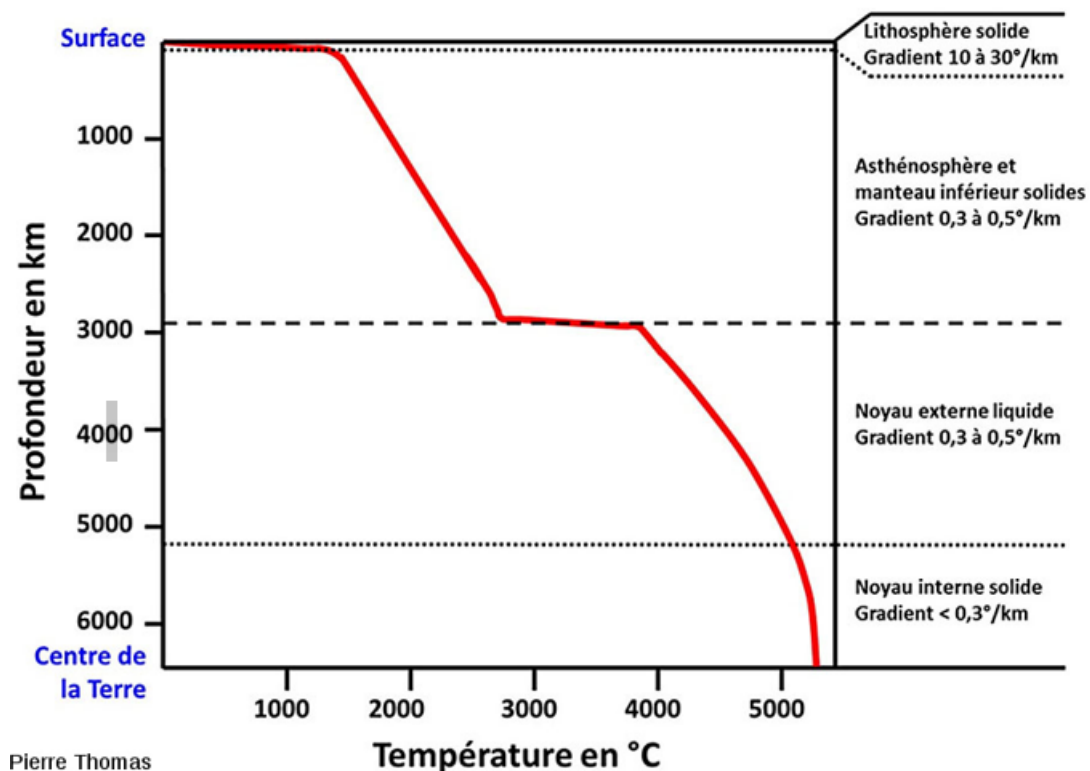


FIGURE 1.1 – Variation de la température en fonction de la profondeur [4].

Ce gradient dépend de la conductivité thermique des roches et du flux géothermique qui est de l'ordre de 0,05 W/m², soit environ 4 000 fois moins que la valeur moyenne du flux solaire

(200 W/m²). [2] Le flux géothermique, quantité d'énergie dégagée par la terre par unité de surface, est fonction du gradient et de la conductivité thermique (loi de Fourier sur la conduction) des roches traversées. Cette loi est traduite par la relation ci-dessous :

$$dQ = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot dS \cdot \vec{n} \cdot dt \quad (1.1)$$

Avec dQ la variation élémentaire de la quantité de chaleur en joule (J), (λ) le coefficient de conductivité thermique en W/m.K, T la température en kelvin (K), dS la surface élémentaire en mètre carré (m²), le temps t en seconde et $\vec{n}$ le vecteur normal à dS. Le transfert de chaleur en fonction du temps en un point du globe est exprimé par l'équation différentielle de la chaleur :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{A}{\rho \cdot C_p} + K_0 \cdot \Delta T - \mu \nabla T \quad (1.2)$$

Avec A la production de chaleur libérée par les roches, T la température en °K, t le temps, K la diffusivité thermique en m²/s, μ la vitesse des transferts de chaleur en W, C_p la chaleur spécifique en J/kg.K et ρ la masse volumique en kg/L [4].

1.1.3 Pourquoi exploiter la géothermie ?

La croûte terrestre a l'immense avantage de stocker la chaleur en abondance. On peut dès lors utiliser ce stock pratiquement en tout point du globe. En terme de flux, on estime la puissance géothermique de la Terre à **30 milliards de kilowatts** [14]. Les réserves en calories des deux premiers kilomètres de la croûte terrestre sont plusieurs milliers de fois supérieures à celles des combustibles fossiles. La figure 1.2 illustre par exemple le plein potentiel qu'a l'exploitation de l'énergie géothermique à condition d'utiliser les moyens et l'intelligence nécessaire [5].

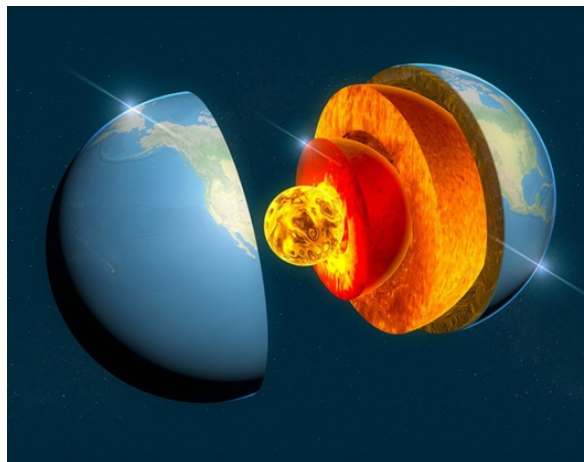


FIGURE 1.2 – L'intérieur de la Terre [5]

1.2 Les types de géothermie

1.2.1 La géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie consiste à prélever la chaleur du sous-sol à basse température à l'aide d'une pompe à chaleur. Cette température se situe généralement à moins de 30°C à des profondeurs allant jusqu'à 200 mètres. Elle développe une puissance thermique ne dépassant pas 500 kW. La chaleur stockée dans la terre et dans les roches provient des rayonnements solaires et des eaux pluviales, ainsi que de l'activité radioactive des roches souterraines. Notons également que dans les régions arctiques froides avec le sol gelé en profondeur, cette géothermie n'existe pas [6].

1.2.2 La géothermie basse énergie

On parle de « géothermie basse énergie » lorsque le forage permet d'atteindre des températures comprises entre 30°C et 100 °C dans des gisements situés à des profondeurs allant jusqu'à 1 500 mètres voir 2 000 mètres de profondeur dépendamment de la région où on se situe. Il s'agit principalement d'extraire la chaleur contenue dans la croûte terrestre [6].

1.2.3 La géothermie haute énergie

La géothermie haute énergie ou « géothermie profonde », appelée plus rarement géothermie haute température, ou géothermie haute enthalpie, est une source d'énergie contenue dans des réservoirs localisés généralement à plus de 1 500 mètres et moins de 4 000 mètres de profondeur avec des températures comprises entre 100 °C et 150 °C. Plus la terre est forée profondément, plus la température augmente. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région du globe considérée. Les zones où les températures sont beaucoup plus fortes, appelées anomalies de température, peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés pour de faibles profondeurs. Ces anomalies sont observées le plus souvent dans les régions volcaniques. En géothermie, elles sont désignées comme des gisements de haute enthalpie, et utilisées pour fournir de l'énergie (la température élevée du gisement entre 80°C et 200 °C) [6].

1.2.4 La géothermie très haute énergie

La géothermie très haute énergie va au delà de 4000 mètres de profondeur et est généralement utilisée pour produire de l'électricité. Elle se trouve aussi dans les régions volcaniques mais aussi à la frontière des plaques tectoniques. Cette technique permet d'atteindre des températures supérieures à 150 °C et utilise la vapeur sous pression pour alimenter les turbines

des centrales géothermiques. C'est la géothermie la plus difficile d'accès car elle nécessite la mobilisation des appareils munis d'une technologie de pointe et très coûteuse [6].

1.3 Les applications de la géothermie

Comme les autres formes d'énergies, l'énergie issue de la géothermie présente de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Lors de l'utilisation des ressources géothermiques, une distinction des types de géothermie est faite entre l'utilisation directe et l'utilisation indirecte. L'utilisation directe signifie faire usage de la chaleur elle-même. Quand on parle d'utilisation indirecte, on entend qu'une conversion est faite vers un autre type d'énergie, par exemple en énergie électrique ou en travail. La figure 1.3 présente les différents types de géothermie et leurs applications dans les domaines respectifs [7].

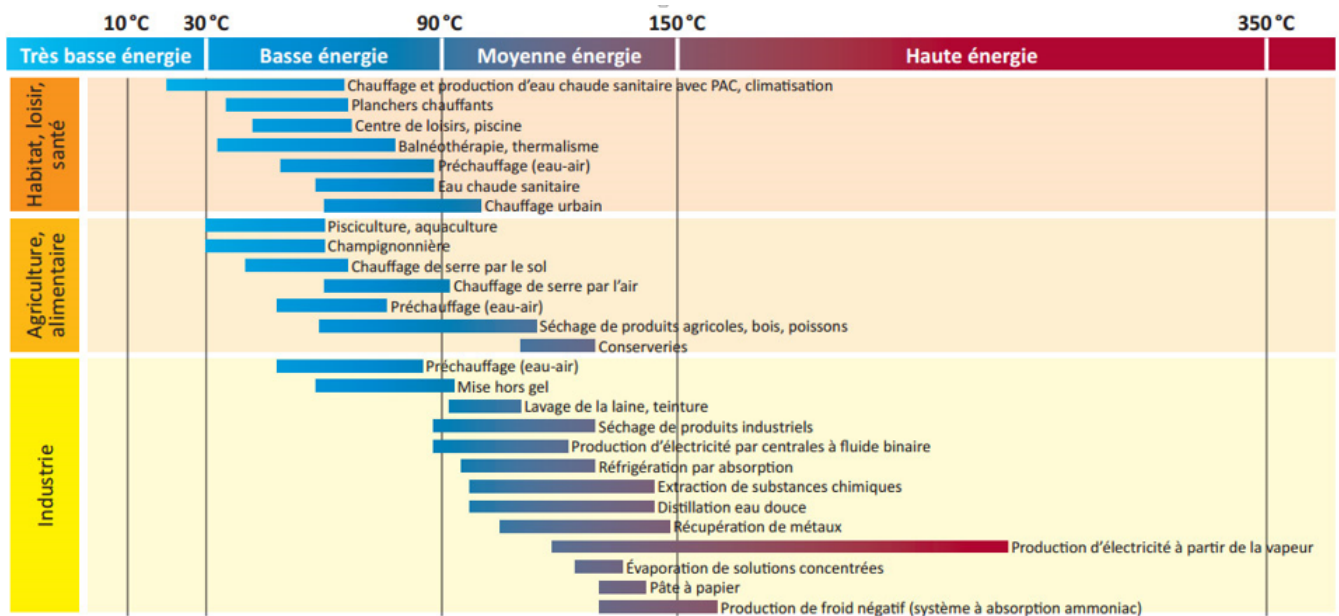


FIGURE 1.3 – Les applications de la géothermie [7]

1.3.1 La géothermie très basse énergie

En fonction de la température de la source, la géothermie très basse température peut être utilisée pour le chauffage des piscines, des serres agricoles, la climatisation, la pisciculture, la balnéothérapie et même dans les champignonnières. En effet, les principaux domaines d'applications de cette géothermie sont l'agriculture et l'habitat.

Le chauffage des habitats et piscines par pompe à chaleur consiste à prélever des calories dans le sol et à restituer ces calories dans un réseau traditionnel de plancher chauffant [8].

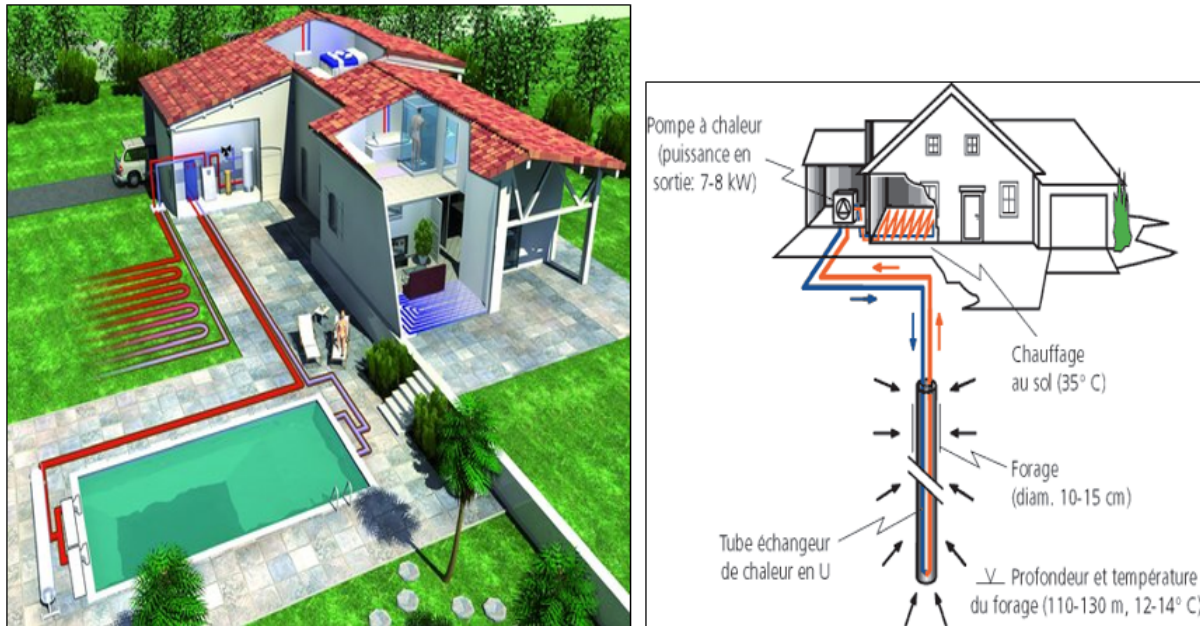


FIGURE 1.4 – Maison écologique avec piscine et chauffage d’une habitation [9]

Dans le même ordre d’idée, une technique plus avancée consiste à utiliser une pompe à chaleur moderne. C’est un dispositif permettant de transférer de l’énergie thermique d’un milieu à basse température (source froide) vers un milieu à haute température (source chaude). Son principe de fonctionnement est celui d’un réfrigérateur inversé. Elle est constituée d’un évaporateur, un compresseur, un condenseur et le détendeur. Le principe de fonctionnement de ce dispositif est basé sur le cycle thermodynamique de Rankine avec quatre temps :

- La **compression** : le réfrigérant à l’état vapeur est comprimé et sort du compresseur à haute pression et haute température ;
- La **condensation** : la vapeur très chaude (et comprimée) passe dans un condenseur (ou échangeur de chaleur) où elle va céder de la chaleur au milieu ambiant (l’air de la pièce), ce qui va lui permettre de se liquéfier, c’est-à-dire passer de l’état vapeur à l’état liquide ;
- La **détente** : à la sortie du condenseur le liquide sous haute pression est détendu en faisant baisser rapidement la pression dans un détendeur (en faisant circuler le fluide au travers d’un orifice). Cette subite baisse de pression a pour effet de vaporiser une partie du fluide. Le réfrigérant est à présent à son état le plus froid du cycle ;
- L’ **évaporation** : le fluide réfrigérant à présent froid et partiellement vaporisé circule dans un échangeur de chaleur (évaporateur) qui est connecté à la source géothermique. Il soustrait de la chaleur au sous-sol pour refroidir le fluide. En absorbant de la chaleur, le réfrigérant s’évapore complètement (du liquide au gaz). La figure 1.5 met en exergue le principe de fonctionnement d’une pompe à chaleur géothermique [10].

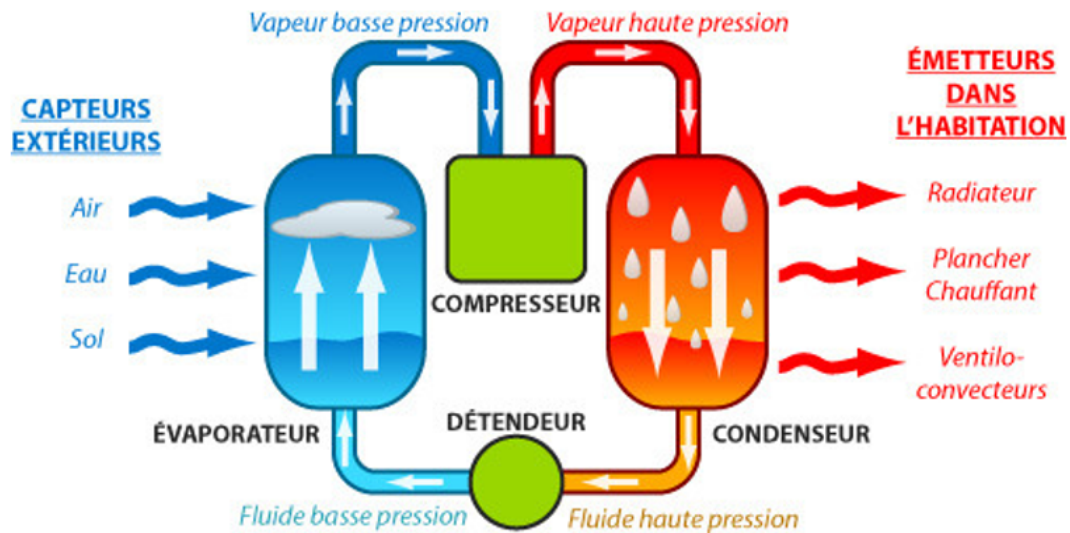


FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur [10]

Dans le **domaine agricole** : on peut l'utiliser pour le chauffage des serres (figure 1.6) et des bassins de pisciculture. Dans la pisciculture, une légère augmentation de la température et son maintien produit un accroissement du métabolisme chez les poissons et les crustacés. Bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le chauffage des serres ou des bassins de pisciculture. On compte l'Italie, la Hongrie et l'Islande comme les pays possédant les plus grands complexes de serres chauffées par la géothermie [10].

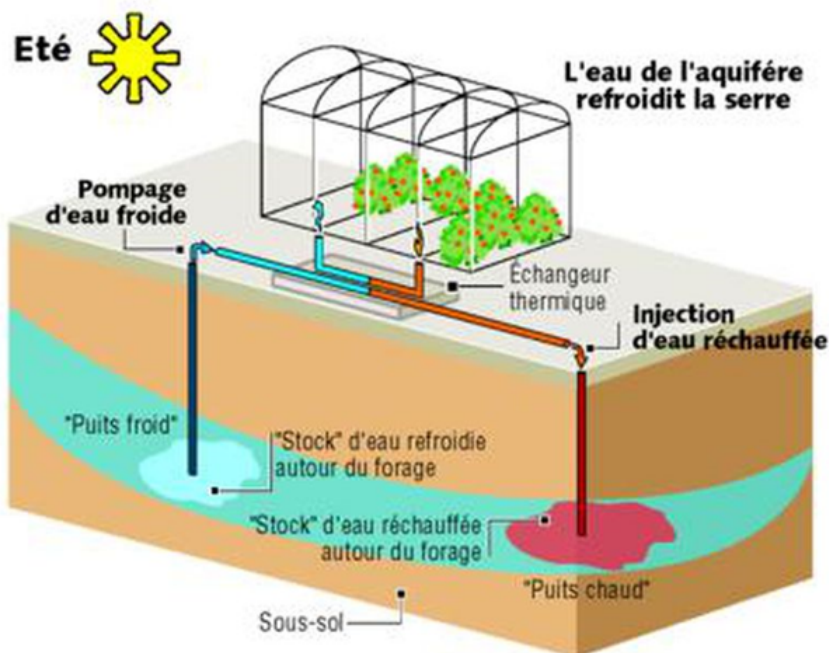


FIGURE 1.6 – Serre écologique à énergie géothermique [10]

1.3.2 La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie trouve ses applications dans les domaines tels que l'habitat, la santé, l'agriculture, et dans l'industrie à travers :

- La **production de l'eau chaude sanitaire** : l'eau chaude sanitaire est de l'eau chauffée pour des usages domestiques. L'eau, chauffée par échange de chaleur avec l'énergie issue d'une source géothermale, est acheminée via des canalisations, jusqu'à des points d'utilisation (douche, baignoire, lavabo, évier, etc.).
- Le **séchage géothermique** : le séchage agricole est la méthode de conservation la plus ancienne des produits agricoles. Elle consiste à la déshydratation des fruits et légumes, grâce à la chaleur. Les principaux éléments qui sont séchés grâce à la géothermie sont : oignon, tomate, ail, pommes, mangue, poire, banane, ananas, céréales, noix de coco, algues).
- La **mise hors gel** : c'est un concept utilisé dans le domaine de la construction et de l'architecture pour qualifier un élément ou une structure qui est protégée contre les effets néfastes du gel. Cette protection peut être assurée par divers moyens, tels que l'utilisation de matériaux résistants au gel, le confort thermique [11].

