

N° d'ordre : /DSTU/2020



MEMOIRE

Présenté

à



L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE
ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité

Géo-Ressources

par

Baraa Yousra BENSENANE

**DETERMINATION DU FLUX DE CHALEUR DANS LA REGION D'AIN
TEMOUCHENT**

Soutenu le 30/11/2020 devant les membres du jury :

Salamet MAHBOUBI, MC (B), Univ. Tlemcen
Abderezak BOUZID, MR (A), CRAAG
Fatiha HADJI, MC (B), Univ. Tlemcen
Kamar Eddine BENSEFIA, MA (A), Univ. Tlemcen

Président
Encadreur
Co-encadreur
Examineur

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
RESUME	6
ABSTRACT	7
INTRODUCTION GENERALE	8
CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE	
I. SITUATION GEOGRAPHIQUE	9
A. Situation géographique de la zone d'étude	9
B. Localisation des forages	9
II. CONTEXTE GEOLOGIQUE	10
A. Plan morpho-tectonique	10
B. Plan Stratigraphique	11
1. Terrains sédimentaires	11
2. Terrains Volcaniques.....	13
III. LITHOLOGIE DES FORAGES	15
A. Forage Bendouma	15
B. Forage Sidi Saada	17
C. Forage El Halfa	18
D. Forage Kerolise	20
CHAPITRE 2 : NOTIONS GENERALES	
I. NOTIONS SUR LA CHALEUR TERRESTRE	21
II. NOTIONS SUR LA GEOTHERMIE	21
A. Energie : types et production	22
1. Types d'énergie géothermique.....	22
2. Mode d'exploitation de l'énergie géothermique.....	22

B. Gradient géothermique, flux et conductivité thermique	23
1. Gradient géothermique.....	23
2. Flux géothermique	24
3. Conductivité thermique.....	25
III. FLUX DE CHALEUR TERRESTRE.....	25
A. Conduction et convection.....	26
1. Mode de conduction	26
2. Mode de convection	27
B. Flux de chaleur océanique	27
C. Flux de chaleur continentale.....	27
IV. FLUX DE CHALEUR : ESTIMATION	27
A. Loi de Fourier : Estimation du flux de chaleur par conduction.....	28
B. Estimation du flux de chaleur par convection	28
C. Agents affectant le flux de chaleur.....	28
CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE ET RESULTATS	
I. COLLECTE DES DONNEES DE TEMPERATURE.....	30
II. REDUCTION DES DONNEES.....	32
III. DETERMINATION DU GRADIENT GEOTHERMIQUE.....	33
IV. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE	33
V. ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR	34
A. Méthode des gradients géothermiques des courbes températures vs profondeur.	34
1. Forage Bendouma.....	34
2. Forage Sidi Saada	36
3. Forage El Halfa	38

4. Forage Kerolise	40
CHAPITRE 4 : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
I. DISCUSSION	44
II. INTERPRETATIONS DES RESULTATS	45
CONCLUSION GENERALE	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48.
LISTE DES TABLEAUX	50
LISTE DES FIGURES	51

Dédicaces

*Je dédie tout spécialement ce travail à ma sœur, Docteur Manel Fatima Zohra
BENSENANE pour le rôle crucial qu'elle joue en ce temps de pandémie
mondiale et à l'ensemble des cadres médicaux pour leur dévouement et leur
combat.*

*“J'ai appris que le courage n'est pas l'absence de peur, mais la capacité de la
vaincre.”*

-Nelson Mandela

*Je dédie aussi ce mémoire à ma famille, à mes amis, et à toute personne ayant
contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet.*

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur A. BOUZID et à Madame F. HADJI, qui n'ont cessé de m'encourager durant ce travail réalisé dans des conditions sanitaires particulières. Ils m'ont orientée, conseillée et corrigée avec compétence et efficacité. Qu'ils en soient vivement remerciés.

