

**ETUDE DE LA VARIATION DES TEMPERATURES DES
PUITS DU QUARTIER OYOM-ABANG-YAOUNDE ET
SON IMPLICATION DANS LA RECHERCHE DE
L'ENERGIE GEOTHERMIQUE AU CAMEROUN**

*Mémoire présenté et soutenu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de
l'Enseignement Secondaire Deuxième Grade (DI.P.E.S. II)*

Par :

BATEKI Etienne Flavien

Titulaire du DI.P.E.S. I et Licencié ès Physiques

Matricule : 10Y756

Sous la direction de :

Dr. NJINGTI NFOR

Chargé de Cours

Membres de jury

Président : BEGUIDE BONOMA, Maître de Conférences (ENS Yaoundé)

Rapporteur : NJINGTI NFOR, Chargé de Cours (ENS Yaoundé)

Examineur : POKAM MBA Wilfried, Chargé de cours (ENS Yaoundé)

Année académique 2018-2019

DEDICACE

A toute ma famille

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, Nous tenons à remercier Dieu le tout-puissant pour avoir fait ombrage aux éléments qui échappent au contrôle de l'existence humaine et qui pouvaient entraver l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements :

- ✓ Au Dr NJINGTI NFOR, Chargé de Cours à l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de Yaoundé et directeur de notre mémoire, qui a eu la lourde responsabilité de nous initier à ce travail de recherche et qui nous a toujours témoigné de sa disponibilité ;
- ✓ Au Doctorant SEUTCHE Jean Calvin, pour sa disponibilité, ses suggestions et son apport à l'utilisation de l'outil informatique ;
- ✓ Aux honorables membres du jury de soutenance, pour l'honneur qu'ils nous font en examinant ce travail ;
- ✓ A tous les enseignants du département de physique de l'ENS de Yaoundé ;
- ✓ A tous mes camarades de la 5^{ème} année de la filière Physique de l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé et particulièrement à monsieur HAMAN Robert et Mlle TSAGUE Cathy avec qui nous constituons une équipe de travail.

Nous ne saurons jamais achever ce travail délicat sans rendre un vibrant hommage à :

- ✓ Mes parents : TEHNA Jacques moïse et NGO BATEKI Augusta pour leur soutien de toute nature ;
- ✓ Mes grand-mère et arrière-grand-mère : NGO BATEKI Salomé et Mme Veuve BATEKI Anne, pour leur soutien moral et spirituel ;
- ✓ Mes tantes : Mme veuve WONJU Augustine et DJEMIS Pélagie Odile, pour leur soutien ;
- ✓ Mes oncles : MATJABI Jules Michel et HELL Zachée pour leurs encouragements ;
- ✓ Ma fille BATEKI Augustine Vénus, l'une de mes sources de motivation.

Que le Très-Haut vous comble de ses grâces.

TABLE DE MATIERE

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DE MATIERE	iii
RESUME	vi
ABSTRACT	vii
LISTE DES ABREVIATIONS, DES ACRONYMES ET DES SIGLES	viii
NOMENCLATURE DES SYMBOLES PHYSIQUES UTILISES	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE	4
1.1- Introduction	4
1.2- Puits à eau	4
1.2.1- Définition	4
1.2.2- Catégories de puits	4
1.3- Notion de température	7
1.4- Loi de propagation de la chaleur dans le sol	7
1.5- Principaux facteurs influant sur la température d'un puits	9
1.5.1- Facteurs influant sur la température à la surface du sol	9
1.5.2- Paramètres thermophysiques du sol	10
1.5.3- Profondeur du sol et la saison	10
1.6- Energie géothermique	13
1.6.1- Quelques notions de géologie	13
1.6.2- Définition et témoins de l'existence de l'énergie géothermique	13
1.6.3- Origine de l'énergie géothermique	14
1.6.4- Typologie et usage de la géothermie	15

1.6.5- Sites à fort potentiel géothermique	16
1.6.6- Mécanismes d'exploitation d'énergie géothermique	16
1.6.7- Principales grandeurs géothermiques	18
1.6.8- Avantages, inconvénients, et limites de la géothermie.....	19
1.6.9- Exploitation géothermique dans le monde	20
1.7- Système géothermique	21
1.7.1- Composants essentiels d'un système géothermique et leurs fonctions	21
1.7.2- Principaux éléments d'une PAC : principe général de fonctionnement.....	25
1.7.3- Coefficient de Performance de la pompe à chaleur : le CoP	26
1.8- Présentation du quartier Oyom-Abang : zone d'étude	26
1.8.1- Cadre géographique du quartier Oyom-Abang	27
1.8.2- Cadre pédologique et géologique du quartier Oyom-Abang	28
1.8.3- Cadre hydrographique et climatologique du quartier Oyom-Abang.....	28
1.9- Conclusion	29
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES DE L'ETUDE.....	30
2.1- Introduction.....	30
2.2- Population visée par l'étude.....	30
2.3- Matériel utilisé pour l'étude.....	30
2.3.1- Thermomètre infrarouge Laser	30
2.3.2- GPS.....	32
2.3.3- Fil à plomb.....	33
2.3.4- Décamètre	33
2.3.5- Application Convertisseur de coordonnées.....	34
2.3.6- Logiciel Microsoft Excel	34
2.3.7- Logiciel Surfer	35
2.3.8- Feuille de calcul ÖWAV	36
2.4- Méthodes de l'étude expérimentale.....	37
2.4.1- Méthode de collecte des données	37
2.4.2- Méthode de traitement des données expérimentales.....	39
2.5- Méthode de l'étude analytique	41
2.5.1- Technique de dimensionnement d'un échangeur géothermique.....	41
2.5.2- Modèle de systèmes géothermiques considérés	41
2.5.3- Description du domicile témoin	42

2.5.4- Bilan thermique du système	43
2.6- Conclusion	47
CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE L'ETUDE.....	48
3.1- Introduction.....	48
3.2- Présentation et discussion des résultats de l'étude expérimentale	48
3.2.1- Tris à plat.....	49
3.2.2- Tris croisés	51
3.2.3- Discussion des résultats de l'étude expérimentale	54
3.3- Présentation et discussion des résultats de l'étude analytique.....	56
3.3.1- Résultat du dimensionnement du système géothermique	56
3.3.2- Comportement thermique du système géothermique réalisé.....	56
3.3.3- Flux géothermique de la zone	57
3.3.4- Discussion des résultats de l'étude analytique.....	58
3.4- Conclusion	58
CHAPITRE 4 : INTERET DE L'ETUDE SUR LE SYSTEME EDUCATIF.....	59
4.1- Introduction.....	59
4.2- Intérêt général de l'étude.....	59
4.3- Intérêt didactique de l'étude.....	60
4.4- Fiche pédagogique.....	61
4.4.1- Invariants de la fiche pédagogique	61
4.4.2- Elaboration d'une fiche pédagogique type.....	61
4.5- Conclusion	63
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	64
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE	66
ANNEXES	69

RESUME

L'étude que nous présentons dans ce mémoire porte sur la variation des températures des puits du quartier Oyom-Abang-Yaoundé et son implication dans la recherche de l'énergie géothermique au Cameroun. L'objectif principal est de contribuer à la recherche de la résolution du problème énergétique en cherchant le type de géothermie facilement exploitable dans la zone choisie en particulier, et au Cameroun en général. L'atteinte de cet objectif a nécessité une étude expérimentale pour déterminer la température des puits et les facteurs explicatifs de sa variation. Ensuite, sur la base des températures de la zone, une étude analytique a permis de faire une simulation pour prévoir la capacité d'une sonde géothermique judicieusement choisie, à satisfaire à la demande d'énergie exprimée par un foyer témoin.

Il ressort de ces travaux qu'en deçà de 30 m de profondeur, la température du sol d'Oyom-Abang varie très peu. Cette légère variation s'explique en partie par la profondeur des puits et les conditions aérothermiques de la zone.

La puissance thermique théorique que l'on peut soustraire par mètre de profondeur du sol dans la zone d'Oyom-Abang est estimée à 43 W. Cependant avec les conditions de l'étude, le sous-sol a pu générer une puissance linéaire de 101 W/m pour satisfaire à une demande de 11 kW exprimée par trois habitations abritant 15 personnes dans la zone d'étude, rien qu'en forant à 41 m. Ce résultat est un indicateur significatif du potentiel géothermique de la zone d'étude. Toutes les températures enregistrées ont été inférieures à 30°C, ce qui nous amène à affirmer qu'en se limitant aux profondeurs enregistrées lors de notre étude, le sous-sol d'Oyom-Abang est favorable à l'exploitation géothermique très basse énergie. Cette énergie peut être utilisée par les populations de ce quartier pour produire de l'eau chaude sanitaire, réchauffer les pièces humides de la maison, ou en refroidir d'autres en saison sèche.

Mots clés :

Puits, température, géothermie, études expérimentale et analytique, Intérêt didactique.

ABSTRACT

The study that we present in this thesis deals with the variation of the temperatures of the wells of the Oyom-Abang-Yaoundé district and its implication in the research of the geothermal energy in Cameroon. The main objective is to contribute to the search for the resolution of the energy problem by looking for the type of easily exploitable geothermal energy in the selected area in particular and in Cameroon in general. The achievement of this objective required an experimental study to determine the temperature of the wells and explanatory factors of its variation. Then, on the basis of the zone's temperatures, an analytical study made it possible to make a simulation to predict the capacity of a well-chosen geothermal probe, to satisfy the energy demand expressed by a control home.

Its appears from these studies that below 30 m depth, the soil temperature of Oyom-Abang varies little. This slight variation can be explained in part by the depth of the wells and the aerothermal conditions in the area.

The theoretical thermal power that can be subtracted per meter of soil depth in the Oyom-Abang zone is estimated at 43 W. However, with the conditions of the study, the subsoil of the area could generate a linear power of 101 W/m to satisfy a demand of 11 kW expressed by tree homes sheltering 15 people, just by drilling 41 m. This result is a significant indicator of the geothermal potential of the area. All the recorded temperatures were below 30°C, which leads us to affirm that by limiting ourselves to the depths recorded during our study, the subsoil of Oyom-Abang is favorable to the geothermal exploitation very low energy. This energy can be used by the population of this district to produce domestic hot water, warm humid rooms in the house, or cool others in the dry season.

Keywords :

Well, temperature, geothermal, experimental and analytical studies, didactic interest

LISTE DES ABREVIATIONS, DES ACRONYMES ET DES SIGLES

APC-ESV : Approche Par les Compétences avec Entrée par les Situations de Vie.

(Plan) **CHIS** : Plan du cours Centré sur les Habilités d'Investigation Scientifique.

DIPES II : Diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire de 2^{ème} grade.

ECS : Eau Chaude Sanitaire.

ENR : Energies renouvelables.

ENS : Ecole Normale Supérieure.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GPS : Global Positioning System c'est-à-dire Système de Géolocalisation par Satellite.

GVC : Global Village Cameroon.

INSA : Institut National des Sciences Appliquées.

IR : Infrarouge

LAP : Laboratory of Applied Physics soit Laboratoire de Physique Appliquée.

LAP/ENS/UY1 : Laboratoire de Physique Appliquée de l'ENS de l'Université de Yaoundé 1.

LCD : Liquid Crystal Display c'est-à-dire Ecran à cristaux liquides.

MIS : Microgeneration Installation Standard ou Norme d'installation de la microgénération.

ÖWAV : Österreichischer Wasser und Abfallwirtschaftsverband ou union autrichienne professionnelle des entreprises de l'eau et des déchets.

PAC : Pompe à chaleur.

PACG : Pompe à chaleur géothermique

SGV : Sonde Géothermique Verticale.

SIA : Société suisse des Ingénieurs et Architectes.

UTM : Universal Transverse Mercator c'est-à-dire Transverse Universelle de Mercator.

WGS 84 : World Geodetic System 1984 c'est-à-dire Système Géodésique Mondial version 1984.

NOMENCLATURE DES SYMBOLES PHYSIQUES UTILISES

Symbole	Désignation	Unité
A	Amplitude des oscillations de température à la surface du sol	[K]
b	Nombre de bain par personne par jour	-
C	Chaleur massique de l'eau	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
$C_{p_{sol}}$	Chaleur massique du sol	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
E_{bes1}	Besoin énergétique journalier en ECS	[Wh/jour]
E_{bes2}	Besoin journalier en chauffage des penderies	[W]
E_{bes} ou P_{charge}	Besoin énergétique journalier total du foyer témoin	[W]
G	Coefficient thermique de la construction.	[W.m ⁻³ .°C ⁻¹]
$L_{réf}$	Longueur de référence de la SGV	[m]
$L_{réelle}$	Longueur réelle de la SGV	[m]
n	Nombre de branche de la sonde	-
$P_{élec}$	Puissance électrique qu'il faut fournir à la PAC.	[W]
P_{froid}	Puissance spécifique que le capteur doit récupérer du sous-sol	[W]
p	Nombre de personnes par appartement	-
p'	Nombre de penderies par appartement	-
$Q_{l(réelle)}$	Puissance maximale linéaire réelle soutirable du sol	[W/m]
$Q_{l(réf)}$	Puissance maximale linéaire de référence soutirable du sol	[W/m]
T_{fluide}	Température du fluide caloporteur circulant dans la sonde	[K]
T_0	Température à la surface du sol	[K]
T_{moy}	Température moyenne annuelle à la surface du sol	[K]
t_0	Jour de l'année où la température est maximale	[h]
T_{sol}	Température du sol	[K]
t	Temps en heure	[h]

t'	Durée d'écoulement de l'eau durant un bain	[s]
v	Volume d'eau utilisé pour un bain par personne	[m ³]
v'	Volume occupé par une penderie	[m ³]
V	Volume total d'eau utilisé par le foyer en une journée	[m ³]
V'	Volume total d'espace occupé par les penderies de la cité	[m ³]
z	Coordonnée verticale	[m]
z_{lim}	Profondeur d'influence aérothermique	[m]
α	Diffusivité thermique du sol	[m ² /h]
θ_{ext}	Moyenne des températures minimales 2018	[K]
θ_{int}	Moyenne des températures maximales 2018	[K]
θ_i	Température de l'eau non chauffée	[K]
θ_f	Température de l'ECS	[K]
ρ_e	Masse volumique de l'eau	[kg.m ⁻³]
ρ_{sol}	Masse volumique du sol	[kg/m ³]
Δt	Durée de fonctionnement de la PACG	[heure]
ΔT	Différence de température du sol	[K]
$\Phi_{géo}$	Flux géothermique	[W.m ⁻²]
λ	Conductivité thermique de la roche	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1- Photo d'un puits creusé [LAP/ENS/UY1, 2018]	xiii
Figure 1.2- Réalisation d'un puits creusé [4]	5
Figure 1.3- Procédé de réalisation d'un puits foncé [4]	6
Figure 1.4- Photo d'un puits foré [25]	6
Figure 1.5- Isothermes [LAP/ENS/UY1, 2018]	7
Figure 1.6- Schéma du transfert de chaleur dans le sol [12]	8
Figure 1.7- Evolution de la température du sol en fonction de la profondeur [6]	11
Figure 1.8- Evolution de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol d'argile [7]	12
Figure 1.9- Evolution de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol de sable humide [7]	12
Figure 1.10- Structure détaillée de la terre [26].....	13
Figure 1.11- Contribution des différentes sources de chaleur dans le flux géothermique [13]	14
Figure 1.12- Diverses applications de la géothermie [14] et [15]	15
Figure 1.13- Schéma illustratif des modes de transfert de chaleur dans le sol [27]	17
Figure 1.14- Procédé hydrothermal d'extraction de la chaleur souterraine [28] et [LAP].....	18
Figure 1.15- Production journalière mondiale des types d'énergie en 2012 [29]	20
Figure 1.16- Production journalière mondiale des ENR en 2012 [29]	20
Figure 1.17- Huit principaux pays producteurs d'électricité géothermique dans le monde en 2018 [30] ..	21
Figure 1.18- Capteurs horizontaux [15] et [31]	22
Figure 1.19- Capteurs verticaux [15] et [31]	22
Figure 1.20- Capteur sur nappe phréatique [31].....	23
Figure 1.21- Pieux géothermiques [32]	23
Figure 1.22- Emetteurs géothermiques [15]	24
Figure 1.23- Schéma d'une PAC [33].....	24
Figure 1.24- Principe général de fonctionnement d'une PAC [15].....	25
Figure 1.25- Localisation géographique du quartier Oyom-Abang [Google maps].....	27
Figure 1.26- Evolution annuelle de la température de l'air du quartier Oyom-Abang [34].....	28
Figure 2.1- Thermomètre IR Laser de marque Etekcity modèle 800 [LAP/ENS/UY1, 2018]	31

Figure 2.2- GPS de marque GARMIN [LAP/ENS/UY1, 2018]	32
Figure 2.3- Fil à plomb [LAP/ENS/UY1, 2018]	33
Figure 2.4- Décamètre [LAP/ENS/UY1, 2018]	33
Figure 2.5- Capture d'écran de la boîte de dialogue d'accueil du convertisseur de données.....	34
Figure 2.6- Capture d'écran de l'interface d'accueil du logiciel Excel 2016.....	35
Figure 2.7- Capture d'écran de l'interface du logiciel Surfer 2011	36
Figure 2.8- Capture d'écran de la feuille de calcul ÖWAV [35].....	37
Figure 2.9- Ecran d'affichage d'un thermomètre Laser [LAP/ENS/UY1, 2018].....	38
Figure 2.10- Ecran d'affichage des positions d'un GPS en mode UTM [36].....	39
Figure 2.11- Capture d'écran de la boîte de dialogue du logiciel Surfer 11 [LAP/ENS/UY1, 2018]	41
Figure 2.12- Puissance linéaire soutirable par mètre de sonde en fonction de la conductivité thermique du sol pour le cas de référence [22].....	45
Figure 3.1- Evolution des températures des puits du quartier Oyom-Abang [LAP/ENS/UY1, 2018]	49
Figure 3.2- Evolution de la profondeur des puits du quartier Oyom-Abang [LAP/ENS/UY1, 2018]	50
Figure 3.3- Evolution de la température en fonction de la profondeur [LAP/ENS/UY1, 2018]	51
Figure 3.4- Carte isothermique 2D [LAP/ENS/UY1, 2018]	52
Figure 3.5- Carte isothermique 2D [LAP/ENS/UY1, 2018]	53
Figure 3.6- Courbe et diagramme de charge du foyer en fonction de la température du sol [LAP/ENS/UY1, 2018]	57
Figure 4.1- Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique [37].....	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1- Contribution des différentes enveloppes dans la production de la chaleur [13].....	14
Tableau 2.2- Quelques caractéristiques techniques du système extrait d’une fiche signalétique [15]	42
Tableau 2.3- Caractéristiques d’appel énergétique du domicile témoin en 24 heures [LAP/ENS/UY1, 2018].....	42
Tableau 3.4- Tableau de mesure des données collectées sur les puits [LAP/ENS/UY1, 2018].....	48
Tableau 3.5- Carte matricielle des puits [LAP/ENS/UY1, 2018]	54
Tableau 3.6- Résultats du dimensionnement de l’installation géothermique à réaliser [LAP/ENS/UY1, 2018].....	56

INTRODUCTION GENERALE

Le souci de développement économique et industriel a été marqué ces dernières années par une société énergétivore caractérisée par une demande en énergie de plus en plus croissante. Cette demande a occasionné une raréfaction des ressources fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) et a engendré ce qui a été appelé « problème énergétique » (Pierre Gadonneix, 2012). Il a fallu dès lors trouver des solutions alternatives, d'où l'intérêt suscité par les énergies renouvelables et particulièrement la géothermie.

En effet, l'émanation en surface de la matière chaude, provenant des profondeurs de la terre, à travers le volcanisme, l'hydrothermalisme et l'exploitation minière, a amené les hommes à envisager l'exploitation d'une forme d'énergie due à la chaleur, appelée énergie géothermique. Le sol apparaît dès lors comme un réservoir d'énergie qui lui provient d'une part de la chaleur dégagée par le centre de la terre et d'autre part des échanges thermiques avec l'extérieur [11]¹. L'énergie géothermique appartient ainsi à la famille des énergies dites renouvelables c'est-à-dire une énergie non polluante et dont le taux de génération est équivalent ou supérieur au taux de sa consommation. Lorsque le contexte géologique y est favorable, l'énergie géothermique est facilement exploitable et peut être utilisée pour des besoins électriques, de refroidissement et de chauffage.

Dans certains pays du monde, la technologie d'exploitation de cette forme d'énergie est suffisamment avancée ce qui n'est pas le cas des pays subsahariens en général et du Cameroun en particulier. Cependant, une récente étude menée en 2012, sur les énergies renouvelables par l'Organisation Non Gouvernementale, Global Village Cameroon (GVC) indique des possibilités de développement de ce type d'énergie notamment dans les zones de Ngaoundéré, du mont Cameroun et du mont Manengoumba [20]. Par ailleurs la formation géologique de Yaoundé constituée de failles, de diaclases, de décrochements [2], nous a paru intéressante au regard de la littérature développée sur les sites à forts potentiels géothermiques. Ce sont donc l'épuisement des ressources fossiles, le désir de répondre aux besoins énergétiques tout en préservant l'environnement, qui ont été des éléments fondateurs du choix de notre thème de recherche

¹ Extrait du document 11 de la bibliographie

intitulé « Etude de la variation des températures des puits du quartier OYOM-ABANG-YAOUNDE et son implication dans la recherche de l'énergie géothermique au CAMEROUN ».

Ce thème dévoile l'importance de la température sur l'exploitation de la géothermie. Des études académiques similaires très récentes ont été menées dans les quartiers Emana et Obili-Scalom par MIYOPDJI NJIOGOUA en 2017 et MANE FOTO en 2018, dans le cadre de leurs travaux de recherche en vue de l'obtention du DIPES II. Cependant, force a été de constater que leurs investigations aboutissaient à des résultats différents notamment en ce qui concerne la variation de la température en fonction de la profondeur. Leurs résultats par ailleurs se focalisaient essentiellement sur l'aspect de la variation des températures.

La principale préoccupation interrogative de notre étude dès lors est celle de savoir : Comment contribuer à la recherche de la résolution du problème énergétique ?

Cette question centrale peut se décliner en deux questions de recherche à savoir :

- Quels sont les facteurs susceptibles de provoquer la variation des températures des puits ?
- Quels sont les effets de la variation des températures des puits sur les besoins énergétiques d'une habitation ?

Pour répondre à ces questions de recherche, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- La variation de la température des puits dépend de leur profondeur.
- Cette variation dépend de la position géographique des puits.
- La variation de la température conditionne l'usage de l'énergie qui en découle.

De manière générale, l'objectif visé par cette étude est de contribuer à la résolution du problème énergétique (rareté et pollution) grâce à une énergie renouvelable.

Spécifiquement parlant, l'étude vise à :

- Vérifier l'effectivité de la variation des températures des puits d'Oyom-Abang et connaître les facteurs explicatifs de cette variation.
- Estimer la puissance thermique que l'on peut extraire du sous-sol pour répondre à un besoin énergétique quelconque.

Pour atteindre nos objectifs d'étude, nous opterons pour deux approches. L'une expérimentale et l'autre analytique. L'approche expérimentale passera par une phase de terrain qui nous amènera à collecter les données sur 22 puits sélectionnés au hasard dans la zone d'étude. L'approche analytique quant à elle permettra, à partir des relations mathématiques, de faire une

simulation pour apprécier l'adéquation entre le gisement géothermique du sous-sol d'Oyom-Abang et les besoins énergétiques d'un foyer témoin.

Cette étude s'articulera autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire s'intéressera à la revue de la littérature sur les puits ensuite les facteurs susceptibles de faire varier leur température. Il évoquera également les généralités sur l'énergie géothermique, fera une présentation de la zone d'étude, et accordera une importance particulière à la pompe à chaleur géothermique.

Le deuxième chapitre sera consacré à la méthodologie et au matériel utilisé pour l'étude. Il y sera présenté : les instruments de mesure et d'analyse des données, un module de PACG et le domicile témoin qui servira à la simulation.