1.3.3 La géothermie haute énergie

Le principal domaine d'application de la géothermie haute température est l'industrie. Elle permet :

- Le **séchage géothermique des produits industriels** : le principe est le même que celui du séchage géothermique des produits agricoles à la seule différence qu'ici il faut atteindre les températures plus grande dont la valeur est généralement de l'ordre de 150 °C voir plus ;
- L'**extraction des substances chimiques** est un procédé de séparation en génie chimique et en chimie de laboratoire qui consiste à extraire une espèce chimique, c'est-à-dire prélever une ou plusieurs espèces chimiques d'un mélange solide ou liquide grâce à l'énergie géothermique ;
- L'**évaporation des solutions concentrées** grâce à la chaleur issue des réservoirs géothermiques de haute enthalpie qui offre une large fourchette de températures. La température d'évaporation varie d'une solution concentrée à une autre, dépendamment des substances constitutives de ces dernières [12]. Ce processus est assimilable à la distillation dans le cadre de la chimie générale.

1.3.4 La géothermie très haute énergie

La principale application de la géothermie très haute énergie est la production de l'électricité à travers les centrales géothermiques. Une **centrale géothermique** est l'ensemble des équipements de surface permettant la récupération de la chaleur, le traitement de l'énergie contenue dans le fluide géothermal et de son départ vers le circuit de distribution de l'énergie (chaleur, électricité). La centrale comprend également tous les équipements nécessaires à ce transfert, notamment : l'échangeur, la turbine, la pompe, le condenseur, le générateur, l'évaporateur. Actuellement, 24 pays ont des centrales géothermiques en exploitation, avec une capacité totale de **12,8 GW**. Les trois principaux producteurs mondiaux sont les États-Unis (**7525MW**), les Philippines (**6915MW**) et l'Indonésie (**4380 MW**) [13]. La production de l'électricité dans une centrale géothermique s'effectue suivant les étapes ci-après :

- Le captage du fluide géothermal dans le (**puits de production**) ;
- La remontée du fluide géothermal à la surface jusqu'à la **tête du puits** avec vaporisation partielle du fluide ;
- La dissociation de la vapeur et de l'eau par le **séparateur** ;
- La vapeur actionne la **turbine** et la met en rotation. L'**alternateur** lié mécaniquement à l'axe de la turbine produit l'électricité lors de sa rotation (loi de Lenz). La figure suivant nous présente un système de turbinage [13].

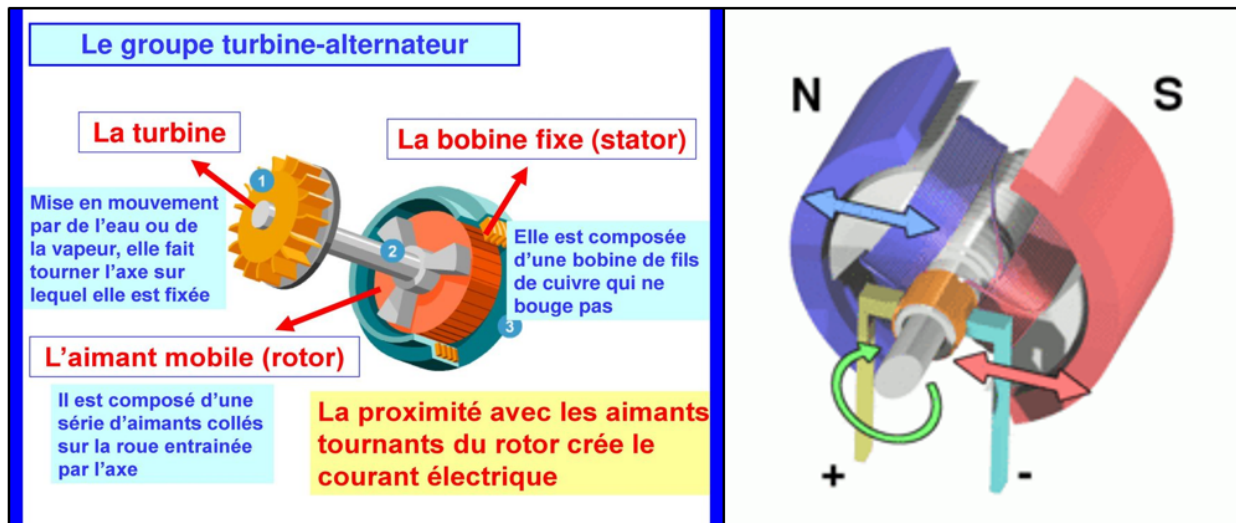


FIGURE 1.7 – Principe de fonctionnement d'un alternateur dans une centrale [13]

- L'élévation de la tension électrique par un **transformateur** élève de tension dont le mécanisme et les formules mathématiques y afférentes sont présentés à la figure 1.8 ci-contre [13].

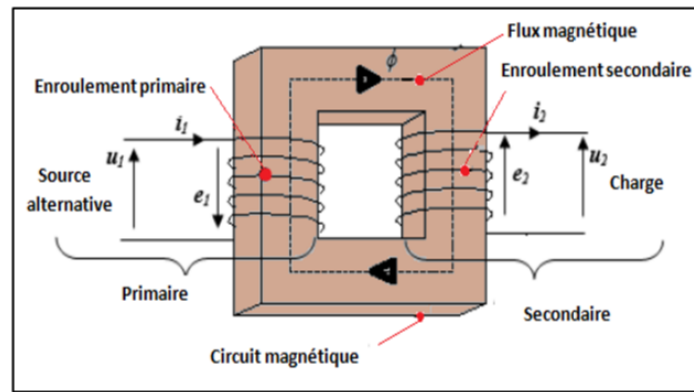


FIGURE 1.8 – Description simplifiée d'un transformateur [13]

- Après sa détente dans la turbine, la vapeur est transformée en eau dans le **condenseur** par refroidissement à l'aide d'eau froide provenant des **tours de refroidissement**. Le surplus d'eau de la tour de refroidissement est réinjecté dans le **puits de réinjection** ;
- L'eau issue du séparateur et de l'unité de refroidissement est envoyée dans le sous-sol à l'aide d'une pompe.

En fonction des caractéristiques du liquide géothermal, on distingue plusieurs types de centrales :

- **Centrale géothermique à vapeur sèche** : le fluide géothermal se présente sous forme de vapeur sèche pressurisée et surchauffée à une température pouvant aller de 180°C à plus de 350 °C. Il fait tourner la turbine d'une centrale, tandis que l'eau refroidie résultante est injectée dans le réservoir géothermique comme l'illustre la figure ci-après [14].

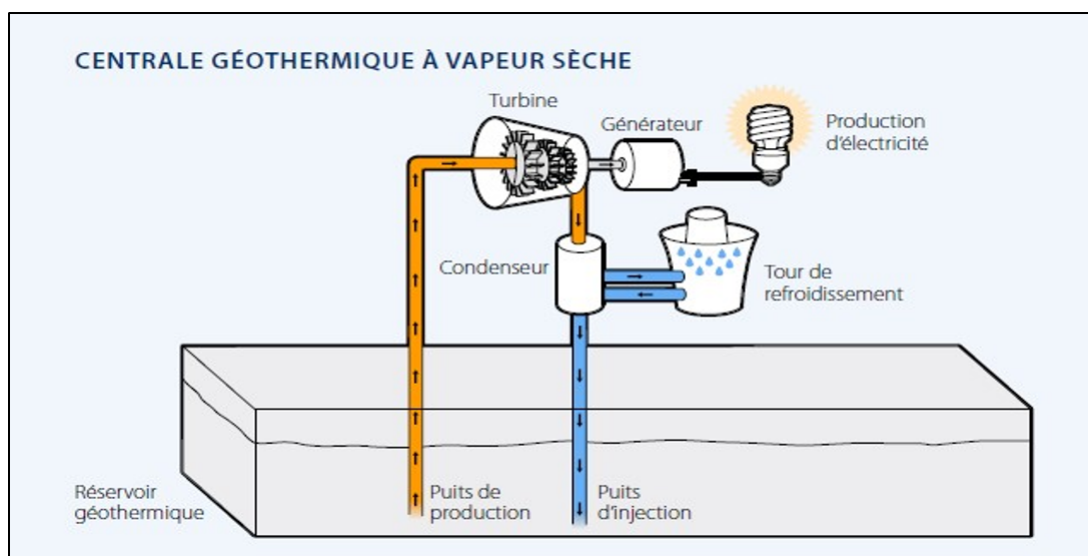


FIGURE 1.9 – Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique à vapeur sèche [14]

- **Centrale géothermique à vapeur humide** : le fluide géothermal se présente sous forme de vapeur humide (mélange d'eau et de vapeur) pressurisée à une température supérieure à 180 °C. La vapeur saturée sèche, séparée de la vapeur humide dans un ou deux réservoirs de détente, fait tourner la turbine d'une centrale. L'eau refroidie résultante est injectée dans le réservoir géothermique. Il s'agit d'une centrale géothermique à simple ou double détente comme présentée à la figure ci-après [14].

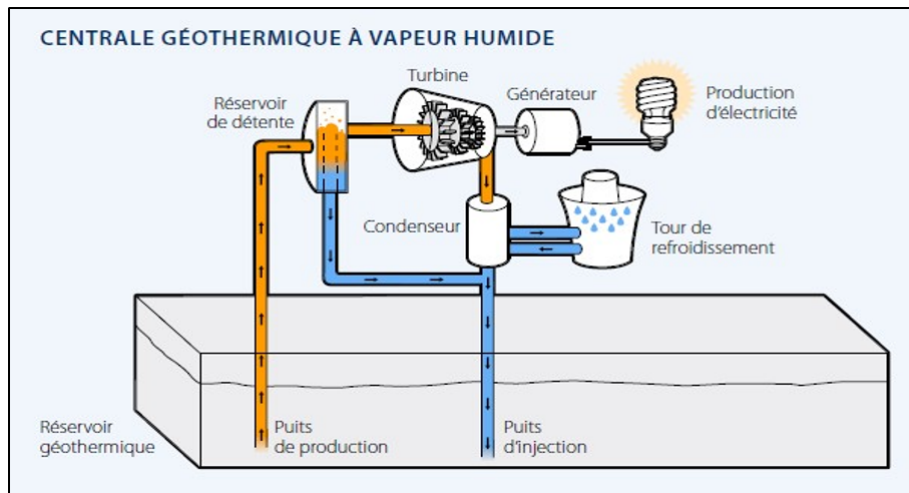


FIGURE 1.10 – Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique à vapeur humide [14]

- **Centrale géothermique hydrothermale** : le fluide géothermal se présente sous forme d'eau chaude pressurisée à une température pouvant aller de 125°C à 180 °C. Pour convertir efficacement en électricité la chaleur récupérée à ce niveau de température, il faut que la centrale géothermique soit à cycle binaire [14].

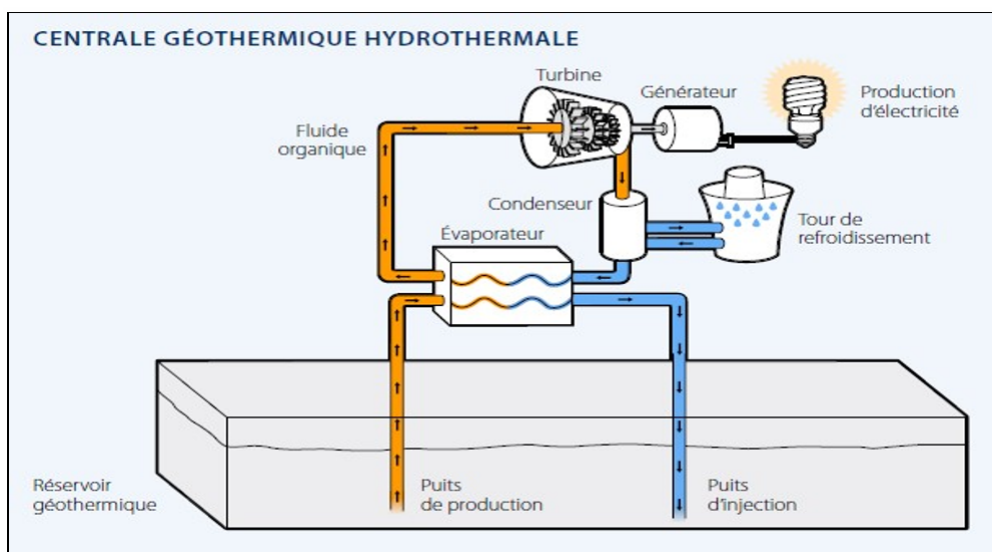


FIGURE 1.11 – Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique hydrothermale [14]

- **Centrale géothermique profonde stimulée** : le fluide géothermal se présente sous forme de liquide réchauffé au contact de roches chaudes à une température supérieure à 150 °C. Pour accéder à l'énergie thermique des roches chaudes, il faut procéder par fracturation hydraulique, soit créer des fissures dans la roche par injection d'eau sous haute pression, afin de permettre au fluide de circuler dans le réservoir géothermique.

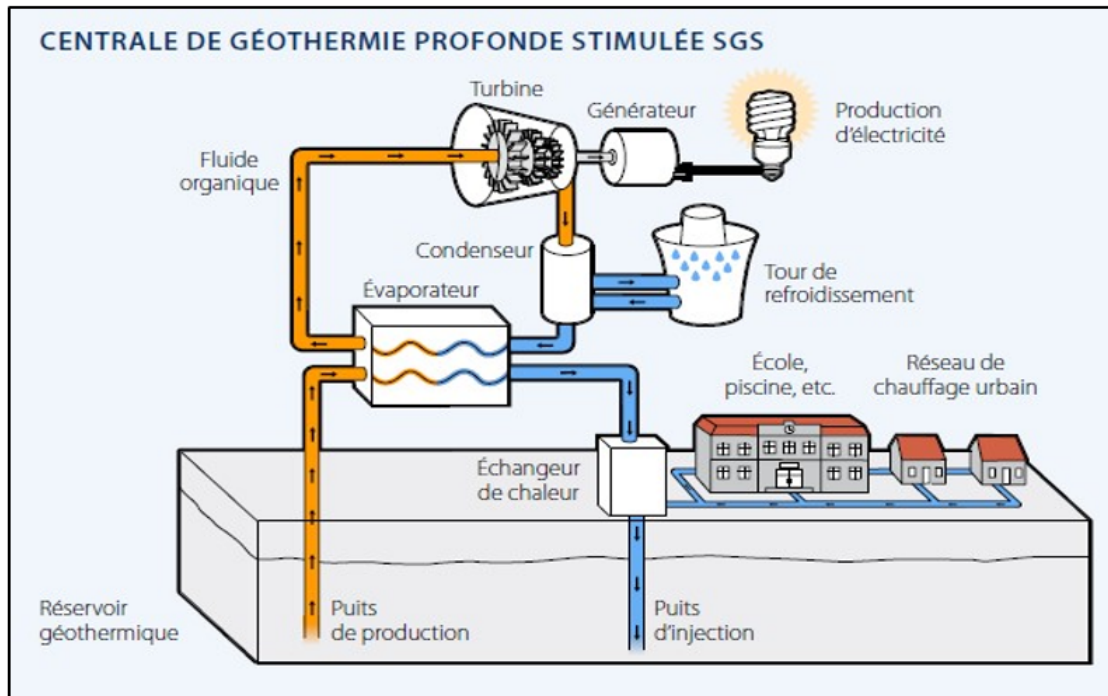


FIGURE 1.12 – Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique profonde stimulée [14]

1.4 La géothermie au Cameroun

1.4.1 Le potentiel géothermique du Cameroun

Le Cameroun possède une importante ligne volcanique active qui s'étend du golfe de Guinée jusqu'au Nord-Ouest du Cameroun et constitue une zone favorable à la production d'électricité à partir des ressources géothermales. La présence de fortes manifestations thermiques de surface se produisant sous la forme de sources chaudes, de sols altérés, de fumerolles, de forages anormaux et d'éruptions du Mont Cameroun sont des indications de son énorme potentiel géothermique, qui est largement répandu le long de la **ligne volcanique du Cameroun (LVC)**. Une source est qualifiée de thermale lorsque sa température est supérieure à la température moyenne de 23°C ; à partir de cette définition, cent trente sources thermales ont été recensées, concentrées le long de la LVC. Cependant, les données actuellement disponibles proviennent d'une enquête complète sur seulement **20%** du territoire camerounais [15].

La source thermique avec la température la plus élevée qui est de 74°C se trouve à **Woulndé**, qui est situé dans la région de l'Adamoua, ainsi que la source de **Lobe** située à la base du mont Cameroun, avec une température enregistrée de 49°C . La région de l'Adamoua possède le plus grand nombre de sources thermales. Ces manifestations indiquent la présence d'un énorme potentiel de ressources d'énergie géothermique pour une utilisation électrique et directe dans le pays. La géothermie comme source d'énergie électrique au Cameroun pourrait être employée dans la localité de Woulndé, où la température atteint 600°C à une profondeur de 1000 mètres [15] ce qui est suffisant pour construire une centrale électrique d'une capacité de 5 MW ceci s'explique par le fait que d'après le département forage de la société Addax Petroleum Cameroun le gradient thermique au Cameroun est de $1,8^{\circ}\text{F}/100\text{ ft}$, la profondeur moyenne d'un forage droit est de 1000m [15].

La carte du Cameroun suivante présente la ligne volcanique du Cameroun et la zone de Woulndé située dans la vallée du mayo Baléo dans l'arrondissement de Tignère sur une longitude Est $12^{\circ} 28' 30''$ et sur une latitude Nord $7^{\circ} 26' 10''$ dans les plateaux de l'Adamoua. Ceci est observable à la figure 1.13 [15].

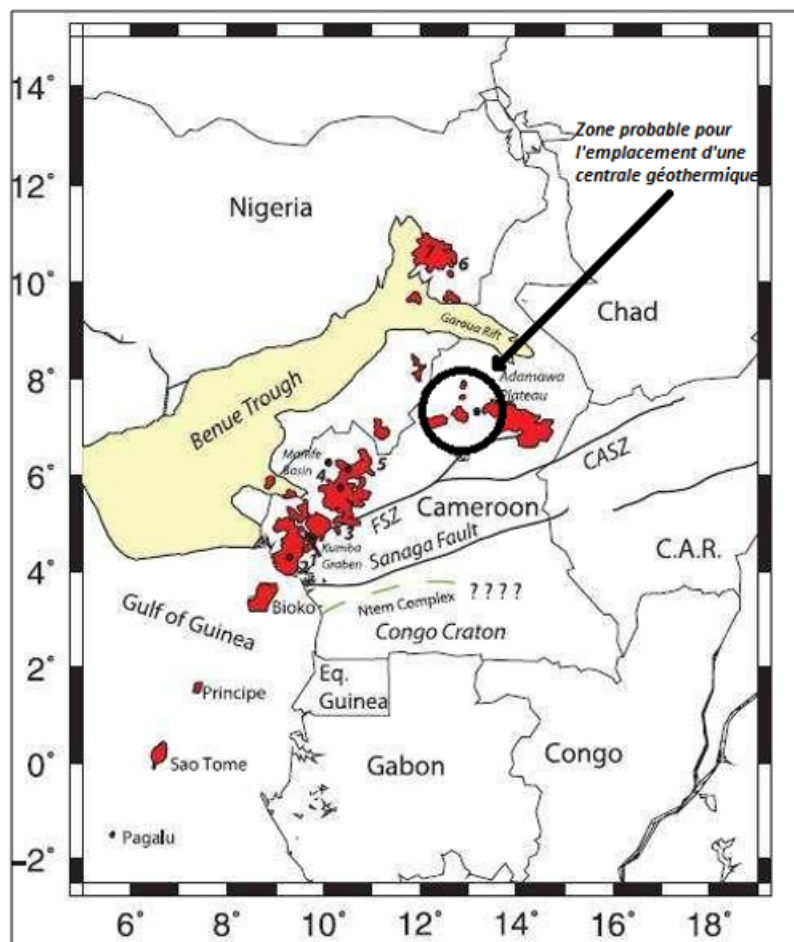


FIGURE 1.13 – Ligne volcanique du Cameroun et localisation de Woulndé [15]

1.4.2 Les obstacles à la géothermie au Cameroun

L'utilisation de l'énergie géothermique parmi d'autres sources d'énergies renouvelables est nécessaire pour réduire la dépendance vis-à-vis des sources d'énergie fossiles, et conduira à un développement durable et respectueux de l'environnement. L'effet direct du développement de la géothermie au Cameroun sera la création d'emplois et le relèvement de secteurs tels que l'agriculture, la pêche et les activités d'élevage. Néanmoins, l'exploitation de l'énergie géothermique au Cameroun fait face à de nombreux défis malgré la présence d'activités volcaniques et de manifestations géothermiques. Parmi les principaux obstacles identifiés nous avons :

- Les limitations technologiques et les contraintes de financement ;
- Une main-d'œuvre et des institutions de formation inadéquates ;
- Le manque d'informations et d'intérêts des investisseurs pour ce domaine ;
- Le coût élevé de réalisation des projets d'exploitation des gisements géothermiques ;

La contribution de l'énergie géothermique reste aujourd'hui négligeable en raison des bas prix et de la disponibilité du gaz naturel et du carburant. Mais cette situation ne durera pas, compte tenu de l'augmentation progressive des prix et de la demande d'énergie. Ainsi, les autorités devraient prendre de plus en plus conscience de la nécessité de diversifier les sources d'énergie et de préserver l'environnement [15].