Je remercie vivement Madame S. MAHBOUBI de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

J'adresse tous mes remerciements et respects à Monsieur K. BENSEFIA, non seulement de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner ce projet mais aussi pour tous les efforts et le dévouement qu'il apporte à cette formation de Master, pour que ses étudiants soient encadrés dans les meilleures conditions.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur A. MAROK, qui m'a été d'une grande assistance, qui m'a guidée dans la bonne direction, et qui a toujours été présent pour me conseiller et satisfaire ma curiosité scientifique et professionnelle tout au long de mes 5 ans d'études universitaires.

Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude à tous les enseignants de la formation de Master Géo-ressources Professionnel, spécialement à Madame L. MAHI, une enseignante compétente, compréhensive et très aimable, qui a su allier sérieux et gaieté.

J'aimerais m'adresser à mes parents qui m'ont toujours fait confiance, qui m'ont soutenue dans tout ce que j'entreprenais et qui ont toujours fait en sorte qu'on ne manque de rien. Qu'ils soient remerciés pour leur disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'ils m'ont prodigués.

Une pensée particulière à mon grand-père Papassi qui m'a toujours encouragé, soutenu et cru en moi, et à ma grand-mère Hbibba pour sa gentillesse et sa bienveillance.

Merci à tous mes amis, plus spécialement à MANKOURI Neda Lamis, à YADI Sarra Zineb, à BELLA Soraya et à ABI AYAD Chakib qui m'ont appris durant toutes ces années ce qu'était l'amitié pure et sincère.

Enfin je remercie chaque personne qui de près ou de loin, m'a fourni une aide informative ou autre, notamment toute l'équipe du CRAAG qui a fait de mon séjour au sein de leur centre une expérience scientifique et professionnelle enrichissante.

L'objectif de cette étude concerne une étude géothermique de quatre forages situés dans la région d'Aïn Temouchent (NW, Algérie). Des mesures de résistance électrique ont été conduites à l'aide d'une thermistance en fonction de la profondeur avec des pas de 5 mètres sur des profondeurs atteignant les 200m. Des gradients géothermiques ont été calculés moyennant les températures déterminées à partir des mesures de résistance réalisées durant la descente de la sonde et lors de sa remontée.

Les valeurs du gradient géothermique ponctuel déterminées à partir des courbes $T=f(P)$, ont permis de calculer un gradient

géothermique moyen compris entre 6 et 11 °C/km dans les forages de Sidi Saada, Kerolise et Bendouma. Des gradients plus importants, compris entre 37 et 41°C/km, ont été déterminés au forage El Halfa .

Les flux de chaleur ont été estimés à partir des valeurs de conductivités géothermiques et celles des gradients géothermiques.

Les flux géothermiques moyens estimés dans les trois premiers forages sont compris entre 14.52 ± 2.90 et 24.31 ± 4.86 mWm^{-2} . Le flux le plus important (78.6 ± 15.72 mW m^{-2}) a été enregistré au forage El Halfa.

Mots clés : Ain Temouchent, Forages, Gradient géothermique, Flux géothermique.

The objective of this study concerns a geothermal study of four boreholes located in Ain Temouchent region (NW, Algeria). Electrical resistance measurements were carried out using a thermistor as a function of depth with steps of 5 meters at depths up to 200m. Geothermal gradients were calculated from the temperatures determined from the resistance measurements taken during the descent of the probe and during its ascent.

The values of the point geothermal gradient determined from the curves $T = f(P)$, made it possible to calculate an average

geothermal gradient of between 6 and 11 °C/km for Sidi Saada, Kerolise and Bendouma boreholes. Larger gradients, between 37 and 41 °C/km, were determined in the El Halfa one.

The heat fluxes were estimated from the values of geothermal conductivities and those of the geothermal gradients.

The estimated average geothermal fluxes in the first three boreholes were between 14.52 ± 2.90 and 24.31 ± 4.86 mWm^{-2} . The greatest flux (78.6 ± 15.72 mW m^{-2}) was recorded in El Halfa forage.