La présentation des différents résultats obtenus et une discussion de leur validité seront au cœur du chapitre 3.

Enfin, le chapitre 4 montrera l'intérêt que suscite notre sujet de recherche sur le système éducatif.

REVUE DE LA LITTERATURE

1.1- Introduction

Pour satisfaire leurs besoins énergétiques tout en se souciant du développement durable, l'homme a jugé nécessaire de capitaliser la chaleur provenant des profondeurs terrestres, et ceci, par la réalisation des puits. Les profondeurs atteintes et les températures rencontrées au cours de cette opération conditionnent fortement le type d'énergie exploitée.

Nous verrons dans ce chapitre le dispositif qui nous permettra d'effectuer l'étude des températures souterraines, un rappel sur les paramètres qui affectent l'évolution de la température au sein de ces puits sera fait. On évoquera dans un troisième temps la notion de géothermie ainsi que l'outil principal permettant son exploitation en l'occurrence la PACG ; la présentation du quartier Oyom-Abang comme zone d'étude nous permettra de clore le chapitre.

1.2- Puits à eau

1.2.1- Définition

Un *puits à eau* est une cavité verticale pratiquée dans le sol 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. L'eau peut être remontée à la surface du sol, soit à l'aide d'un récipient, soit grâce à une pompe manuelle ou motorisée.

1.2.2- Catégories de puits

Selon la profondeur de la nappe aquifère, du volume d'eau et de la pureté recherchée, de la rapidité d'exécution et du coût de l'opération, on distingue trois grandes catégories de puits : les puits creusés, les puits foncés, et les puits forés communément appelés forages.

1.2.2.1- Puits creusés ou puits ordinaires

Creuser un puits est la technique la plus simple, la plus ancienne, et la moins coûteuse. Une pioche, une pelle, un seau et une corde suffisent pour réaliser cet ouvrage. Cette technique est manuelle et nécessite que le sol soit relativement facile à labourer et la nappe phréatique peu profonde. Les puits creusés doivent être cuvelés c'est-à-dire renforcés et protégés intérieurement par un matériau adéquat afin d'empêcher l'éboulement de terres. Ce type de puits est illustré par les figures 1.1 et 1.2 ci-dessous.

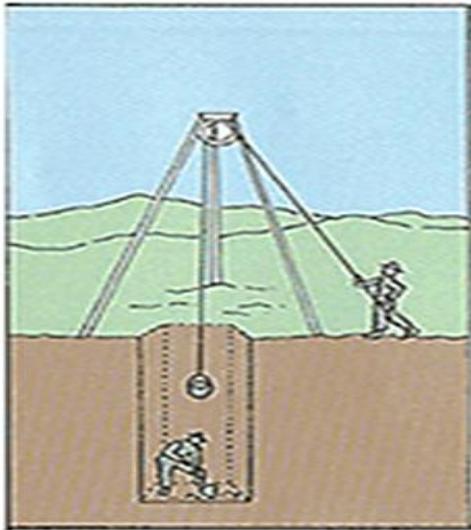


Figure 1.2- Réalisation d'un puits creusé [4]



Figure 1.1- Photo d'un puits creusé [LAP/ENS/UY1, 2018]

Pour des raisons de sécurité du puisatier, les puits creusés dépassent rarement 40 m. Cependant, creusés à une faible profondeur, ils risquent d'être contaminés, et peuvent s'assécher plus facilement que les autres types de puits.

1.2.2.2- Puits foncés ou puits à pointe filtrante

Ce sont des puits creusés, par enfoncement direct d'un tube perforé à bout pointu, jusqu'à la nappe phréatique, dans un sol meuble ou de dureté moyenne. Une crépine, est très souvent fixé à la partie inférieure de la conduite pour filtrer le sable et les autres particules afin de les empêcher de pénétrer dans le puits pendant l'opération. On peut faire varier le diamètre du puits, et sa profondeur peut alors atteindre 100 m.

Ces puits sont moins exposés à la contamination et à l'assèchement. L'eau peut être remontée à la surface à l'aide d'un appareil de levage (poulie, roue, treuil) ou d'une pompe. Le procédé de réalisation du puits foncé est illustré par la figure 1.3 ci-dessous :

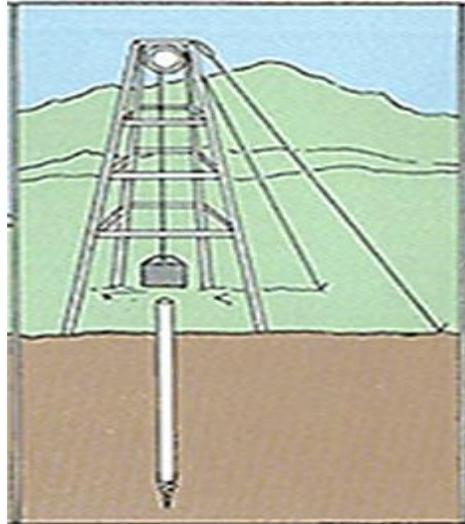


Figure 1.3- Procédé de réalisation d'un puits foncé [4]

1.2.2.3- Puits forés ou forages

Un *puits foré* est un trou cylindrique creusé dans le sol, par percussion ou par l'action rotative d'un outil coupant, tournant autour d'un axe vertical et qui brise et mâche les roches dont les résidus sont remontés le plus souvent par des boues à la surface. Forer un puits est une technique facile, rapide, mais couteuse. La photo ci-dessous est celle d'un puits foré.



Figure 1.4- Photo d'un puits foré [25]

Ces puits sont souvent équipés d'une pompe, ont un diamètre qui varie de 5 cm à 1,5 m et peuvent atteindre jusqu'à 300 m de profondeur, ce qui permet d'avoir une eau de bonne qualité.

1.3- Notion de température

La *température* désigne une grandeur physique qui caractérise le degré d'agitation des particules dans un corps. Elle se mesure à l'aide d'un thermomètre et selon la méthode thermométrique. La température d'un corps renseigne sur le degré de chaleur ou de froid au sein de ce corps. L'échelle de température la plus utilisée est le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$) mais elle peut aussi s'exprimer en Kelvin (K) ou en degré Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). L'ensemble des points ayant une même température à un instant donné décrit une courbe appelée *isotherme*. La figure ci-dessous présente quelques isothermes ; sur l'isotherme 5, on a $T_{5A} = T_{5B} = T_{5C}$.

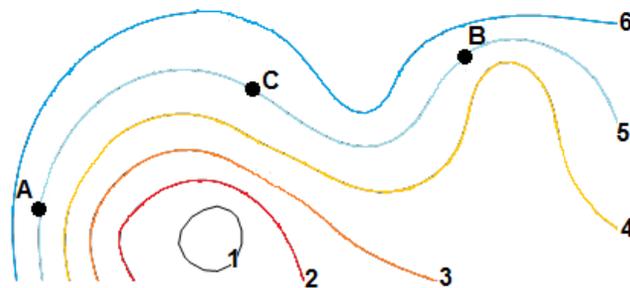


Figure 1.5- Isothermes [LAP/ENS/UY1, 2018]

1.4- Loi de propagation de la chaleur dans le sol

Il est possible de calculer la température du sous-sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quel jour de l'année. Le modèle de sol que nous considérons est celui d'un milieu semi-infini homogène, caractérisé par des propriétés thermophysiques constantes. Le transfert de chaleur dans le sol provoqué par la température de l'air ambiant et du rayonnement solaire incident est vertical et unidirectionnel.

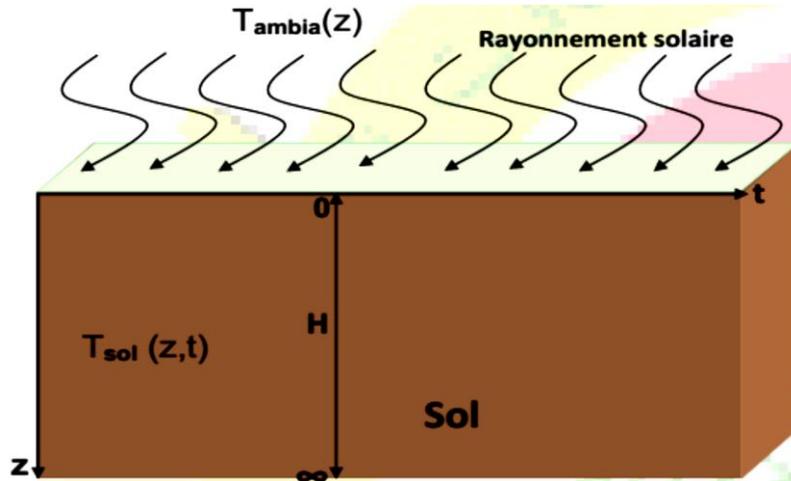


Figure 1.6- Schéma du transfert de chaleur dans le sol [12]

L'équation de propagation de la chaleur régissant les transferts de chaleur par conduction dans le sol est basée sur la loi de Fourier. L'expression de cette équation est donnée par [12] :

$$\frac{\partial^2 T_{sol}(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_{sol}(z,t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

Avec :

$T_{sol}(z, t)$: température du sol à la date t (en heure) et à la profondeur z (en m).

$\alpha = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} C_{psol}}$: diffusivité thermique du sol.

λ_{sol} : conductivité thermique du sol

ρ_{sol} : masse volumique du sol.

C_{psol} : chaleur massique du sol.

La résolution de l'équation (1.1) conduit à la solution :

$$T_{sol}(z, t) = T_{moy} + A \cdot \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{8760\alpha_{sol}}}\right) \cos\left[\frac{\pi}{8760\alpha_{sol}}\left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{8760}{\pi\alpha_{sol}}}\right)\right] \quad (1.2)$$

C'est cette équation (1.2) qui permet de connaître la température du sous-sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quel jour de l'année.

T_{moy} : température moyenne annuelle à la surface du sol, elle représente aussi la température à la profondeur d'influence aérothermique du sous-sol.

t_0 : temps de l'année où la température est maximale, en heures [h].

$A = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$: amplitude des oscillations (variations) de température à la surface du sol en °C.

8760 = 365×24 : la période en heure des variations de température sur une année.

Au-delà de la profondeur d'influence aérothermique (z_{lim}), il faut tenir compte du réchauffement d'origine interne de la terre ; d'où la nécessité d'ajouter à la relation (1.2) le terme $T_{géo}(z)$ en $^{\circ}C$ donné par [7] :

$$T_{géo}(z) = \textit{gradientgéothermique} \times (z - z_{lim})$$

Il importe de noter que ce modèle de sol ne tient pas compte de certaines spécificités du lieu de mesure de la température, notamment la température de l'air extérieur et du flux de rayonnement global incident mais aussi de l'humidité du sol, de la couverture du sol par la végétation, de la vitesse du vent, et de l'humidité relative moyenne de l'atmosphère.

1.5- Principaux facteurs influant sur la température d'un puits

L'équation de la chaleur (1.1) et sa solution (1.2) montrent clairement que la température à une certaine profondeur dépend de la température à la surface du sol, de la diffusivité thermique du sol, et de la profondeur. Ceci nous permet de définir les facteurs susceptibles de modifier la température du sol ; on peut citer les facteurs liés à la météorologie, au relief, à la végétation, à la nature du sol, à la profondeur et à la saison.

1.5.1- Facteurs influant sur la température à la surface du sol

➤ Facteurs météorologiques

L'ensoleillement, les nuages, le vent, et la composition des gaz contenus dans l'air sont des facteurs qui modifient la température du sol [24].

Un nuage épais diminue davantage la quantité de rayonnement solaire arrivant au sol. Les gaz présents dans l'atmosphère peuvent emprisonner la chaleur pour réchauffer ensuite le sol (effet de serre). Le vent quant à lui pourra déplacer les masses d'air et de nuages ce qui agit sur le rayonnement qui parvient au sol dans un lieu précis.

➤ Facteurs liés au relief et à la végétation

La végétation peut agir comme isolant en protégeant le sol des températures extrêmes qui modifient les taux de transmission de chaleur. La température en profondeur peut donc être volontairement modifiée par un revêtement de la surface du sol. Par ailleurs, l'orientation des pentes a également un impact sur la température du sol car il a été observé qu'une pente exposée au sud a une température supérieure à celle d'une pente donnant sur le nord [24].

➤ **Albédo du sol** [1]

Il traduit le pouvoir réfléchissant de la surface du sol ; il renseigne sur la proportion de rayonnement solaire absorbé à la surface terrestre et transmis vers les profondeurs.

1.5.2- Paramètres thermophysiques du sol

Ils sont représentés dans l'équation de la chaleur par la diffusivité thermique (α) du sol. Cette *diffusivité* représente l'aptitude du sol à transmettre de la chaleur à une certaine vitesse. Elle dépend de la capacité thermique volumique (C_{vol}) du sol et de sa conductivité thermique. Nous rappelons son expression ci-dessous :

$$\alpha = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol}C_{Psol}} \quad (1.3)$$

La *conductivité thermique* du sol traduit sa capacité à laisser circuler la chaleur.

La *capacité thermique volumique* du sol représente sa capacité à emmagasiner la chaleur par rapport à son volume. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'un mètre cube de sol. Ce paramètre joue un rôle inverse à celui de la conductivité thermique et est donné par [12] :

$$C_{vol} = \rho_{sol}C_{Psol} \quad (1.4)$$

La capacité thermique volumique et la conductivité thermique dépendent des constituants du sol (eau, air, matières organique et minérale). Elles augmentent avec la teneur en eau du sol. En effet, un sol humide transmet plus facilement sa chaleur ou sa fraîcheur d'un point à un autre [1]. Il est donc possible de modifier la température en profondeur par simple arrosage de la surface du sol. La matière minérale (roche) quant à elle, présente une conductivité plutôt faible.

1.5.3- Profondeur du sol et la saison

Plus on s'enfonce dans le sol, plus la température et la pression augmente [8]. En effet, lorsque l'on creuse dans le sol, la température augmente de 0,3°C tous les 10 m. Mais il s'agit là d'une moyenne, d'une part, et d'autre part, une étude menée par Mohamed SAADEDDINE en 2013 sur cette évolution montre que cela n'est pas valable dans les premiers mètres. La figure 1.7 ci-dessous illustre les résultats de son étude qui présente l'évolution annuelle des températures en fonction de la profondeur.

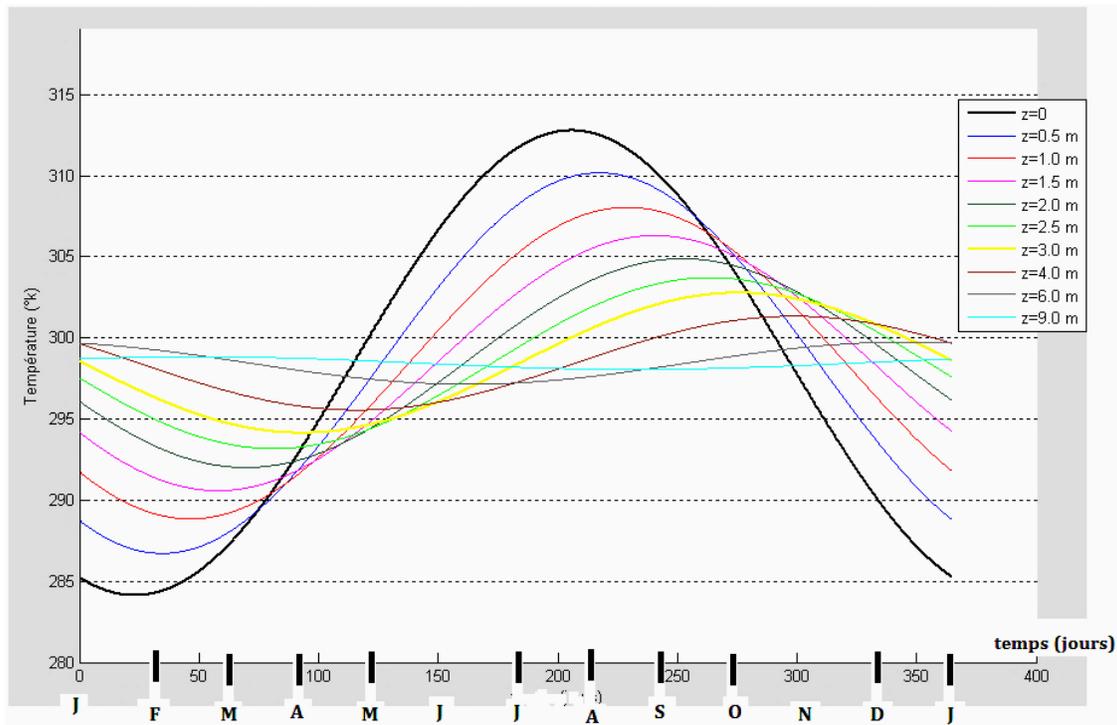


Figure 1.7- Evolution de la température du sol en fonction de la profondeur [6]

Il ressort de son étude qu'en période froide, la température augmente dans les premiers mètres avec la profondeur et tend vers une température limite (298 K dans la zone de Biskra en Algérie) qui est constante tout au long de l'année. Cette température limite est donc supérieure à celle de la surface du sol. En saison sèche, les températures diminuent dans les premiers mètres avec la profondeur et tendent vers la même température limite.

Ainsi, la température de l'air a un impact sur la température à la surface du sol, qui à son tour influence de proche en proche celle de la profondeur. On considère, selon les régions, que la température limite est atteinte entre -5m et -15m de profondeur. Cette profondeur est appelée *profondeur d'influence aérothermique*. Il s'agit de la profondeur critique au-delà de laquelle les variations de température saisonnières n'ont plus d'impact sur la température du sol [8, 9 et 10]. La figure ci-dessus montre qu'elle se situe autour de 9,5 m pour une température d'environ 24°C.

Les résultats précédents ont été confirmés par YOUSEF BELLOUFI en 2017 dans la région de Biskra au cours de ses travaux de thèse ; il avait alors montré que cette évolution dépend aussi de la nature du sol. Son étude, réalisée sur les sept premiers mètres avait été menée sur deux types de sol. Les courbes des figures 1.8 et 1.9 ci-dessous illustrent les résultats obtenus :

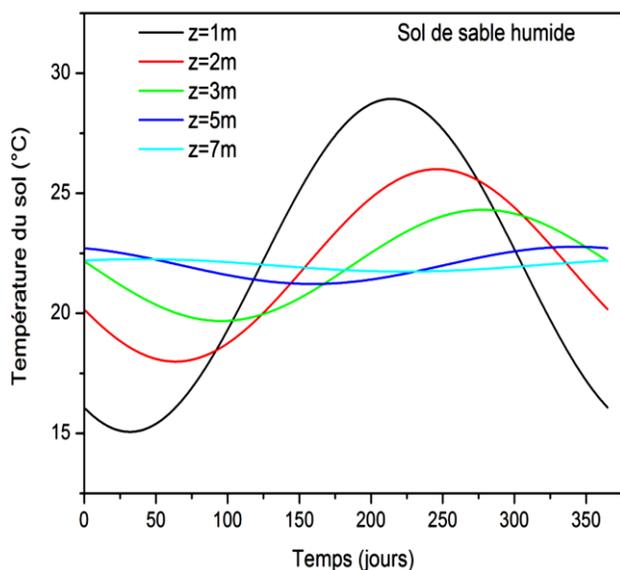


Figure 1.9- Evolution de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol de sable humide [7]

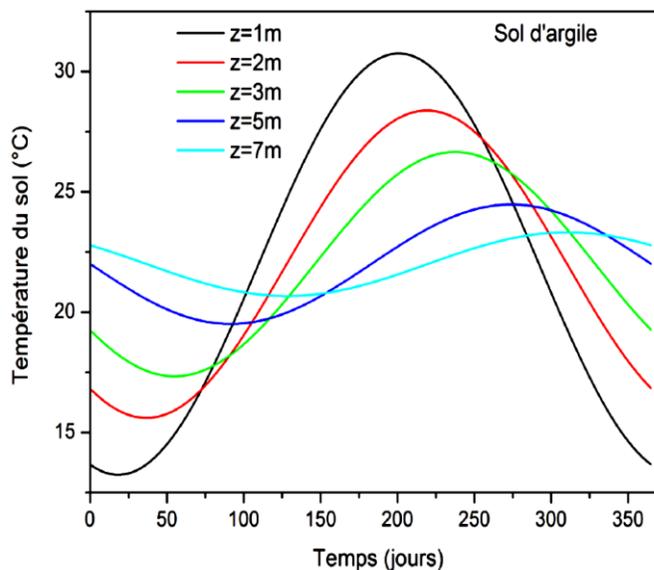


Figure 1.8- Evolution de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol d'argile [7]

De manière générale, ces études montrent que la température dans les premiers mètres de profondeurs est fortement influencée par la saison et la nature du sol. Si la surface du sol va se réchauffer et se refroidir presque instantanément, les variations de température vont mettre plus de temps à modifier la température du sol en profondeur.

Pour ce qui est des températures diurnes et nocturnes, durant la saison sèche, lors des fortes chaleurs, le sol n'a pas le temps de se refroidir du fait de sa faible teneur en eau (faible conductivité), il conserve ainsi quasiment la même température le jour que la nuit. En période froide, le sol perd quelques degrés, tout comme la nuit (Antoine Chatelain, 2018)

En fonction du niveau de profondeur, la température du sol va être influencée par deux types d'apport thermique [11] :

- Par le réchauffement dû à la chaleur dégagée par le centre de la terre et aux éléments radioactifs du sol. Cependant, l'apport de cette source de chaleur dans les premiers mètres de profondeur représente à peine 0,01% et sera donc négligé en surface (Wikipédia, 2018).
- Par l'apport de chaleur dû à l'atmosphère et au rayonnement solaire.

1.6- Energie géothermique

1.6.1- Quelques notions de géologie

L'étude de la structure de la terre révèle qu'elle est constituée de trois enveloppes concentriques : le noyau, le manteau et la croûte terrestre, comme l'illustre la figure ci-dessous.

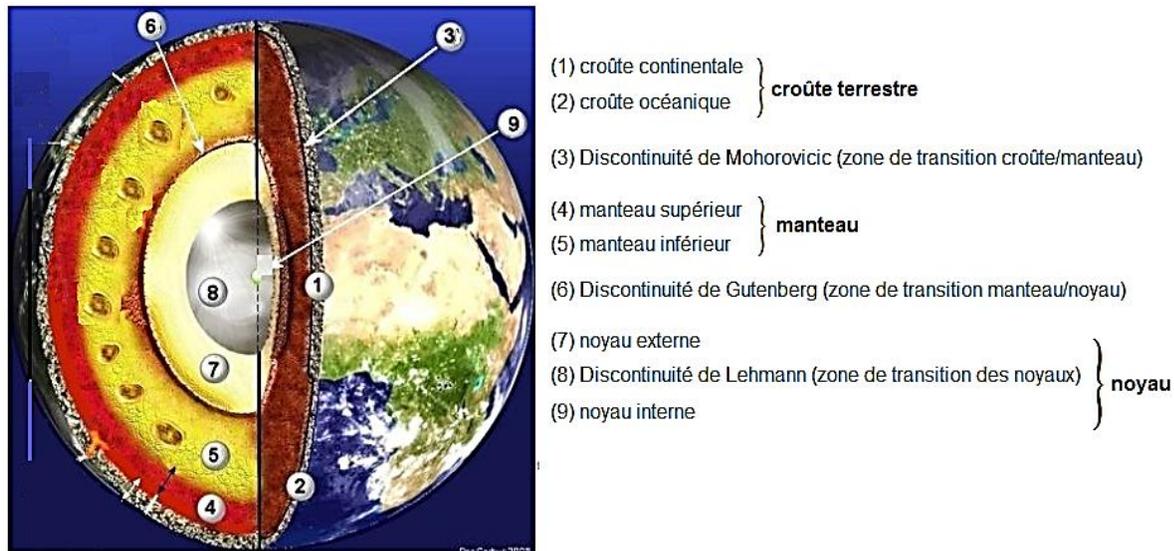


Figure 1.10- Structure détaillée de la terre [26]

La croûte terrestre et la couche rigide du manteau supérieur forment ensemble une couche solide appelée *lithosphère*. La lithosphère n'est pas un bloc ; elle est divisée en plusieurs plaques qui peuvent lentement se déplacer les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère sous l'effet des courants de convection. Ce sont ces courants qui fracturent la lithosphère en plaques et les déplacent : ce phénomène de déplacement des plaques de la lithosphère est appelé *tectonique des plaques*.