1.5 Les puits d'eau

1.5.1 Les types de puits d'eau

Un puits à eau ou un forage est un ouvrage de captage vertical permettant l'exploitation de l'eau d'une nappe, contenue dans les interstices ou dans les fissures d'une roche du sous-sol qu'on nomme aquifère. Il existe en fait trois grandes catégories de puits : les puits creusés, les puits foncés et les puits forés plus communément appelés forages, terme ambigu qui désigne à la fois un ouvrage et une technique de réalisation. Le choix du type d'ouvrage à réaliser dépend essentiellement de la profondeur de la nappe aquifère (il serait par exemple très difficile ou dangereux de faire creuser un puits à la main par des puisatiers à plus de 30 m de profondeur), des données hydrogéologiques du terrain, de la rapidité recherchée ou non et du coût de l'opération. Un puits creusé à la main avec la participation de la population s'avère le plus souvent beaucoup moins coûteux [17].

- Les **puits creusés** : creusés sur le terrain avec une pelle et une pioche, c'est la technique la plus simple et la plus ancienne. C'est aussi la plus fatigante mais la moins coûteuse.

Elle nécessite que le sol soit relativement meuble et la nappe phréatique peu profonde. Ces puits sont souvent bordés par des pierres pour les renforcer et les empêcher de s'effondrer, mais il est nettement préférable de les cuveler (maintenir à la verticale) avec des anneaux de béton souvent réalisés facilement sur place avec des moules. On peut aussi utiliser des moyens mécaniques moins rustiques de creusement pour diminuer les efforts physiques importants. Les puits creusés ne sont pas très profonds (entre 10 et 20 m le plus souvent, exceptionnellement 30 à 40m). Etant peu profonds, ils risquent d'être contaminés et ils peuvent s'assécher plus facilement que les autres types de puits [17].

- Les **puits foncés** : ils sont réalisés par enfoncement par un mouvement de va et vient vertical d'un tube perforé à bout pointu et de petit diamètre (sauf pour la technique particulière du havage) dans une terre friable, comme le sable ou le gravier. Un filtre, ou crépine, est très souvent fixé à la partie inférieure de la conduite pour filtrer le sable et les autres particules et les empêcher de pénétrer dans le puits. Ils ne peuvent puiser l'eau qu'à des profondeurs moyennes comprises entre 15 et 100 m suivant la technique utilisée. Ils sont, comme les puits creusés, exposés aussi, mais moins, à la contamination et à l'assèchement [17].
- Les **puits forés** : un grand nombre de puits modernes sont des puits forés qui sont creusés par percussion d'un outil dans le sol ou par l'action rotative d'un outil coupant (tarière, foreuse, trépan) tournant autour d'un axe vertical qui brise et mâche les roches dont les résidus sont remontés le plus souvent par des boues à la surface. Ils peuvent atteindre jusqu'à 300 m de profondeur [17].

1.5.1.1 Les facteurs influençant la température à l'intérieur des puits

Plusieurs facteurs peuvent influencer la température des puits creusés. La **profondeur du puits** est un facteur important car la température augmente avec la profondeur. La **géologie locale** est également un facteur important car elle peut influencer la conductivité thermique du sol et donc la vitesse à laquelle la température augmente avec la profondeur. En effet, la géologie est l'étude scientifique de la structure, de la composition et de l'histoire de la Terre. Elle comprend l'étude des roches, des minéraux, des fossiles et des processus géologiques tels que les tremblements de terre, les éruptions volcaniques et la formation des montagnes. Outre la géologie locale, la **température de l'eau souterraine** est également à prendre en compte car elle peut influencer la température du puits. Nous avons également le **climat de la région considérée** qui impacte sur la température au fond des puits [18].

1.6 Les atouts et les préjudices de la géothermie

Les principaux atouts et limites de la production géothermique sont multiples ; ils sont résumés dans le tableau suivant [16] :

TABLE 1.1 – *Avantages et inconvénient de la géothermie*

Atouts de la géothermie	Préjudices de la géothermie
L'énergie géothermique est une source renouvelable (inépuisable) puisque la terre produit indéfiniment de la chaleur dans son noyau par la désintégration radioactive.	Un épuisement des ressources peut survenir au niveau d'un réservoir individuel.
Faible taux (négligeable) d'émissions de CO ₂ et de polluants dans l'air.	La teneur en sulfure d'hydrogène (H ₂ S) et même en CO ₂ est élevée dans certains réservoirs.
Les installations d'énergie géothermique nécessitent moins de surface que celles des autres sources locales tel que l'hydro-électrique.	Les ressources géothermiques se situent souvent sur des sites éloignés, ce qui nécessite la construction de connexion de ligne de transport et autres infrastructures permettant l'accès aux sites.
L'énergie géothermique est presque entièrement indépendante des combustibles fossiles, constituant ainsi une excellente protection contre les chocs des prix d'énergie et contribuant à la sécurité énergétique.	Les ressources géothermiques (chaleur et vapeur) ne peuvent pas être commercialisées et sont restreinte à leurs sites.
La géothermie fournit une énergie de charge de base faible. Une fois opérationnelle, la centrale fournira une production constante durant des décennies.	La capacité des centrales géothermique à répondre à la demande d'électricité est limitée et tenter d'y répondre peut accroître les coûts de productions d'énergie.
La géothermie donne accès à une large gamme de températures.	Risque de séisme pour la géothermie profonde.
Sécurité : pas de transport ni de stockage de substances polluantes ou dangereuses.	Possibles participation aux émissions de gaz à effet de serre emprisonnés sous terre.
La géothermie est parmi les plus rentables des énergies renouvelables.	L'attrait politique reste encore faible (manque de promotion).
Elle stimule les nouvelles technologies et crée des places de travail.	La pression est encore trop faible à cause du prix encore relativement bon marché des énergies fossiles.
Utilisable dans plusieurs pays du monde.	Le coup d'investissement important.
L'énergie géothermique est disponible en permanence (de façon non intermittente)	L'installation d'une centrale géothermique nécessite l'aménagement d'un espace, ce qui entraîne la déforestation.

1.7 Présentation de la zone d'étude : AHALA (OBAM)

1.7.1 Situation géographique

Situé au Sud de la ville de Yaoundé, dans le département du Mfoundi et l'arrondissement de Yaoundé III, il est un interfluve qui sépare les affluents Esob Minlung et Biyeme. Il est entouré des quartiers Nomayos, Afanayo, Mvan et Simbock. Ce quartier a pour coordonnées géographiques $3^{\circ} 48' 00''$ Nord et $11^{\circ} 29' 00''$ Est. Ahala est peuplé en grande partie d'autochtones, dont une majorité de Bété (60 %), où les Ewondo dominent largement. Cosmopolite de par son histoire, Ahala est voisin à plusieurs zones telles qu'Obobogo, Nsam, Efoulan ou Nsimeyong [19]. La figure 1.14 présente la situation géographique de la zone d'étude ainsi que la répartition géographique des différents puits qui s'y trouvent. Cette figure illustre une vue aérienne du quartier Obam Ahala avec une attention particulière mise sur la répartition géographique des puits symbolisés par des points rouges. Cette carte révèle que notre zone d'étude s'étend en bordure de route allant du point de repère 1 (le repos du chef Obam) au point de repère 2 (Mère martine).

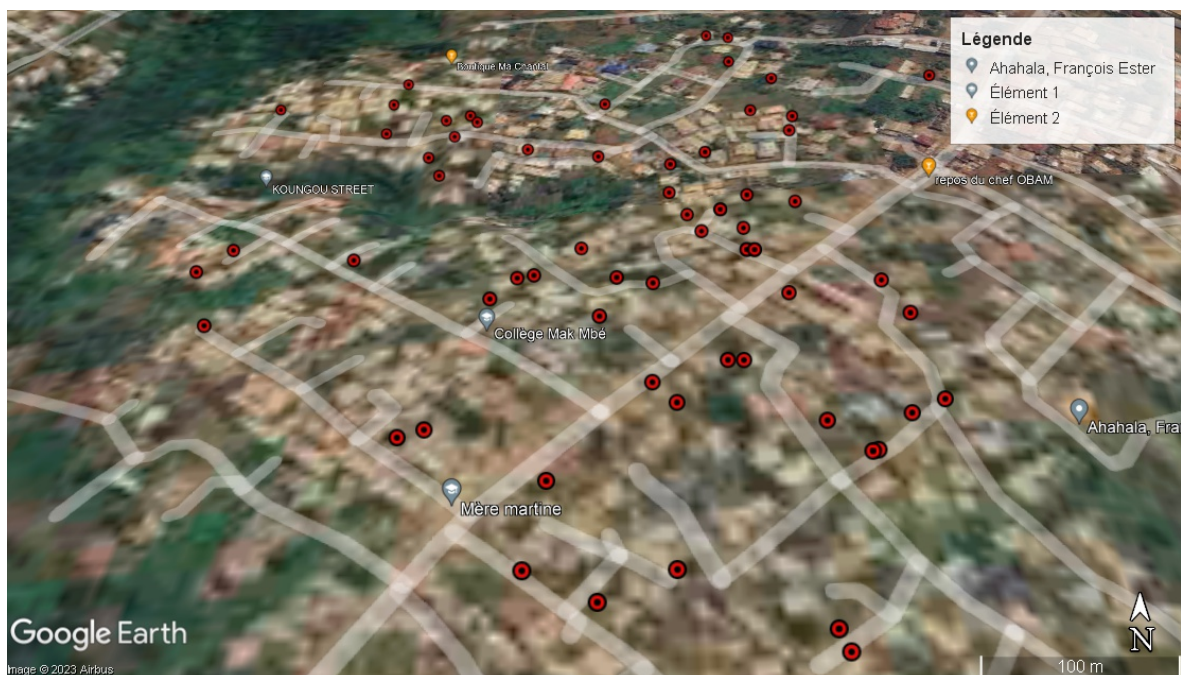


FIGURE 1.14 – Représentation de la répartition géographique des puits à Obam Ahala [19]

1.7.2 Le climat à AHALA

Le climat à Ahala est de type équatorial avec quatre saisons :

- Une longue saison sèche de mi-novembre à mi-mars ;
- Une courte saison de pluie de mi-mars à mi-juin ;

- Une courte saison sèche de mi-juin à mi-septembre ;
- Une longue saison de pluie de mi-septembre à mi-novembre.

Le climat se caractérise par des précipitations annuelles de 1600 mm, une température moyenne de 25 °C et une évaporation de 800 mm [20].

1.7.3 Cadres géologique et tectonique

La ville de Yaoundé repose sur deux unités rocheuses : le groupe **néo protérozoïque** qui s'appuie sur le craton du Congo, et le groupe de Bafia considéré comme une tranche tectonique **paléo protérozoïque** du socle qui chevauche le groupe **protérozoïque** de Yaoundé vers le Nord. Les roches métamorphiques telles que les gneiss, les migmatites et les schistes constituent le socle du plateau sud-camerounais. Les affleurements de ces roches apparaissent le long des lignes de faille au sud de Yaoundé, où les schistes et les quartzs sont exposés [21].

1.8 Généralités sur les systèmes photovoltaïque et thermoélectrique

1.8.1 L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots : “Photo”, qui signifie lumière. “Volta”, du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique). L'effet photovoltaïque est un processus physique qui transforme la lumière en électricité. Il se produit dans les cellules. Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons (porteurs d'énergie) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction laissant des trous. Les électrons « N » et les trous « P » sont alors maintenus par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel [22].

1.8.2 L'effet thermoélectrique

Les effets thermoélectriques décrivent l'interaction entre la chaleur et l'électricité dans les solides. Sur la base de ces effets, des dispositifs thermoélectriques ont été conçus pour la production d'énergie ou la réfrigération. Les effets thermoélectriques qui ont lieu dans un module thermoélectrique comprennent : l'effet Seebeck, l'effet Peltier, et l'effet Thomson. Ces trois effets représentent les fondamentaux de la thermoélectricité [23].

L'effet Seebeck est un phénomène physique découvert par Seebeck en 1821. Il s'agit de la génération d'une tension électrique aux bornes de deux jonctions de matériaux A et B dissemblables, lorsqu'ils sont exposés à un gradient de température. [24]

L'effet Peltier est un phénomène thermodynamique qui se produit lorsqu'un courant électrique traverse deux conducteurs différents en contact, créant ainsi un transfert de chaleur d'une extrémité à l'autre [24].

L'effet Thomson combine les deux précédents. Il se manifeste lorsque la température d'un matériau thermoélectrique change en fonction de la direction du flux de chaleur à travers celui-ci. Contrairement à l'effet Peltier qui est dû à la circulation d'un courant électrique, l'effet Thompson est causé par le flux de chaleur naturel à travers le matériau. Cependant, dans le cadre de notre travail, nous nous attarderons sur l'effet Seebeck car c'est sur ce dernier que repose le principe de fonctionnement du générateur thermoélectrique.

Basé sur l'effet Seebeck, un générateur thermoélectrique convertit directement la chaleur en électricité. Un générateur thermoélectrique est constitué d'éléments semi-conducteurs de type n et de type p qui sont connectés électriquement en série, afin de générer une tension et une puissance électrique et thermiquement en parallèle pour maintenir chaque jonction formée par les éléments semi-conducteurs p-n au même gradient thermique. Ces éléments semi-conducteurs sont généralement pris en sandwich entre deux plaques céramiques où la chaleur est transférée du côté chaud vers le côté froid. La structure de base d'un générateur thermoélectrique est formée par l'association d'une paire d'éléments semi-conducteurs p-n avec une charge électrique résistive reliée à ses bornes. La figure ci-après met en évidence les effets photovoltaïque et thermoélectrique [25].

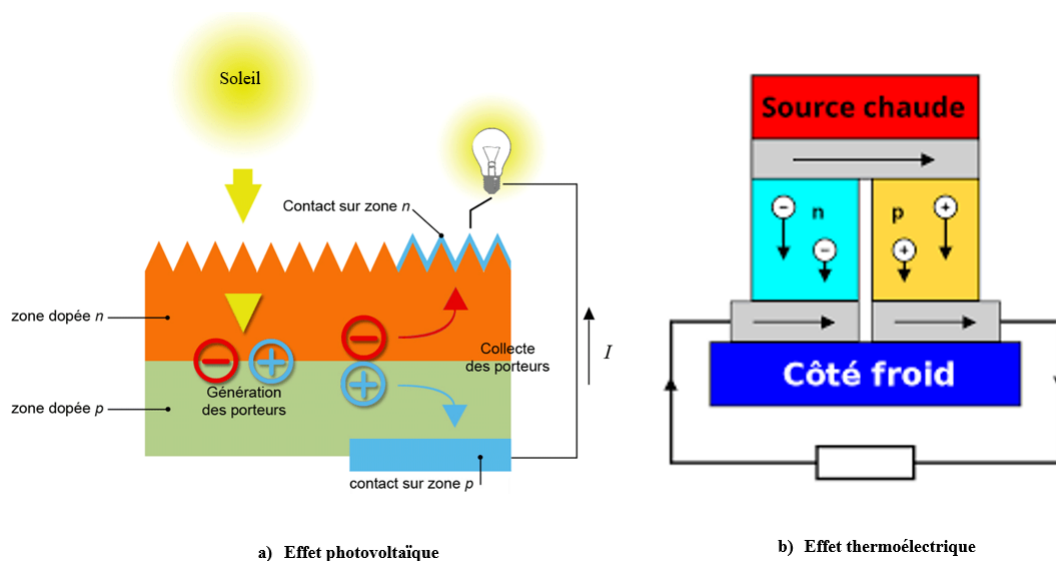


FIGURE 1.15 – Illustration des effets photovoltaïque (a) et thermoélectrique (b) [25]

CONCLUSION

Les énergies fossiles représentent environ 80 % de notre consommation en énergie, elles sont en train de disparaître du fait de leurs ressources épuisables à l'échelle humaine [14]. Dans l'optique de trouver une alternative à ces énergies, il est nécessaire de se tourner vers d'autres formes d'énergies dont les ressources sont inépuisables à notre échelle : l'énergie géothermique. La géothermie est donc une solution efficace, propre, renouvelable et économique aux problèmes énergétiques de chauffage. Les techniques plus récentes, principalement découvertes lors des révolutions industrielles permettent aussi de produire de l'électricité avec la géothermie. Le Cameroun dispose d'un potentiel favorable à l'exploitation géothermique sur sa ligne volcanique active mais ce potentiel est très peu et voir même inexploité du fait de nombreux obstacles rencontrés par les investisseurs dans cette filiale.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

INTRODUCTION

Pour réaliser ce travail, plusieurs outils ont été utilisés (les appareils électroniques, les logiciels) et une démarche bien élaborée. Dans ce chapitre, il sera présenté succinctement l'ensemble de matériel et de méthodes ayant contribué à la mise sur pieds de ce mémoire.

2.1 Matériel

2.1.1 L'ordinateur portable

L'outil TIC principal ayant contribué de manière significative à l'accomplissement de ce travail est un ordinateur portable DESKTOP-SD4RVID, avec un processeur Intel(R) Core (TM)i5-3320M @ 2.60 GHz (gigahertz). Cet appareil a une mémoire RAM installée de 4,00 Go (gigaoctet) et son identifiant est 4A9764F0-4274-40A2-B77D-4933D3030180. Il possède un système de type 64-bit operating system, x64-based processor avec un disque dur d'une capacité de 1 To (téraoctet). Cet appareil a donné accès aux logiciels tels Oasis Montaj, Surfer, Google earth, Excel.

2.1.2 Le Thermomètre LASER infrarouge

Il s'agit d'un dispositif de mesure de la température sans contact, principalement utilisé lorsque l'objet dont on veut mesurer la température est fragile ou qu'il est dangereux de s'en approcher. Cet appareil utilise le concept du rayonnement infrarouge pour déterminer la température de surface d'un corps ou d'un objet. Les molécules en mouvement à la surface de l'objet émettent de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Ce rayonnement est focalisé par une lentille vers un détecteur connu sous le nom de thermopile. Le rayonnement arrivant sur la thermopile est absorbé et converti en chaleur, produisant une tension de sortie proportionnelle

à l'énergie du rayonnement émis. Cette tension est ensuite utilisée par le détecteur du thermomètre pour déterminer la température correspondante [27]. Cet appareil présente plusieurs applications parmi lesquelles :

- Le contrôle de produits alimentaires sous emballage ;
- Le contrôle de la température d'un four ou d'autres équipements ;
- La détection de zones chaudes lors d'un incendie ;
- La prise de température des individus ;
- Le contrôle du réchauffement ou du refroidissement de matériaux avec précision ;

Dans le cadre de cette recherche, le thermomètre LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) infrarouge a été utilisé pour mesurer la température à l'intérieur des puits de la zone d'étude. La figure suivante présente un thermomètre LASER infrarouge avec ses différentes parties annotées [27].



FIGURE 2.1 – Thermomètre LASER infrarouge [27]

Les caractéristiques du thermomètre LASER infrarouge ci-dessus sont :

- La marque : etekcity lasergrip 800 ;

- L'intervalle des températures mesurables : $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $750\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- La précision : $\pm 2\text{ }%$;
- La résolution ; $0,1\text{ }^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$;
- La longueur d'onde : $630\text{ nm} - 670\text{ nm}$;
- Le rapport distance-tache : $16 : 1$;
- Le temps de réponse : 500 ms ;
- L'émissivité (c'est la capacité d'un matériau à émettre de l'énergie infrarouge) : $0,95$.

2.1.3 Le compteur LASER de distances

Le télémètre laser également appelé distance mètre laser ou compteur laser de distance est un instrument indispensable si on souhaite effectuer des mesures en profondeur pour pouvoir commencer ces travaux en toute sérénité. Bien qu'explicite, le télémètre laser mesure la distance qui le sépare de sa cible (point d'incidence du spot lumineux). En effet, un laser est projeté sur la cible qui renvoie le rayon, l'outil calcule alors le temps qu'il a fallu au rayon laser pour lui parvenir et convertit alors cette durée en mètre. Sa précision est de $\pm 2\text{ mm}$. La figure 2.2 est le schéma annoté de l'appareil ayant permis de mesurer les profondeurs des puits de la zone d'étude [28].



FIGURE 2.2 – Le Télémètre LASER de distances [28]

2.1.4 Le logiciel UTM Geo Map

UTM Geo Map est un logiciel de cartographie et de gestion des données géographiques basé sur le système de coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator). Il est conçu pour les professionnels travaillant dans les domaines de la géographie, de l'ingénierie, l'aménagement du territoire, l'environnement, l'arpentage (discipline qui consiste à mesurer, délimiter, représenter les terrains et les propriétés foncières) et la cartographie [29].

Ce logiciel offre une interface conviviale qui permet aux utilisateurs de visualiser, d'analyser et de manipuler des données géographiques avec facilité. Il prend en charge différents formats de fichiers tels que Shape file, raster et GPS, ce qui permet aux utilisateurs d'importer et d'exporter des données provenant de différentes sources [29].

UTM Geo Map permet également aux utilisateurs de créer des cartes personnalisées en ajoutant des symboles, des images et des annotations, ainsi que d'imprimer ou d'exporter leurs cartes dans différents formats tels que PDF, JPEG ou PNG. Dans le cadre de ce travail, le logiciel a permis de géo-localiser les puits et d'obtenir les coordonnées géographiques de ces derniers (altitudes, latitudes et longitudes). La figure 2.3 illustre l'interface du logiciel [29].