Keywords: Ain Temouchent, Boreholes, Geothermal gradient, Geothermal flux

Actuellement, notre planète fait face à de grands problèmes environnementaux liés aux sources énergétiques existantes polluantes et non renouvelables (charbon et combustibles fossiles), et à leur rareté, surtout que de nos jours, la demande des énergies ne fait qu'accroître avec le mode de vie de notre époque (transports, équipements électriques, usines...etc.). Cette situation a mené différents chercheurs et développeurs scientifiques à rechercher dans l'environnement d'autres sources d'énergie renouvelables, propres et suffisantes pour la consommation et l'utilisation mondiale, telles que l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie géothermique.

Pour s'intéresser à l'énergie géothermique, il faut connaître l'état thermique de la lithosphère en déterminant le flux de chaleur émanant des profondeurs de la Terre. Il est défini comme étant égal au produit du gradient géothermique par la conductivité thermique des formations géologiques traversées. Le gradient géothermique est obtenu en mesurant la profondeur de la température dans un forage en état d'équilibre thermique (pas d'activité d'exploitation) à l'aide d'une thermistance calibrée (sonde) avec une grande précision. D'autre part, la conductivité des roches peut être mesurée au laboratoire sur des échantillons de roches prélevés dans les formations géologiques traversées par le forage, faute de quoi, elle sera estimée à partir du log lithologique du forage moyennant des tables de valeurs issues des études antérieures.

Dans le présent travail, il est proposé de réaliser des mesures de température dans quatre forages en équilibre thermique (c'est-à-dire en non exploitation) situé dans la région d'Ain Temouchent. L'exploitation des mesures de forage permettra d'estimer le gradient géothermique à travers ce dernier. Le flux de chaleur sera déduit au niveau de chaque forage. Les valeurs obtenues seront interprétées en fonction du contexte géologique.

Notre travail est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre portera sur la localisation géographique des points étudiés et le contexte géologique de la région d'étude.
- Le second traitera du concept général de la chaleur, y compris de l'origine de la chaleur, de la manière dont elle s'écoule de l'intérieur vers la surface de la Terre et de la façon dont elle peut être estimée.
- Le troisième, sera consacré à la présentation de la méthode utilisée et au traitement des données
- Et le dernier présentera l'interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE

A. Situation géographique de la zone d'étude

La région de notre étude correspond à la wilaya d'Ain Temouchent (Figure 1) ; appartenant à la région Nord-Ouest du territoire Algérien, à l'extrémité occidentale de la haute plaine du Sahel oranais.

- La région d'Ain Temouchent dispose d'une façade maritime de 80km. Elle est limitée :
 - au Nord par la mer Méditerranée ;
 - à l'Ouest par les Monts des Traras;
 - au Sud-Ouest par les Monts des Sebaâ Chioukh;
 - à l'Est par la plaine de M'Leta;
 - au Sud-Est par les Monts des Tessala.

B. Localisation des forages

Les forages concernés par l'étude sont situés dans quatre (04) communes de la wilaya d'Ain Temouchent (Figure 1) sont ;

- le forage Bendouma à la commune d'Ain Kihel,
- le forage Sidi Saada à la commune d'Aghlal,
- le forage El Halfa à la commune d'Oulhaça,
- le forage Kerolise à la commune de Hammam Bou Hadjer

Les forages sont situés dans la région d'étude qui est limitée à l'Est par la Sebkhia d'Oran, au Sud par les Monts des Tessala et à l'Ouest par les Monts des Traras.

La figure 1 montre la localisation géographique des forages retenus pour cette étude.