L'action des courants de convection peut s'observer au sein d'une même plaque ou entre deux plaques, et peut conduire le cas échéant à des formations géologiques (faille, subduction...) qui déterminent le type de géothermie favorable à la zone où l'on se trouve.

1.6.2- Définition et témoins de l'existence de l'énergie géothermique

Si *l'énergie géothermique* est définie comme l'énergie due à la chaleur provenant du sous-sol, la *géothermie* quant à elle est un procédé qui permet d'extraire cette chaleur et de l'exploiter

afin de la transformer en énergie. Trois observations majeures ont été à la base de l'idée selon laquelle le sous-sol est un gigantesque réservoir de chaleur.

- Les éruptions volcaniques : expulsion en surface, de gaz et de roches en fusion provenant du sous-sol à une température supérieure à 900°C.
- L'hydrothermalisme : expulsion de l'eau des profondeurs à une température supérieure à 100°C.
- L'exploitation des mines : Plus une mine est profonde, plus les mineurs ont chauds (35 à 40°C).

1.6.3- Origine de l'énergie géothermique

La chaleur contenue dans le sol provient soit des conditions atmosphériques en surface (c'est l'aérothermie), soit de la terre elle-même (géothermie). L'apport de l'aérothermie étant négligeable au-delà des premiers mètres du sol, nous nous focaliserons sur la 2^{ème} catégorie.

La chaleur interne du sol est issue de trois sources diverses (figure 1.11 ci-dessous).

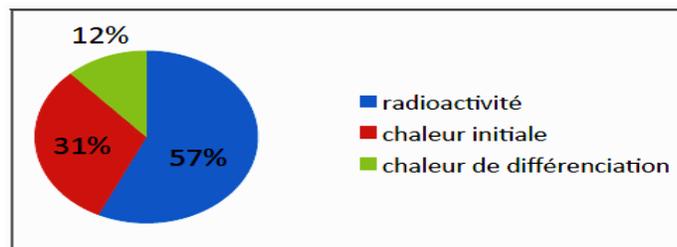


Figure 1.11- Contribution des différentes sources de chaleur dans le flux géothermique [13]

- La principale source d'énergie est la *désintégration des éléments radioactifs* contenus dans les roches ; il s'agit principalement de l'Uranium, du Thorium et du Potassium. C'est dans le manteau que la plus grande partie de la chaleur est libérée comme le présente le tableau 1.1 ci-dessous.

Tableau 1.1- Contribution des différentes enveloppes dans la production de la chaleur [13]

	Masse (kg)	Flux de chaleur libérée (W)	Pourcentage de la contribution
Croûte continentale	$1,38 \times 10^{22}$	$5,6 \times 10^{12}$	24,4%
Croûte océanique	$6,9 \times 10^{21}$	$1,2 \times 10^{12}$	5,2%
Manteau	$3,7 \times 10^{24}$	$16,1 \times 10^{12}$	70,3%
Noyau	$2,32 \times 10^{24}$	$1,6 \times 10^{10}$	0,1%

- La *chaleur initiale* due au refroidissement des matériaux terrestres profonds qui libèrent ainsi l'énergie accumulée pendant l'accrétion du globe.
- La *chaleur de différenciation* : c'est l'énergie libérée par le changement d'état des matériaux terrestres profonds, au niveau du noyau (à travers les mécanismes de cristallisation du noyau externe liquide en solide)

1.6.4- Typologie et usage de la géothermie

En fonction de la température, on distingue quatre types de géothermie [15] :

- La *géothermie très basse énergie* : exploitée pour les températures inférieures à 30°C, elle est fortement influencée par les conditions atmosphériques en surface ; elle nécessite généralement l'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) qui peut modifier la température.
- La *géothermie basse énergie* : pour les températures comprises entre 30° et 100°C. La chaleur qui en résulte peut-être exploitée directement c'est-à-dire sans PAC.
- La *géothermie moyenne énergie* : concerne les températures variant entre 100° et 180°C.
- La *géothermie haute énergie* : exploitée pour les températures supérieures à 180°C.

A chaque type de géothermie, correspond une utilisation particulière (voir figure 1.12).

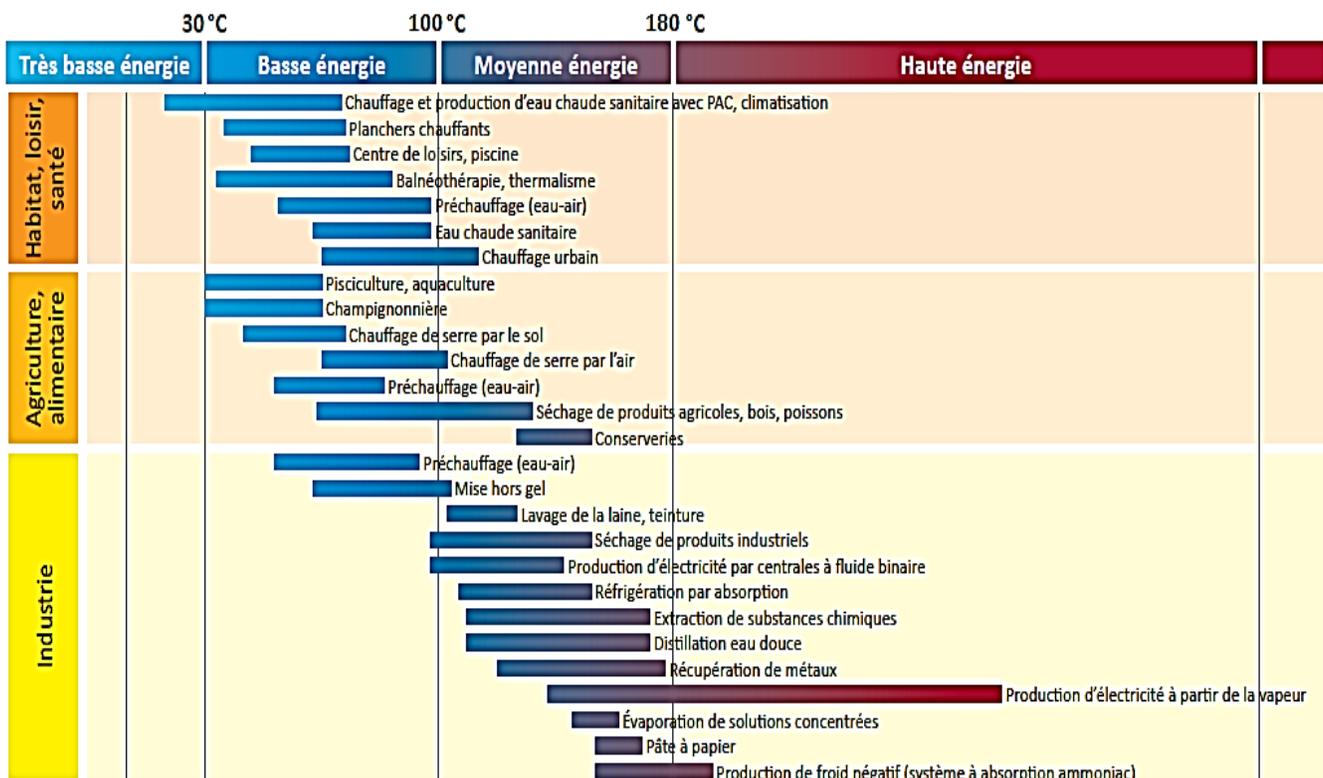


Figure 1.12- Diverses applications de la géothermie [14] et [15]

1.6.5- Sites à fort potentiel géothermique

L'énergie géothermique peut être exploitée dans divers contextes géologiques. Les zones potentiellement favorables à cette exploitation sont des zones à forte activité magmatique où l'on peut atteindre 150°C entre 1500 et 3000m, il s'agit :

- Des *zones de dorsale* : telle l'Islande, île volcanique située sur la dorsale atlantique ;
- Des *zones de subduction* associées à l'arc volcanique : Japon, Nouvelle Zélande, ...
- Des *zones de point chaud* : Islande, Açores, Hawaï, Sud-ouest du Cameroun, Cap-Vert, ...
- Des *zones de rift* : Le rift d'Afrique (la ligne du Cameroun), l'Alsace...

Toutefois, des zones à faible activité magmatique, dans lesquelles il est possible d'obtenir des températures inférieures à 90°C entre 500 et 4000m, peuvent être exploitées telles que :

- Les *bassins sédimentaires* : Le bassin de la Bénoué, le bassin Parisien, du Québec, ...
- Les *zones de subduction* liées au prolongement de la plaque lithosphérique froide : Guadeloupe, ...
- Les *zones de faille*.

La géothermie est exploitable dans tous les sols et même dans les zones géologiquement très stables comme les cratons (Congo) ; tout dépend donc de l'usage que l'on voudrait en faire.

1.6.6- Mécanismes d'exploitation d'énergie géothermique

1.6.6.1- Mode de transfert de chaleur dans le sous-sol

La chaleur produite dans les profondeurs de la terre est transférée vers la surface selon deux modes : la conduction et la convection (figure 1.13)

- *La conduction* : c'est le transfert de chaleur qui s'effectue entre 2 régions d'un même solide, ou entre 2 solides en contact, et qui se réalise sans déplacement global de matière. La propagation de la chaleur peut s'effectuer selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.
- *La convection* : c'est le transfert de chaleur qui s'effectue avec transport de matière dans un fluide. Il se produit entre un fluide et une paroi. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide ce transfert peut être *naturel* ou *forcé*.

La chaleur se propage des zones chaudes vers les zones froides cependant, dans le cas d'une convection forcée, la propagation peut s'effectuer dans les deux sens. Le transfert par convection est beaucoup plus efficace (rapide) que la conduction.

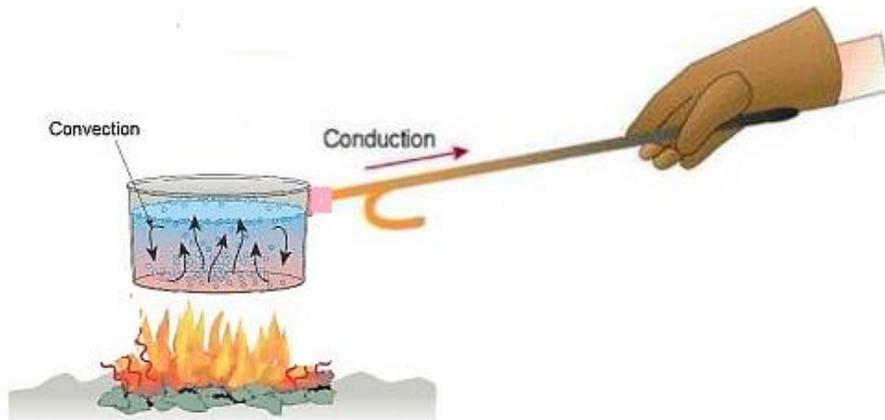


Figure 1.13- Schéma illustratif des modes de transfert de chaleur dans le sol [27]

1.6.6.2- Procédés d'extraction de la chaleur du sous-sol

Il existe 03 procédés permettant d'extraire la chaleur souterraine.

- *Le thermopompage* : pour des températures inférieures à 30°C, l'énergie géothermique peut être exploitée au moyen de thermopompes qui prélèvent et amplifient la chaleur de la terre ou des eaux souterraines à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 100 m.
- *Le procédé hydrothermal* : il consiste à accéder directement, par des forages d'exploitation, à des gisements naturels d'eau chaude piégée dans des roches magasins poreuses appelées aquifères.

L'eau chaude (55°C à 85°C) de l'aquifère est remontée à haut débit par une pompe à eau jusqu'à la centrale géothermique où un échangeur thermique prélève sa chaleur et la renvoie dans l'aquifère à travers un puits de réinjection. La chaleur prélevée est soit conduite dans les habitations grâce au réseau de distribution urbain et des sous-stations pour des besoins de chauffage et de refroidissement, soit transférée à un circuit qui actionne une turbine laquelle fait tourner un alternateur qui produit de l'électricité. Ce procédé est illustré par la figure ci-dessous.

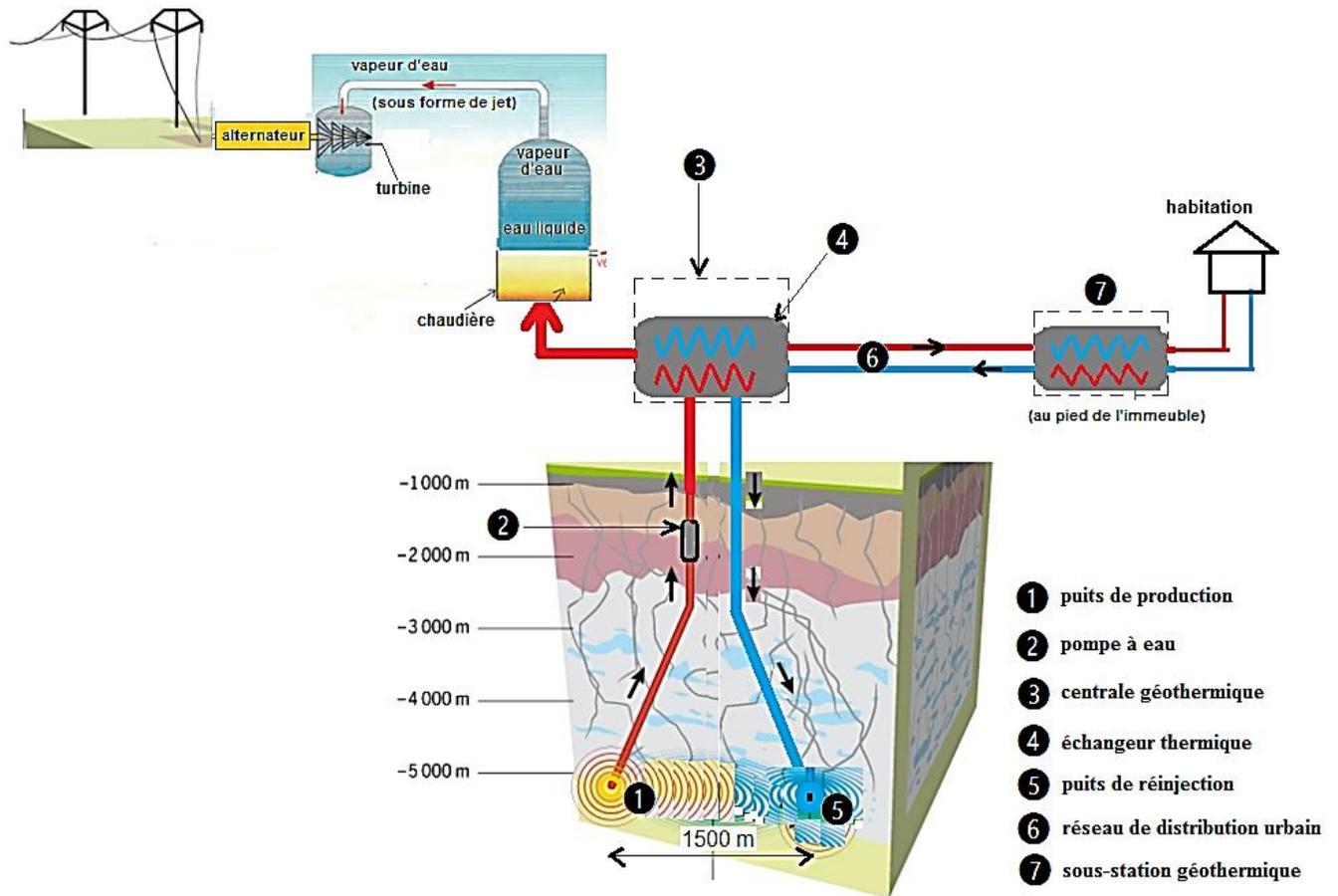


Figure 1.14- Procédé hydrothermal d'extraction de la chaleur souterraine [28] et [LAP]

En l'absence de sources thermales, on peut recourir au procédé pétrothermal.

- *Le procédé pétrothermal ou système géothermique stimulé* : il permet d'exploiter l'énergie géothermique à partir des roches sèches et chaudes contrairement au procédé précédent où la roche était gorgée d'eau chaude. L'idée est de créer artificiellement un puits d'exploitation, un réservoir géothermique dans un massif cristallin, bref une sorte d'aquifère.

1.6.7- Principales grandeurs géothermiques

Deux grandeurs physiques permettent d'évaluer l'énergie libérée dans les profondeurs terrestres. Il s'agit du gradient géothermique et du flux géothermique.

- *Le gradient géothermique* : C'est l'augmentation de la température souterraine en fonction de la profondeur. Ce gradient varie en fonction des régions du globe terrestre. Il est élevé en zones volcaniques (environ 100°C/100m) et faible dans les régions dites stables (3°C/100m) [23].

- Le flux géothermique $\Phi_{géo}$ correspond à la quantité de chaleur traversant une unité de surface par unité de temps. Le flux de chaleur en un point M de la terre dépend du gradient géothermique et de la conductivité thermique des roches sous-jacentes. Il est donné par [3] :

$$\Phi_{géo} = \text{conductivité thermique} \times \text{gradient géothermique} \quad (1.5)$$

Le flux présente des valeurs différentes selon la région étudiée. Ce flux est en moyenne de 80 W/m², un peu moins sous les continents et les zones de subduction, et un peu plus sous les océans au niveau des dorsales [13].

1.6.8- Avantages, inconvénients, et limites de la géothermie

1.6.8.1- Avantages de l'énergie géothermique

- L'énergie est disponible 24h/24h toute l'année (Christian BOISSAVY, 2016) ;
- Elle permet le chauffage et le refroidissement des routes pour éviter d'abîmer le bitume (Mélanie TARAVANT, 2016) ;
- Elle est exploitable dans tous les pays et sous tous les climats (énergie universelle et indépendante) ;
- Elle est inépuisable à l'échelle humaine (énergie renouvelable) ;
- Elle préserve l'environnement en limitant les émissions de déchets (énergie propre) ;
- A l'exception de l'hydroélectricité et du biogaz, le coût de revient d'un kilowattheure d'énergie électrique à base de la géothermie est nettement plus avantageux comparé aux autres sources d'énergie [19].
- Pour ce qui est de l'impact sur l'environnement, seule l'hydraulique fait mieux que la géothermie. Le bilan énergétique de la géothermie profonde est affecté surtout par la consommation de métaux lors du forage ; les autres sources d'énergie ne sont pas toujours favorables au climat, rejettent beaucoup de poussières fines, ont une forte demande en matériaux plus ou moins toxiques [19].

1.6.8.2- Inconvénients et limites liés à la géothermie

- Les pompes à chaleur utilisées fonctionnent grâce à des fluides potentiellement polluants qui ont un pouvoir réchauffant de l'ordre de 2000 fois celui du CO₂ (Raphael CLAUSTRE, 2016) ; cependant on peut minimiser les risques de fuite en prenant des mesures de sécurité.

- La géothermie profonde nécessite l'aménagement des sites des centrales et des forages qui fissurent les roches ce qui provoque un déséquilibre du sous-sol, d'où le risque de microséisme.
- Le coût de l'investissement pour l'exploitation de l'énergie géothermique est élevé.
- Le fonctionnement des PAC nécessite l'utilisation de l'énergie électrique.
- Le coût de maintenance est élevé car le matériel de l'installation se périmé relativement vite et peut nécessiter un renouvellement tous les 6 ou 7 ans.
- Les zones volcaniques sont généralement des zones protégées.

1.6.9- Exploitation géothermique dans le monde

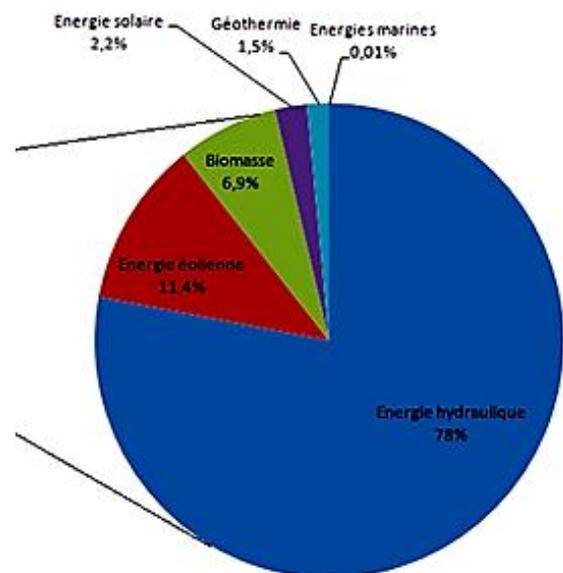
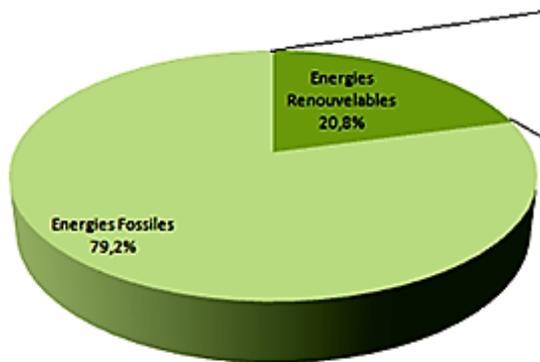


Figure 1.17- Production journalière mondiale des types d'énergie en 2012 [29]

Figure 1.20- Production journalière mondiale des ENR en 2012 [29]

La contribution des ENR dans la production journalière mondiale d'énergie en 2012 est représentée sur la figure 1.16 ci-dessus ; La même année, l'énergie géothermique quant à elle se classait comme la 5^e ENR la plus utilisée (figure 1.15 ci-dessus).

L'énergie géothermique est exploitée dans une vingtaine de pays dans le monde. Le classement en 2018 est dominé par les USA, suivi des Philippines. Le Kenya occupe le 8^e rang de ce classement et demeure avec l'Ethiopie les seuls producteurs d'énergie géothermique en Afrique [30].

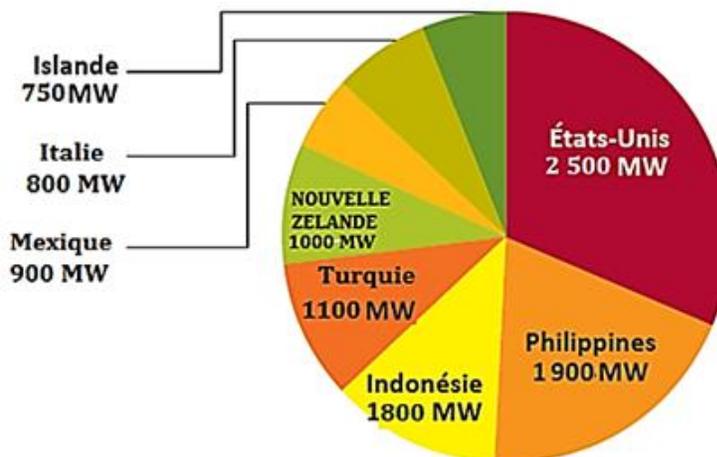


Figure 1.23- Huit principaux pays producteurs d'électricité géothermique dans le monde en 2018 [30]

Malgré tout le potentiel dont dispose le Cameroun, cette forme d'énergie tarde véritablement à décoller et ne se situe encore qu'à sa phase de recherche. Selon le rapport du GVC (en 2012), il s'agit d'un problème de volonté politique parce que les décideurs n'ont pas encore bien cerné les avantages d'une diversification de nos ressources énergétiques.

1.7- Système géothermique

1.7.1- Composants essentiels d'un système géothermique et leurs fonctions

Un système géothermique a 03 fonctions : le captage, le pompage, et l'émission de la chaleur. Chacune de ces fonctions est assurée par les trois composants essentiels du système à savoir : les capteurs, la PACG, et les émetteurs.