UTM GEO MAP 3.8.8

Cartographie simple et outils SIG

 Map Coordinates	 GPS hors ligne
 Coord. Converter	 Zone / Distance
 Carte de marqueur	 Carte Compas
 Buffer/Overlay	 Contour
 Profil d'altitude	 DTM
 Gérer les données	 Export File

FIGURE 2.3 – Présentation de l'interface du logiciel UTM Geo Map [29]

2.1.5 Le logiciel Google Earth

Google Earth est un logiciel de cartographie en ligne développé par Google. Il permet aux utilisateurs d'explorer virtuellement la Terre en utilisant des images satellites, des photographies aériennes et des données géographiques (latitude, longitude, altitude). Avec ça, on peut naviguer dans le monde entier, zoomer sur des endroits spécifiques, afficher des images en trois dimensions, mesurer des distances entre deux points quelconques du globe terrestre et des surfaces données. Il propose également des fonctionnalités supplémentaires telles que la possibilité d'ajouter des couches d'informations additives, comme les frontières politiques, les routes, les bâtiments historiques, les parcs nationaux, les supermarchés, boulangeries, stations de pompage et bien d'autres [30].

Il est utilisé dans de nombreux domaines, notamment la géographie, l'urbanisme, l'environnement, le tourisme, l'éducation et même l'archéologie. Il offre une perspective unique sur notre planète et permet aux utilisateurs d'explorer et de découvrir le monde depuis leur ordinateur ou leur téléphone portable. Cet outil a permis d'avoir une meilleure vue aérienne de la zone d'étude ainsi que les différents puits s'y trouvant. La figure 2.5 met en exergue une des interfaces du serveur. On constate qu'il est bien possible d'observer n'importe quel point du globe terrestre [30].

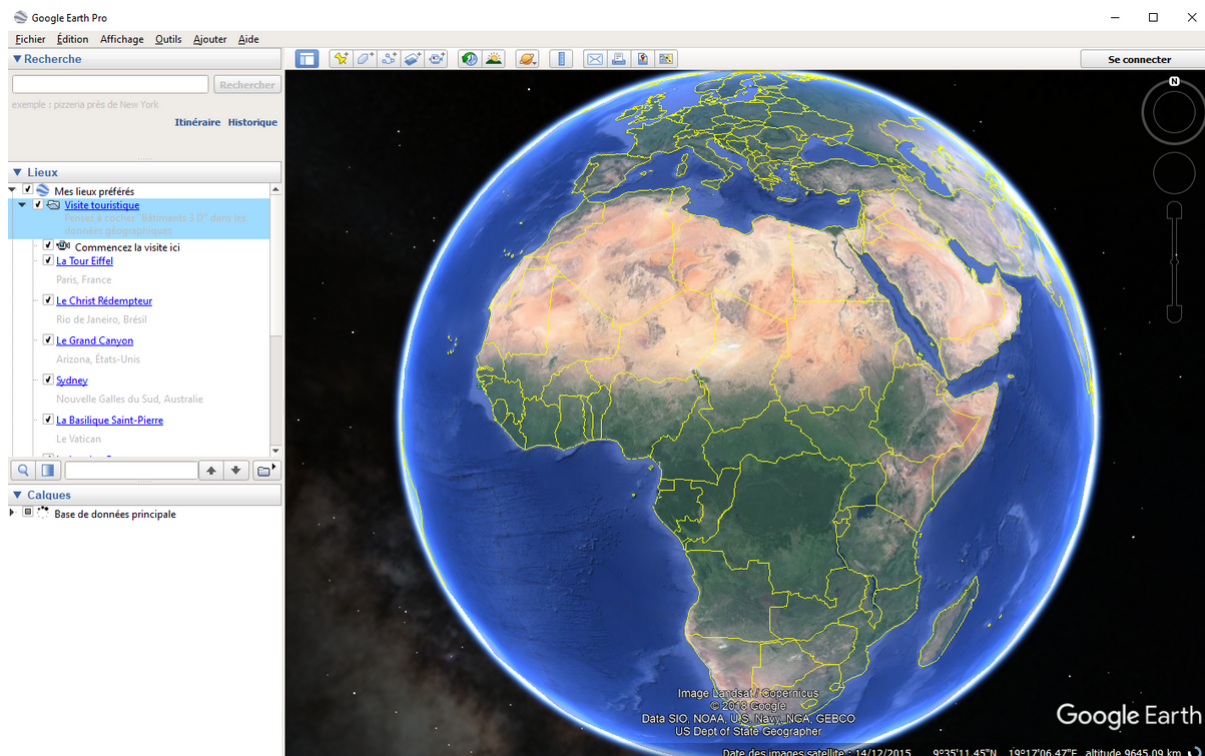


FIGURE 2.4 – Présentation de l'interface du logiciel Google Earth [30]

2.1.6 Le logiciel Oasis Montaj

Oasis Montaj est un logiciel de traitement de données géophysiques, géochimiques et géologiques. Il est conçu pour importer, traiter, visualiser, analyser et partager de grands volumes de données géoscientifiques au sein d'un seul et même environnement. La plateforme du logiciel Oasis Montaj fournit un étalon de référence pour travailler avec des données géophysiques, géochimiques, géologiques. Depuis plus de 30 ans, elle est constamment mise à jour avec de nouvelles fonctionnalités qui aident à stocker et traiter les données.

Ce logiciel permet d'interagir de façon dynamique avec les différentes fenêtres d'images, de cartes, les profils, les graphiques, les données et métadonnées (données qui fournissent des informations sur d'autres et qui renseignent sur l'utilisation de la technologie dans un contexte) dans une, deux ou trois dimensions. Cliquez sur un point de la carte et visualisez immédiatement la donnée ponctuelle correspondante dans son profil, graphique ou tableau associé. C'est un moyen très simple et très performant d'identifier visuellement les zones remarquables communes ou les points caractéristiques. La localisation d'anomalies ou la sélection de cibles est ainsi optimisée et rapide. C'est également une valeur ajoutée tout au long des projets, car interagir avec les données permet d'évaluer les résultats immédiatement. La base de données haute performance d'Oasis montaj permet un stockage efficace de grands volumes de données géoscientifiques. La figure 2.6 montre l'interface du logiciel Oasis Montaj avec une carte topographique y représentée [31].

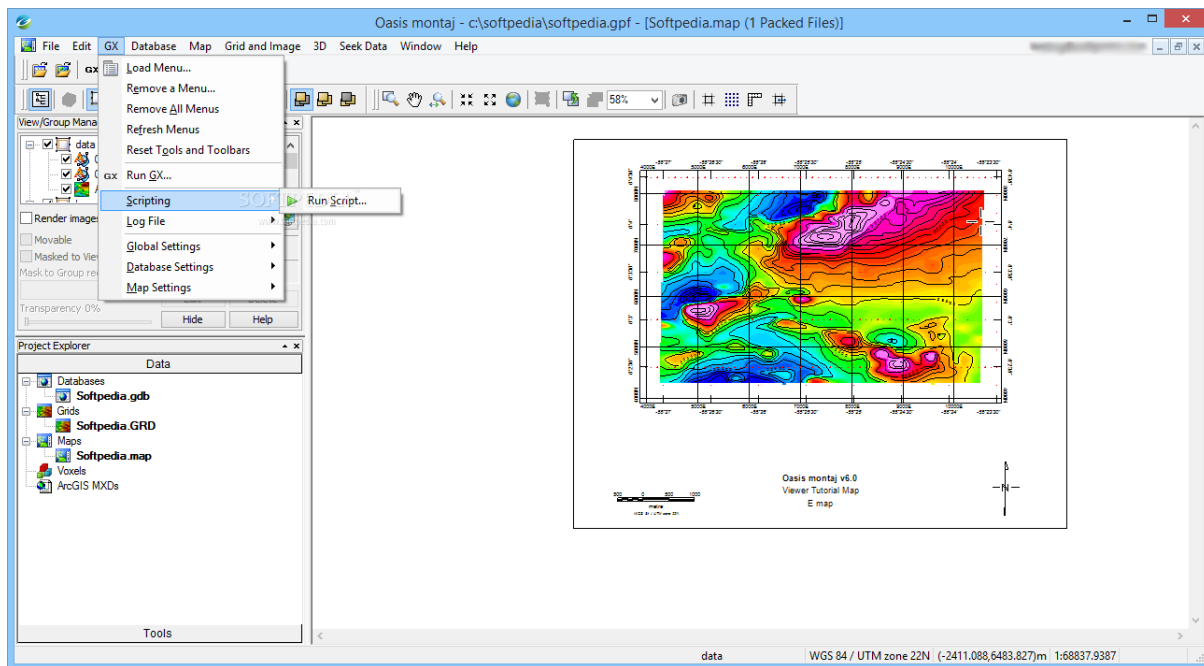


FIGURE 2.5 – Présentation de l'interface du logiciel Oasis Montaj [31]

2.1.7 Le logiciel Surfer

Le logiciel Surfer, conçu par Golden Software, permet de réaliser des cartes à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) qui est la représentation topographique du terrain permettant l'extraction de nombreux paramètres entre autre la pente, les axes d'écoulement. Ce logiciel facilite la création des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points x, y, z afin de les ordonner. Les grilles peuvent être importées depuis plusieurs sources pour produire différents types de cartes, incluant des contours, des vecteurs, des images ainsi que des cartes superficielles. Surfer contient plusieurs options cartographiques qui permettent de produire une carte représentant le mieux possible les données utilisées.

Les superficies, les profils croisés ainsi que les calculs volumiques peuvent être exécutés et exportés rapidement dans Surfer. Ce logiciel inclus un outil utile dans la création, l'édition et l'exécution des fichiers scripts permettant d'automatiser les procédures de surfer. En écrivant et exécutant des fichiers script, de simples ou complexes tâches d'intégration de système peuvent être effectuées avec précision et de façon répétitive, sans interaction directe. Ces capacités d'automatisation permettent à ce logiciel d'être utilisé comme une visualisation de données et un post-processeur (principal composant qui traite les signaux, extrait les instructions de la mémoire, exécute les instructions requises et renvoie les résultats en mémoire) de génération de carte pour n'importe quel système de modélisation scientifique. Son interface est illustrée à la figure 2.6 [32] :

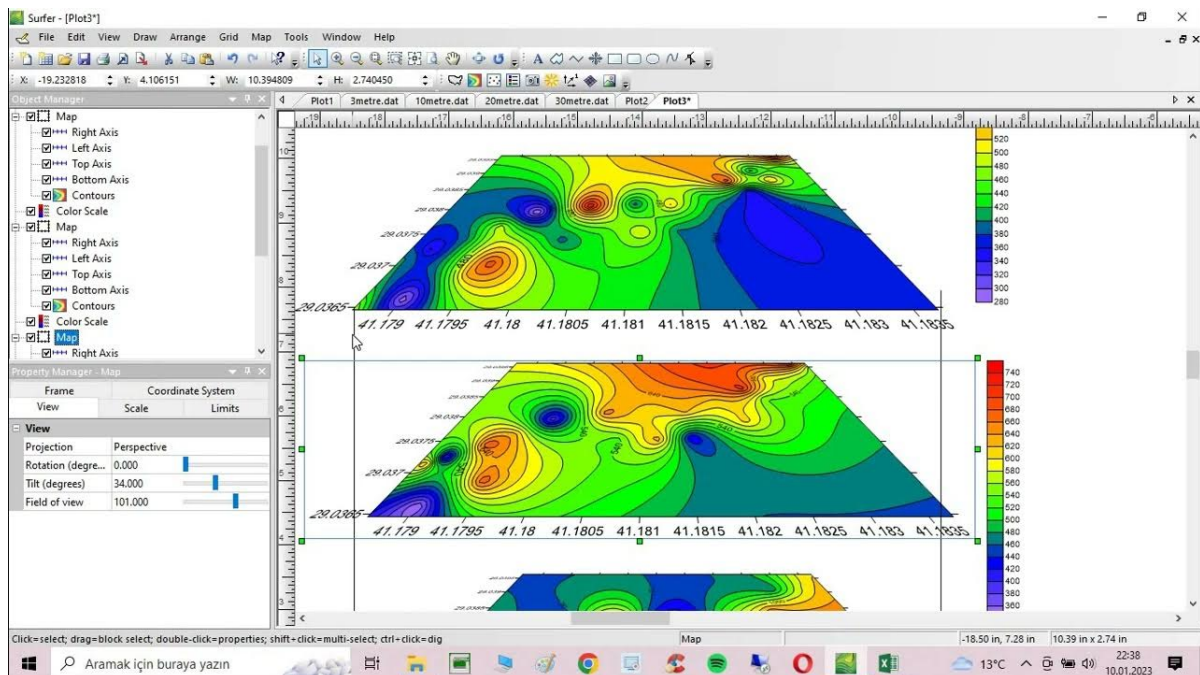


FIGURE 2.6 – Présentation de l'interface du logiciel Surfer [32]

2.1.8 Le logiciel Excel

Développé par Microsoft, Excel est un logiciel de tableur intégré à la suite bureautique Microsoft Office. Il est largement utilisé tant dans le monde professionnel que personnel pour la création, la manipulation et l'analyse des données sous forme de tableaux. Ce logiciel présente une pléthore de fonctionnalités parmi lesquelles : la création des feuilles de calcul (Excel permet de concevoir des feuilles de calcul avec des cellules organisées en ligne et en colonnes où l'utilisateur peut saisir des données, des formules, du texte et des images), la mise en forme des données (ce logiciel offre de multiples fonctions de mise en forme pour personnaliser l'apparence des cellules, des tableaux, des graphiques et bien d'autres), la représentation graphique (histogrammes, courbes, diagramme en bâton, diagramme en bande, nuage de points, etc.), l'analyse des données (à travers les outils avancés d'analyse de données tels que les tableaux croisés dynamiques, les solveurs), l'automatisation des tâches (Excel offre la possibilité d'automatiser les tâches répétitives en utilisant le macros et le micro scripts VBA qui est une intégration de Visual Basic avec les applications microsoft office permettant la création des scripts personnalisés en vue de simplifier les processus complexes). Dans le cadre de ce travail, le logiciel a permis d'effectuer une analyse des données recueillies sur le terrain à travers des représentations graphiques traduisant les variations de certains paramètres (température, profondeur, altitude) en fonction d'autres grandeurs (les puits, temps) et la détermination de plusieurs variables statistiques (moyenne, variance, écart-type, médiane et bien d'autres). La figure 2.7 présente l'interface du logiciel Excel version 2016 [33].

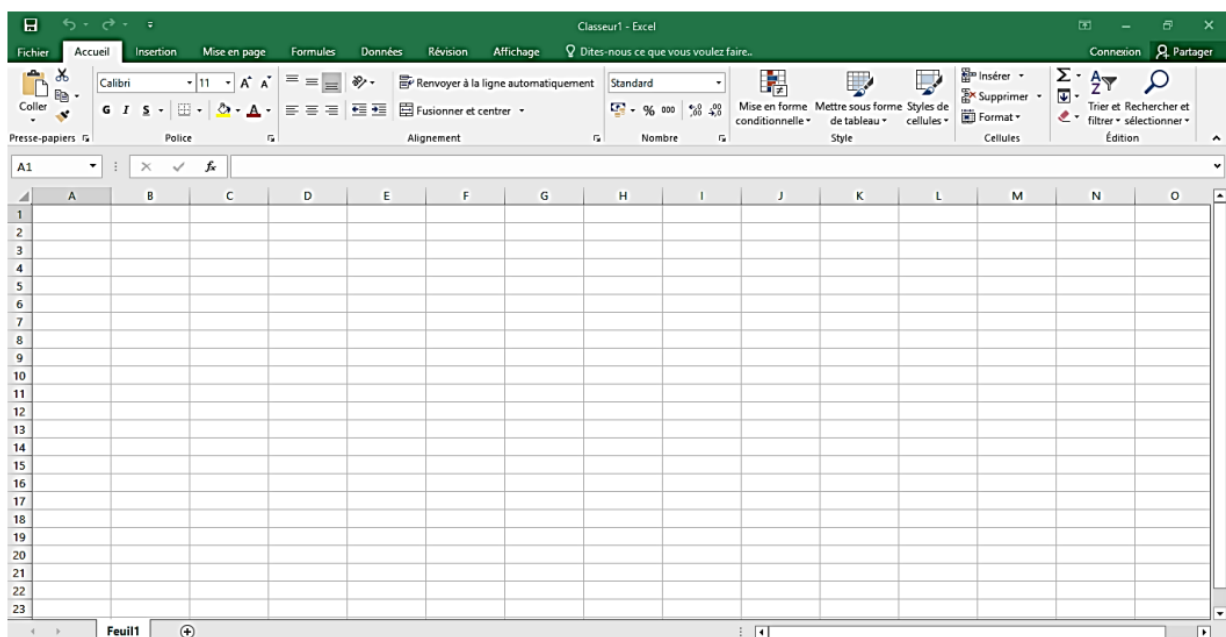


FIGURE 2.7 – Présentation de l'interface du logiciel Excel [31]

2.1.9 Le logiciel Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics est un logiciel de simulation multi physique développé par la société Comsol Inc. Il permet aux ingénieurs, aux chercheurs et aux scientifiques de modéliser et de simuler des phénomènes physiques complexes impliquant plusieurs domaines de la physique, tels que la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, la thermiques, l'acoustique, la chimie et bien d'autres. Ce logiciel présente une multitude de fonctionnalités à savoir : la modélisation multiphysique permettant de coupler plusieurs domaines physiques dans une même simulation, ce qui met en évidence les interactions complexes entre différents phénomènes, l'analyse et le traitement des résultats de simulation, l'extensibilité car ce logiciel permet aux utilisateurs de faire appel aux langages scripts comme MATLAB ou Python [34].

Comsol Multiphysics a permis de modéliser un générateur thermoélectrique combiné à une source d'énergie géothermale afin d'étudier le comportement d'un système thermoélectrique recevant la chaleur issue d'une source extérieure. Pour cela, le type de champ physique utilisé, le maillage, les paramètres du système et enfin la résolution du problème ont été définis. En théorie, un apport d'énergie thermique extérieur devrait augmenter le rendement du générateur thermoélectrique [29]. Par la suite, on a contextualisé cette étude à la zone d'investigation qu'est le quartier Obam Ahala afin d'évaluer autant que faire se peut l'apport de la géothermie sur le fonctionnement d'un générateur thermoélectrique associé à un PV-PCM (plaque photovoltaïque avec matériaux à changement de phase). La figure 2.8 met en vue l'interface de Comsol [34].

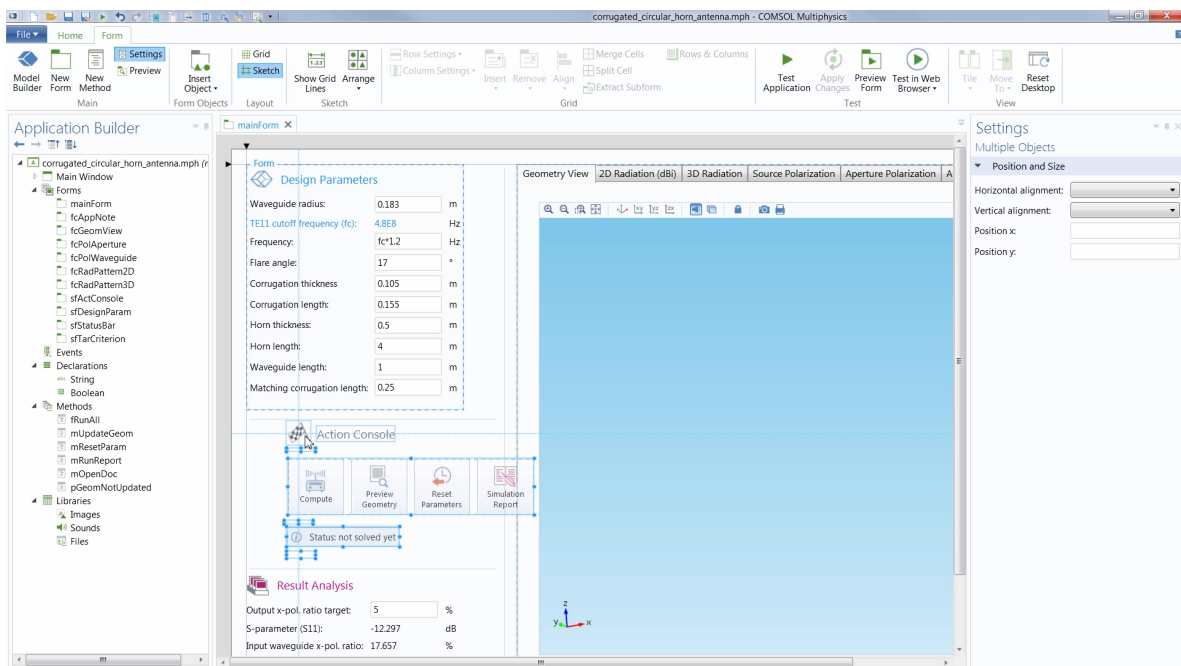


FIGURE 2.8 – Présentation de l'interface du logiciel Comsol Mulyiphysics [34]

2.1.10 Le logiciel Matlab

Matlab développé par Matworks est un logiciel de calcul numérique et de programmation largement utilisé dans divers domaines tels que l'ingénierie, les sciences exactes, et la finance. Il permet d'effectuer des calculs mathématiques, d'analyser des données, de créer des modèles et de simuler le comportement des systèmes complexes. Les principales caractéristiques de ce logiciel incluent un environnement de développement interactif pour exécuter des commandes, écrire des scripts et interagir en temps réel avec les résultats. Il propose également une gamme étendue des fonctions mathématiques pour des opérations avancées tel que l'algèbre linéaire, l'optimisation et le traitement du signal. En outre Matlab possède des outils puissants de visualisation des données, de programmation haut niveau basés sur des matrices, ainsi que la capacité de modélisation des problèmes complexes. Il peut être intégré avec d'autres langages (Java, Fortran, Python, les nombreux programmes écrits dans les langages comme Visual) et logiciels. Dans le cadre de ce travail, Matlab a permis de superposer les courbes des puissances et des rendements du PV-PCM-TE pour des valeurs différentes des températures du corps froid du générateur thermoélectrique. La figure 2.9 présente l'interface du logiciel Matlab avec l'espace de travail ou work space, la fenêtre des commandes ou command window, et l'historique des commandes ou command history [35].