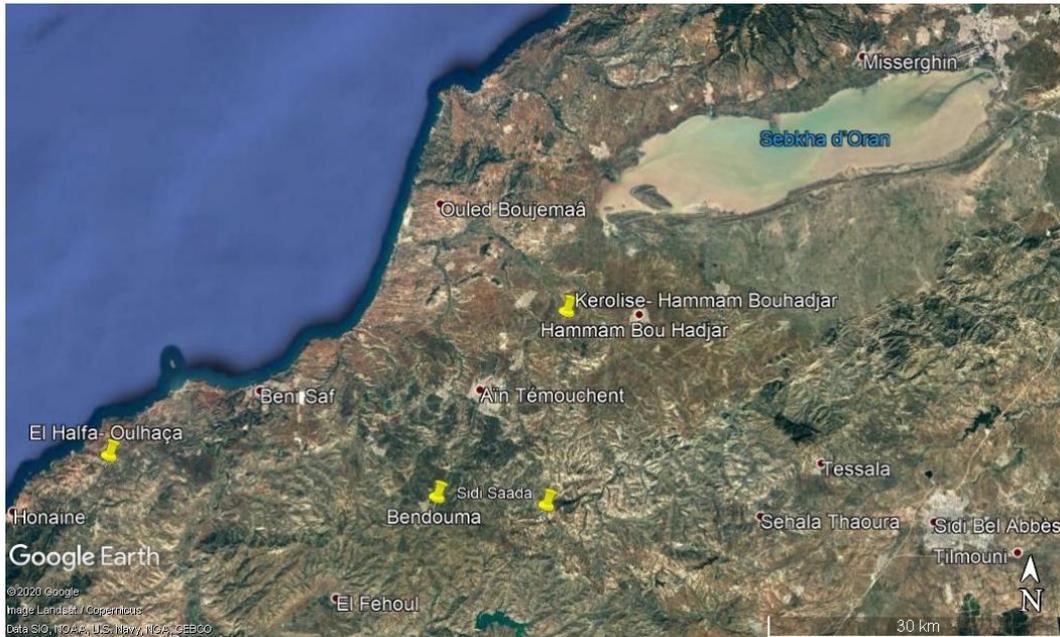


Figure 1: Localisation des forages étudiés.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La structure géologique de la région d'Ain Témouchent est constituée par des formations volcaniques de type basaltique et de cendres volcaniques, qui doivent leur apparition aux éruptions du Pliocène et du Quaternaire. Ces formations recouvrent toute la partie Sud-Est et Sud d'Ain Témouchent. (Bechlaghem et Dekhli 2015):

On distingue trois types de formation ;

1. des formations basaltiques avec des cendres volcaniques d'âge primaire;
2. des formations sédimentaires constituées de calcaires, d'argiles et de marnes;
3. des formations sédimentaires constituées de tufs et d'alluvions recouvertes de formations argilo-marneuses et argilo-sablonneuses et croûtes calcaires.

A. Plan morpho-tectonique

Sur le plan morpho-tectonique la région d'Ain Témouchent (Figure 2) est délimitée ;

- au Sud, par les reliefs des Monts de Tlemcen et leurs prolongements ;
- à l'Ouest, par les Monts des Traras ;
- à l'Est, la région de Sebaa Chioukh qui est une zone de collines en prolongement occidental du massif des Tessala. Entre ces reliefs, plusieurs dépressions s'échelonnent (plaine d'Ain Témouchent - El Melah et plaine de Hennaya), et une reprise d'érosion intense au niveau des bassins de Bab el Assa, de la Moyenne et Basse Tafna, de l'Oued Isser et du Feid el Atouch

Plusieurs phases tectoniques ont affecté la région d'Ain Temouchent ;

- la tectonique post-nappe ;
- la tectonique de compression;
- la tectonique en distension et en coulissement.