1.7.1.1- Captage de la chaleur

Le prélèvement de la chaleur du sous-sol se fait à l'aide d'un *échangeur géothermique* appelé *capteur géothermique*. Il s'agit d'un réseau de tubes en polyéthylène haute densité ou en cuivre gainé enterrés dans le sol et dans lesquels circule en boucle, un fluide caloporteur qui récupère la chaleur du sol. Le captage peut se faire horizontalement ou verticalement.

- **Le captage horizontal au sol** : ce mode de captage est composé de capteurs enterrés horizontalement dans le sol (figure 1.18). C'est le moins couteux mais également le moins performant car les capteurs sont enterrés à faible profondeur (entre 0,6 m et 1,2 m). La surface de captage préconisée varie entre 1,5 et 2 fois la surface chauffée de l'habitation.

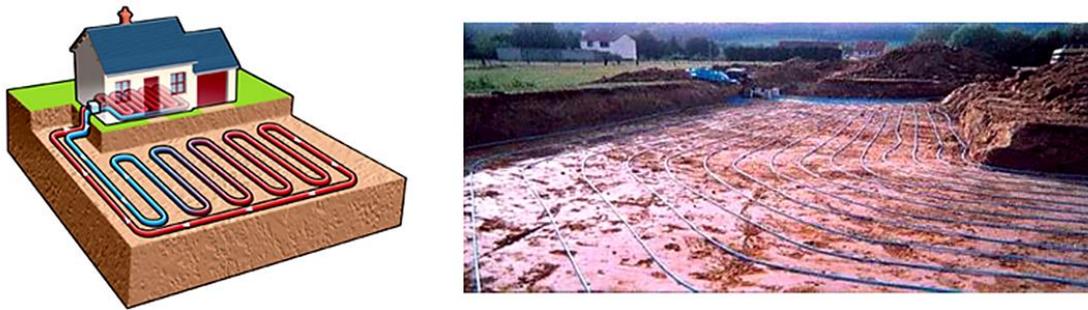


Figure 1.26- Capteurs horizontaux [15] et [31]

- **Le captage vertical au sol** : il se fait à l'aide des sondes géothermiques enterrées dans le sol à une profondeur pouvant atteindre 200 m. Ces capteurs peuvent être simples ou disposés en corbeille (figure 1.19). Le coût élevé de ce mode de captage se justifie par les frais de réalisation du forage ; cependant, il est performant et ne nécessite pas une grande surface au sol.

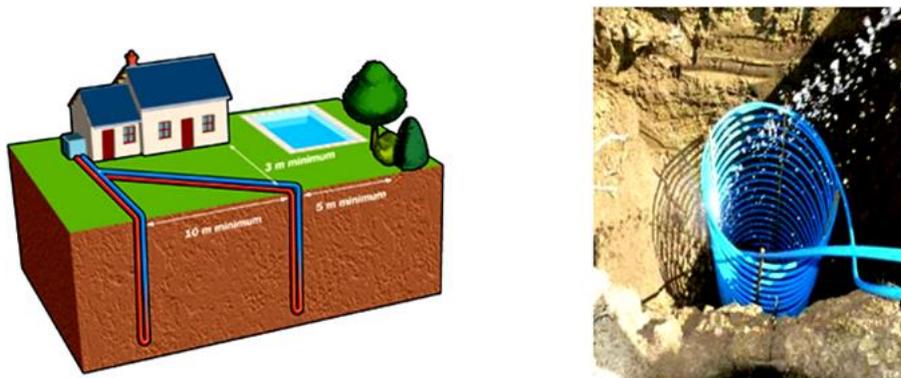


Figure 1.29- Capteurs verticaux [15] et [31]

- **Le captage vertical sur fondation** : Les capteurs sont installés verticalement au cœur des fondations des bâtiments, d'où leur nom de pieux géothermiques (figure 1.21).

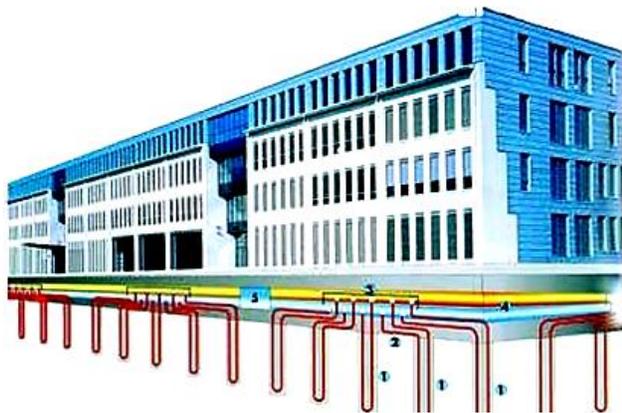


Figure 1.35- Pieux géothermiques [32]

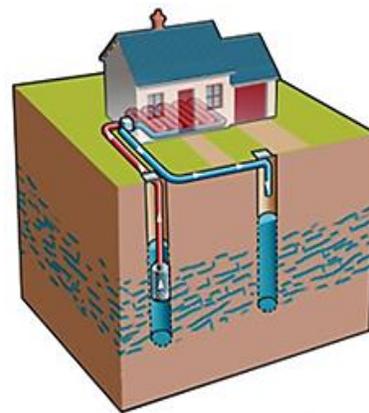


Figure 1.32- Capteur sur nappe phréatique [31]

- **Le captage vertical sur nappe phréatique** : les capteurs sont enterrés dans le sol à une grande profondeur (moins de 100 m) jusqu'à ce qu'ils plongent dans une nappe d'eau souterraine. A la différence des 03 premiers modes, la boucle n'est pas fermée, car l'eau prélevée dans la nappe est, soit réinjectée dans la même nappe à partir d'un deuxième forage, soit rejetée dans une rivière, un plan d'eau ou un réseau d'eaux pluviales après qu'on y ait prélevé les calories nécessaires (figure 1.20).

1.7.1.2- Emission ou absorption de la chaleur

Afin de transmettre la chaleur ou le froid à l'habitat, l'utilisation d'émetteurs est indispensable (figure 1.22). Les émetteurs de chaleur adaptés à la géothermie sont :

- **Le plancher chauffant à fluide** : Il s'agit d'un réseau de tuyaux implantés sous la dalle et à l'intérieur duquel circule un fluide chauffé ou refroidi par la PAC. Ils occupent une surface importante et diffusent par rayonnement une chaleur douce dans toute la pièce.
- **Le plafond et le mur chauffant à fluide** : Le principe est identique à celui du plancher chauffant sauf qu'ici les tuyaux sont implantés respectivement sur le plafond, ou sur le mur.
- **Le ventilo convecteur** : il fonctionne comme le plafond chauffant à la seule différence qu'il est équipé d'un ventilateur qui permet de souffler sur le rayonnement de chaleur afin de vite chauffer la pièce. Il occupe une petite surface d'où le recours au ventilateur.

- **Les radiateurs à basse température à eau** : ils permettent soit d'évacuer la chaleur d'un objet pour éviter sa surchauffe (via un fluide qui y circule), soit de chauffer un espace. Ils opèrent par convection ou par rayonnement, et fonctionnent en mode irréversible.



Figure 1.38- Emetteurs géothermiques [15]

1.7.1.3- Pompage de la chaleur géothermique

Une PAC est un dispositif qui permet de prélever la chaleur et de la restituer à une température plus élevée. Les différents types de PAC se distinguent par le milieu (eau, air sol) dans lequel le capteur prélève la chaleur ; si ce milieu est le sol, la PAC est dite géothermique ou géothermale (figure 1.23)

La chaleur prélevée dans le sol par les capteurs et distribuée dans les habitations par les émetteurs est d'abord amplifiée par la PACG dans laquelle circule le *fluide frigorigène* qui demeure l'élément nécessaire pour transporter la chaleur de la source froide (capteur extérieur) à la source chaude (émetteurs)

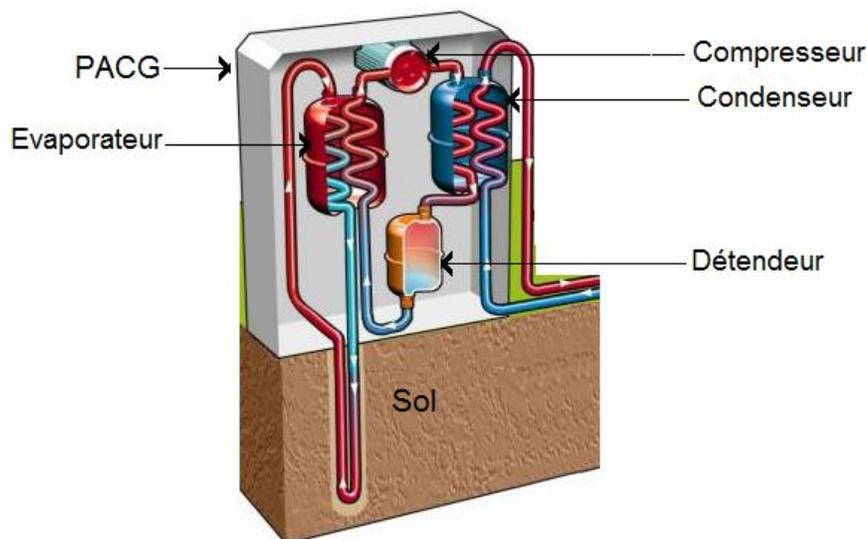


Figure 1.41- Schéma d'une PAC [33]

Il existe différents types de PACG ; la principale différence tient à la nature des fluides circulant dans les capteurs et les émetteurs de chauffage. On distingue :

- La PAC à détente directe (PAC sol/sol) : le fluide frigorigène circule dans les capteurs et l'émetteur. Cette PAC ne fonctionne pas en mode refroidissement et n'est utilisable qu'avec des capteurs horizontaux.
- La PAC à fluides intermédiaires (PAC eau glycolée/eau) : De l'eau additionnée de l'antigel (glycol) circule dans les capteurs et de l'eau circule dans les émetteurs de chauffage. Ce type de PAC est utilisable aussi bien pour les capteurs horizontaux que verticaux.
- La PAC mixte (PAC sol/eau) : Le fluide frigorigène circule dans les capteurs et de l'eau circule dans les émetteurs de chauffage. Elle n'est utilisable qu'avec des capteurs horizontaux.

1.7.2- Principaux éléments d'une PAC : principe général de fonctionnement

Comme l'indique la figure (1.23) ci-dessus, les composants indispensables d'une PAC sont : l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur. Le principe général de fonctionnement de la PAC est illustré par la figure (1.24) ci-dessous.

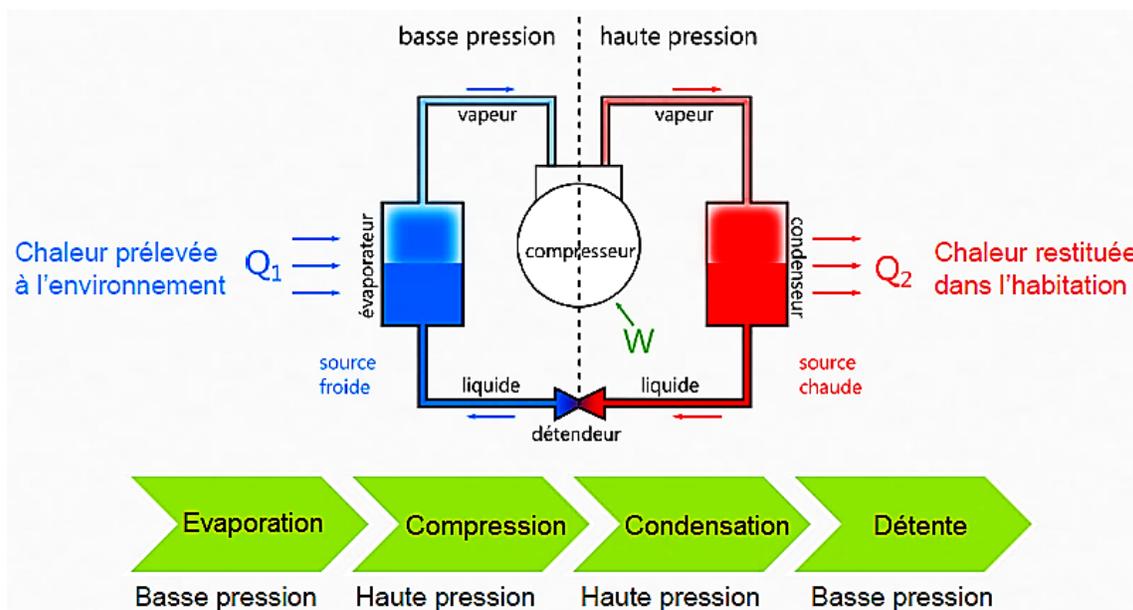


Figure 1.44- Principe général de fonctionnement d'une PAC [15]

- **L'évaporateur** : Le fluide caloporteur provenant des capteurs arrive à l'interface d'échange avec l'évaporateur de la PAC. Les calories transportées par le fluide caloporteur sont suffisantes pour évaporer le liquide frigorigène. Ce passage du fluide frigorigène de l'état liquide à l'état gazeux s'effectue avec absorption de la chaleur du liquide caloporteur par le fluide frigorigène.
- **Le compresseur** : C'est l'organe essentiel de la PAC dont le rôle est d'aspirer le fluide frigorigène à l'état gazeux puis de le comprimer, ce qui permet d'élever sa température et sa pression. Il est généralement alimenté, soit par un moteur électrique, soit entraîné par un moteur thermique (avec possibilité de récupérer de la chaleur). Le moteur et le compresseur sont montés ensemble dans le même bloc.
- **Le condenseur** : Il joue un rôle inverse à celui de l'évaporateur. Le fluide provenant des émetteurs arrive à l'interface d'échange avec le condenseur de la PAC où il absorbe les calories transportées par le fluide frigorigène (gazeux) qui se liquéfie par la même occasion. L'évaporateur et le condenseur sont les échangeurs de chaleur.
- **Le détendeur** : Le fluide frigorigène, à l'état liquide, arrive au détendeur qui fait chuter sa température et sa pression.

En mode refroidissement, les rôles des échangeurs thermiques sont permutés.

1.7.3- Coefficient de Performance de la pompe à chaleur : le CoP

Le CoP est défini comme le rapport entre la puissance thermique utile (P_{charge}) et la puissance électrique (P_{elec}) utilisée par la PAC pour faire fonctionner son compresseur. La puissance thermique utile correspond à la chaleur que la PAC restitue à la charge (source chaude ou bâtiment). Le CoP est toujours supérieur à 1 et est donné par [15] :

$$CoP = \frac{P_{charge}}{P_{elec}} \quad (1.6)$$

1.8- Présentation du quartier Oyom-Abang : zone d'étude

Nous avons porté notre choix sur le quartier Oyom-Abang pour des raisons de proximité avec notre domicile mais aussi pour interconnecter notre zone d'étude à une autre (cité verte) dans le souci de contribuer à l'établissement de la carte du flux géothermique de la ville de Yaoundé.

1.8.1- Cadre géographique du quartier Oyom-Abang

Oyom-Abang est un quartier de la région du Centre-Cameroun, localisé dans le département du Mfoudi et plus précisément dans l'arrondissement de Yaoundé 7^{ème}. Ce quartier est situé à 3,87° de latitude Nord et à 11,47° de longitude Est, à l'altitude 750 m. Il s'agit d'une zone urbaine limitée au Nord par le quartier Ekong, au Sud par les quartiers Nkolbisson et Nkolbikok, à l'Est par les quartiers Madagascar et Cité verte, et à l'Ouest par le quartier Haoussa.

La photographie ci-dessous permet de localiser géographiquement la zone d'étude.



Figure 1.47- Localisation géographique du quartier Oyom-Abang [Google maps]

1.8.2- Cadre pédologique et géologique du quartier Oyom-Abang

Le relief local de la zone d'étude est très accidenté et s'étend sur plusieurs collines hautes de quelques dizaines de mètres. Sa végétation est caractérisée par une forêt secondaire très éclaircie qui entoure l'agglomération. Comme la plupart des quartiers de Yaoundé, le sol de notre zone d'étude est rouge ferrallitique forestier classique.

Le quartier Oyom-Abang repose sur un socle ancien (gneiss). Il s'agit d'un massif rocheux très hétérogène et anisotrope, caractérisé par une certaine perméabilité fissurale due à la présence de failles, de diaclases et de décrochements [2].

1.8.3- Cadre hydrographique et climatologique du quartier Oyom-Abang

Le quartier n'est pas très riche en cours d'eau. On y rencontre néanmoins quelques sources d'eau et bas-fonds marécageux. Initialement, la zone d'étude appartient au domaine climatique de type équatorial et légèrement tempéré par l'altitude. Cependant, du fait des variations climatiques, nous relevons une certaine difficulté dans la délimitation des saisons. Nous notons tout de même une période de basse température qui s'étale de Juin à Octobre, et une seconde période relativement chaude pour le reste. Entre Janvier et novembre, la température ambiante a oscillé autour de 26,64°C, avec une température minimale de 24°C (Aout et Octobre) contre une valeur maximale de 30°C (Janvier). L'évolution de la température de Janvier à Novembre. 2018 dans le quartier Oyom-Abang est représentée ci-dessous :



Figure 1.48- Evolution annuelle de la température de l'air du quartier Oyom-Abang [34]

1.9- Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question de faire une revue de littérature sur les différents concepts abordés par le sujet. Les références consultées s'accordent à dire que la profondeur, le climat, le type de sol et les grandeurs thermophysiques sont les paramètres qui influencent la température du sous-sol. L'importance de la géothermie en tant qu'énergie renouvelable a été soulignée à travers ses usages et ses avantages parmi lesquels le chauffage, le refroidissement, l'électrification et bien d'autres. Cette énergie est profitable dans tous les sous-sol du globe terrestre mais à différents niveaux d'exploitation allant de la très basse énergie qui nécessite l'utilisation d'une PACG, à la haute énergie, favorable aux zones à forte activité magmatique. L'extraction de la chaleur se fait au moyen des forages et à travers la conduction et la convection. Le quartier Oyom-Abang, site de l'étude se présente comme une zone reposant sur un massif rocheux très hétérogène et anisotrope, caractérisé par une certaine perméabilité fissurale due à la présence de failles, de diaclases et de décrochements.

Au-delà de se familiariser aux différentes notions développées dans ce chapitre, l'une des finalités dudit chapitre était de se doter des outils servant de baromètre au regard des données expérimentales qui seront recueillies et analysées dans nos prochains chapitres.

MATERIEL ET METHODES DE L'ETUDE

2.1- Introduction

L'atteinte des objectifs visés par une étude nécessite la mobilisation d'un matériel adéquat et une approche soutenue par une démarche scientifique rigoureuse. La nôtre ayant sollicitée une démarche expérimentale et analytique, ce chapitre se chargera dans un premier temps, de présenter la démarche expérimentale qui a prévalu, depuis la présentation du matériel de travail en passant par la technique de collecte des données primaires sur le terrain jusqu'à la technique de traitement des informations recueillies. Il sera question dans un deuxième temps, au moyen des équations mathématiques simples, de présenter les éléments de calculs du potentiel géothermique de la zone d'étude.

2.2- Population visée par l'étude

Les puits du quartier Oyom-Abang ont constitué la population cible de notre étude. Pour des raisons pratiques, il était impossible de se lancer dans les opérations d'excavation afin d'étudier la variation des températures en fonction de la profondeur. Ainsi, pour le temps et les moyens alloués à l'expérience, le projet réaliste était plutôt l'utilisation des puits existants.

2.3- Matériel utilisé pour l'étude

2.3.1- Thermomètre infrarouge Laser

Un *thermomètre infrarouge* (IR) est un instrument de mesure de la température de la surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit. Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure du rayonnement de l'objet dans le domaine de l'IR. On utilise également le terme de pyromètre IR lorsqu'il s'agit de mesurer des températures élevées d'un objet ou d'un environnement (four, incendie, volcan, etc.).

La différence entre un thermomètre IR et un thermomètre de contact classique est qu'il mesure le rayonnement thermique émis et non la température elle-même.

Le thermomètre IR mesure la température par quantification de l'énergie radiative émise dans l'IR. En connaissant la quantité d'énergie émise par un objet, et son émissivité, sa température peut donc être déterminée. Schématiquement, le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'IR) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance, contrairement aux autres types de thermomètres comme les thermocouples². Ainsi il est possible de mesurer la température si l'objet est en mouvement, placé dans un champ électromagnétique, ou dans le vide.

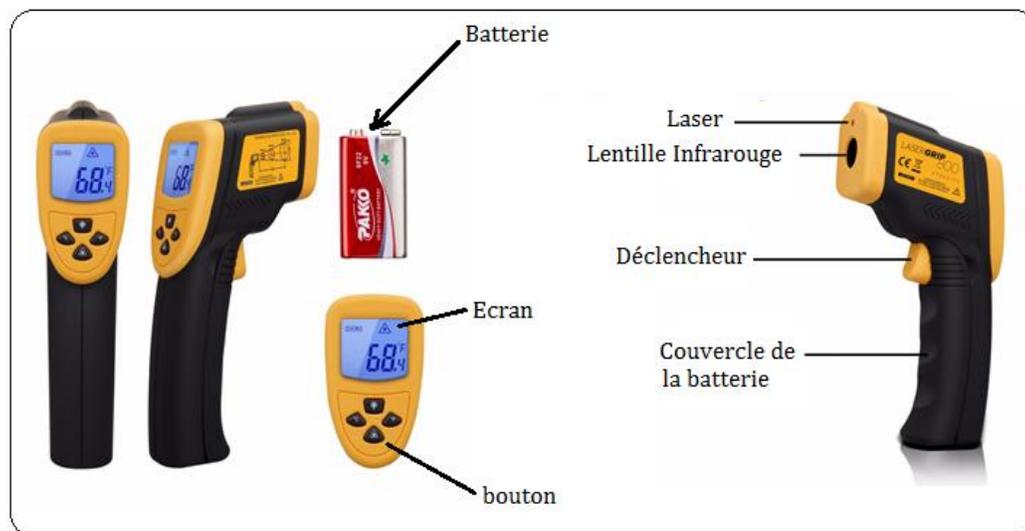


Figure 2.1- Thermomètre IR Laser de marque Etekcity modèle 800 [LAP/ENS/UY1, 2018]

Cet appareil permet d'effectuer des mesures en toute sécurité pour les objets dangereux ou inaccessibles ; il n'est pas destiné à prendre la température corporelle car une mesure à distance nécessite une surface importante de l'objet cible. L'écran LCD du thermomètre IR est un écran à lecture instantanée muni d'un système de rétroéclairage qui assure une bonne lisibilité, même dans un lieu obscur ou mal éclairé.

Les principales caractéristiques du thermomètre Laser utilisé sont les suivantes :

- Marque : Etekcity Lasergrip 800 Non-contact Digital Laser IR Infrared Thermometer, Yellow/Black Model No : Lasergrip 800
- Plage de températures mesurées : de -50°C à 750°C (-58°F à 1382°F) ;

² Thermocouples : couple de matériaux dont l'effet thermoélectrique permet de mesurer la température.

- Unité de mesure : °C ou °F ;
- Précision : $\pm 2^{\circ}\text{C}$;
- Temps de réponse : $< 500\text{ ms}$;
- Réponse spectrale : $8 - 14\ \mu\text{m}$;
- Température de fonctionnement : 0°C à 50°C ;
- Emissivité : 0,95
- Résolution : $0,1^{\circ}\text{C}/0,1^{\circ}\text{F}$.
- Alimentation : batterie standard 9 V offre 14 heures ou plus d'utilisation cumulative ;
- Arrêt automatique après 15 secondes pour augmenter la durée de la batterie ;

Ce thermomètre a été l'instrument principal pour la mesure des températures des puits.

2.3.2- GPS

Le GPS, entendu Global Positioning System, est un système de géolocalisation par satellite. Dans notre travail, nous avons utilisé un GPS de marque GARMIN pour déterminer la position géographique de chaque puits et circonscrire la zone d'étude.