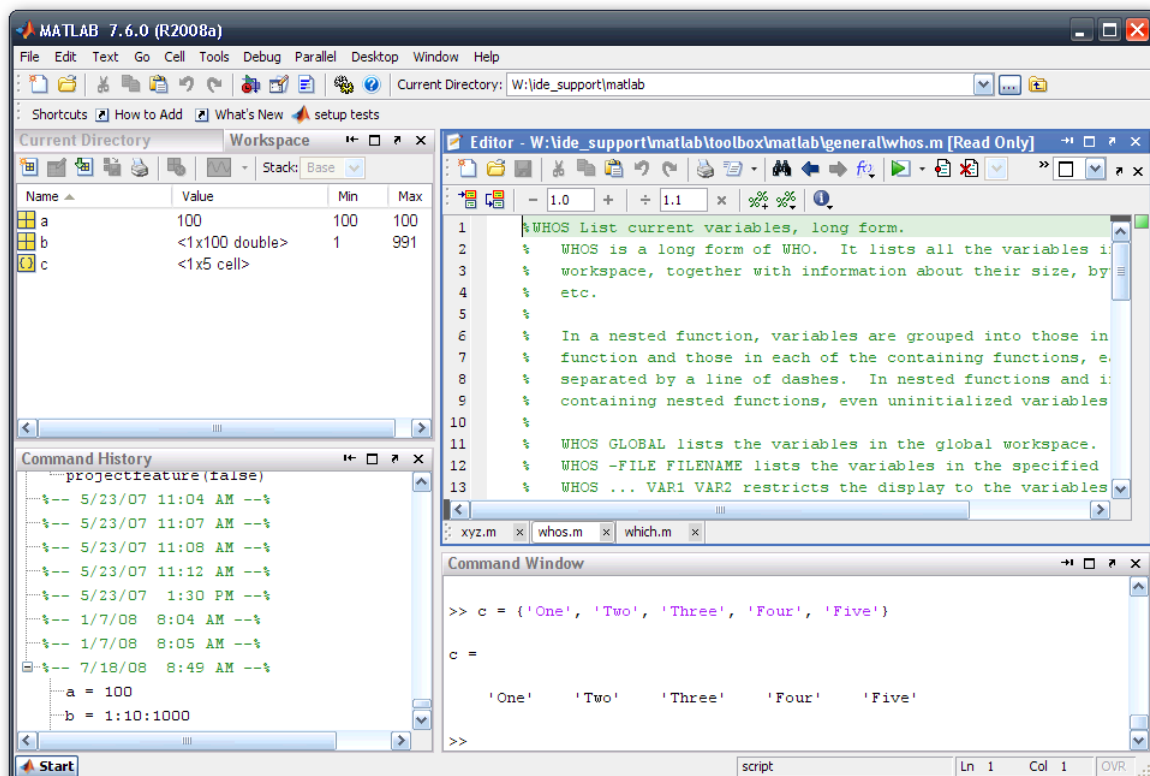


FIGURE 2.9 – Présentation de l'interface du logiciel Matlab [35]

2.1.11 Description des données

Les données utilisées dans ce travail sont les températures, les profondeurs, et les coordonnées géographiques (altitudes, latitudes, longitudes) des différents puits recensés à Obam Ahala à l'aide des appareils présentés à la section précédente. Les différents résultats des mesures obtenues dans la zone d'étude sont présentés en partie dans le tableau 2.1. 61 puits ont été recensés et les paramètres ont été prélevés aux mois de Mars et Mai 2024.

TABLE 2.1 – Données des puits du quartier Ahala (Obam)

Puits	Températures (C)	Profondeurs (m)	Altitudes (m)	Latitudes	Longitudes
P1	25,2	17,43	744,17	3.80648378337393	11.498780250549316
P2	26	14,26	749,3	3.8060017161496646	11.498943530023098
P3	26,9	11,62	742,14	3.8060087414199626	11.498896591365337
P4	26,7	12,45	740,22	3.8062412443808715	11.49890162050724
P5	26,8	14,13	744,17	3.80648378337393	11.498780250549316
P6	26,9	10,97	749,3	3.8060017161496646	11.498943530023098
P7	26	12,64	742,14	3.8060087414199626	11.498896591365337
P8	21,2	14,69	731,41	3.806251949551664	11.498640440404415
P9	21,7	17,45	744,17	3.8064931503957395	11.498568020761013
P10	21	17,68	737,26	3.806607227331747	11.49896364659071
P11	21,9	14,38	725,46	3.806792560503469	11.498468108475208
P12	21,3	17,27	737,7	3.8057424501818673	11.49831186980009
P13	21,1	19,94	734,31	3.8058371240862563	11.4980972930789
P14	21,7	16,49	729,47	3.806209797940906	11.497878693044186
P15	16,5	18,4	730,04	3.8059117257774333	11.497590355575085
P16	16,8	15,57	731,63	3.8058842937661717	11.497489102184772
P17	17,7	11,99	735,49	3.8056568087611677	11.497340239584446
P18	18,3	18,97	713,39	3.806207121648094	11.49641253054142
P19	17	18,97	709,75	3.8063964693442927	11.495572663843632
P20	16,1	11,9	707,25	3.806181362329317	11.495386250317097
P21	18,6	12,01	713,11	3.8056277040576636	11.495600156486034
P22	15,3	11,42	732,17	3.8045404586819815	11.496949642896652
P23	16,1	10,25	726,86	3.8045822758371988	11.497084759175777
P24	17,4	12,71	714,3	3.803632858645381	11.497976928949356
P25	18,8	14,32	728,34	3.803758644774594	11.497629918158054
P26	18,5	13,59	732,02	3.8042430550156205	11.497726812958717
P27	17,8	12,16	736,83	3.8048994170761987	11.498273983597755
P28	17,6	11,81	735,51	3.8047532243465647	11.49839736521244

Puits	Tempé- ratures (C)	Profon- deurs (m)	Altitudes (m)	Latitudes	Longitudes
P29	10,3	12,16	735,12	3.8054437087828585	11.497991681098938
P30	12,3	14,47	743,65	3.8055741781635897	11.499092727899551
P31	11,2	16,28	743,04	3.805048286077463	11.498778909444809
P32	10	12,54	743,98	3.80565781237161	11.499641574919224
P33	13,1	17,6	756,46	3.8053811503804775	11.499751210212708
P34	13,3	17,14	733,97	3.8047569042554046	11.499804183840752
P35	17,4	17,14	750,17	3.8046585503230577	11.499608717858791
P36	16,4	14,51	735,87	3.8044220324874294	11.499390453100204
P37	13	18,68	721,96	3.804415341741486	11.499361619353294
P38	13	15,9	723,93	3.803378275492564	11.49908434599638
P39	13,4	18,31	727,98	3.803487000238518	11.499048136174679
P40	13,5	15,82	723,89	3.8038098290187308	11.498352102935314
P41	14	10,5	738,89	3.804616398634338	11.4991644769907
P42	12,6	12,53	737,99	3.8050536386703016	11.498692072927952
P43	13,4	7,88	740,89	3.8065085390741986	11.49926371872425
P44	14,1	4,57	732,23	3.8072274576812277	11.498742029070854
P45	12,7	12,76	732,26	3.8071180643348943	11.498492918908596
P46	13,7	7,97	721,44	3.8073144370904317	11.497988663613796
P47	14,2	14,26	714,74	3.807505791759725	11.497470661997795
P48	12,8	10,9	710,77	3.807713873187505	11.496908739209175
P49	13,9	5,21	706,64	3.8075660082552427	11.496720649302006
P50	13,2	7,14	699,98	3.8073080809031294	11.496829614043236
P51	13,9	12,26	702,17	3.8079731385617093	11.496338434517384
P52	13,7	11,67	706,06	3.808296634732023	11.496358886361122
P53	12,5	11,7	699,56	3.808420412965641	11.49540301412344
P54	13,2	14,23	711,36	3.8079855163905214	11.49681519716978
P55	13	13,45	722,6	3.807997225147342	11.497003957629204

2.2 Méthodes

2.2.1 La méthode thermique

Les méthodes géophysiques regroupent un ensemble de techniques utilisées pour étudier la structure et les propriétés du sous-sol terrestre en se servant des mesures physiques. Parmi les méthodes géophysiques, on distingue la méthode sismique, gravimétrique, magnétique, thermique, électrique et électromagnétique. La température étant le paramètre principal de cette étude, on fera recours à la thermique. La méthode thermique en géophysique est une démarche utilisée pour étudier les propriétés thermiques de la croûte terrestre, des roches et des fluides souterrains. Elle repose sur la mesure des variations de température à différentes profondeurs pour obtenir des informations sur la distribution de la chaleur dans le sous-sol. Cette méthode repose sur le fait que la température du sol varie en fonction de la profondeur en raison de la conductivité thermique des matériaux. En mesurant les variations de la température avec la profondeur, il est possible d'extraire les informations sur la structure géothermique du sous-sol [36].

Il est à noter qu'il y a trois modes de transfert d'énergie thermique à savoir la conduction (mode de transfert de chaleur sans déplacement global de matière, ayant lieu principalement entre les corps solides), la convection (mode de transfert de chaleur dans les fluides) et le rayonnement (transfert d'énergie par ondes électromagnétiques). Dans cette étude, on s'est attardé sur la conduction car c'est le principal mode de transfert de chaleur dans la croûte terrestre.

Les mesures des températures sont effectuées à différentes profondeurs à l'aide des capteurs thermiques à l'instar du thermomètre LASER infrarouge et la thermistance. Ces mesures se font grâce aux ouvertures telles que les puits ou les sondes géothermiques. Une fois les mesures de température collectées, les données sont analysées afin de déterminer les gradients thermiques verticaux et horizontaux, ainsi que le flux de chaleur traversant la croûte terrestre. Ces données permettent d'estimer la conductivité thermique des roches et des fluides souterrains. [37].

Les résultats de l'analyse des données thermiques peuvent être utilisés pour caractériser la structure géologique du sous-sol, identifier les zones de circulation des fluides chauds ou froids, détecter les anomalies thermiques associées à des failles ou à des réservoirs géothermiques. Cette méthode est largement utilisée dans divers domaines tels que l'hydrogéologie, l'exploration pétrolière, l'étude des ressources en eaux souterraines, l'étude des mouvements tectoniques et l'exploration géothermique qui est le domaine qui nous incombe [38].

2.2.2 La collecte des données

Les données ont été prélevées dans l'ordre chronologique suivant : les coordonnées géographiques, les températures, les profondeurs des puits d'Obam Ahala. L'altitude, la latitude et la longitude constituent un système de référence permettant de localiser un point précis à la surface de la Terre. Elles caractérisent respectivement l'élévation d'un point par rapport au niveau de la mer, la distance angulaire entre un point donné et l'équateur, la distance angulaire entre un point donné et le méridien de Greenwich [39]. Outre cela, le thermomètre LASER infrarouge et le compteur de distance ont donné les températures des puits d'eau et les profondeurs de ces derniers. Les figure 2.10 et 2.11 illustrent respectivement la mesure de la température et la profondeur d'un puits d'eau.



FIGURE 2.10 – *Mesure de la température d'un puits*



FIGURE 2.11 – *Mesure de la profondeur d'un puits*

2.2.3 Traitement des données recueillies

2.2.3.1 Traitement des données par le logiciel Excel

En dehors du tracé des graphes, Excel a servi à calculer plusieurs variables statistiques importantes pour l'analyse des résultats. Il s'agit des grandeurs telles que :

- La moyenne : c'est une mesure statistique qui représente la valeur centrale ou typique de ce paramètre. Elle est obtenue en calculant la somme de toutes les valeurs du paramètre et en la divisant par le nombre total de valeurs ;
- L'écart type : est une mesure du degré de dispersion d'un ensemble de valeurs ;
- La médiane : c'est la valeur qui partage la population étudiée en deux sous-ensembles de même effectif ;
- Coefficient de variation : il permet d'évaluer la dispersion relative des données par rapport à leur moyenne. Il est utilisé pour comparer la variabilité entre des ensembles de données dont les échelles de mesure peuvent être différentes.
- Covariance inter-variable : Il s'agit d'une mesure de la façon dont deux variables aléatoires varient ensemble. Une valeur positive signifie que les deux variables ont tendance à évoluer dans le même sens tandis qu'une valeur négative signifie qu'elles varient dans le sens opposé ;
- La variance : une variance faible indique que les nombres de la série de données sont proches l'un de l'autre, tandis qu'une variance élevée indique que les nombres sont très distants ;

2.2.3.2 Traitement des données par les logiciels Oasis Montaj et surfer

Le traitement des données à l'aide de ces logiciels repose sur l'importation et la conversion des données brutes. Les données ainsi converties seront interpolées. En effet, l'interpolation linéaire est une méthode de construction de nouveaux points de données dans la plage d'un ensemble discret de points de données connues. La surface interpolée générée par la courbure minimale est analogue à une fine plaque linéairement élastique traversant chacune des valeurs de données, avec un minimum de flexion : c'est la méthode de courbure minimale.

Par ailleurs, il y a la méthode de krigeage qui est une procédure de maillage géostatistique prenant en compte à la fois les variations de distance et de degré entre des points de données connues lors de l'estimation de valeurs dans des zones inconnues pour produire des cartes visuellement attrayantes à partir des données irrégulièrement espacées. Elles reposent sur l'hypothèse selon laquelle les valeurs spatiales sont corrélées, c'est-à-dire les valeurs proches les unes des autres ont tendance à être similaires.

2.2.3.3 Estimation théorique de la profondeur de peau dans la zone d'étude

La profondeur de peau en géophysique est un paramètre important pour comprendre la structure du sous-sol, localiser des ressources naturelles telles que le gisement des minéraux ou pétroliers et les isothermes souterraines. Cette profondeur fait référence à la distance souterraine à laquelle la géothermie est exploitable (la température varie peu avec le temps). La profondeur de peau est fonction de plusieurs paramètres à savoir la conductivité thermique du sol (λ en W/m.K), la masse volumique du sol (ρ en kg/m³), et la chaleur massique du sol (C en J/kg/K). Elle est donnée par la relation (2.1) [40] :

$$d = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \lambda \cdot 365}{\pi \cdot C \cdot \rho}\right)} \quad (2.1)$$

D'après les études géologiques, le sol du quartier Ahala a une masse volumique de 3,1 g/cm³, une conductivité thermique de 1,4 W/m.K et une capacité thermique spécifique de 7,95 J/kg/K. En supposant que le sol est homogène sur 25 m, la valeur théorique de la profondeur de peau est 13,2 m [19].

2.2.3.4 Modélisation d'un système hybride PV-PCM-TE dans Comsol Multiphysics

La représentation d'un tel système sur Comsol nécessite préalablement la définition des dimensions des matériaux utilisés (largeur, hauteur, profondeur), les propriétés physiques (capacité thermique, densité volumique, conductivité thermique, coefficient de transmissivité, et coefficient d'absorptivité) de ces derniers (tableaux 2.2, 2.3, 2.4, 2.5) [41]. Le matériau à changement de phase choisi pour cette modélisation est le RT28HC (température de fusion 28°C) car sa plage de température de fusion est proche de la température ambiante de la zone d'étude par conséquent il est adapté à la zone d'investigation. En considérant ces paramètres, le modèle PV-PCM-TE a été ainsi représenté telle que présenté à la figure 2.12.

TABLE 2.2 – Dimensions physiques des matériaux utilisés

Dimen sions [mm]	Couve rle en verre	EVA PV	Cellule	TPT	Alumi nium	MCP	Oxyde alumi nium	Matéri au de sou- dure	Cuivre	Jambe TE
Lar- geur	5	5	5	5	5	5	5	1,4	2,4	1,4
Hau- teur	3	0,5	0,3	0,3	1,6	1,4	0,8	0,1	0,2	1,6
Profon- deur	2	2	2	2	2	2	2	1,4	1,4	1,4

TABLE 2.3 – Propriétés des matériaux de la cellule photovoltaïque

Matériaux		Capacité thermique (J/(Kg.K))	Densité volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Coefficient de transmission (°)	Coefficient d'absorption (°)
Couvercle en verre	en	730	2210	1,4	/	0,05
EVA		2090	960	0,35	0,94	0,027
Silicium cristallin	poly-	678	2320	148	0,02	0,9
TPT		1250	1200	55	0,92	0,04

TABLE 2.4 – Propriétés des matériaux thermoélectriques

Matériaux	Capacité thermique (J/(Kg.K))	Densité volumique (kg/m ³)	Conductivité électrique S/m	Conductivité thermique (W/(m.K))
Bismuth Tellurique	154	700	/	/
Matériau de soudure	150	9000	$6,67 \times 10^6$	50
Cuivre	385	8960	$5,998 \times 10^6$	400
Oxyde d'Al	900	3900	/	27

TABLE 2.5 – Propriétés du matériau à changement de phase

Matériaux	Densité volumique solide	Densité volumique liquide	Cp (J/(kg.K))	Ma (°C)	k (W/(m.K))	δH (K/Kg)
RT28HC	880	770	2000	27-29	0,2	250

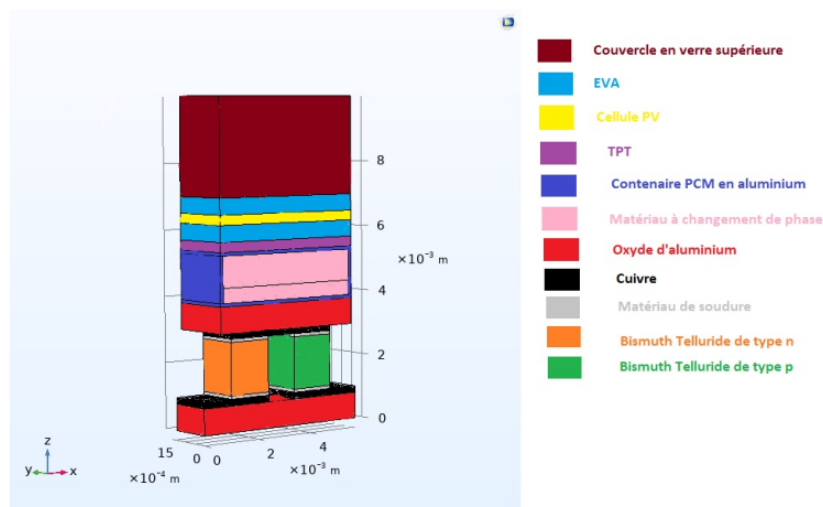


FIGURE 2.12 – Système hybride PV-PCM-TE modélisé sur Comsol Multiphysics

CONCLUSION

Dans ce chapitre, les outils et méthodes utilisés dans cette étude ont été présentés. La collecte des données a été effectuée à l'aide d'un système GPS, un thermomètre laser infrarouge, un télémètre laser de distances. Ces appareils ont été utilisés pour enregistrer respectivement les coordonnées géographiques, les températures souterraines, et les profondeurs des différents puits. La méthode utilisée pour la prospection est la méthode thermique. Pour l'analyse des données, on a eu recours aux logiciels suivants : Excel, Google heart, Oasis Montaj, Surfer, COMSOL Multiphysics. La section suivante consiste à effectuer l'analyse et une interprétation des différents résultats obtenus.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Toute étude scientifique a pour but d'apporter des éléments de réponses à un problème préalablement posé. Le présent chapitre permettra de confronter les résultats obtenus à ceux développés par la littérature et, le cas échéant, expliquer le gap que l'on pourra enregistrer en utilisant les modèles existants ou non. Il reviendra alors dans cette partie d'apprécier non seulement les objectifs visés par l'étude, mais également de valider ou non les hypothèses formulées. Pour ce faire, les résultats seront analysés et interprétés afin de mettre en lumière la pertinence de ce travail.

3.1 Traitement des données collectées

3.1.1 Variation de la température des puits du quartier Ahala (Obam)

La méthode géophysique utilisée dans ce travail étant la méthode thermique, le paramètre fondamental de cette investigation est la température. Ainsi, l'évolution des températures des puits de la zone d'étude est représentée par le diagramme en bâtons de la figure 3.1.