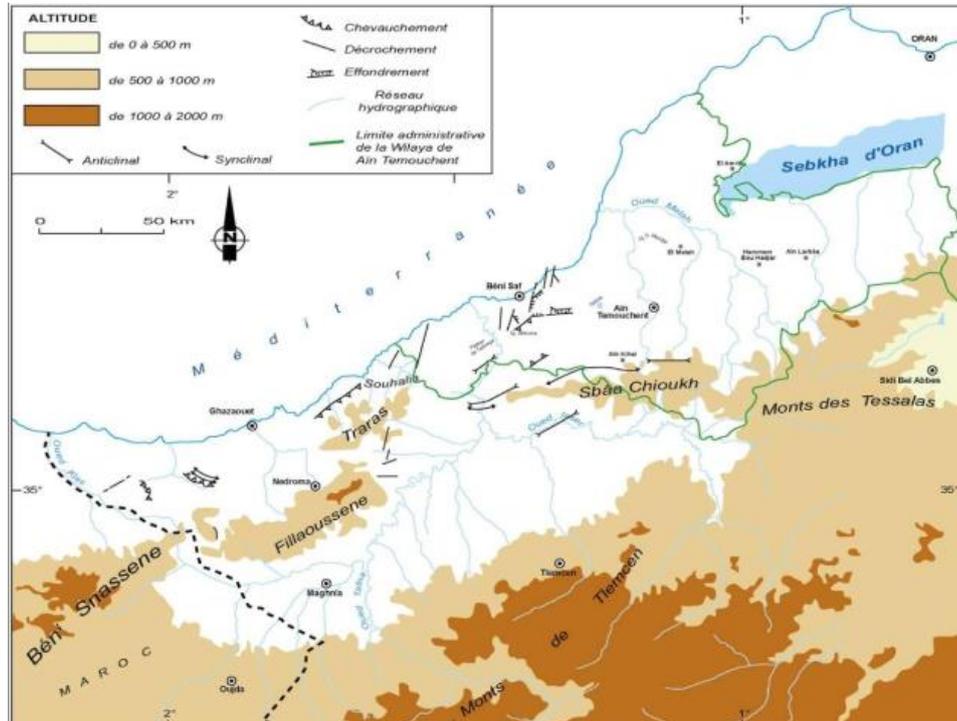


Figure 2: Contexte morpho-tectonique de l'Oranie nord-occidentale

B. Plan Stratigraphique

Sur le plan stratigraphique, la région d'Ain Temouchent est formée essentiellement de sédiments carbonatés marins, représentant des formations datant du Trias jusqu'au Miocène, (Figure 3). On trouve sur cette série sédimentaire, dans quelques endroits (spécialement en allant vers le Nord-Ouest et le Sud-Ouest de la région), des coulées volcaniques récentes d'âge plio-quadernaire.

1. Terrains sédimentaires

La série sédimentaire synthétique de la région d'Ain-Temouchent se présente (de bas en haut) par la succession litho stratigraphique suivante (Bechlaghem et Dekhli 2015):

1.1. Le Trias

Il se manifeste par des points gypso-salifères et des marnes bariolées. Il couvre la partie sud du massif de D'Har El Mendjel. Ces affleurements sont nombreux et recouverts par des alluvions caillouteuses et poudingues tertiaires.

a) Le Lias

Il est représenté au niveau de Djebel Touita et de D'Har El Mendjel par une série de bancs métriques à décimétriques de calcaires gris ou bleu grisâtre, mal stratifiée et fortement fracturés, traversés par des veines multidirectionnelles et généralement remplies par de la calcite. Vers le sommet on trouve des dolomies du même âge, plus compactes.

b) Callovo Oxfordien

Il est constitué par des schistes argileux, intercalés par des filons de calcite blanchâtre et des quartzites lenticulaires. Cette série forme la base des massifs de Djebel Touita et D'Har El Mendjel.

c) Le Néocomien

Il s'agit de schistes et de quartzites ; des schistes argileux avec des intercalations de lentilles de quartzite.

d) Le Miocène

Il est largement représenté dans la région, dans la partie septentrionale où le Miocène post-nappe est discordant sur le Miocène synchro-nappe qui est bien visible au niveau du village Emir Abdelkader (plâtrière). Son épaisseur est d'environ 100 m et est constitué essentiellement par des marnes, des grès et calcaires récifaux.

e) Le Pliocène

Il est discordant sur le Miocène post-nappe et est constitué de grès jaunâtres mollassiques. Ces grès contiennent plusieurs espèces fauniques et sont riches en pectens, en huîtres et en d'autres bio-clastes, tels que les débris de bivalves.