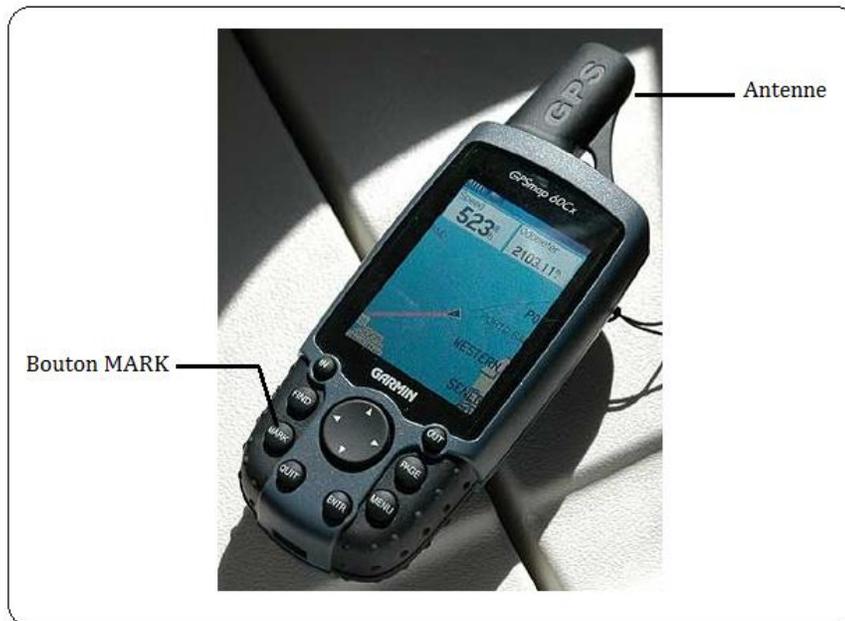


Figure 2.2- GPS de marque GARMIN [LAP/ENS/UY1, 2018]

2.3.3- Fil à plomb

Le fil à plomb est un outil constitué d'un fil lesté à l'une de ses extrémités par une masse. Il est utilisé pour obtenir des verticales ou du moins la direction de la pesanteur à un endroit précis. Dans notre étude, il nous a permis de délimiter la profondeur des puits.



Figure 2.3- Fil à plomb [LAP/ENS/UY1, 2018]

2.3.4- Décamètre

Encore appelé chevillière, c'est un instrument de mesure des longueurs réalisé à l'aide d'un ruban souple gradué. Dans cette étude, nous avons utilisé un décamètre de 50 m et il nous a permis de mesurer la longueur du fil à plomb entré dans le puits et par conséquent sa profondeur.



Figure 2.4- Décamètre [LAP/ENS/UY1, 2018]

2.3.5- Application Convertisseur de coordonnées

Le convertisseur de coordonnées est une application conçue par Éric Sibert pour être utilisé pour convertir un type de coordonnées à un autre. Dans le cadre de notre recherche, il nous a permis de convertir les distances Est et Nord d'un point du globe, en degrés décimaux. Il s'agit en fait de passer des coordonnées en projection (projection cartographique UTM qui expriment les distances), aux coordonnées géographiques (système géodésique WGS 84 donnant la latitude et la longitude d'un point). Sa boîte de dialogue d'accueil est présentée par la figure 2.5 ci-dessous.

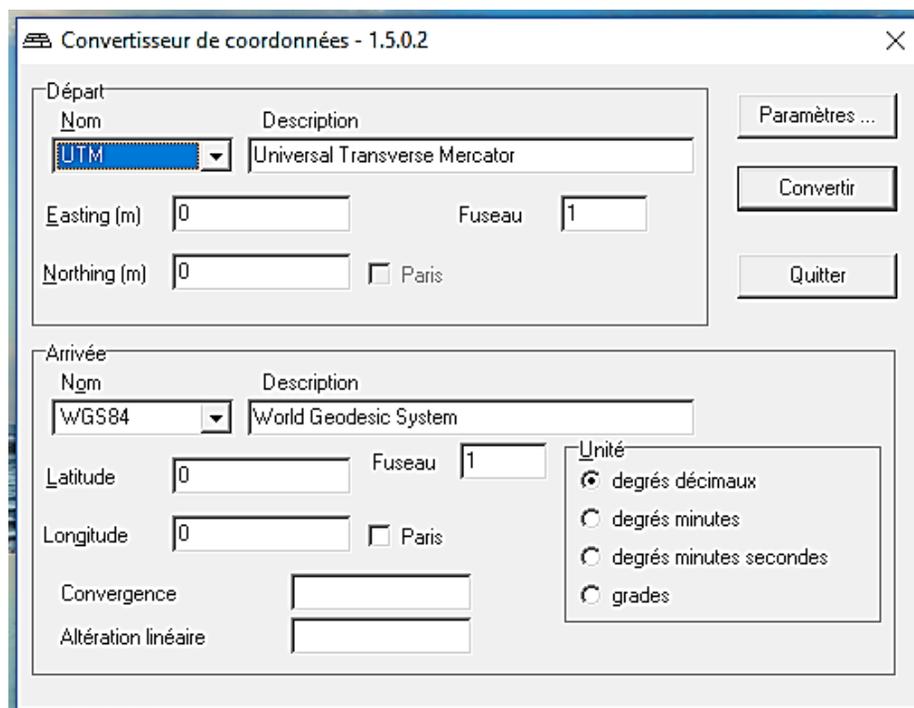


Figure 2.5- Capture d'écran de la boîte de dialogue d'accueil du convertisseur de données

2.3.6- Logiciel Microsoft Excel

Microsoft Excel est un logiciel, tableur de la suite bureautique Microsoft Office, développée et distribuée par l'éditeur Microsoft. Le logiciel Excel intègre les fonctions de calcul numérique, de représentation graphique, d'analyse de données (notamment de tableaux croisés dynamiques) et de programmation, laquelle utilise les macros écrites dans le langage Visual Basic for Applications (VBA) qui est commun aux autres logiciels de Microsoft Office. La figure 2.6 ci-dessous présente son interface d'accueil.

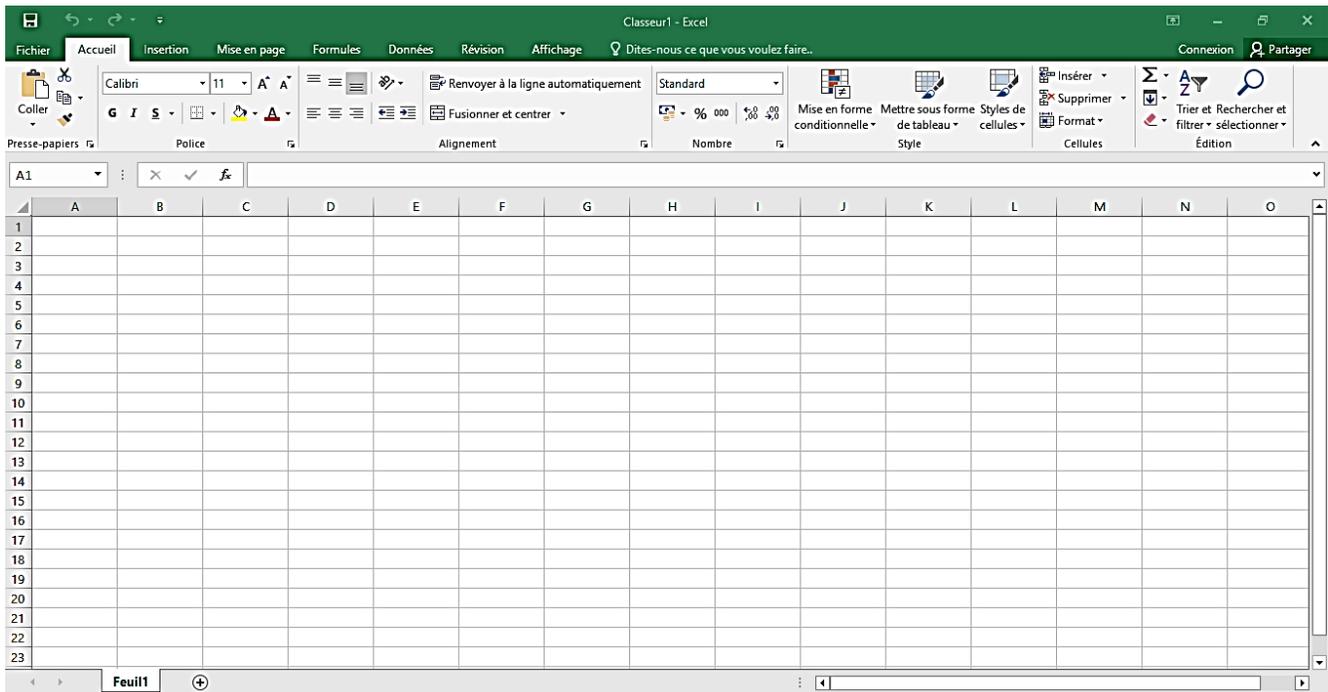


Figure 2.6- Capture d'écran de l'interface d'accueil du logiciel Excel 2016

Dans notre travail, il nous a permis de calculer les coefficients (de variation et de détermination), mais également de tracer les différents graphes (variation de la profondeur, variation de la température, variation de la température en fonction de la profondeur).

2.3.7- Logiciel Surfer

Le logiciel Surfer est un logiciel qui nous permet de réaliser des modèles numériques de terrain issus des données récoltées à travers le GPS. Le principe de Surfer est le suivant : le logiciel crée des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points de coordonnées x, y, et z afin de les ordonner, c'est à partir de ces grilles que l'on peut créer plusieurs types de cartes : Basemap, contour map, 3D, vector, et bien d'autres. Son interface d'accueil est visualisée sur la figure 2.7 ci-dessous.

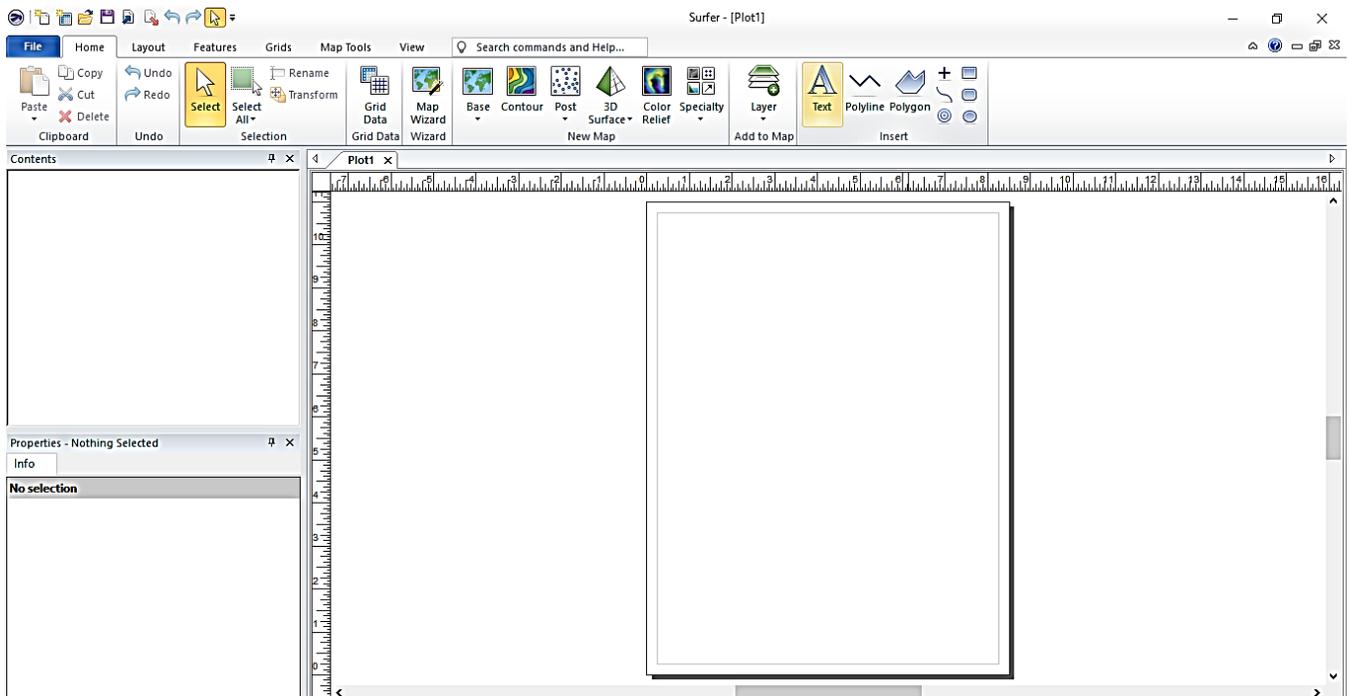


Figure 2.7- Capture d'écran de l'interface du logiciel Surfer 2011

2.3.8- Feuille de calcul ÖWAV

Il s'agit d'une feuille de calcul Excel élaborée par l'ÖWAV, union autrichienne professionnelle des entreprises de l'eau et des déchets ; elle permet le dimensionnement d'une sonde géothermique et c'est à ce titre que nous l'avons utilisée pour réaliser un système géothermique tenant compte des besoins d'un foyer type et du gisement thermique du sol. Elle se présente comme sur la figure 2.8 ci-dessous.

SIA - feuille de calcul - Copie

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Dites

B52 Taux de retrait spécifique avec facteurs de correction

Règle 207 de l'ÖWAV, Annexe 4			
Conception de SAP basée sur SIA 384/6, 1ère édition 11-2009			
Propriétés			Données d'entrée
			Résultats
Désignation	Unité	Valeur	Remarque
Données des besoins du chauffage du bâtiment : voir la feuille des règles ÖWAV 207. Ptk. 5.2.1			
Espace de vie chauffé	[m ²]	200	
Puissance de chauffage requise	[kW]	9,4	
Puissance de chauffage spécifique	[W/m ²]	47	
Heures de fonctionnement annuelles en chauffage	[h/an]	1900	D'après calcul ou SIA 384/6, Fig. 10
Demande annuelle de chauffage requise	[kWh/an]	17 860	
Indice d'énergie	[kWh/(m ² *an)]	89	
Chauffage de l'eau : voir la feuille des règles ÖWAV 207. Ptk. 5.2.3			
Population	[pers.]	4	
Chauffe-eau spécifique avec PAC	[kW/pers.]	0,25	Au moins 0,25 kW/E
Chauffage à eau chaude avec PAC	[kW]	1	
Besoin spécifique en énergie chauffage de l'eau	[kWh/(E*d)]	3	2 -4 kWh/E, jour en moy. Le comportement des utilisateurs
dont avec PAC	[kWh/(E*d)]	3	
Besoin en énergie chauffage de l'eau avec PAC	[kWh/an]	4 380	
Dimensionnement de la PAC			
Puissance requise PAC	[kW]	10,40	
Puissance de chauffage sélectionnée à B0/W35	[kW]	10,80	
Puissance de chauffage sélectionnée à B0/W50 (eau cha)	[kW]	10,20	
Consommation électrique en B0/W35	[kW]	2,40	
Puissance de retrait de SGV à B0/W35	[kW]	8,40	
Dimensionnement de la sonde géothermique (SGV)			
Besoin énergétique chauffage	[kWh/an]	22 240	Refroidissement gratuit déduit
Heures de fonctionnement annuelles PAC chauffage	[h]	1 654	
Heures de fonctionnement annuelles PAC eau chaude	[h]	429	WP = PAC
Heures de fonctionnement annuelles PAC Total	[h]	2 083	EWS = Erdwanmesonden=SGV
Conductivité thermique	[W/m.K]	2,5	
Tubes de sonde		Duplex 32	
Taux de retrait spécifique	[W/m de forage]	37,5	D'après ÖWAV RB 207 Fig.13 ou SIA 384/6 Fig. 7
Nombre de SGV	[Stk.]	2	
Distance entre les sondes géothermiques	[m]	10	
Longueur de la sonde	LEWS 1 [m]	112	
Altitude	[mü.A.]	405	
Température à la surface du sol *	[°C]	10,4	Ligne de régression ZAMG - 0,5 K
Gradient géothermique	[K/m]	0,030	
température du fluide caloporteur	[°C]	-1,5	
Différence de température du sol	[K]	13,5	
Longueur de la sonde	LEWS 2 [m]	95	
Différence de température du sol	[K]	13,3	
Longueur de la sonde	LEWS 3 [m]	97	
			Iteration

Figure 2.8- Capture d'écran de la feuille de calcul ÖWAV [35]

2.4- Méthodes de l'étude expérimentale

2.4.1- Méthode de collecte des données

2.4.1.1- Collecte des données sur la température du puits

Le processus de collecte des données sur la température à l'aide du thermomètre IR s'est fait de la manière suivante :

- Nous pointons le thermomètre en direction de l'eau contenue dans le puits ;

- Nous appuyons sur le déclencheur pour activer le pointeur Laser pendant au moins une seconde (durée d'un aller-retour du rayon Laser au fond du puits) ;
- Nous relevons, sur la fiche de charge (dans le tableau 3.1), les valeurs indiquées sur l'écran d'affichage en °C (figure 2.9 ci-dessous) ;
- Nous répétons les mêmes actions pour les autres puits du site.



Figure 2.9- Ecran d'affichage d'un thermomètre Laser [LAP/ENS/UY1, 2018]

2.4.1.2- Collecte des données sur la profondeur du puits

La démarche suivante a été utilisée lors de la mesure :

- Nous envoyons le fil à plomb à l'intérieur du puits jusqu'à ce qu'il touche le fond ;
- Nous marquons la ficelle du fil à plomb pour noter la profondeur ;
- Nous sortons le fil à plomb du puits ;
- Nous mesurons la longueur de la ficelle du plomb à la marque grâce au décimètre ;
- Nous relevons, sur la fiche de charge, les différentes valeurs lues ;
- Nous répétons les mêmes actions pour les autres puits du site ;
- Nous notons les informations recueillies dans le tableau 3.1.

2.4.1.3- Collecte des données sur la position géographique du puits

Le processus de collecte des données sur la position du puits à l'aide du GPS s'est fait de la manière suivante :

- Nous allumons le GPS ;
- Nous appuyons sur la touche MARK ; une page s'ouvre sur l'écran (figure 2.10). Celle-ci indique la latitude, la longitude et l'altitude du puits ; nous attendons que le pointeur se stabilise sur l'écran ;

- Nous relevons, sur la fiche de charge, les différentes informations affichées sur l'écran ;
- Nous répétons les mêmes actions pour les autres puits du site ;
- Nous notons les données recueillies dans le tableau 3.1.



Figure 2.10- Ecran d'affichage des positions d'un GPS en mode UTM [36]

2.4.2- Méthode de traitement des données expérimentales

2.4.2.1- Traitement des données dans le logiciel Excel

Outre les opérations usuelles de calcul des moyennes, écart-type et autres, le processus de traitement des données à l'aide du logiciel Microsoft Excel, notamment pour les tracés graphiques s'est fait de la manière suivante :

- Nous mettons nos différentes données dans un tableau ;
- Nous les sélectionnons puis, nous cliquons sur 'insertion' sur la barre des tâches ;
- Nous choisissons 'graphique recommandé' ;
- Nous choisissons le graphique qui correspond le mieux à ce que nous voulons exprimer.

2.4.2.2- Traitement des données dans l'application convertisseur de coordonnées

Le protocole de traitement des données s'est fait de la manière suivante :

- Sous l'onglet "Départ" : sous "nom", nous choisissons UTM dans la liste déroulante ;

- Nous saisissons les valeurs des distances Est et Nord dans les cases correspondantes puis 32 (relatif à la zone du Cameroun) dans la case "fuseau".
- Sous l'onglet "Arrivée" : sous "nom", nous choisissons WGS 84 dans la liste déroulante ;
- Sous unité, nous cochons degrés décimaux ;
- Nous cliquons sur convertir ;
- Nous relevons les données (longitude et latitude) sur un tableau Excel, et ce, pour chaque puits de la zone ;

2.4.2.3- Traitement des données dans le logiciel Surfer

Le processus de traitement des données à l'aide du logiciel Surfer a respecté les étapes ci-dessous :

- Nous ouvrons le logiciel Surfer ;
- Sur la barre des tâches, nous cliquons sur l'icône « New Worksheet », une feuille nommée « sheet1 » semblable à celle d'Excel apparaît ;
- Nous accédons à la feuille Excel, nous copions les informations utiles, puis nous renseignons notre feuille « sheet1 » et nous l'enregistrons sous le nom « APT » par exemple ;
- Sans fermer le logiciel, nous créons une nouvelle feuille (plot) ;
- Nous cliquons sur 'grid' puis sur 'data'. Lorsque nous avons cliqué sur data, une boîte de dialogue nous permettant de choisir le tableau des données enregistrées dans le logiciel Microsoft Excel s'ouvre ;
- Nous choisissons notre fichier « APT ». Une autre boîte de dialogue s'ouvre (figure 2.11) ;
- Nous faisons les réglages nécessaires dans la boîte de dialogue ;
- Nous cliquons sur 'OK'. Le fichier 'GridDataReport' s'ouvre ;
- Nous enregistrons ce fichier sous le nom 'GridDataReport'.
- Nous allons sur la barre de tâche choisir les types de courbe, il nous renvoie sur le fichier 'GridDataReport' enregistré ;
- Nous l'ouvrons et nous observons la courbe des isothermes ;
- Nous enregistrons.

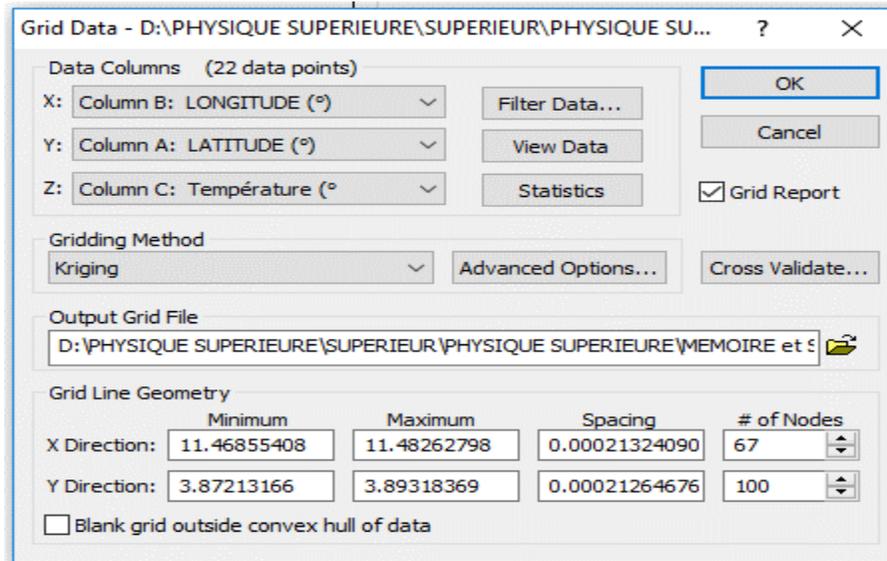


Figure 2.11- Capture d'écran de la boîte de dialogue du logiciel Surfer 11 [LAP/ENS/UY1, 2018]

2.5- Méthode de l'étude analytique

2.5.1- Technique de dimensionnement d'un échangeur géothermique

Dimensionner un échangeur géothermique revient à déterminer principalement la longueur du capteur à installer en tenant compte du potentiel thermique du sous-sol et des besoins énergétiques du bâtiment à satisfaire. Le modèle de dimensionnement adopté a été calqué sur celui proposé par la Société suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA 384/6). Ladite société donne des prescriptions sur la mise en place, le dimensionnement des sondes géothermiques verticales (quatre sondes au maximum pour une profondeur allant jusqu'à 400m) et leur raccordement à la PAC, pour des besoins de chauffage, de production d'ECS et de refroidissement [22].