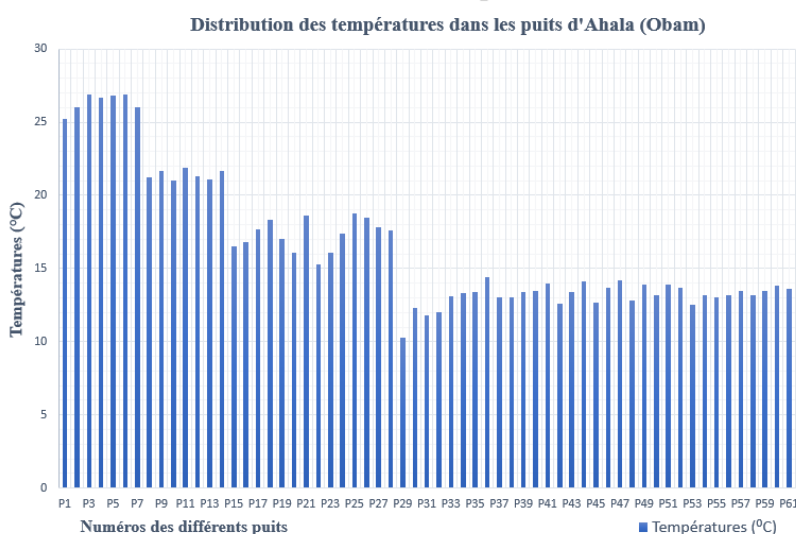


FIGURE 3.1 – *Distribution des températures dans les puits d'Ahala (Obam)*

L'analyse de cette série de températures montre une répartition inégale des températures à l'intérieur des puits. Globalement, on observe une décroissance non linéaire des températures. Les statistiques obtenues révèlent que :

- La température moyenne des puits est de $16,59^{\circ}\text{C}$. La température maximale est de $26,90^{\circ}\text{C}$ tandis que la température minimale vaut $10,30^{\circ}\text{C}$ correspondant à une étendue (différence entre les valeurs maximales et minimales) de $16,60^{\circ}\text{C}$;
- La température médiane vaut $14,10^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire que 50% des valeurs des températures sont inférieures ou supérieures à $14,10$;
- La variance et l'écart-type ont respectivement pour valeurs $20,98^{\circ}\text{C}$ et $4,58^{\circ}\text{C}$;
- Le coefficient de variation de la série de température vaut 27,61%. Ce coefficient étant supérieur à 15%, cela traduit une forte variation globale de la température des puits à Ahala.

Outre les statistiques précédentes on note que les puits à Ahala peuvent être regroupés en quatre groupes en fonction des valeurs des températures telles que présentées à la figure 3.2. Le premier groupe est constitué des puits dont les températures fluctuent entre 10°C et 15°C (P29 - P61), quant au deuxième groupe l'intervalle des températures est $15^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}$ (P15 - P28), pour ce qui est du troisième groupe on a l'intervalle $20^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ (P8 - P14) et enfin $25^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}$ (P1 - P7) pour le dernier groupe de puits. Cette répartition groupée des puits est illustrée par le nuage de points de la figure 3.3 :

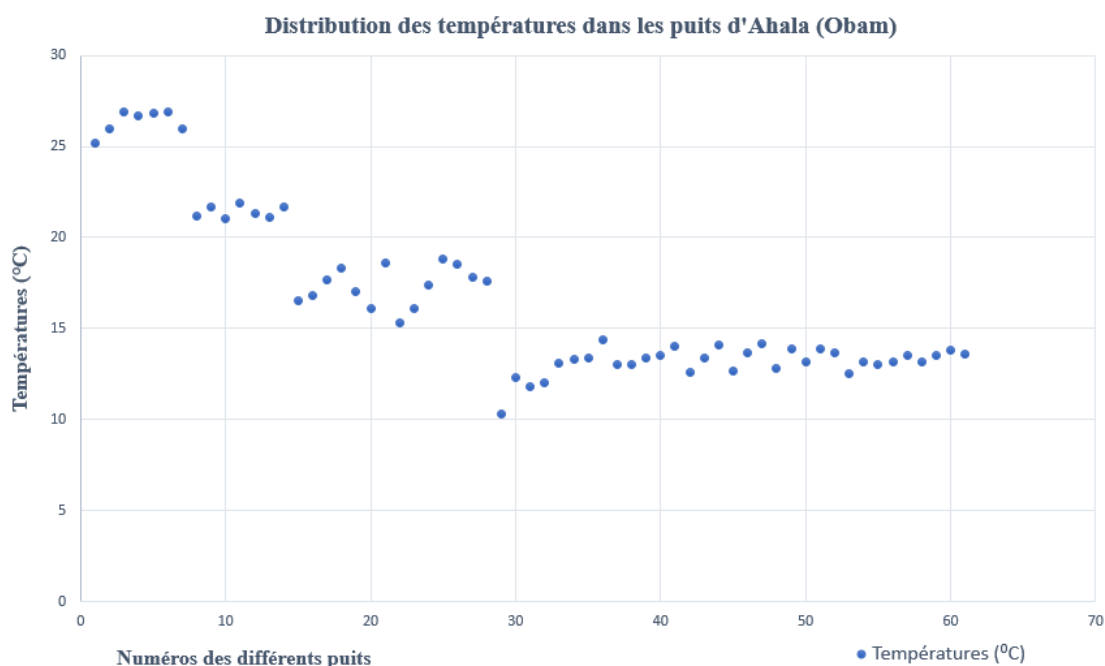


FIGURE 3.2 – *Distribution des températures dans les puits d'Ahala (Obam)*

Les températures au fond des puits d'une région donnée varient en fonction de divers éléments notamment la profondeur du puits, la géologie locale, le climat, les activités humaines. En effet, plus un puits est creusé en profondeur, plus la chaleur géothermique provenant de l'intérieur de la Terre peut élever la température au fond du puits. La composition du sol influence également les variations de température. Par exemple, les zones riches en roches volcaniques peuvent avoir des températures plus élevées en raison de l'activité géothermique ce qui n'est pas le cas au quartier Ahala car les roches y sont principalement d'origine métamorphique.

Les conditions météorologiques locales, comme l'exposition au soleil, les précipitations et les vents, peuvent impacter les températures des fonds de puits. Une exposition prolongée au soleil peut augmenter la température du fond du puits. Cependant plus le puits est profond, moins sa température est influencée par le climat. Aussi, les pratiques telles que l'irrigation agricole, le pompage d'eau souterraine ou la construction à proximité d'un puits peuvent aussi influencer les températures. C'est le cas d'un pompage excessif qui peut refroidir le fond du puits. Ahala étant un quartier qui se remplit peu à peu par les populations, on y retrouve principalement les activités humaines telles que l'agriculture, l'élevage, et les nouvelles constructions.

3.1.2 Variation de la profondeur des puits du quartier Ahala (Obam)

L'évolution des profondeurs des puits de la zone d'étude est représentée par le diagramme en bâtons (figure 3.3) :

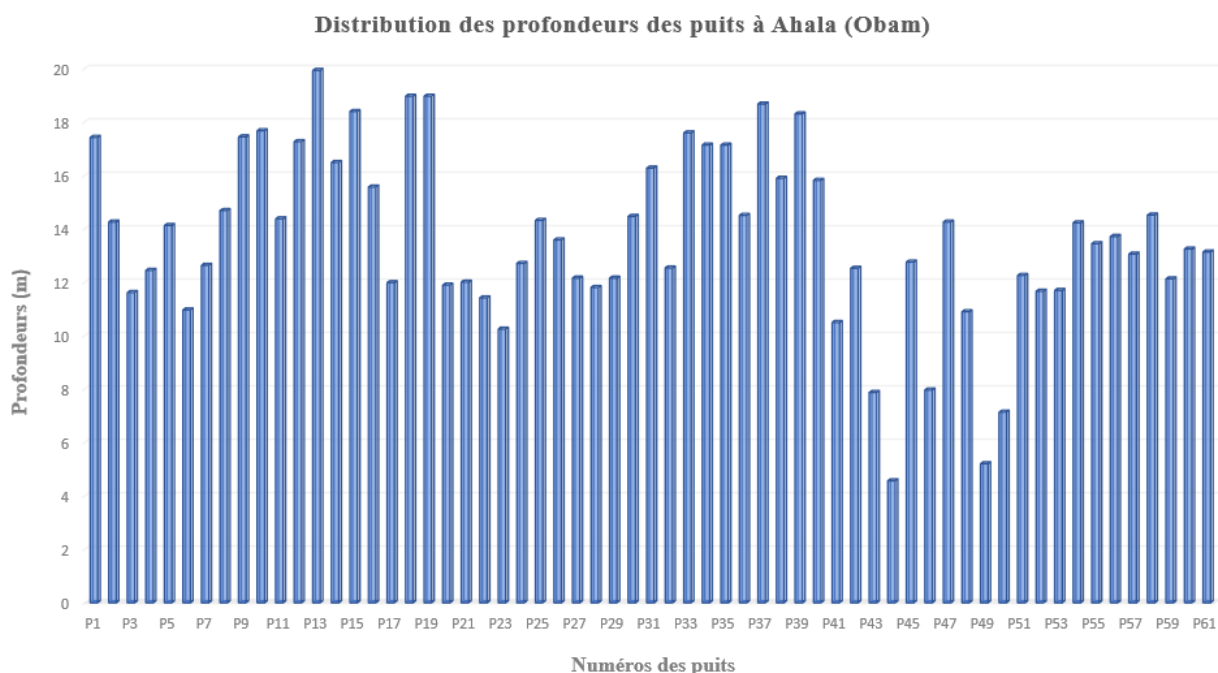


FIGURE 3.3 – Distribution des profondeurs des puits d'Ahala (Obam)

L'analyse de la répartition des profondeurs présente un étalement non uniforme des profondeurs des puits de la zone d'étude. Selon les statistiques obtenues, il en ressort que :

- La profondeur moyenne des puits est de 13,65 m. La profondeur maximale est de 19,94 m tandis que la température minimale vaut 4,57 m correspondant à une étendue (différence entre les valeurs maximales et minimales) de 15,37 m ;
- La profondeur médiane vaut 13,45 m, c'est-à-dire que 50% des valeurs des profondeurs sont inférieures ou égales à 13,45 m et 50% des valeurs des profondeurs sont supérieures ou égales à 13,45 m ;
- La variance et l'écart-type (mesures qui rendent compte de la dispersion ou l'étalement de toutes les valeurs d'un ensemble de données) ont respectivement pour valeurs 10,67 m et 3,27 m ;
- Le coefficient de variation (rapport entre l'écart-type et la moyenne, il mesure la dispersion relative des points de données d'une série autour de la moyenne) de la série de profondeurs vaut 23,93%. Ce coefficient étant supérieur à 15% comme s'tait le cas pour les températures, cela traduit une forte variation globale de la profondeur des puits à Ahala.

Plusieurs facteurs peuvent influencer les différences de profondeurs des puits dans une région : les besoins en eau, la géologie locale, la topographie, la contamination. La profondeur des puits dépend des besoins en eau locaux. Par exemple, dans les zones où l'eau de surface est rare, les puits peuvent être creusés plus profondément pour atteindre des nappes phréatiques plus profondes. Aussi, la composition du sol et du sous-sol peut également jouer un rôle clé dans la profondeur des puits. Les sols imperméables ou les roches dures peuvent nécessiter des puits plus profonds pour accéder à l'eau souterraine.

La configuration du terrain peut également influencer la profondeur des puits. Dans les régions montagneuses, par exemple, les puits peuvent être creusés plus en profondeur pour atteindre les nappes phréatiques situées en contrebas. En outre, en cas de contamination de l'eau en surface, les puits peuvent être creusés plus profondément pour accéder à une source d'eau souterraine plus propre et sécurisée. En conclusion, la profondeur des puits dans une région est influencée par divers facteurs tels que les besoins en eau, la géologie, la topographie, la qualité de l'eau et les réglementations locales. Il est crucial de tenir compte de ces éléments lors de la conception et de la construction des puits pour assurer autant que faire se peut un approvisionnement fiable et sûr en eau dans une région donnée.

3.1.3 Variation de l'altitude des puits du quartier Ahala (Obam)

L'altitude des puits au quartier Obam Ahala croit de façon non linéaire du lieu-dit Mère matine jusqu'au Repos du chef. Cette croissance est illustrée par la figure 3.4 :

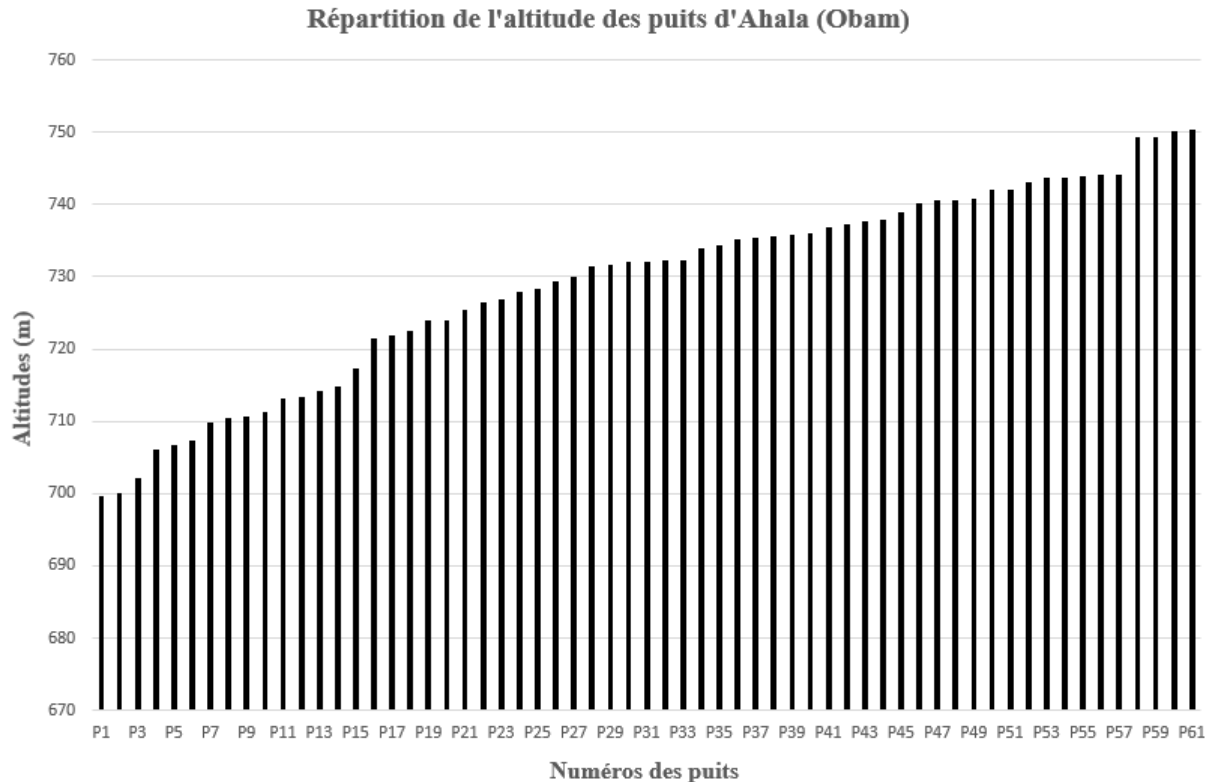


FIGURE 3.4 – Répartition de l'altitude des puits d'Ahala (Obam)

Les variables statistiques de la série d'altitudes sont : moyenne 729,19 m, médiane 732,17 m, variance 186,49 m², écart-type 13,66 m, altitude maximale 750,46 m, altitude minimale 699,56 m, l'étendu 50,9 m et le coefficient de variation 1,87 (l'altitude varie peu).

On a également fait ressortir la répartition des profondeurs en fonction de la latitude et la longitude. Les représentations en deux dimensions et trois dimensions sont données par les figures 3.5 et 3.6. Les températures y sont représentées par les couleurs allant du violet et bleue pour les très faibles altitudes (700 m - 716 m), passant par le vert (716 m - 732 m), le jaune (732 m - 736 m), le orange (736 m - 740 m) pour les altitudes respectivement faibles moyennes et fortes ainsi que la couleur rouge pour les altitudes très fortes (figures 3.5 et 3.6).

Les écarts d'altitude des puits dans une zone bien précise (Obam Ahala) sont principalement liés au relief local, au niveau de la nappe phréatique. Il est crucial de tenir compte de ces facteurs lors de la planification et de l'installation des puits pour assurer un approvisionnement en eau adéquat et durable. En effet, l'altitude du terrain environnant peut influencer celle du puits. Obam Ahala étant située sur une montagne, l'altitude y sera plus élevée par rapport à une

zone moins montagneuse. La profondeur de la nappe phréatique peut varier selon les saisons, les précipitations et l'exploitation de l'eau. Ainsi, les altitudes des puits peuvent varier en fonction des fluctuations (variation successive et en sens contraire d'une grandeur) du niveau de la nappe. Les figures 3.5 et 3.6 illustrent la répartition bidimensionnelle et tridimensionnelle de l'altitude en fonction de la latitude et la longitude.

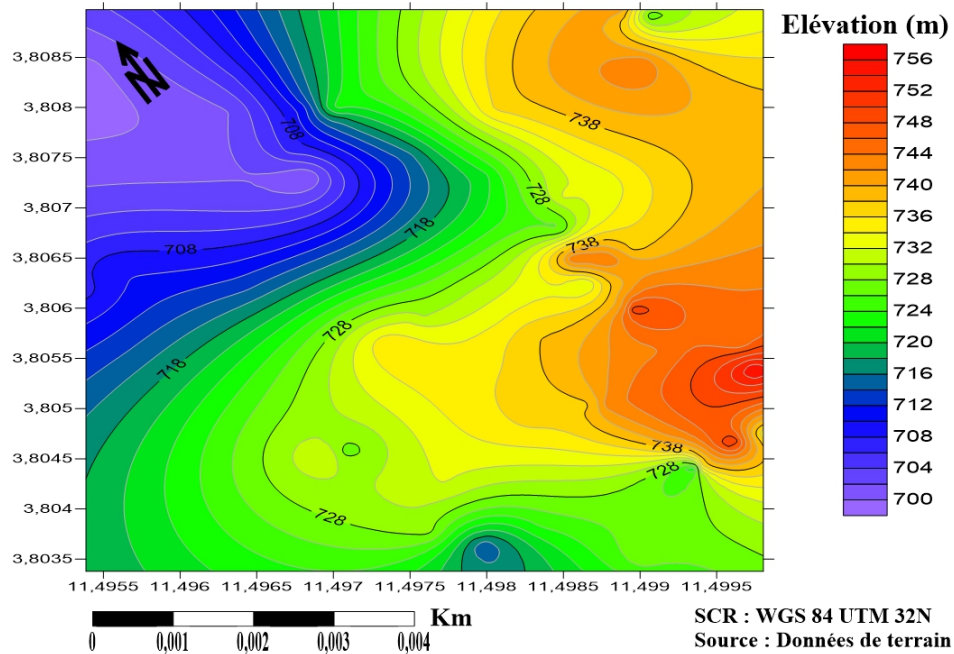


FIGURE 3.5 – Répartition 2D de l'altitude des puits d'Ahala en fonction de la latitude et la longitude

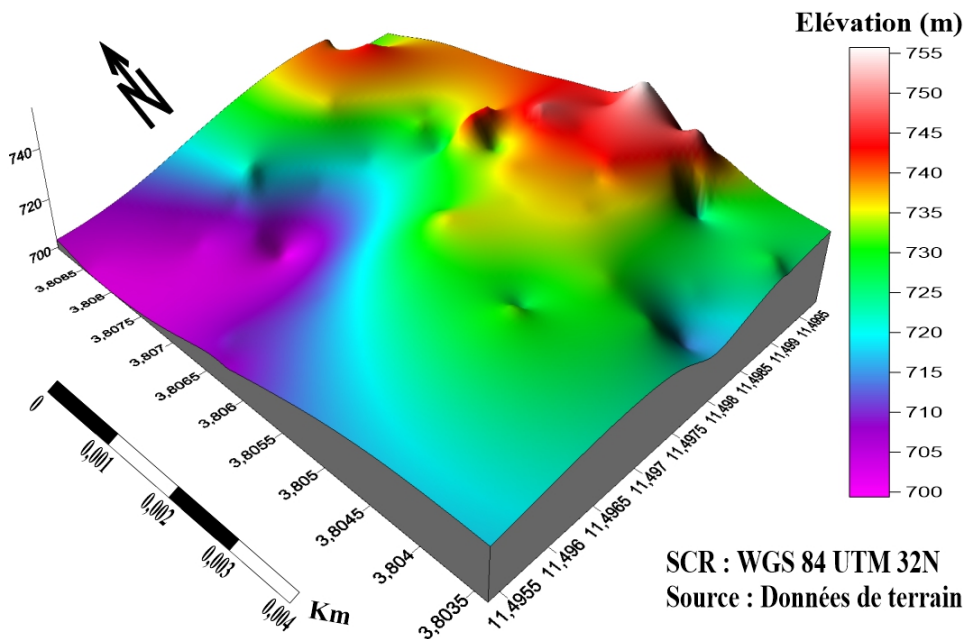


FIGURE 3.6 – Répartition 3D de l'altitude des puits d'Ahala en fonction de la latitude et la longitude

Le climat dans une région influence aussi l'altitude des puits. Dans les régions où il pleut abondamment, l'eau souterraine peut être rechargée régulièrement, ce qui permet aux puits d'être situés à des altitudes plus basses. En revanche, dans les zones arides où les précipitations sont rares, l'eau souterraine est plus profonde, conduisant à des puits d'altitude plus élevée. L'utilisation des terres dans une localité contribue également à la variation de l'altitude des puits (dans les régions agricoles où les pesticides et engrais sont utilisés)