2.5.2- Modèle de systèmes géothermiques considérés

Nous avons limité l'étude aux sondes géothermiques verticales (SGV) puis avons considéré le modèle de puissances utilisant le CoP au détriment de celui qui tient compte des variations de température du fluide dans les différents sous-systèmes géothermiques. Le cas des capteurs horizontaux n'a pas été abordé du fait de l'espace de construction de plus en plus réduit en zone urbaine. Nous avons également négligé les pertes d'énergie occasionnées par le circuit hydraulique notamment dans les conduites ; de même, les pompes de forage et de circulation n'ont pas été prises en compte. Le module de PACG choisi comme témoin présente les caractéristiques techniques suivantes :

Tableau 2.1- Quelques caractéristiques techniques du système extrait d'une fiche signalétique [15]

Caractéristiques de la PACG	
Point de fonctionnement	B0/W35
Coefficient de performance (CoP)	4,2
Caractéristiques du capteur et du fluide	
Diamètre nominal du tube	PE 32 × 2,9 mm
Type de sonde	Sonde unique double-U (n = 2)
Température du fluide caloporteur	[entrée : 0°C – sortie : -1,5°C]

2.5.3- Description du domicile témoin

Nous allons dans cette section apprécier la capacité énergétique du sous-sol d'Oyom-Abang, à satisfaire aux attentes des populations de cette zone d'étude notamment en matière de besoins thermiques en eau chaude sanitaire (ECS) et de chauffage des penderies. Le système géothermique à installer permettra de desservir trois habitations nouvellement construites situées au Nord de la zone d'étude. Il s'agit donc d'un système de chauffage collectif. L'illustration est faite à partir d'un foyer type dont les spécifications sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 2.2- Caractéristiques d'appel énergétique du domicile témoin en 24 heures [LAP/ENS/UY1, 2018]

Données relatives à l'utilisation de l'eau chauffée	
Nombre de personnes par foyer (p)	5
Nombre de bain par personne par jour (b)	2
Durée d'écoulement de l'eau durant un bain (t')	10 min
Débit d'eau dans la douche	4 L/min
Volume d'eau utilisé pour un bain par personne (v)	40 L
Température de l'eau non chauffée : θ_i	22°C
Température de l'ECS : θ_f	60°C
Données relatives à la penderie et à son chauffage	
Nombre de penderies par foyer (p')	3
Volume d'une penderie (v')	4,8 m ³
Température de l'air de la penderie : θ_{int}	29,2°C
Température à l'extérieur de la penderie : θ_{ext}	24,2°C

2.5.4- Bilan thermique du système

2.5.4.1- Besoin en énergie du foyer :

➤ Production de l'ECS

Le besoin énergétique journalier en ECS (E_{bes1}) est donnée par la relation [38] :

$$E_{bes1} = \rho_e \cdot V \cdot C \cdot (\theta_f - \theta_i) \times \frac{1}{3600} \quad (2.7)$$

ρ_e : masse volumique de l'eau

C : Chaleur massique de l'eau. $C = 4\,186 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

V : Volume total d'eau utilisé par les foyers en une journée. Il est donné par :

$$V = 3p \times b \times v \quad (2.8)$$

➤ Besoin en chauffage

La puissance nécessaire pour chauffer l'espace occupé par les penderies est donnée par [15] :

$$E_{bes2} = G \cdot V' (\theta_{int} - \theta_{ext}) \quad (2.9)$$

G : coefficient thermique qui dépend du type de maison. La cité étant neuve $G = 0,8 \text{ W.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$ (Sylvain DELENCLOS, 2017), [15].

V' : Volume total d'espace occupé par les penderies de la cité. Ce volume s'obtient par :

$$V' = 3p' \times v' \quad (2.10)$$

θ_{ext} : moyenne des températures minimales de l'année 2018 (Janvier à Novembre)

θ_{int} : moyenne des températures maximales de l'année 2018 (Janvier à Novembre).

Ainsi, le besoin énergétique journalier total pour satisfaire à la demande du foyer témoin est :

$$E_{bes} = E_{bes1} + E_{bes2} \quad (2.11)$$

Comme les pertes thermiques du circuit hydraulique ont été négligées, alors $E_{bes} = P_{charge}$.

Nous pouvons dès lors déterminer les proportions énergétiques de chaque sous-système de chauffage à l'aide des équations suivantes :

Pour la production d'ECS :

$$\%ECS = \frac{E_{bes1}}{E_{bes}} \times 100 \quad (2.12)$$

Pour le chauffage de la penderie :

$$\%chauffage = \frac{E_{bes2}}{E_{bes}} \times 100 \quad (2.13)$$

2.5.4.2- Evaluation de la puissance électrique à fournir à la PAC : P_{elec}

La puissance électrique qu'il faut fournir à la PAC est obtenue à partir de (1.6). On a :

$$P_{elec} = \frac{P_{charge}}{CoP} \quad (2.14)$$

2.5.4.3- Evaluation de la puissance spécifique que le capteur doit récupérer du sous-sol (source froide) : P_{froid}

$$P_{froid} = P_{charge} - P_{elec} \quad (\text{Sylvain DELENCLOS, 2017}) \quad (2.15)$$

2.5.4.4- Gisement énergétique du sol d'Oyom-Abang et estimation de la longueur des sondes

Nous avons vu au chapitre 1 que la roche mère du sol d'Oyom-Abang est constitué de gneiss dont la conductivité thermique est évaluée à $3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [2 et 37]. Cette zone étant stable c'est-à-dire hors activité magmatique, son gradient géothermique se situe autour de $30^\circ\text{C}/\text{km}$ soit $0,03^\circ\text{C}/\text{m}$ [23]. Nous allons ici estimer la capacité thermique du sous-sol de la zone d'étude.

➤ Evaluation de la puissance maximale linéaire de référence soutirable du sol $Q_l(\text{réf})$

La norme SIA-384/6 donne un abaque de puissance linéaire soutirable par mètre de sonde en fonction de la conductivité thermique (cf. figure 2.12 ci-dessous) pour une situation de référence caractérisée par [22] :

- Une SGV unique double-U de 100 m de longueur, constituée de tubes de diamètres externes 32 mm, le forage étant rempli d'un matériau de conductivité $0,85 \text{ W/m.K}$ (ciment à base de bentonite) ;
- Un temps de fonctionnement de la PAC estimé à 1800 heures par an ;
- Une température moyenne à la surface du sol de 10°C ;
- Une température du fluide caloporteur en entrée de SGV de -3°C et en sortie de 0°C .

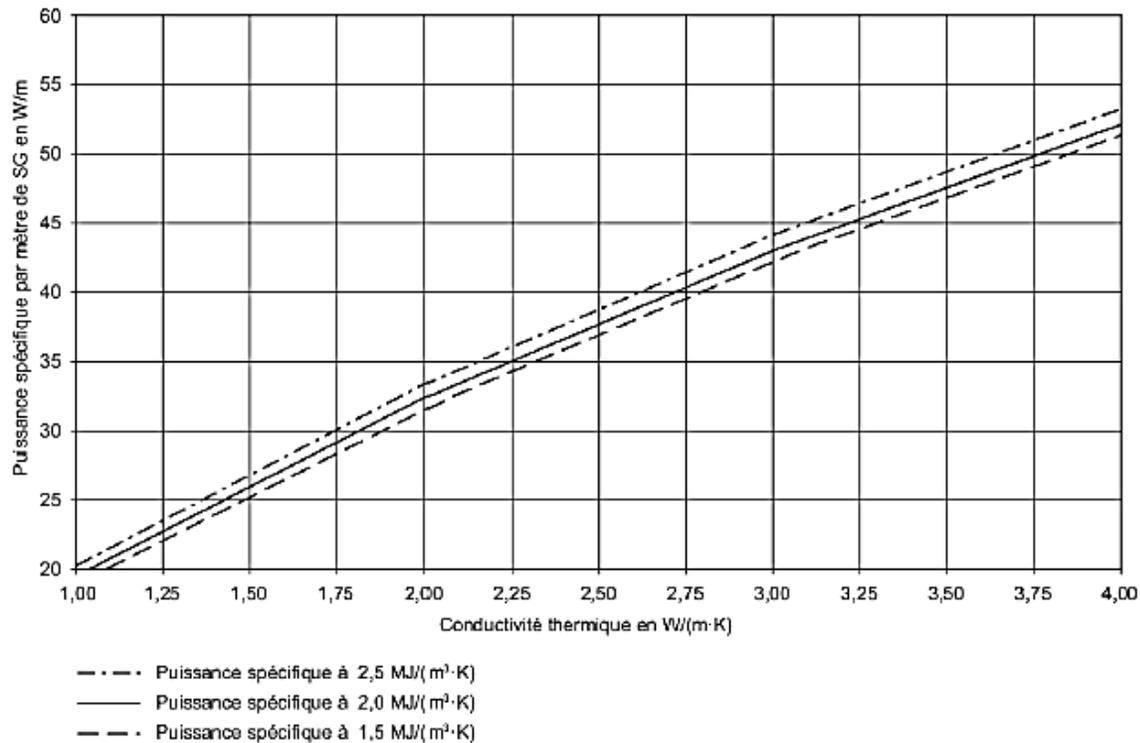


Figure 2.12- Puissance linéaire soutirable par mètre de sonde en fonction de la conductivité thermique du sol pour le cas de référence [22]

Pour déterminer la durée Δt de fonctionnement de notre PACG, nous avons supposé que le système de chauffage des penderies n'est activé que lors de la production d'ECS et exclusivement en période froide (les cinq mois de plus basse température). Ce calcul donne :

$$\Delta t = \frac{30 \times 12 \times 3}{60} pbt' \quad (2.16)$$

La température moyenne à la surface du sol est la moyenne annuelle des températures mensuelle à la surface du sol. Toutefois, la norme MIS 3005 élaborée par les chercheurs du Royaume Uni recommande d'assimiler la température du terrain à la température moyenne de l'air ambiant [22]. Cette température devrait correspondre à la moyenne des températures minimales pour être sûr de pouvoir satisfaire les besoins en période froide [38].

La température du fluide caloporteur dans la sonde est la moyenne entre l'entrée et la sortie de la sonde :

➤ Estimation de la longueur de référence de la SGV

Cette longueur correspond à celle calculée dans les conditions de référence. Pour une sonde unique double-U, elle est donnée par [15] :

$$L_{réf} = \frac{P_{froid}}{n \times Q_{l(réf)}} \quad (2.17)$$

➤ **Estimation de la longueur réelle de la SGV : $L_{réelle}$**

La feuille de calcul élaborée par l'ÖWAV est basée sur les différentes étapes de la méthodologie de la SIA 384/6 ; elle intègre également les corrections à apporter à la situation de référence ci-dessus décrite.

Le cas le plus fréquent est la correction apportée à la longueur de référence par la température à la surface du sol. Cette dernière est donnée par la SIA [35] :

$$L_{réelle} = \frac{L_{réf} \times 11,5}{\Delta T} \quad (2.18)$$

ΔT est la différence de température du sol et est donnée par [35]

$$\Delta T = T_0 + \frac{L_{réf} \times \text{gradient géothermique}}{2} - T_{fluide} \quad (2.19)$$

T_0 : température à la surface du sol.

➤ **Evaluation de la puissance maximale linéaire réelle soutirable du sol $Q_l(\text{réelle})$**

$$Q_l(\text{réelle}) = \frac{P_{froid}}{n \times L_{réelle}} \quad [35] \quad (2.20)$$

2.5.4.5- Comportement du système géothermique constitué

Il est question ici d'évaluer l'offre thermique que le système géothermique réalisé est à même de proposer compte tenu de la variation des températures de l'air et de la surface du sol.

Pour chaque température moyenne mensuelle à la surface du sol T_0 , nous déterminons la différence de température du sol en utilisant à la relation (2.19) :

Par la suite, nous évaluons la longueur de la sonde qui correspondrait à la température du sol T_0 . A partir de (2.18) et (2.19), on peut alors écrire :

$$L_{réf} = \frac{2L_{réelle}(T_0 - T_{fluide})}{2 \times 11,5 - L_{réelle} \times \text{gradient géothermique}} \quad (2.21)$$

La puissance spécifique que le capteur récupérerait du sol est obtenue à partir de (2.17) :

$$P_{froid} = n \times L_{réf} \times Q_l \quad (2.22)$$

A partir de (2.15), on peut retrouver les besoins énergétiques que la SGV est en même de couvrir. On a :

$$P_{charge} = P_{froid} + P_{elec} \quad (2.23)$$

Connaissant les proportions de chaque sous système de chauffage, on peut retrouver les besoins énergétiques couverts pour chaque type.

$$E_{bes1} = \%B_{ECS} \times P_{charge} \quad \text{Pour la production de l'ECS} \quad (2.24)$$

$$E_{bes2} = \%chauffage \times P_{charge} \quad \text{Pour la penderie} \quad (2.25)$$

En nous appuyant sur les relations (2.7) et (2.9), il est possible de déterminer les volumes d'eau V et d'air chauffés V' , que le système peut produire :

$$V = \frac{3600 \times E_{bes1}}{\rho_e \cdot C \cdot (\theta_f - \theta_i)} \quad (2.26)$$

$$V' = \frac{E_{bes2}}{G \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})} \quad (2.27)$$

2.6- Conclusion

Ce chapitre, a été l'occasion pour nous de présenter le matériel et les méthodes utilisés pour mener à bien notre étude. L'approche expérimentale et l'approche analytique ont été les deux approches adoptées et présentées dans le cadre de ce chapitre. Dans l'approche expérimentale, le thermomètre infrarouge laser a permis de prendre les mesures des températures ; le GPS a servi pour la géolocalisation des différents puits de la zone ; le fil à plomb et le décamètre ont été utilisés pour déterminer la profondeur des puits. De même, l'application convertisseur de coordonnées a été utilisée pour passer des coordonnées en projection aux coordonnées géographiques ; par la suite, le logiciel Microsoft Excel nous a permis de tracer les différents graphes tandis que le logiciel Surfer a été utile pour la réalisation des différents modèles numériques de terrain. L'approche analytique nous a fourni les éléments de calcul pour évaluer la puissance linéaire du terrain, les besoins journaliers d'énergie en ECS et en chauffage du foyer témoin, la puissance électrique de la PACG, et la puissance à soutirer au terrain pour satisfaire à la demande énergétique du foyer témoin en question. Cette approche nous a permis ainsi de modéliser le problème via des équations mathématiques qui seront implémentées dans une feuille de calcul type ÖWAV.

En somme, ce chapitre nous aura permis d'éviter une navigation à vue et d'épouser une certaine logique et rigueur scientifique dans la résolution du problème énergétique posé. Nous verrons dans la suite si les données recueillies permettent de savoir si la profondeur et la position géographique de la zone d'étude sont à l'origine de la variation des températures des puits de la zone, et enfin s'il existe une corrélation entre la température et la demande énergétique.

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE L'ETUDE

3.1- Introduction

Toute étude scientifique a pour but d'apporter des réponses ou un début de réponse à un problème préalablement posé. Le présent chapitre nous permettra de confronter les résultats obtenus à ceux développés par la littérature et, le cas échéant, tenterons d'expliquer le gap que l'on pourra enregistrer en utilisant les modèles existant ou non. Il reviendra alors à ce chapitre d'apprécier non seulement les objectifs visés par l'étude, mais également de valider ou non les hypothèses formulées. Pour ce faire, nous présenterons et discuterons les résultats des études expérimentale et analytique lesquels nous permettrons de mettre en lumière les facteurs influençant la température des puits, ainsi que le comportement thermique du sous-sol d'Oyom-Abang dans sa propension à couvrir des besoins énergétiques.

3.2- Présentation et discussion des résultats de l'étude expérimentale

Les différents résultats de mesure obtenus dans la zone d'étude sont présentés dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1- Tableau de mesure des données collectées sur les puits [LAP/ENS/UY1, 2018]

N° puits	Altitude (m)	Longitude (Distance à l'Est du méridien)	Latitude (Distance en m depuis l'équateur)	Profondeur du puits (m)	Température de l'eau (°C)
P ₁	759	0774247	0430695	25,43	23,70
P ₂	769	0774283	0430717	23,10	24,00
P ₃	766	0774287	0430722	22,25	23,50
P ₄	744	0774344	0430529	17,24	23,15
P ₅	740	0774321	0430484	17,38	22,40
P ₆	740	0774278	0430291	06,50	21,70
P ₇	740	0774289	0430235	10,75	22,30
P ₈	736	0774244	0430237	08,62	21,70
P ₉	735	0774231	0430282	06,57	21,10
P ₁₀	732	0774199	0430249	05,75	21,30
P ₁₁	731	0774168	0430212	06,00	21,45

Tableau 3.1- (suite)

P ₁₂	745	0774145	0430114	11,48	21,65
P ₁₃	757	0774153	0429989	09,76	21,00
P ₁₄	722	0775714	0428397	02,83	23,50
P ₁₅	740	0775584	0428575	10,75	23,20
P ₁₆	753	0775618	0428656	09,95	22,40
P ₁₇	755	0775568	0428676	12,41	21,30
P ₁₈	760	0775560	0428701	07,11	21,20
P ₁₉	760	0775606	0428702	08,60	22,25
P ₂₀	759	0775623	0428698	10,30	20,80
P ₂₁	764	0775603	0428729	10,07	22,65
P ₂₂	762	0775669	0428696	09,84	21,95

3.2.1- Tris à plat

3.2.1.1- Variation de la température des puits

Le tri à plat articulé autour de la variation des températures des puits d'eau est une opération qui permettra d'apprécier si les écarts de température observés entre les différents puits sont significatifs ou alors peuvent être négligés. L'évolution des températures des puits de la zone d'étude est représentée par le diagramme en bande ci-dessous.

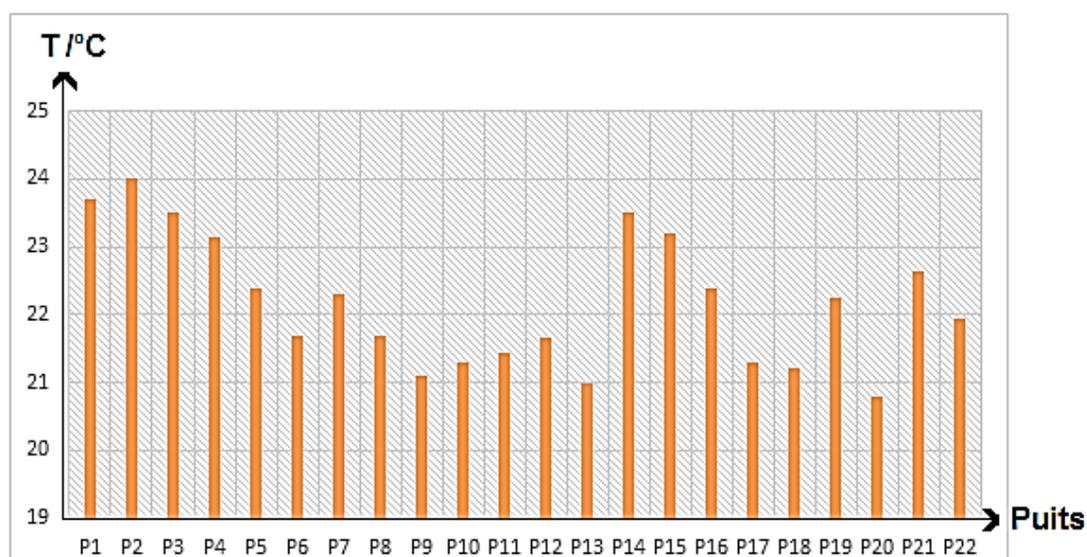


Figure 3.1- Evolution des températures des puits du quartier Oyom-Abang [LAP/ENS/UY1, 2018]

De cette série des températures, il en découle que :

- La température moyenne des puits est de 22,19°C. La température maximale est de 24°C tandis que la température minimale vaut 20,8°C soit une étendue de 3,2°C.

- Le coefficient de variation de cette série, calculé au moyen du tableur Excel, est de 4,37 %. Ce coefficient est inférieur à la valeur seuil de 15 %. Ainsi, la série de températures obtenue est homogène par conséquent, les températures mesurées sont proches de la valeur moyenne.

3.2.1.2- Variation de la profondeur des puits

Le diagramme ci-dessous présente l'évolution de la profondeur des puits de la zone.

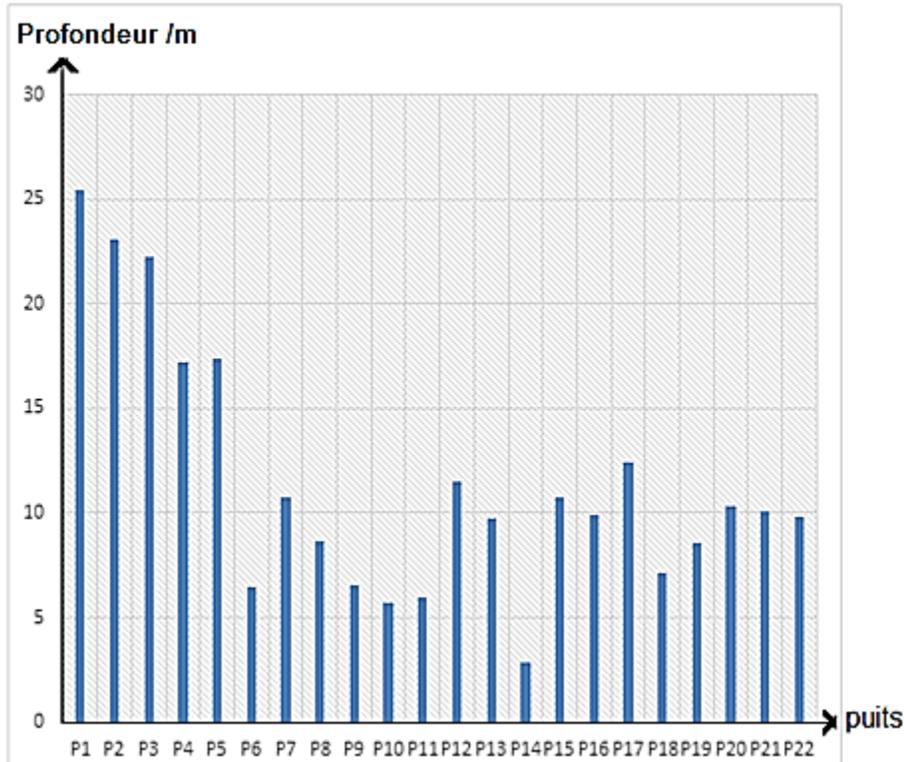


Figure 3.2- Evolution de la profondeur des puits du quartier Oyom-Abang [LAP/ENS/UY1, 2018]

De cette série des profondeurs, il en découle que :

- La profondeur moyenne des puits est de 11,49 m. La profondeur maximale est de 25,43 m tandis que la profondeur minimale vaut 2,83 m soit une étendue de 22,6 m.
- Le coefficient de variation de cette série est de 51,96 %. Il est supérieur à la valeur seuil de 15 %. Ce qui montre que les écarts de profondeurs des puits sont significatifs ; les profondeurs ne sont pas regroupées autour de la valeur moyenne.
- En considérant une profondeur d'influence aérothermique de 10 m, les différents puits pourraient être regroupés en deux catégories : les puits géothermiques (11) qui ont une profondeur supérieure à 10m, et les puits aérothermiques (11) pour lesquels la profondeur est

inférieure à 10 m et qui sont susceptibles d'être influencés par les conditions atmosphériques en surface.

3.2.2- Tris croisés

Le paragraphe précédent a confirmé l'existence d'une variation de température entre les différents puits, bien que cette dernière soit faible. Il est question dès lors d'associer à ces températures des paramètres susceptibles d'expliquer a priori les variations constatées.