3.1.4 Variation de la température avec la profondeur des puits du quartier Ahala (Obam)

Les résultats de l'investigation montrent que la température des puits varie avec la profondeur. Cette évolution est observable à la figure 3.7 :

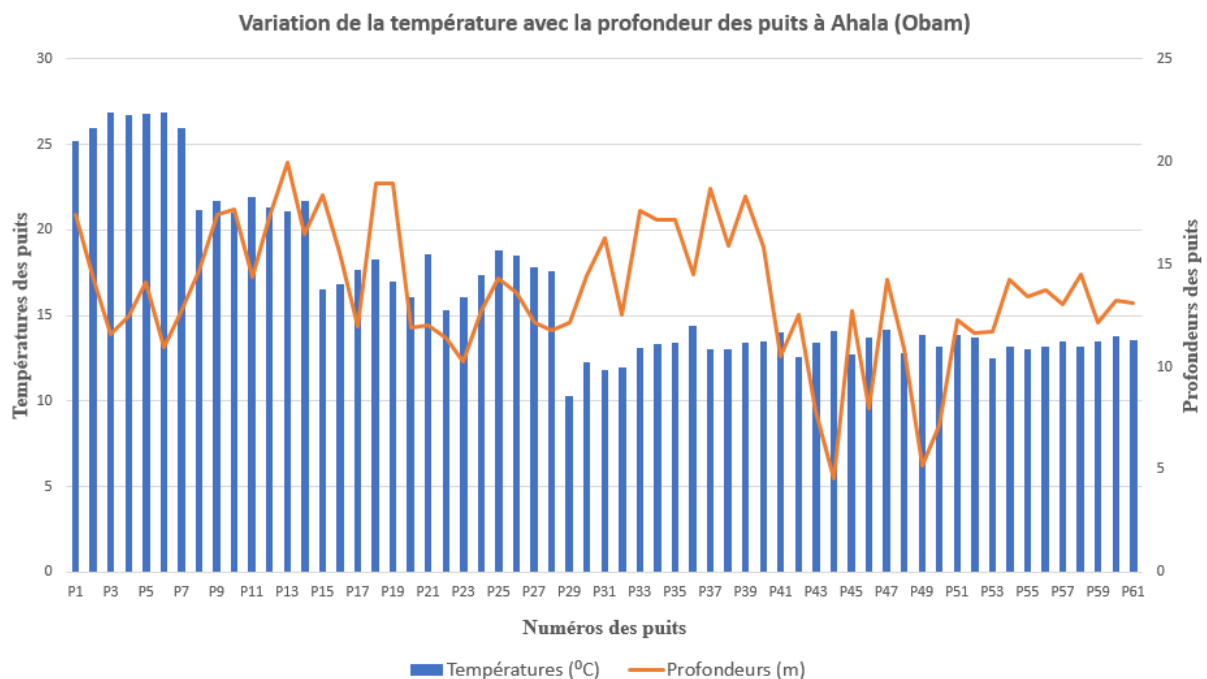


FIGURE 3.7 – Variation de la température avec la profondeur des puits à Ahala (Obam)

D'après les statistiques, la covariance inter-variable (grandeur qui mesure la façon dont deux variables aléatoires varient ensemble ; une valeur positive signifie que les deux variables ont tendance à évoluer dans le même sens, tandis qu'une valeur négative signifie qu'elles varient en sens contraires) de la température et la profondeur des puits à Ahala (Obam) vaut 2,44. Cette valeur montre que dans l'ensemble, la température évolue dans le même sens que la profondeur ce qui est en adéquation avec la courbe du gradient géothermique présent dans la revue de la littérature.

Plusieurs paramètres peuvent influencer la variation de la température avec la profondeur, notamment : la géothermie, la conductivité thermique des roches, la présence d'eau souterraine, les conditions climatiques. Généralement, la chaleur provenant du noyau terrestre contribue à l'augmentation de la température à mesure que l'on descend en profondeur, aussi, certaines roches ont une conductivité thermique plus élevée, ce qui peut influencer la vitesse à laquelle la chaleur se propage en profondeur. Outre cela, la présence d'eau souterraine peut agir comme un isolant thermique ou au contraire, permettre un transfert de chaleur plus efficace. En fin, les variations de température à la surface de la Terre peuvent se propager en profondeur, affectant ainsi la température du sol en profondeur.

3.1.5 Variation de la température avec l'altitude des puits du quartier Ahala (Obam)

La figure 3.8 met en exergue la repartition des températures des puits de la zone d'étude en fonction de leurs altitudes.

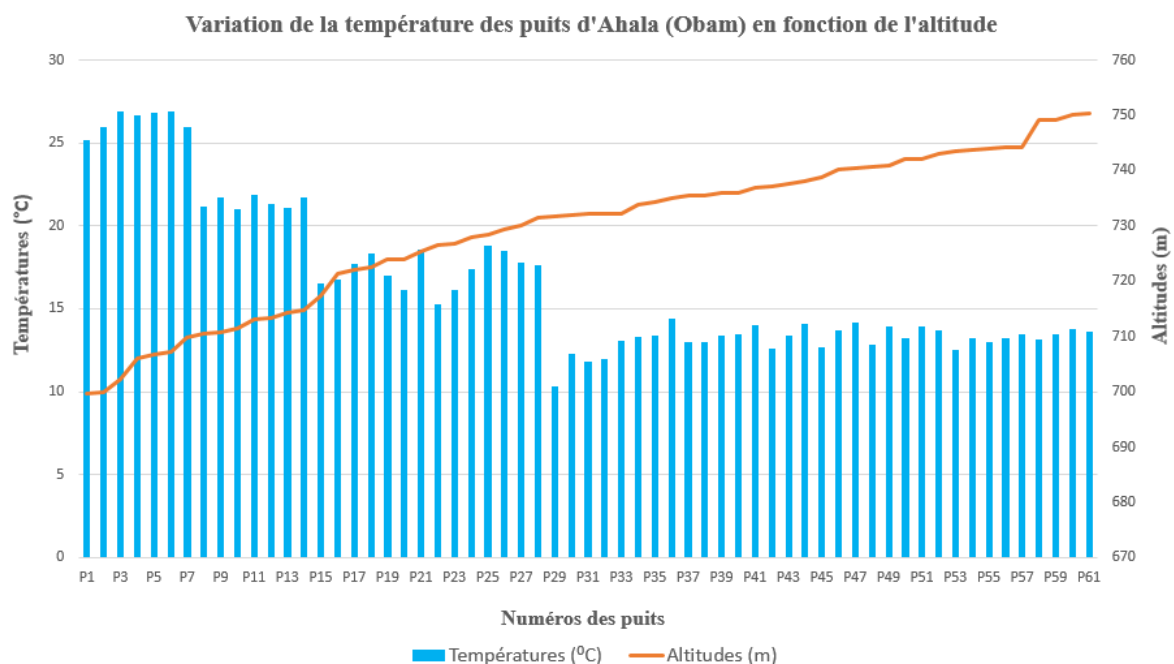


FIGURE 3.8 – Variation de la température des puits d'Ahala (Obam) en fonction de l'altitude

Ce graphique laisse voir que la température des puits diminue lorsque l'altitude augmente allant de Mère martine jusqu'au repos du chef. Ainsi, la température et l'altitude varient en sens contraire. La valeur de la covariance inter-variable ($-55,16 < 0$) consolide l'observation faite ci-dessus grâce au signe négatif de la covariance intervariable de la température et l'altitude.

Lorsque l'altitude augmente, la température des puits diminue en raison de divers facteurs. La diminution de la température des puits avec l'augmentation de l'altitude est principalement due à l'effet de refroidissement dû à la pression atmosphérique réduite, à l'influence de l'altitude sur la température du sol et aux effets géothermiques. Il est important de prendre en compte ces éléments pour comprendre et gérer les variations de température des puits en fonction de l'altitude.

À mesure que l'altitude augmente, la pression atmosphérique diminue, entraînant une baisse de la température de l'air ambiant. Cela refroidit l'air en altitude, ce qui peut également réduire la température de l'eau dans les puits situés à des altitudes plus élevées. De plus, les puits sont affectés par la température du sol environnant. À des altitudes plus élevées, la température du sol est généralement plus basse, ce qui peut également influencer la température de l'eau dans les puits d'Obam Ahala, en particulier les puits peu profonds. La conductivité thermique du sol peut également entraîner une baisse de la température de la terre en profondeur à des altitudes plus élevées. Cela contribue aussi à refroidir l'eau des puits en altitude.

3.1.6 Variation de la température des puits en fonction de la latitude et la longitude

Lors des descentes sur le terrain, le système GPS a permis de prélever les coordonnées géographiques des différents puits de la zone étudiée. Le graphe 3.9 présente la répartition des températures des puits d'Ahala (Obam) en fonction de la latitude et de la longitude. Les températures sont réparties des plus faibles aux plus fortes. Les températures y sont majoritairement faibles (13 °C - 14 °C). Ceci se traduit par une prédominance de la couleur verte sur la carte. On a également les températures très fortes ou sources chaudes (19 °C - 26 °C) représentées par la couleur rose. Les couleurs bleue, jaune et rouge orangé renvoient respectivement aux températures très faibles (7 °C - 12,6 °C), moyennes (14,1 °C - 16 °C) et fortes (16 °C - 19 °C). En fonction de cette répartition des températures, les applications de la géothermie peu profonde peuvent être développées d'une manière contextualisée à chaque endroit.

Sur les zones bleues, vertes, et jaunes, la géothermie est propice à l'usage direct pour le refroidissement. Les populations de la zone rouge orangée peuvent se servir de la géothermique pour assurer le confort thermique dans leurs habitats tandis que les populations de la zone rose peuvent faire recours à l'énergie géothermique pour le chauffage des serres agricoles grâce à une pompe à chaleur. Les sources froides peuvent servir à améliorer le rendement d'un système PV-PCM-TE en augmentant le gradient de température dans le TEG afin de favoriser l'effet Seebeck (conversion de la chaleur en électricité).

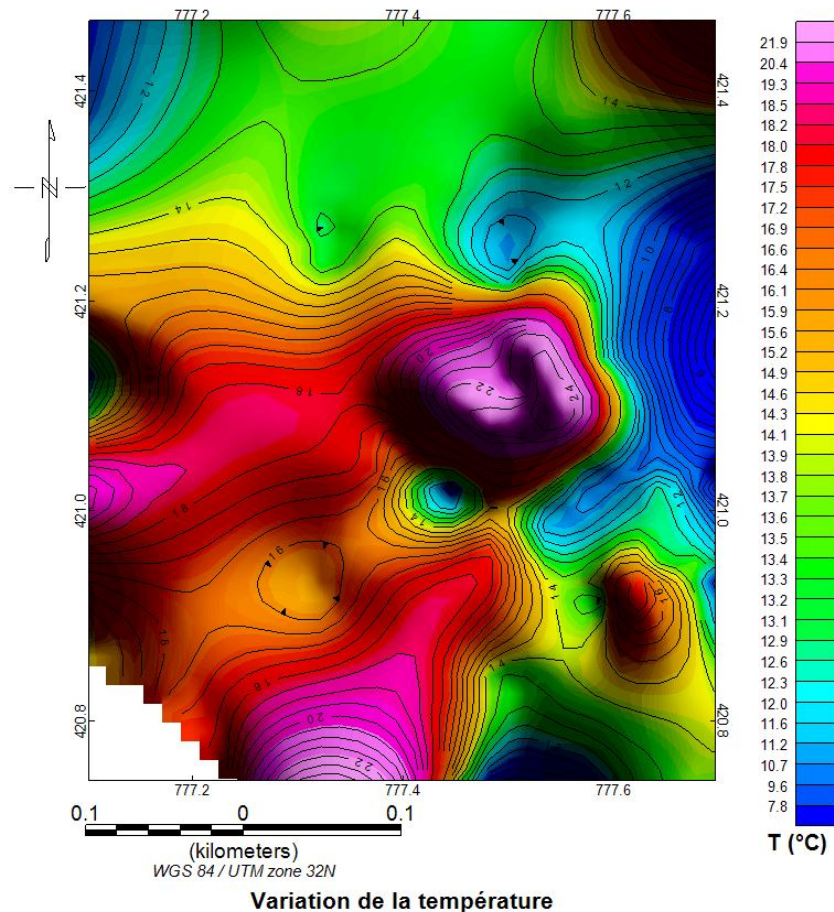


FIGURE 3.9 – Carte 2D des contours isothermes de Ahala (Obam)

La répartition géographique des températures souterraines est influencée par une combinaison de facteurs géographiques, géologiques et climatiques à savoir la latitude, la longitude, la géologie du sol, la présence d'eau souterraine, et le climat local.

3.1.7 Variation de la profondeur avec l'altitude des puits du quartier Ahala (Obam)

L'évolution de la profondeur en fonction de l'altitude des puits d'Ahala (Obam) est mise en évidence par la figure 3.10.

L'observation de ce graphe montre que la profondeur des puits de la zone d'étude varie en augmentant avec l'altitude. Cette observation est appuyée par la valeur de la covariance intervariable ($41,87 > 0$) de la profondeur et l'altitude des puits d'Obam Ahala. Ceci témoigne à suffisance de la variation unilatérale de la profondeur des puits avec leur altitude. Ce résultat est en adéquation avec les prévisions théoriques selon lesquelles la profondeur des puits évolue dans le même sens que l'altitude.

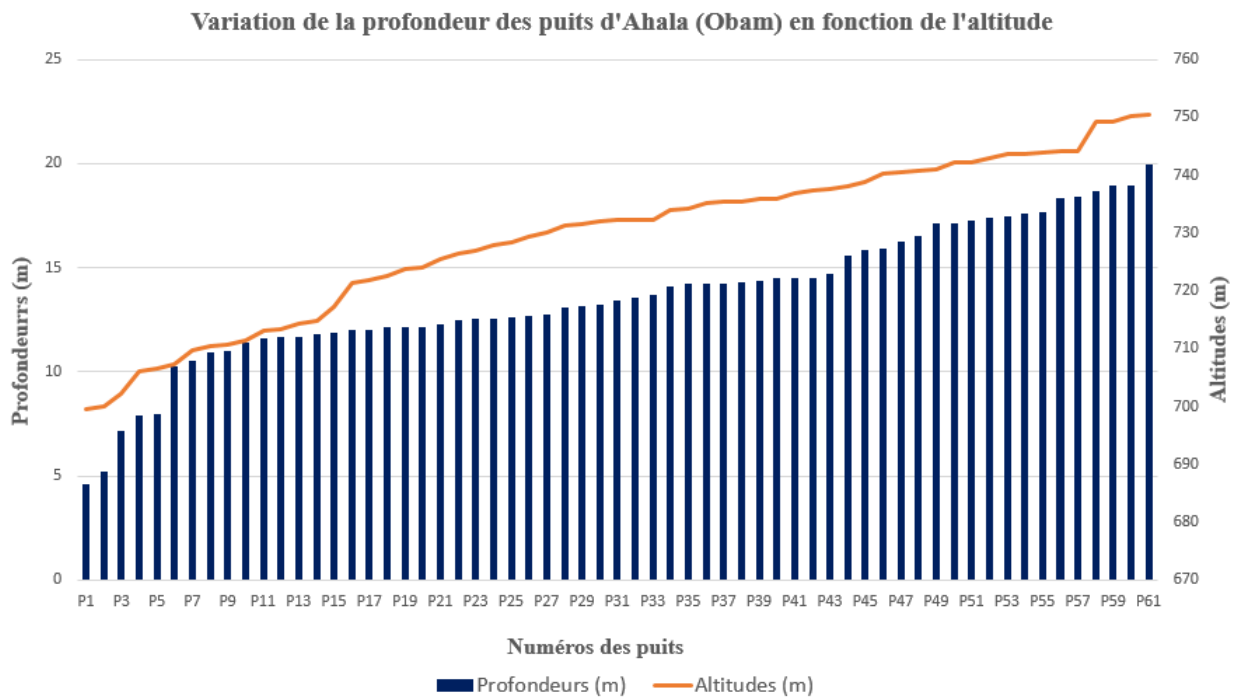


FIGURE 3.10 – Variation de la profondeur des puits d'Ahala (Obam) en fonction de l'altitude

La profondeur des puits d'eau tend à augmenter avec l'altitude en raison du niveau de la nappe phréatique, de la pression de l'eau, de la composition géologique et des besoins en eau spécifiques aux régions en altitude. À des altitudes plus élevées, le niveau de la nappe phréatique peut être plus bas en raison de la gravité et de la pression atmosphérique, obligeant ainsi à creuser des puits plus profonds pour accéder à l'eau souterraine. De prime abord, à des altitudes plus élevées, la diminution de la force gravitationnelle entraîne une réduction de la pression de l'eau, rendant son extraction des puits plus difficile et nécessitant des puits plus profonds pour obtenir suffisamment d'eau. En fin, en altitude la variation de la composition géologique du sol peut influencer la profondeur à laquelle se trouve l'eau. Des roches plus dures ou imperméables peuvent exiger des puits plus profonds pour atteindre les nappes phréatiques.

3.1.8 Répartition géographique des profondeurs des puits du quartier Ahala (Obam)

Les profondeurs des puits sont réparties des plus faibles aux plus fortes. Elles y sont inégalement distribuées des plus faibles (5m - 10 m couleurs bleue foncée et clair) aux plus fortes (17 m - 20 m couleur rose) en passant par les profondeurs faibles (10 m - 13 m couleur verte), moyennes (13 m - 14 m couleur jaune) et fortes (14 m - 17 m couleur rouge orangée) en prélude à la figure 3.11 qui suit. On y observe également les lignes d'iso-dépression (les courbes noires).

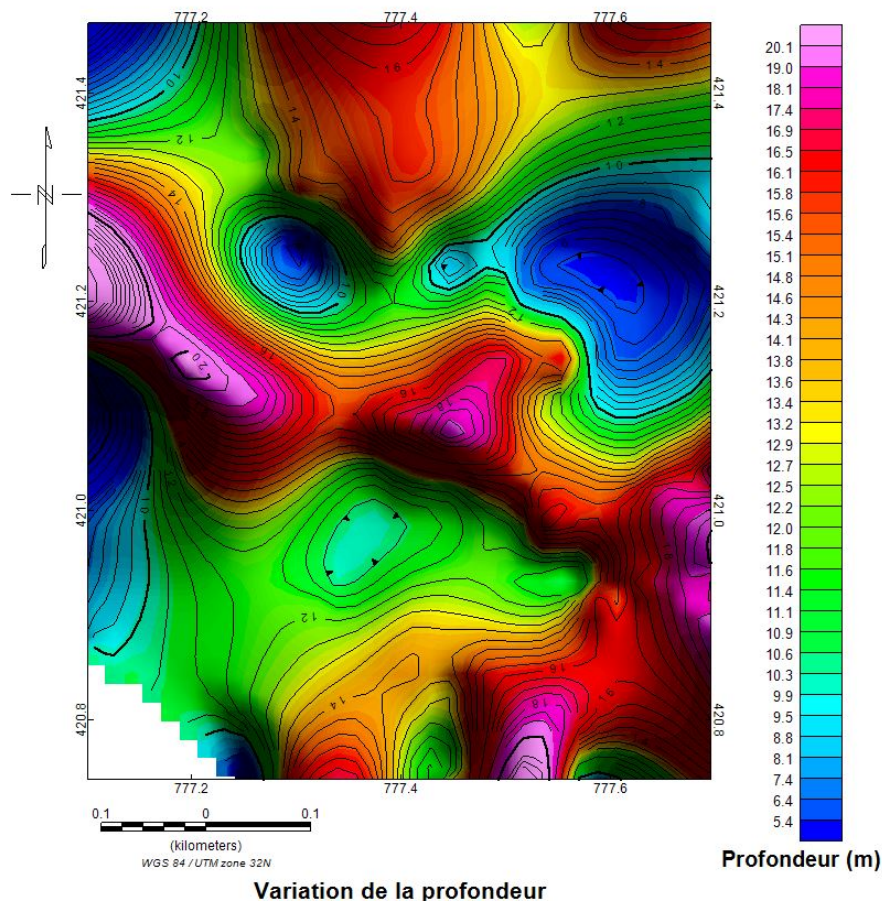


FIGURE 3.11 – Carte 2D des contours d'iso-dépression de Ahala

Les profondeurs des puits dans une localité peuvent être influencées par plusieurs paramètres, notamment la géologie locale, la topographie, le niveau de la nappe phréatique et l'activité humaine (l'agriculture intensive, le pompage excessif des eaux souterraines).

3.2 Détermination de la profondeur de peau

Cette profondeur a été déterminée expérimentalement grâce aux températures prélevées lors des descentes sur le terrain en traçant le graphe qui rend compte de l'évolution cumulée des températures avec la profondeur (figure 3.12).

Il en ressort que les températures prélevées au mois de Mars (courbe orange) sont supérieures aux températures du mois de Mai (courbe grise). Cette observation est due à l'évolution annuelle de l'irradiance (facteur influençant les températures à des faibles profondeurs) qui est plus forte en Mars qu'en Mai. Force est de constater également qu'à partir de 15 m de profondeur, le climat impacte très peu sur les températures à Obam (Ahala). En fin la profondeur de peau est comprise dans l'intervalle [12,7 m - 14,5 m] (intervalle de profondeur dans lequel les températures fluctuent très peu).