3.2.2.1- Evolution de la température en fonction de la profondeur des puits

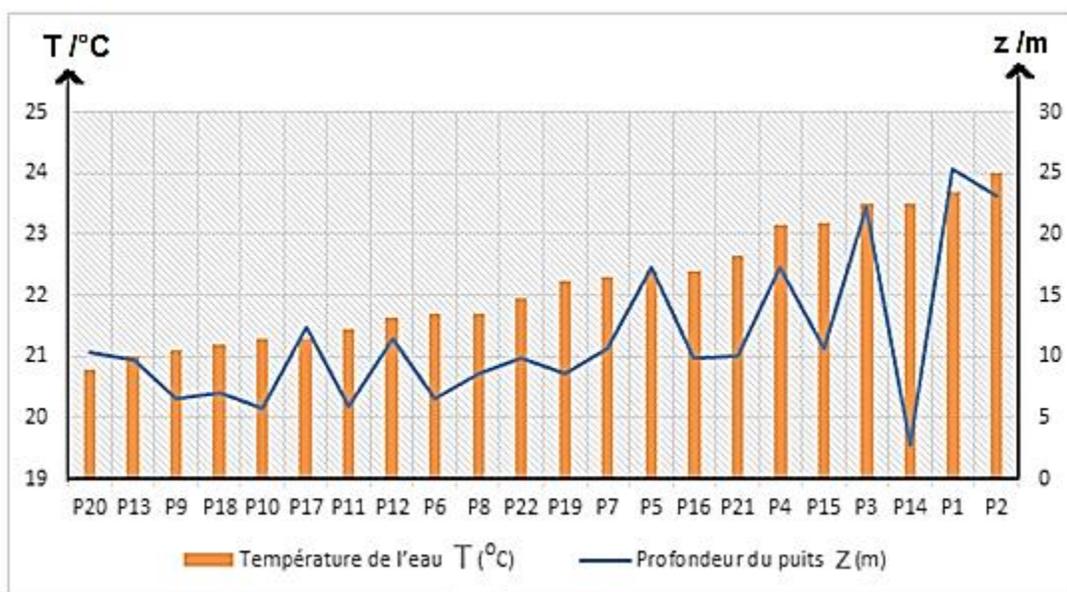


Figure 3.3- Evolution de la température en fonction de la profondeur [LAP/ENS/UY1, 2018]

Il ressort que le coefficient de détermination de la série bivariée obtenue en croisant la série des températures à celle des profondeurs des puits est de 0,39 soit 39 %. Ce qui signifie que seulement 39% de la variation de la température est expliquée par la variation de la profondeur.

Comme $25\% < 39\% < 50\%$ alors l'ajustement est mauvais. Il nous est difficile d'affirmer a priori que la profondeur est le seul facteur explicatif de l'évolution de la température dans le sous-sol de la zone d'étude. L'allure de la courbe ci-dessus montre à suffisance que la température des puits ne varie pas de manière rigoureuse avec la profondeur. Cependant, si l'on s'intéresse uniquement aux puits géothermiques, nous obtenons un coefficient de détermination de 53,65%.

3.2.2.2- Visualisation de l'évolution de la température des puits en dimension 2

En associant les paramètres géographiques de la zone tels que la latitude et la longitude nous obtenons la carte isotherme de la figure 3.4 suivante.

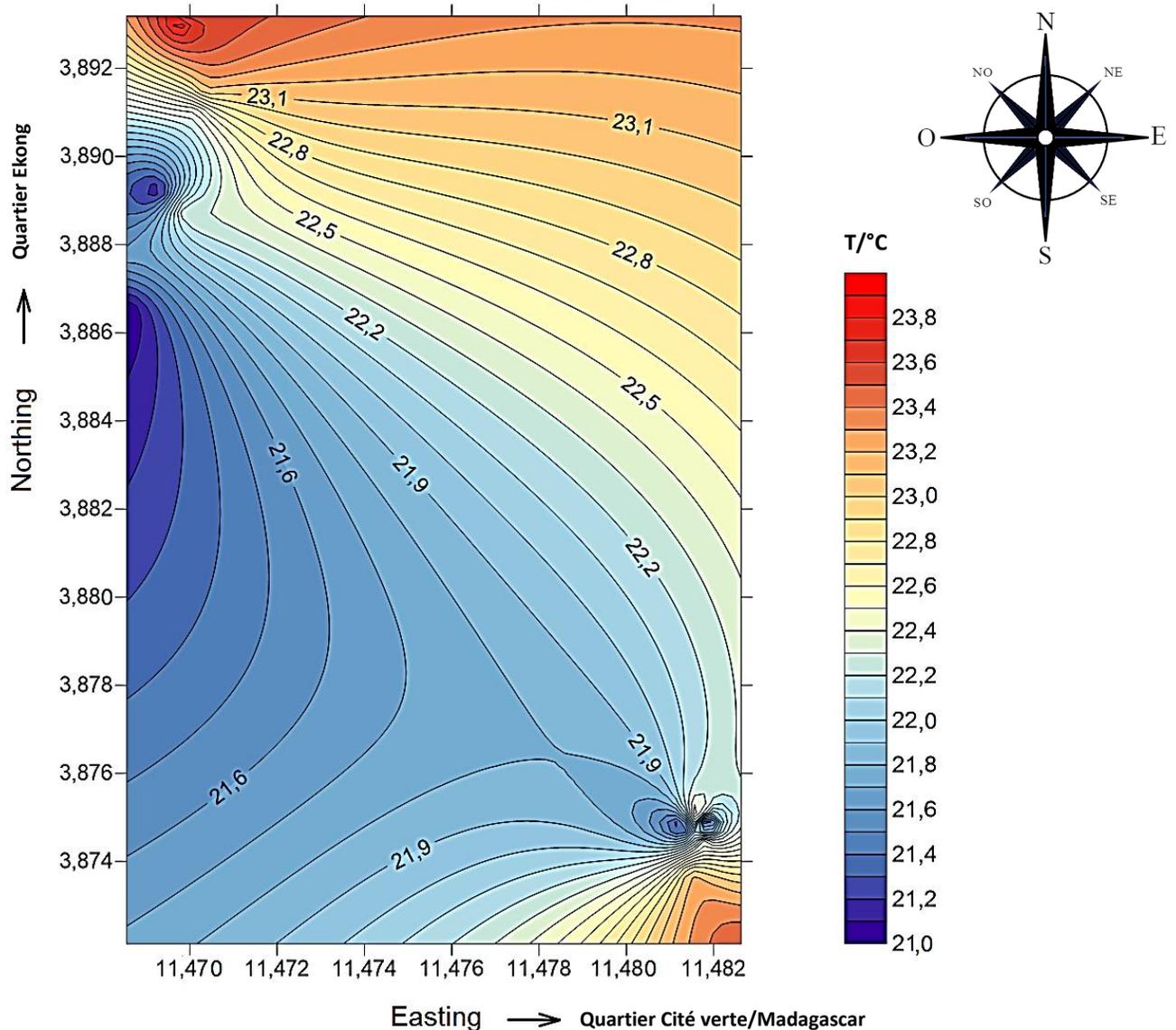


Figure 3.4- Carte isothermique 2D [LAP/ENS/UY1, 2018]

A première vue, la carte montre que le sous-sol du secteur Nord est chaud et principalement le secteur Nord-Ouest. D'ailleurs une analyse approfondie révèle que tous les puits étudiés se répartissent dans deux régions de la zone d'étude : le Sud-Est (S-E) et le Nord-Ouest (N-O), secteur dans lequel on note la présence d'une source de chaleur. Les isothermes sont resserrées autour des centres de haute et de basses températures et presque équidistantes au-delà.

De même, en couplant la profondeur à l'altitude nous obtenons la carte suivante :

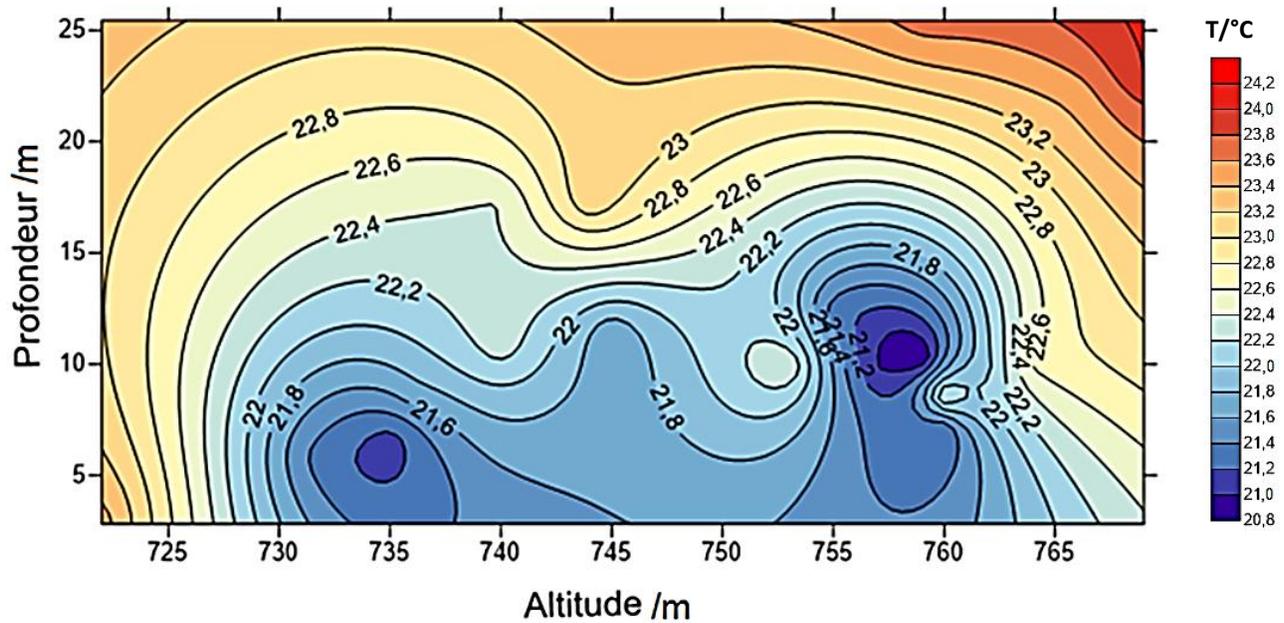


Figure 3.5- Carte isothermique 2D [LAP/ENS/UY1, 2018]

A la lumière de cette figure, il apparaît que :

- La carte présente deux centres de basse température. L'un est situé à faible profondeur et à faible altitude et l'autre à moyenne profondeur et à haute altitude.
- Au de-là de 20 m de profondeur, le sous-sol de la zone d'étude a une température supérieure à 22,6°C.

Le couplage des variables géographiques avec la profondeur des différents puits nous a permis de délimiter quatre domaines de profondeur thermique.

Le domaine ① constitué des puits ayant une température et une profondeur supérieures à la moyenne. Tous ces puits sont situés dans le secteur Nord-Ouest.

Le domaine ② regroupe les puits ayant une faible profondeur mais avec une température élevée.

Le domaine ③ regroupe les puits ayant une profondeur élevée mais avec une température faible.

Le domaine ④ est constitué des puits à températures et profondeurs faibles.

La carte matricielle suivante permet de quadriller les différents puits de la zone d'étude.

Tableau 3.2- Carte matricielle des puits [LAP/ENS/UY1, 2018]

CARTE MATRICIELLE DES PUIITS		
	Profondeur élevée	Profondeur faible
Température élevée	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₂ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₃ (N-O)</div> </div> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₄ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₅ (N-O)</div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">①</div>	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₇ (N-O)</div> </div> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₄ (S-E)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₅ (S-E)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₆ (S-E)</div> </div> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₉ (S-E)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₂₁ (S-E)</div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">②</div>
Température faible	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₇ (S-E)</div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">③</div>	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₆ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₈ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₉ (N-O)</div> </div> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₀ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₁ (N-O)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₂ (N-O)</div> </div> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₃ (N-O)</div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">④</div> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₁₈ (S-E)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₂₀ (S-E)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">P₂₂ (S-E)</div> </div>

Nous notons par ailleurs en faisant une comparaison rapide que le secteur Sud-Est est situé à une altitude plus élevée que le Nord-Ouest, en moyenne 752,77 m contre 745,7 m. Cependant, les puits de ce secteur sont moins profonds que ceux du Nord-Ouest (9,09 m en moyenne contre 13,14 m).

3.2.3- Discussion des résultats de l'étude expérimentale

A l'issu des analyses et interprétations des résultats, quelques points saillants ont retenu notre attention et méritent d'être scrutés.

- Dans un 1^{er} temps, le coefficient de détermination calculé a laissé transparaître qu'on ne pouvait pas totalement expliquer l'évolution de la température grâce à la profondeur. En effet, seuls 39% de la variation de la température de la zone d'étude sont expliqués par la profondeur ; Cette valeur pourrait être attribuée aux domaines ① et ④ de la carte matricielle constitués des puits dont la température et la profondeur évoluent dans le même

sens. Ce coefficient de détermination passe de 39% à 53,65% lorsque l'on s'intéresse aux puits géothermiques, qui ont une profondeur moyenne (15,56m) supérieure à la moyenne générale (11,49m) des profondeurs. Ce qui laisse penser à l'augmentation du coefficient de détermination lorsque la profondeur augmente et par conséquent à la propension qu'a la profondeur à expliquer la variation des températures des puits.

- Le second fait marquant de nos observations est l'existence des domaines ② et ③ qui regroupent les puits dont la température et la profondeur évolue en sens inverse. Ce contraste peut s'expliquer à plusieurs niveaux :

La présence des puits à faible profondeur et à température élevée serait due à l'impact direct des conditions atmosphériques du milieu, l'expérience sur le terrain ayant été d'ailleurs menée à un moment ensoleillé de la journée.

L'existence d'un puits ayant une profondeur élevée et une faible température serait due au fait que le puits repose sur une roche froide qui a tendance à atténuer les déperditions de chaleur provenant des couches profondes sous-jacentes [2].

- Troisièmement, la présence des puits situés dans une même zone, ayant des profondeurs voisines mais des températures différentes peut s'expliquer par le fait que ces puits seraient soit ravitaillés par des aquifères différentes, soit reposent sur des rochers ayant des paramètres thermophysiques différents, soit encore bénéficient d'une certaine couverture en surface qui limite l'impact de l'aérothermie dans ces puits. Le fait que tous les puits ayant une profondeur et une température élevées appartiennent à un même secteur (Nord-Ouest) pourrait nous amener en première approximation à penser que l'on pourrait attribuer la variation des températures des puits à leurs positions géographiques ; Cependant, le fait de retrouver les puits chauds et froids dans un même secteur (Sud-Est) ne nous permet pas de valider rigoureusement notre hypothèse selon laquelle la variation de la température dépend de la position géographique des puits.
- Le fait que les puits du secteur Sud-Est soient plus élevés mais moins profonds que ceux du Nord-Ouest nous amène à penser que la nappe phréatique du secteur Nord est plus profonde que la nappe du secteur Sud-Est.
- Enfin, les isothermes rapprochées autour des centres de haute et de basse températures peuvent s'expliquer par le fait que le flux thermique varie énormément à proximité de ces sources, tandis qu'ailleurs, la déperdition de chaleur est uniforme.

3.3- Présentation et discussion des résultats de l'étude analytique

3.3.1- Résultat du dimensionnement du système géothermique

Les besoins thermiques du foyer, la capacité thermique du sol de la zone d'étude ainsi que les caractéristiques de la PAC et de la SGV ont été évalués à l'aide de la feuille de calcul de l'ÖWAV. Les résultats obtenus ont été résumés dans le tableau 3.3 ci-dessous :

Tableau 3.3- Résultats du dimensionnement de l'installation géothermique à réaliser [LAP/ENS/UY1, 2018]

<i>Foyer témoin</i>		
	ECS	Espace de vie chauffé
Besoins en énergie	10,605 kW ou 53,025 kWh/jour	0,173 kW ou 0,865 kWh/jour
Besoins en volume	1,2 m ³ par jour	43,2 m ³ par jour
<i>PAC et Sonde géothermique</i>		
Puissance électrique de la PAC	2,567 kW	
Durée de fonctionnement de la PAC	1800 heure/an	
Puissance spécifique à récupérer du sol par la PAC	8,211 kW	
Longueur de référence de la sonde	95,48 m	
Longueur réelle de la sonde	41 m	
<i>Gisement énergétique du sol</i>		
Puissance moyenne linéaire de référence soutirable du sol	0,043 kW/m	
Puissance moyenne linéaire réelle soutirable du sol	0,101 kW/m	

A la lecture de ce tableau, il en ressort que :

- Le besoin thermique total du foyer se chiffre à environ 11 kW avec une prédominance en ECS (plus de 98 %).
- Le modèle de PAC choisi doit avoir une puissance électrique d'un peu plus de 2,5 kW, et il faudrait réaliser un forage dont la sonde devrait aller chercher les calories à 41 m de profondeur.
- Compte tenu de l'appel thermique du foyer témoin, l'on estime à 101 W, la puissance maximale que l'on serait en même d'extraire par mètre de sol dans la zone d'étude ; soit une augmentation de 57,42 % par rapport à la puissance soutirable de référence.

3.3.2- Comportement thermique du système géothermique réalisé

Soumis aux conditions atmosphériques plus ou moins variables au cours de l'année, le sol de la zone d'étude présente la réaction thermique ci-dessous à la suite d'une sollicitation.

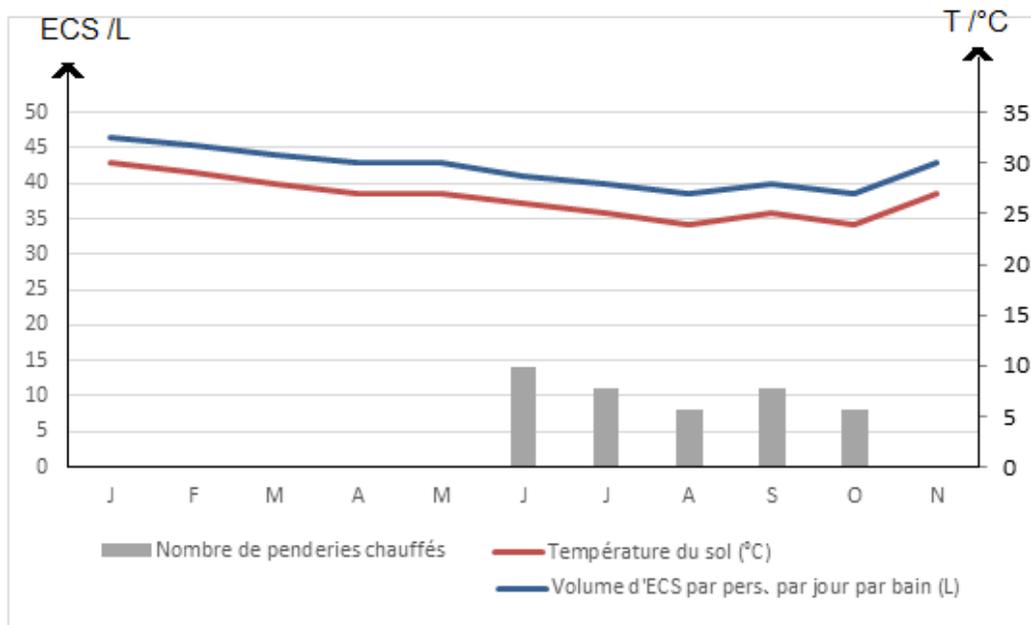


Figure 3.6- Courbe et diagramme de charge du foyer en fonction de la température du sol [LAP/ENS/UY1, 2018]

A la lumière de cette figure, il apparaît clairement que

- Le nombre de penderies chauffées en période froide est minimal aux mois d'Aout et d'Octobre (8 penderies) et maximal en Juin (14 penderies).
- La période où les penderies ne sont pas chauffées correspond à celle où les habitants du foyer bénéficient d'un volume important d'ECS avec une quantité d'eau chaude maximale utilisable par jour par personne et par bain de 46,5 L, obtenue au mois de Janvier. Celle-ci chute à une valeur minimale de 38,5 L en Aout et Octobre, qui sont les mois les plus froids.
- L'allure des courbes laisse entrevoir une certaine relation entre la température du sol de la zone et la quantité d'ECS produite ; le coefficient de détermination de ces deux variables est 99,31 % ce qui confirme que le volume d'ECS à utiliser est fortement dépendant de la température. De plus la valeur du coefficient de corrélation (99,65 %) montre que le volume d'ECS à utiliser et la température évolue dans le même sens.

3.3.3- Flux géothermique de la zone

Connaissant la nature du sol et le contexte géologique prédominant du quartier Oyom-Abang, il est possible, à partir de la relation (1.5), d'évaluer le flux géothermique de ladite zone :

$$\Phi_{géo} = \text{conductivité thermique} \times \text{gradient géothermique}$$

$$\Phi_{géo} = 3 \times 0,03 \quad \text{soit : } \Phi_{géo} = 0,09 \text{ W.m}^{-2}$$

3.3.4- Discussion des résultats de l'étude analytique

A l'issu des analyses et interprétations de ces résultats, nous soulignons que :

- La différence significative observée entre la longueur réelle et la longueur de référence de la sonde à installer s'explique par la différence de température entre la zone d'étude et celle de référence qui se rapproche des conditions atmosphériques européennes. Le dimensionnement est satisfaisant car les variations autour des conditions d'utilisation moyenne sont faibles.
- Les penderies ne sont pas chauffées entre les mois de Novembre et Mai car la chaleur ambiante qui prévaut durant cette période est jugée suffisante pour éviter les moisissures.
- La forte valeur du coefficient de corrélation et le fait que la courbe de variation des températures du sol et celle du volume d'ECS produit soient quasiment identiques et presque superposables constitue un résultat révélateur qui est en effet conforme à notre hypothèse de base selon laquelle la variation de la température conditionne l'usage de l'énergie qui en découle.

3.4- Conclusion

Le présent chapitre nous a permis de répondre à un certain nombre de questions, de vérifier nos hypothèses de recherche et le niveau d'atteinte des objectifs que l'on s'est assigné dans le cadre de notre étude. Ainsi, à moins de 30 m de profondeur, la température du sous-sol d'Oyom-Abang varie très peu. Cette légère variation s'explique indirectement par la position géographique des puits, mais en réalité et en partie par la profondeur de ces puits et des conditions aérothermiques du milieu. Nous avons soupçonné que les paramètres tels qu'une composition minéralogique différente du sol, l'existence des éléments radioactifs à certains endroits, ou encore la présence des nappes phréatiques différentes dans la zone seraient des facteurs qui pourraient expliquer l'autre partie de la variation des températures du sous-sol d'Oyom-Abang. La puissance thermique que l'on peut soustraire du sous-sol et par mètre dans la zone d'Oyom-Abang est estimée à 101 W dans les conditions de l'étude, elle peut varier en fonction de deux paramètres qui sont fortement liés et varient dans le même sens : il s'agit des besoins thermiques des populations et de la température à la surface du sol.

INTERET DE L'ETUDE SUR LE SYSTEME EDUCATIF

4.1- Introduction

Tout le mérite d'une étude scientifique réside dans sa contribution à l'évolution de la société ; le thème soumis à notre étude ne dérogera pas à cette règle. Dans un premier temps, il sera question pour nous dans cette ultime phase de présenter grosso modo l'intérêt suscité par notre étude à la communauté scientifique, politique et économique. Puis, de manière singulière, nous montrerons l'implication didactique du thème de recherche dans le système éducatif camerounais.

4.2- Intérêt général de l'étude

L'étude de la variation des températures des puits du quartier Oyom-Abang et son implication dans la recherche de l'énergie géothermique suscite un double intérêt, à savoir : l'intérêt écologique et l'intérêt scientifique et académique.

- Sur le plan scientifique et académique :
 - Cette étude a permis de connaître le type d'énergie géothermique facilement exploitable dans la zone d'étude.
 - Elle a permis de montrer que malgré le manque de moyens, l'université camerounaise n'est pas en marge de l'évolution de la science et s'implique dans la recherche.
- Sur le plan écologique : elle permet de donner une piste sérieuse à l'Etat du Cameroun pour :
 - Réduire la dépendance à l'utilisation des énergies fossiles ;
 - Limiter les émissions des gaz à effet de serre (GES) responsables du réchauffement anormal de la planète telle que suggéré dans le cadre du protocole de Kyoto³.

³ Le protocole de Kyoto demandait à ses pays signataires de réduire de 5,2% leurs émissions des GES entre 2008 et 2012.

4.3- Intérêt didactique de l'étude

Le mot « didactique » vient du grec ancien *didacticòs* qui signifie « douer pour l'enseignement », et dérive du verbe *didaschein* qui signifie « enseigner, instruire ». Littéralement, la didactique d'une discipline s'intéresse au contenu et aux difficultés que pose son enseignement.