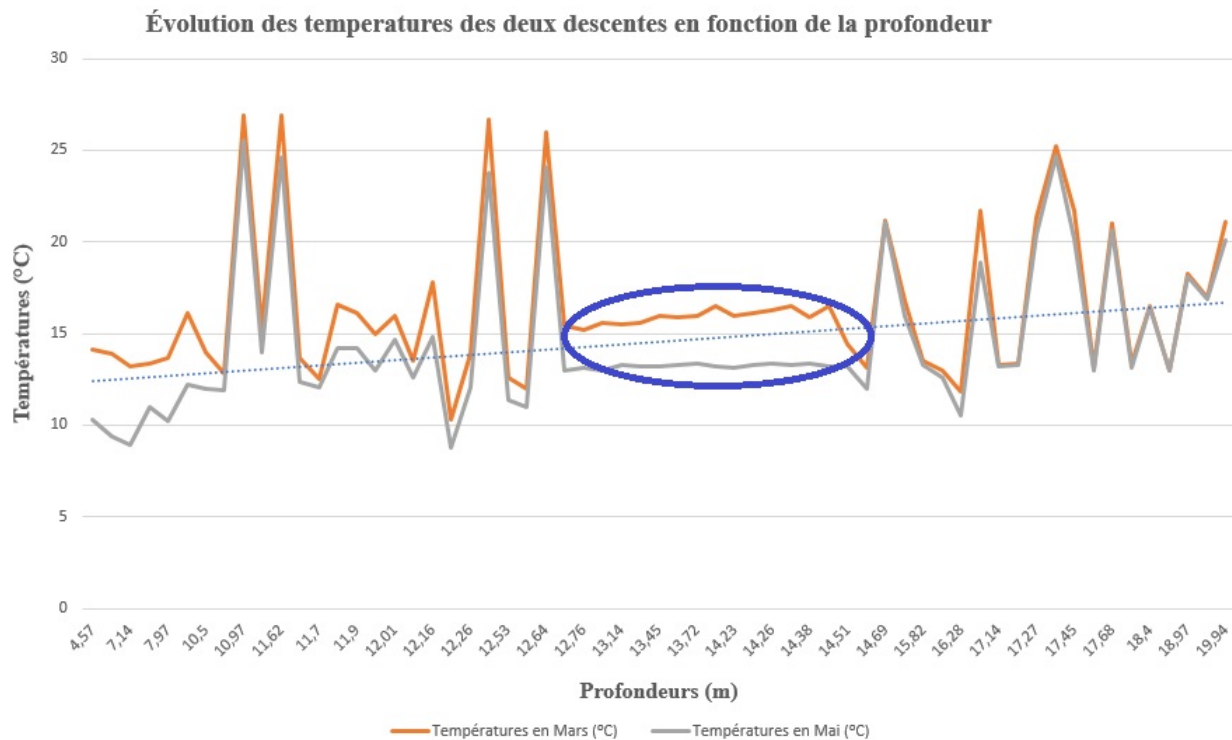


FIGURE 3.12 – Évolution des températures des deux descentes en fonction de la profondeur des puits

La valeur théorique de la profondeur de peau est comprise dans l'intervalle trouvé expérimentalement. La plage de température correspondante à l'intervalle ci-dessus est [13 °C - 15 °C]. Ces températures sont utiles dans le processus de refroidissement grâce à une sonde géothermique dans laquelle circule un fluide caloporteur qui va prendre la fraîcheur souterraine de Obam Ahala pour diminuer davantage la température du corps froid du générateur thermo-électrique dans le système PV-PCM-TE en vue d'optimiser ce dernier.

3.3 Simulation sur consol du comportement d'un système hybride PV-PCM-TE-Géothermique adapté au quartier AHALA (Obam)

3.3.1 Comportement thermique des systèmes PV-PCM-TE et PV-PCM-TE-Géothermique

L'intérêt de cette simulation repose sur l'effet Seebeck (phénomène thermoélectrique de conversion du gradient de température en tension électrique). Généralement, dans le dispositif PV-PCM-TE le corps froid du TEG est à la température ambiante (environ 25°C) cependant la température expérimentale exploitable à Obam Ahala est d'environ 14°C. En réduisant la tem-

pérature du corps froid du TEG, cela devrait augmenter le gradient, par conséquent la différence de potentiel du PV-PCM-TE car ces deux paramètres sont proportionnels comme le montre la formule de Seebeck ci-contre :

$$U_{CF} = \alpha \cdot (T_C - T_F) \quad (3.1)$$

Avec U_{CF} la tension délivrée par le générateur thermoélectrique, α le coefficient de Seebeck, T_C et T_F respectivement les températures des corps chaud et froid du TEG.

Les paramètres de simulation utilisés sont récapitulés dans le tableau 3.1 :

TABLE 3.1 – Valeurs des paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Température de référence Tref	298,15 K
Rendement de référence ref	0,15
Coefficient de température	0,004 [1/K]
coefficient d'absorption (pv)	0,9
Emissivité (pv)	0,8
Transmissivité (Tpv)	0,95
Constante de Stefan-Boltzmann (SB)	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Vitesse du vent w	1m/s
Température ambiante Ta	295,15 K
Température soleil Ts	5777 K
Rendement optique Topt	0,95
Resistance de contact thermique Rct1 Rct2	$0,01 \times 10^{-8} \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$
Resistance de charge du TE Rload	$5 \times 10^{-3} \text{ m}$
Section transversale du PV Apv	10^{-5} m^2
Section transversale des thermo éléments ATE	$(1,96 \times 10^{-6} \text{ m}^2)$
Rapport de concentration C	22,0
Irradiance solaire G	1000 W m^{-2}

Après avoir entré les paramètres de simulation sur Comsol multiphysics, les représentations données par la figure 3.13 ont été obtenues. Elle présente la variation de la température des deux modèles présentés, sous l'influence du rayonnement solaire concentré en trois dimensions. L'on peut clairement voir que la température décroît du couvercle (480 K) vers l'extrémité inférieure du générateur thermoélectrique (298 K pour la figure a et 287 K pour la figure b). La température la plus élevée matérialisée par la couleur blanche est observée au niveau du couvercle en verre du système et au niveau du TEG, la température varie de 360 K à 298 K dans le système a) et de 360 K à 287 K dans le système b). Cette décroissance de température s'explique par le phénomène de conduction et le principe des échanges de chaleur.

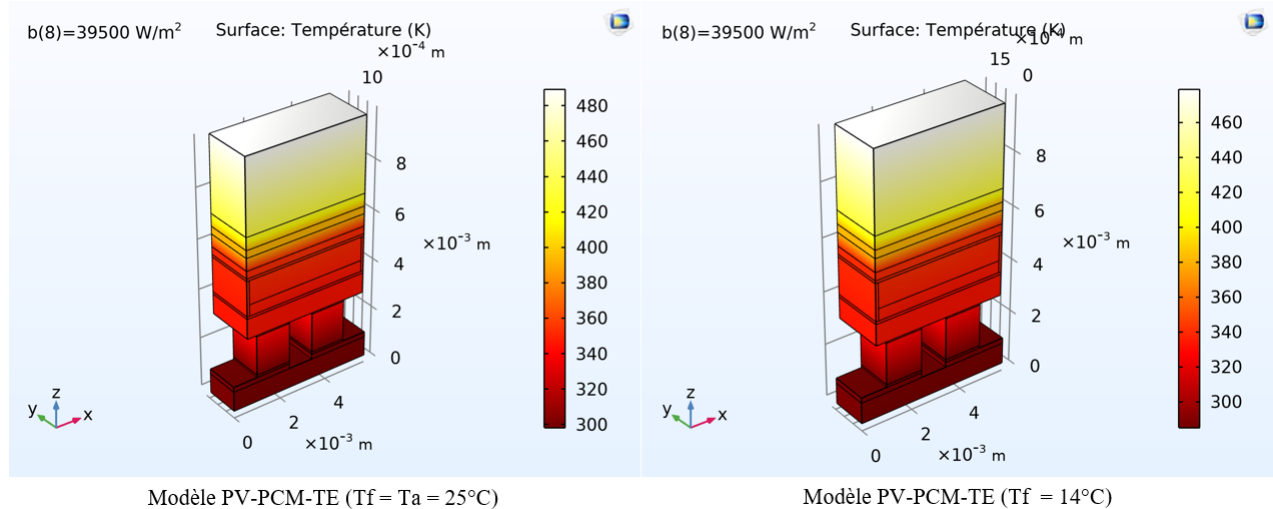


FIGURE 3.13 – Résultats de la simulation

3.3.2 Puissance et rendement énergétique des systèmes PV-PCM-TE et PV-PCM-TE-Géothermique

Il est question ici d'étudier l'influence du rayonnement solaire concentré sur la puissance et le rendement énergétique des systèmes PV-PCM-TE et PV-PCM-TE-Géothermique afin de déterminer le système qui délivre la puissance électrique la plus élevée, par conséquent possède le meilleur rendement. Après simulation sur Comsol la superposition des courbes sur Matlab donne les graphes de la figure 3.14.

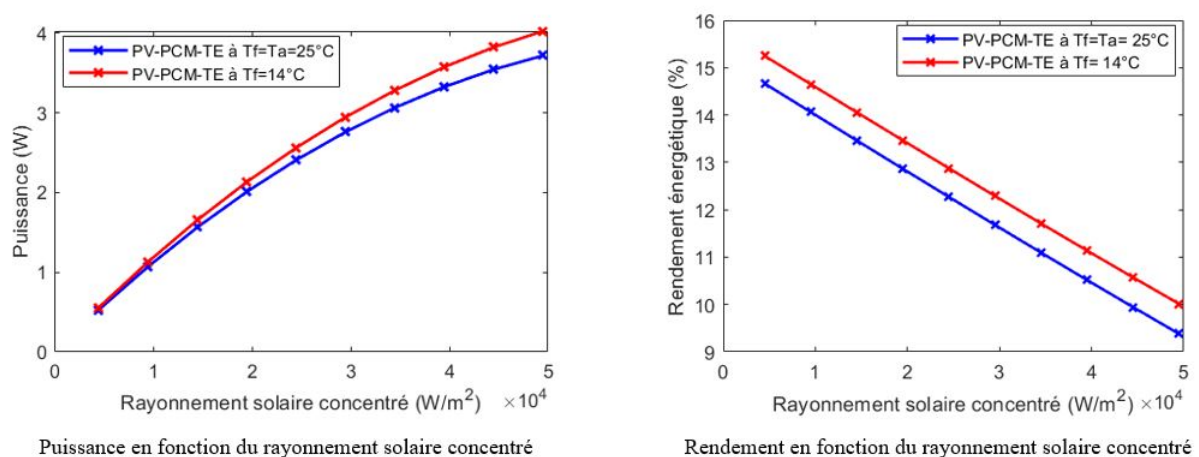


FIGURE 3.14 – Variation de la puissance et du rendement énergétique en fonction du rayonnement solaire

Ces courbes révèlent une croissance exponentielle de la puissance des systèmes étudiés avec le rayonnement solaire concentré et une décroissance linéaire du rendement énergétique avec le rayonnement solaire concentré. La puissance et le rendement du système PV-PCM-TE-

Géothermique (courbes en rouge) sont supérieures à ceux d'un PV-PCM-TE (courbes en bleue), preuve qu'il est avantageux de combiner le solaire thermo-photovoltaïque et la géothermie dans le cadre de cette étude en guise d'application de la géothermie très basse énergie à Ahala. Ce résultat est propre à une localité car il ne serait pas le même dans un endroit où les températures souterraines sont très proches de la température ambiante.

Il trouve une explication claire sur l'effet thermoélectrique (effet Seebeck). En effet, la différence de température du générateur thermoélectrique dans le PV-PCM-TE vaut 62K contre 73K dans le PV-PCM-TE-Géothermique. La tension délivrée par le TEG étant proportionnelle au gradient de température, ceci implique également une proportionnalité entre la puissance de sortie, le rendement énergétique et le gradient de température. En revenant sur la zone d'étude, le système PV-PCM-TE-Géothermique est une application propice de la géothermie très basse énergie pour les populations qui résident dans la circonscription allant de la station ABP jusqu'en face le Repos du Chef. Lorsqu'on s'éloigne de cette zone, les températures souterraines se rapprochent davantage de la température ambiante.

CONCLUSION

Parvenus au terme de ce chapitre, il a été question de présenter et discuter les différents résultats obtenus tout au long de ce travail. Il en ressort clairement que la géothermie très basse énergie est exploitable à Obam Ahala à une profondeur comprise entre 12,7 m et 14,5 m correspondant à une fourchette de température de 13 °C - 15 °C. Outre cela, la température moyenne du sous-sol d'Obam (Ahala) est de 16,59 °C avec une profondeur moyenne des puits de 13,65 m et une moyenne d'altitude de 729,19 m. Dans l'ensemble, les variations des températures, profondeurs, altitudes entre elles sont en adéquation avec les prévisions théoriques à quelques exceptions près. Parmi les applications de la géothermie peu profonde celles qui sont adaptées à Ahala sont celles liées au refroidissement. C'est ainsi qu'on a observé l'augmentation du rendement et la puissance d'un système PV-PCM-TE lorsqu'on le connecte à une source géothermale froide de 14 °C par rapport au milieu ambiant (25 °C).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le présent travail porte sur l'étude comparative des différents types de géothermies et leurs applications, cas de la géothermie très basse énergie à Ahala. Évaluer le potentiel géothermique superficiel de la ville de Yaoundé, plus précisément dans le quartier Ahala (Obam) afin de déterminer les applications de la géothermie peu profonde adaptées à cette zone est l'objectif principal ayant guidé cette recherche. Pour y parvenir, on a utilisé la méthode thermique incluant les appareils tels que le thermomètre laser infrarouge, le compteur de distance et le GPS pour prélever respectivement les températures, les profondeurs, et les coordonnées géographiques (altitude, latitude, longitude) des puits de la zone lors des descentes sur le terrain. Les logiciels Excel, Oasis Montaj, Surfer, Matlab et Comsol Multiphysics ont permis de traiter les données collectées.

Sur la base des différents résultats des investigations, la zone de hautes températures pouvant servir de réservoir géothermique peu profond à Ahala se trouve en face le collège Mak-Mbe (23°C - 27°C) tandis que les zones de basses températures se trouvent majoritairement en face le Repos du Chef (10°C - 16°C). La valeur positive de la covariance inter-variable entre la température et la profondeur des puits (2,44) montre que la température évolue dans le même sens que la profondeur. En comparant l'évolution des températures lors des deux descentes, il en ressort que dans l'ensemble les températures des puits au mois de Mars sont plus élevées que celles de Mai. Aussi, la température moyenne de notre zone d'étude est de $16,59^{\circ}\text{C}$ et la profondeur adapter à l'exploitation de la géothermie très basse énergie au quartier Ahala est d'environ 13,2m comprise dans l'intervalle 12,7 m - 14,5 m. À cette profondeur, la géothermie peu profonde présente une principale application à savoir le refroidissement à travers l'optimisation d'un système PV-PCM-TE (grâce à la simulation sur Comsol, il a été observé une augmentation du rendement d'un système PV-PCM-TE ainsi que sa puissance électrique).

Les études poussées sur le développement de la géothermie permettront au Cameroun de se doter d'une nouvelle source d'énergie. À long terme, ces études permettront de contribuer à l'établissement de la carte géothermique de la ville de Yaoundé. La multiplication du nombre d'investigations permettrait d'avoir une meilleure estimation de la profondeur de peau. Une étude économique du PV-PCM-TE-Géothermique aidera à étudier la faisabilité de ce système.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dickson, J. and Fanelli, M. (2004). What is Geothermal Energy ? p 33-38.
- [2] John, W. (2007). Characteristics, Development and utilization of geothermal resources. Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin, Klamath Falls, Oregon Institute of Technology, p. 1-9.
- [3] Lund, J. (2004). 100 Years of Geothermal Power Production. Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin, Klamath Falls, Oregon Institute of Technology, p. 11-19.
- [4] John, W. (2021). La géothermie en France – Étude de filière, p 61-62.
- [5] Armstead, H. (1978). Geothermal Energy. New York, p 44-47.
- [6] Halim, R. A. (2018). Geothermal Potency and Development mathesis. University of Twente, p 31.
- [7] Tiwari, G. N., Ghosal, M. K. (2005). Renewable Energy Resources : Basic Principles and Applications, Alpha Science, p 76-77.
- [8] Muffler, P. and Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics, p 53 - 59.
- [9] Erkan, K., Holdmann, G., Blackwell, D. (2008). Understanding the Chena Hot springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data, p. 565.
- [10] Zogg, M.(2008). History of Heat Pumps Swiss Contributions and International Milestones, p 20-22.
- [11] Boyer, D. and Bratkovich, D. (2020). The basics and applications of geothermal energy. Dovetail Partners, p 4 - 9.
- [12] Bloomquist, G. (1999). Geothermal Heat Pumps, Four Plus Decades of Experience. Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin, Klamath Falls, Oregon Institute of Technology, p 13.
- [13] Kömürcü, M. and Akpınar, A. (2009). Importance of geothermal energy and its environmental effects in Turkey. Renewable energy, p 1611 - 1615.

- [14] Bertani, R. (2007). World Geothermal Generation, p 8-19.
- [15] Fouépé, T. (2020). Hydrogeochemistry and groundwater flow mechanisms in shallow aquifer in Yaoundé, Cameroon. Water Supply, p 1334 - 1348.
- [16] Haehnlein, S. and Bayer, P. (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, p 26.
- [17] Awol, E. (2013). Types of water wells. Arba Mich University Institute School of post graduate student, Department of water resources and irrigation engineering. Available, p 113-117.
- [18] Lehnert, M. (2014). Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature. Acta Universitatis Palackianae Olomucensis–Geographica, p 5 - 21.
- [19] Bounou, C. (2021). Conversion des marécages à raphiale et risques environnementaux à Yaoundé : cas du quartier Ahala. Afrique, p 51-61.
- [20] Sighomnou, D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. These doctorat Etat Université Yaoundé I, Cameroun, p 97-99.
- [21] Vicat, J. and Mvondo, H. (2002). Phénomènes karstiques fossiles et actuels au sein des formations métamorphiques silico-alumineuses de la nappe panafricaine de Yaoundé . Comptes Rendus Geoscience, p 545 - 550.
- [22] Mchaliikh, M. and Hmada, C.(2013). Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla. subtropics-developing a thermal comfort model for sleeping environments, p 70–81.
- [23] Saima, S. (2017). Systeme thermoelectrique pour la recuperation d'energie : modelisation electrique et continuite de service de la circuiterie electronique, Micro et nanotechnologies/ Microelectronique, p 201.
- [24] Elsheikh, M., Shnawah, M., Sabri, S. (2014). A review on thermo electric renewable energy : Principle parameters that affect their performance, Renewable and Sustainable Energy Reviews, p 12-15.
- [25] Knight, C. and Collins, M. (2009). Results of a water based thermoelectric energy harvesting device for powering wireless sensor nodes, Proceedings of SPIE-Active and Passive Smart, Structures and Integrated Systems, p 12.

- [26] Tengfei, C., Yimin, X., Quiang, L. (2016). Design of a novel concentrating photo voltaic–thermoelectric system incorporated with phase change materials, p 140.
- [27] Vollmer, M. and Mollmann, K. (2014). Infrared Thermography : Fundamentals, Research and Applications, p 87.
- [28] Donges, A. (2014). Laser Measurement Technology : Fundamentals and Applications, p 36.
- [29] Elliot, D. (2020). Understanding GPS : Principles and Applications, p 54.
- [30] Michael, M. (2019). How to Use Google Earth, p 14
- [31] Cheriff, F. and Geldart, K. (2018), Exploration Géophysics, p 63
- [32] Owen, J., Maillardet, R., Robinson, R. (2015), Introduction to Scientific Programming and Simulation Using Surfer, p 76.
- [33] Harvey, G. (2016). Excel pour les nuls, Alpha Science, p 18.
- [34] Roger, W. and Pryor, T. (2017). COMSOL Multiphysics Modeling, Simulation, and Application, Dovetail Partners, p 35.
- [35] Cleve, B. and Moler, N. (2004). Numerical computing with MATLAB, Society for Industrial Applied Mathematics (SIAM), p 13.
- [36] Milton, B. (2012). Introduction to Geophysical Prospecting, p 44
- [37] Green, F. and Harding, R. (1980). Altitudinal gradients of soil temperatures in Europe. Transactions of the Institute of British Geographers, 243 - 254.
- [38] Georgsson, L. S. (2009). Geophysical methods used in geothermal exploration. Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources, p 2 - 3.
- [39] Popiel, C. O., Wojtkowiak, J., Biernacka, B. (2001). Measurements of temperature distribution in ground. Experimental thermal and fluid science, 25, p 301 - 309 .
- [40] Nofziger, D. (2003). La température du sol change avec le temps et la profondeur. Département des sciences des plantes et des sols, Oklahoma State University : Stillwater p 1-3.
- [41] Motiei P., Yaghoubi M. E., GoshtasbiRad, (2015). Simulation transitoire d'un système hybride photovoltaïque thermoélectrique utilisant un matériau à changement de phase, Sustain Energy Technol Assess. p 200–213.