Ce mémoire d'initiation à la recherche nous aura permis en tant que futur enseignant :

- De manifester une certaine rigueur scientifique qu'il faut respecter pour tout travail de qualité ;
- De développer un esprit critique, d'analyse, de jugement et de synthèse dans l'exploitation des documents.
- De mieux appréhender la démarche scientifique, ce qui nous permettra dans un premier temps de stimuler la conscience scientifique des tous jeunes lors des prises de contact notamment sur les phénomènes observés dans leur environnement ; puis dans un deuxième temps, de mieux cerner et mieux expliquer à nos élèves comment aborder les exercices de type expérimental auxquels ils seront soumis lors des contrôles continus en classe et des examens officiels.
- De parler avec emphase des instruments de mesures de longueur et de température aussi bien en ce qui concerne leurs choix, leurs modes d'utilisation, que pour leur lecture systématique.
- De mieux intégrer l'implémentation du récent paradigme d'enseignement dans les nouveaux programmes de notre système éducatif, en l'occurrence l'approche par les compétences avec entrées par les situations de vie (APC-ESV) ; ceci, dans la mesure où la mobilisation des acquis par les apprenants se fera autant que faire se peut par le biais des activités expérimentales.
- De mieux maîtriser l'outil informatique qui constituera notre socle majeur lors de la saisie du cours, des sujets d'évaluation et des fiches de travaux dirigés, des rapports des conseils et autres.
- D'évoquer avec assurance, notamment en classe de 3^{ème} dans le module intitulé « Actions mécaniques et énergie électrique », les modes de production de l'énergie électrique exploitée et exploitable au Cameroun.

4.4- Fiche pédagogique

Il s'agit d'un document écrit qui permet d'atteindre un objectif de formation ou de guider l'enseignant pendant le déroulement des activités pédagogiques (d'enseignement/apprentissage).

Elle s'apparente à un plan de cours et à ce titre, fournit des informations utiles relatives à ce cours et à son organisation pédagogique.

4.4.1- Invariants de la fiche pédagogique

Quel que soit le modèle adopté, (modèle CHIS ou APC-ESV), la fiche pédagogique présente deux grandes parties :

- Une *en-tête* comportant les coordonnées de la leçon. Il contient principalement le titre de la leçon, le but de la leçon, la durée et la classe ou niveau auquel il est destiné.
- Un *tableau* à sept (07) colonnes constitué de contenu, habileté, cadre, situation-problème, activités d'enseignement / apprentissage, matériel didactique, item d'évaluation.

4.4.2- Elaboration d'une fiche pédagogique type.

Programme d'étude : Physique, Chimie et Technologie

Niveau d'étude : 3^{ème}

Titre du module : Actions mécaniques et énergie électrique

Famille de situations : Application des actions mécaniques et utilisation de l'énergie au quotidien

Compétences : Au terme de cette séquence de cours, je dois être capable :

- De produire, transporter et utiliser une tension alternative ;
- De protéger les appareils contre les risques liés à l'utilisation de l'énergie ;

Prérequis : les sources d'énergie (classe de 5^{ème}), le volcanisme (cours SVT, classe de 4^{ème}), principe de production d'une tension alternative (séance précédente, 3^{ème}).

Matériel didactique : programme officiel, manuel de l'élève au programme, craie, règle, tableau, fiche d'activités élève et enseignant.

Activité 1 : vérification des prérequis

- 1) Citer les sources d'énergie que vous connaissez.
- 2) Quelles sont parmi ces sources d'énergie celles qui sont utilisées au Cameroun pour la production d'électricité ?

- 3) Rappeler le principe de production d'une tension alternative et celui d'une centrale hydroélectrique. Dans l'expérience sur la production d'une tension alternative, avec quoi faisait-on tourner le rotor ?
- 4) Vous avez étudié le volcanisme au cours de géologie en classe de 4^{ème}. D'après vous, fait-il plus chaud ou plus froid lorsque l'on s'enfonce dans le sol ?

Activité 2 : Situation-problème (situation de vie)

Muyuka est une localité située dans la région volcanique du Sud-Ouest. Cette localité est pauvre en cours d'eau, les journées ne sont pas suffisamment ensoleillées, il n'y a presque pas de vent qui souffle et, les habitants sont constamment plongés dans un délestage total car la société ENEO est défaillante. Les habitants ne voudront pas cependant manquer la retransmission des matches de la coupe d'Afrique des Nations qui se déroulera dans 2 ans.

- 1) Quel est le problème rencontré par les habitants de Muyuka ?
- 2) Quelle(s) est(sont) la(les) solution(s) que vous pouvez leur proposer ?
- 3) Comment peut-on procéder pour mettre en place la solution choisie ?

Titre de la leçon : Production d'un courant alternatif

Titre de la séance : Modes de production de l'énergie électrique

Objectifs de la séance : Décrire brièvement les modes de production de l'énergie électrique

Activité 3 : fonctionnement d'une centrale géothermique

- 1) Remplir le tableau ci-dessous, en y indiquant les sources d'énergie que vous connaissez parmi les modes de production d'électricité suivants :

Centrale hydroélectrique	Centrale thermique	Centrale solaire	Champ éolien	Groupe électrogène	Centrale géothermique

- 2) Comment procéderiez-vous pour transformer l'eau liquide en vapeur d'eau ?
- 3) La photo ci-dessous est celle d'une centrale thermique. Indiquer les éléments observés.
- 4) En suivant le modèle de la centrale hydroélectrique, décrire le principe de production de l'énergie électrique dans une centrale thermique.

- 5) Si on remplace la chaudière de cette centrale par le sous-sol de la région de Muyuka, est-ce que l'ampoule du schéma va s'allumer ? Pourquoi ?
- 6) Donner alors le principe de fonctionnement d'une centrale géothermique.

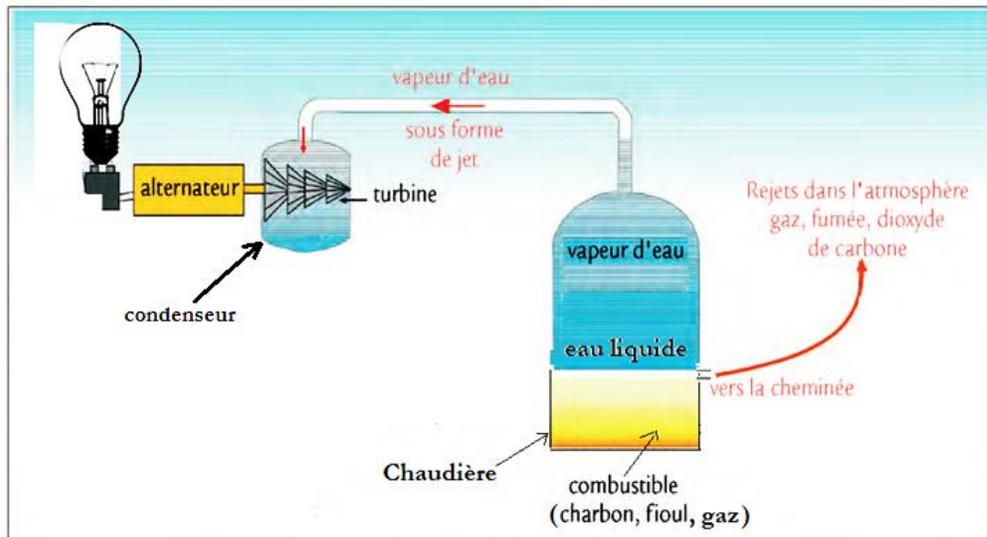


Figure 4.1- Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique [37]

4.5- Conclusion

« L'étude des variations des températures et son implication dans la recherche de l'étude géothermique au quartier Oyom-Abang », thème soumis à notre étude, revêt de manière générale une importance capitale pour les pouvoirs publics et les opérateurs économiques qui pourront s'en servir pour l'exploitation d'un réseau urbain de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. L'implication du sujet de recherche sur le système éducatif s'est traduit non seulement par le renforcement de nos capacités dans l'élaboration, l'analyse et la synthèse des documents, mais également par la capitalisation des expériences réalisées au cours de l'étude afin de mieux cerner l'APC-ESV. Le lien entre la recherche menée et le métier d'enseignant du secondaire a été illustré par la conception d'une fiche d'activités pédagogiques.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Au terme de notre travail de recherche dont le thème s'est articulé autour de « l'étude de la variation des températures des puits du quartier Oyom-Abang-Yaoundé et son implication dans la recherche de l'énergie géothermique au Cameroun », le souci majeur était celui d'évaluer la réponse énergétique que la variation des températures des puits de la zone d'étude peut provoquer. De ce fait, l'objectif visé par cette étude est la résolution du problème énergétique (rareté et pollution) grâce à une énergie propre et renouvelable.

Nous avons dans cet élan fait un état des lieux sur la question au moyen de la revue de la littérature qui nous a permis d'aborder les différents concepts du sujet tels que la géothermie et les facteurs explicatifs de la variation des températures souterraines. Nous avons par la suite présenté le quartier Oyom-Abang ainsi que le matériel de travail utilisé. Le matériel physique, comme le récepteur mobile GPS, le thermomètre Laser, le décamètre et le fil à plomb, a été utilisé pour déterminer respectivement la position géographique des puits, la température, et la profondeur des puits. De même, des logiciels et fichier de calcul à l'instar de Microsoft Excel, Surfer, ou encore la feuille de calcul ÖWAV ont été mis à contribution pour faire des calculs, des représentations graphiques et même des simulations. Les approches expérimentale et analytique ont été au cœur de la méthodologie de notre recherche. La collecte des données sur les vingt-deux puits sélectionnés dans la zone et leur traitement dans les logiciels ont été faits avec toute la rigueur scientifique ; de même, l'analyse du comportement géothermique prévisionnel du sous-sol de la zone d'étude a été illustrée.

A la lumière de ces travaux, il en ressort qu'à faible profondeur, le sous-sol de la zone d'Oyom-Abang est favorable à la géothermie très basse énergie car les températures enregistrées sont toutes inférieures à 30°C ; cette énergie peut être utilisée par les populations de ce quartier pour produire de l'eau chaude sanitaire, réchauffer les pièces humides de la maison, ou encore les refroidir en saison sèche.

Les températures des puits de la zone varient en fonction de la profondeur, des conditions atmosphériques du milieu, et très certainement de la nature du sous-sol et des éléments radioactifs qu'il pourrait regorger. Ce résultat est conforme aux recherches bibliographiques qui étaient révélatrices de ce que la température du puits dépend de la profondeur, de la nature du sol, et du climat.

Enfin, la rigueur scientifique développée au cours de nos travaux de recherche et pendant la rédaction de ce document nous a permis de renforcer nos aptitudes de recherche.

Les études poussées sur le développement de la géothermie pourront permettre au Cameroun de se doter d'une nouvelle source d'énergie afin de résorber le problème énergétique comme le font si bien les pays africains tels que le Kenya ou l'Ethiopie. A terme, ces études permettront de contribuer à l'établissement de la carte du flux géothermique du Cameroun en général et de la ville de Yaoundé en particulier. Elles pourront se focaliser sur d'autres facteurs explicatifs de la variation des températures des puits à l'instar des éléments radioactifs et des paramètres thermophysiques. Ainsi, en vue d'envisager et d'optimiser la production d'énergie géothermique, il sera question dans un futur proche, d'évaluer le potentiel intrinsèquement lié aux éléments radioactifs, source primaire de cette géothermie.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

- [1] **MABROUKI Djamel**, ‘Etude de l’influence des paramètres climatiques sur la température du sol (application au site de Biskra)’, juin 2013
- [2] **MIYOPDJI NJIOGOUA Winnie Sandra**, ‘Etude de la variation de la température des puits d’Emana-Yaoundé et son implication sur le développement de la géothermie’, 2017.
- [3] **Romain VERNIER**, ‘La géothermie en France et dans le monde : comment exploiter la chaleur contenue dans le sous-sol ?’, 11 avril 2013.
- [4] <https://wikiwater.fr>, site consulté le 24 juillet 2018 à 18h00
- [5] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Bilan_radiatif_de_la_Terre, site consulté le 02 Aout 2018 à 08h30
- [6] **Mohamed SAADEDDINE**, ‘Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d’un échangeur air/sol enterré’, 30 janvier 2013.
- [7] **Yousef BELLOUFI**, ‘Etude théorique et expérimentale de l’exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d’un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l’habitat’, thèse de Doctorat LMD en Génie Mécanique, option Génie Energétique, 04 juillet 2017.
- [8] <https://fr.quora.com/Quelle-est-la-temp%C3%A9rature-de-la-terre-%C3%A0-10m-et-et-20m> publié le 04 avril 2017 par Charles Gabouleaou, consulté le 06 aout 2018 à 10h55
- [9] <https://fr.quora.com/Quelle-est-la-temp%C3%A9rature-de-la-terre-%C3%A0-10m-et-et-20m> publié le 03 avril 2017 par Janek Milewski, consulté le 06 aout 2018 à 10h55
- [10] <https://fr.quora.com/Quelle-est-la-temp%C3%A9rature-de-la-terre-%C3%A0-1-m> publié le 06 mars 2018 par Guillaume Penaud. Consulté le 06 aout 2018 à 11h00
- [11] <http://www.collecteurderosee.fr/Etat%20de%20l%20art/evolution%20temperature%20du%20sol/evolution%20temperature%20du%20sol.html>, consulté le 10 juillet 08h30
- [12] **BENDJENIDI Bachir ADDOUN Ben aïssa**, ‘Simulation d’un échangeur de chaleur air /sol de forme spirale’, 03 juin 2017.

[13] <http://svtaubac.e-monsite.com/medias/files/cours-geothermie-.pdf>. Page 2/4 consulté le 09 aout 13h26

[14] **SYNDICAT DES ENERGIES RENOUVABLES,**

http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20communication/2010104945_SERGoothermie20100607L_D.pdf Page 1,3,9/14 consulté le 13 juillet 2018

[15] **Sylvain DELENCLOS**, ‘La géothermie (pompes à chaleur, aérothermie)’, 2016-2017.

[16] **Maurice MOINE** ‘Initiation à la géologie et à la lecture de paysage’, version V4.1 (MM), juillet 2008.

[17] **LES EXPLORATEURS D’ENERGIE**, www.explorateurs-energie.ch, consulté le 30 janvier 2018 à 16h34.

[18] **COFELY**, GDF Suez <https://m.youtube.com/watch?v=NvRw1gLIGM#>, mp4, posté le 14 septembre 2012 et consulté le 14 aout 2018 à 01h05.

[19] Etude **TA-SWISS**, **Géothermie profonde**,

<https://m.youtube.com/watch?v=X2WFPUYQ2mE#>, mp4, posté le 16 Novembre 2015 et consulté le 16 Aout 2018 à 18h15.

[20] **Christian HAPPI**, ‘Energies renouvelables : la sous exploitation de ces technologies au Cameroun’, publié le 02 Juin 2015 et consulté le 08 juillet 2018 à 11h40

<http://christian-happi.over-blog.com/2015/06/energies-renouvelables-la-sous-exploitation-de-ces-technologies-au-cameroun-regorgeant-pourtant-d-un-gigantesque-potentiel-en-termes>

[21] **Jean-Louis Comlan FANNOU**, ‘Analyse et modélisation d’une pompe à chaleur géothermique à expansion directe’, thèse de Doctorat en Génie mécanique, 11 mars 2015.

[22] **C. Maragna, P. Monnot** avec la collaboration de **M. Philippe**, ‘Etat de l’art à l’échelle internationale des méthodes de pré-dimensionnement de sondes géothermiques verticales’, Mars 2012.

[23] **La géothermie, comment ça marche** -<https://m.youtube.com/watch>, mp4, posté le 19 Juillet 2017 et consulté le 25 Septembre 2018 à 12h30, de la 2^e minute à la 3^e.

[24] <http://www.foatcoat.eu/technique/temperature-du-sol/> par G. P. Williams et L. W. Gold, consulté le 21 septembre 2018 à 08h15.

[25] <http://www.malibuzz.tv%20/2018/05/02/acces-a-leau-potable-kanadjiguila-dote-dun-forage/>, site consulté le 24 juillet 2018 à 18h10

-
- [26] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d4/Globe4.jpg/400px-Globe.jpg>
site consulté le 24 juillet 2018 à 18h30
- [27] <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/amp/> , article publié par Adrien Verschaere le 22 mai 2016 et consulté le 12 décembre 2018 à 16h02.
- [28] <http://www.llotenaction.org/medias/images/alternative-infographie-du-site-pilote-de-geothermie.png> consulté le 12 décembre 2018 à 16h14.
- [29] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiches-pedagogiques-energies> consulté le 10 Aout 2018 à 20h11.
- [30] <http://www.pouvoirsafrique.com/2018/09/06/energie-geothermique-le-kenya-domine-lafrique-en-2018/> consulté le 12 décembre 2018 à 16h20.
- [31] <http://www.enr.fr> consulté le 08 Aout 2018 à 08h02.
- [32] Stéphanie Laporte, ‘Petit guide des pompes à chaleur géothermales’, Mars 2004
- [33] <http://www.geothermie-perspectives.fr> consulté le 12 Décembre 2018 à 18h08.
- [34] <http://www.météo.net> consulté le 03 Janvier 2019 à 07h00.
- [35] Feuille de calcul de l’OWAV, www.oewav.at
- [36] <http://www.vagabondjourney.com> consulté le 28 Aout 2018 à 15h15
- [37] <http://www.wikipedia.com> consulté le 13 Octobre 2018 à 15h35
- [38] **Julia TEBA ESTEBAN**, ‘Conception d’un système pour la récupération de l’énergie thermique des chaussées’, 2010-2011.



ANNEXES



ANNEXE 1 : GLOSSAIRE

Aérothermie : c'est un procédé qui permet d'extraire la chaleur de l'air ambiant et de l'exploiter afin de la transformer en énergie.

Aquifères : ce sont gisements naturels d'eau piégée dans des roches magasins poreuses.

Arc volcanique : c'est un ensemble de volcans s'alignant plus ou moins selon une courbe. Il apparaît dans les *zones de subduction* c'est-à-dire les régions dans lesquelles une plaque glisse sous une autre.

Asthénosphère : c'est le manteau moyen ou la zone dans laquelle naissent les magmas (roches en fusion).

Bassin sédimentaire : c'est une portion du globe affaissée recouverte de sédiments et qui se présente sous forme de cuvette dont la structure du sous-sol est composée de couches de roches superposées et parallèles.

Conductivité thermique du sol : c'est la capacité du sol à laisser circuler la chaleur.

Courants de convection : c'est le moteur de la dynamique interne de la terre.

Craton : c'est un vieux socle granitique très rigide n'ayant pas été fragmentée, déformée, ou subi de collisions importantes depuis environ 500 millions d'années.

Décrochement : C'est une faille souvent verticale dans laquelle les 2 compartiments coulissent horizontalement l'un par rapport à l'autre.

Diaclase est une fissure de la croûte terrestre sans déplacement des deux compartiments créés.

Diffusivité thermique du sol : C'est une grandeur physique qui décrit l'aptitude du sol à transmettre de la chaleur à une certaine vitesse.

Dorsale océanique : c'est une longue chaîne de montagnes et de volcans sous-marins dont l'axe est occupé par un rift au niveau duquel se forment en permanence les planchers océaniques.

Eau chaude sanitaire : est une eau chauffée par différents moyens puis acheminée via des canalisations, jusqu'aux points d'utilisation (douche, baignoire, lavabo, évier, etc.).

Éléments radioactifs : ce sont les éléments chimiques instables susceptibles de se transformer en éléments stables avec émission d'un rayonnement.

Énergie géothermique : c'est l'énergie due à la chaleur provenant du sous-sol.

Énergie renouvelable : c'est-à-dire une énergie non polluante et dont le stock est inépuisable à l'échelle humaine.

Faille : c'est une cassure de la croûte terrestre qui s'accompagne d'un déplacement latéral des deux compartiments ainsi créés (ils ne s'éloignent ni ne se rapprochent).

Fluide caloporteur : c'est un fluide porteur de chaleur, un fluide chargé de transporter la chaleur d'un point A vers un point B.

Fluide frigorigène : c'est un fluide qui a la particularité de s'évaporer facilement c'est-à-dire à très basse température (-19°C à -4°C) en aspirant les calories qui sont par la suite véhiculées par le fluide caloporteur.

Flux géothermique : c'est la quantité de chaleur traversant une unité de surface par unité de temps.

Géothermie : c'est un procédé qui permet d'extraire la chaleur du sous-sol et de l'exploiter afin de la transformer en énergie.

Gradient géothermique : C'est l'augmentation de la température souterraine en fonction de la profondeur.

Hydrothermalisme : ensemble de phénomènes liés aux circulations de fluides chauds et riches en eau, activées par des réservoirs magmatiques.

Isotherme : c'est une courbe joignant les points ayant une même température.

Milieu semi-infini : c'est une paroi d'épaisseur suffisamment grande pour que la perturbation appliquée sur une face ne soit pas ressentie par l'autre face.

Penderie : meuble ou armoire prévu pour ranger les vêtements en les suspendant afin d'éviter qu'ils ne se froissent.

Point chaud : c'est une zone de la croûte terrestre qui est perforée en son milieu par la puissance du magma.

Profondeur d'influence aérothermique : c'est la profondeur minimale au-delà de laquelle les variations de température saisonnières n'ont plus d'impact sur la température du sol.

Rift : c'est une région où la croûte terrestre se brise faisant apparaître une gigantesque faille dans laquelle le magma s'engouffre puis se solidifie pour constituer le plancher du fossé d'effondrement (graben). On en trouve sur les continents, où ils portent le nom de rift continental, et au fond des océans, au niveau des dorsales océaniques.

ANNEXE 2 : BULLETIN D'ANALYSE DES DONNEES GENEREES PAR LE LOGICIEL SURFER

Gridding Report

Wed Nov 21 13:55:32 2018

Elapsed time for gridding: 0.02 seconds

Data Source

Source Data File Name: C:\Users\Hp\Desktop\APT1.blm
X Column: C
Y Column: B
Z Column: A

Data Counts

Active Data: 22
Original Data: 22
Excluded Data: 0
Deleted Duplicates: 0
Retained Duplicates: 0
Artificial Data: 0
Superseded Data: 0

Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First
X Duplicate Tolerance: 3.8E-007
Y Duplicate Tolerance: 2.6E-006

No duplicate data were found.

Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

Data Counts

Active Data : 22

Univariate Statistics

	X	Y	Z
Count:	22	22	22
Minimum:	20.8	2.83	722
Maximum:	24	25.43	769
Mean:	22.1909090909	11.4859090909	748.590909091
Median:	22.1	10.01	749
Geometric Mean:	22.1708991824	10.1555759159	748.478000533
Harmonic Mean:	22.151090416	8.90421813212	748.364808967
Root Mean Square:	22.211099805	12.8831219748	748.703515783
Trim Mean (10%%):	22.0894736842	10.5963157895	748
Interquartile Mean:	21.9772727273	9.74818181818	748.363636364
Midrange:	22.4	14.13	745.5
Winsorized Mean:	22.1772727273	10.7940909091	748.5
TriMean:	21.9625	9.6225	747.25
Variance:	0.939199134199	35.6700919913	176.634199134
Standard Deviation:	0.969122868474	5.97244438997	13.2903799469
Interquartile Range:	1.35	4.37	19
Range:	3.2	22.6	47
Mean Difference:	1.12770562771	6.44151515152	15.4242424242
Median Abs. Deviation:	0.8	2.65	10.5
Average Abs. Deviation:	0.813636363636	4.07409090909	11.7727272727
Quartile Dispersion:	0.0307167235495	0.235072619688	0.0126751167445
Relative Mean Diff.:	0.0508183609372	0.560818921735	0.0206043678021
Standard Error:	0.206617689795	1.27332942234	2.83351852533
Coef. of Variation:	0.0436720669939	0.519980120224	0.0177538623373
Skewness:	0.349057969777	0.965708243124	-0.193261638509
Kurtosis:	1.73161242737	2.89602406413	1.70692374189
Sum:	488.2	252.69	16469
Sum Absolute:	488.2	252.69	16469
Sum Squares:	10853.325	3651.4463	12332253
Mean Square:	493.332954545	165.974831818	560556.954545

Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.622	0.162
Y:	0.622	1.000	0.551
Z:	0.162	0.551	1.000