f) Le Quaternaire

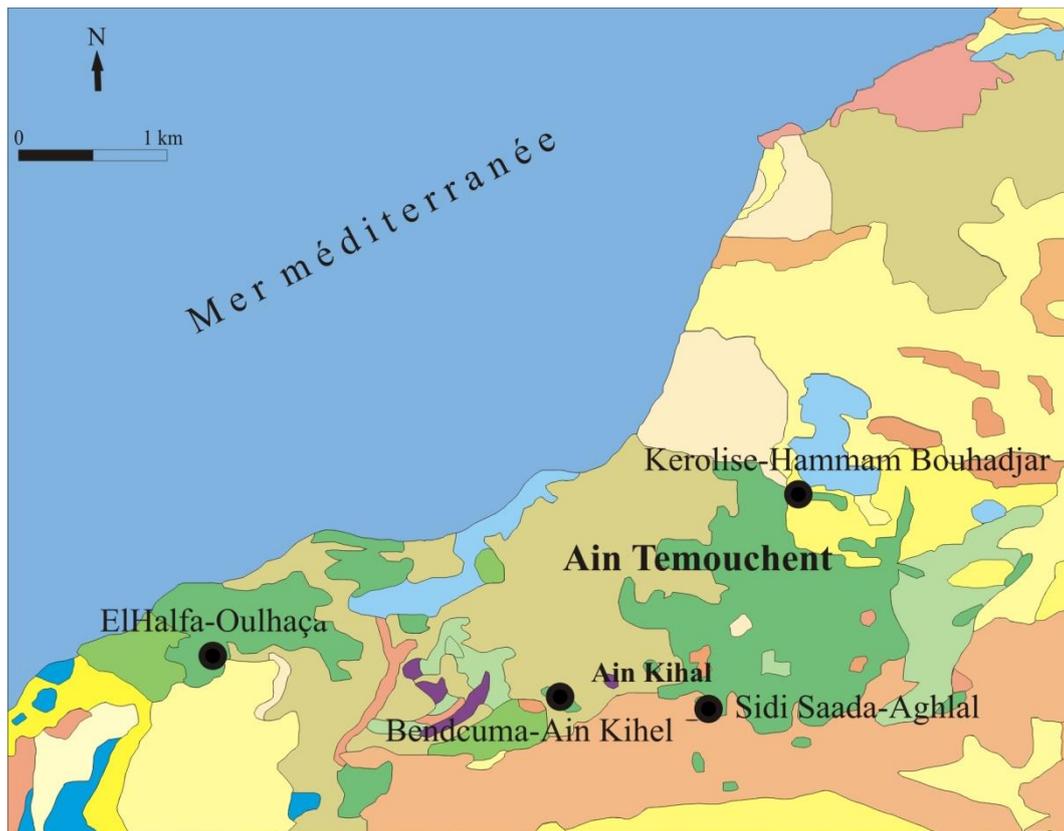
Les dépôts du Quaternaire sont représentés par des alluvions récentes, formés généralement de limons.

g) Le Plio-quaternaire

Il est représenté par une formation continentale et une autre marine. La formation continentale datée du Quaternaire supérieur est représentée par des alluvions et des terrasses. La formation marine d'âge quaternaire inférieur est constituée de calcaires, de grès marins et de marnes argileuses qui affleurent sur la rive droite de l'Oued Tafna.

2. Terrains Volcaniques

Le volcanisme du massif d'Ain Temouchent couvre une superficie de 350 km². Les produits qui ont été émis par ce volcanisme ont atteint les alentours de Chaâbet Elaham, au Nord, Douar Chentouf à l'Est, Ain Tobal et Ain Kihal au Sud et les environs de Sidi Safi à l'Ouest. Le volcanisme de la région occidentale d'Ain Temouchent est caractérisé par son jeune âge parce qu'il s'est manifesté pendant le Quaternaire entre (-1.28 et -0.82 Ma) ([Louni-Hacini et al., 1995](#) ; [Coulo et al., 2002](#)). Les émissions volcaniques varient entre des laves associées le plus souvent à des brèches volcaniques et du volcano-sédimentaire représentées par des roches volcaniques. Les coulées émises reposent sur un substratum représenté par des sédiments néogènes du deuxième cycle post-nappe, et se subdivisent en deux parties : orientale et occidentale ([Ben Doukha et al., 2009](#)).



- Quaternaire continental: alluvions
- Calabrien: grès marin et formation dunaire
- Villafranchien: calcaire lacustre, argile à lignite et couche rouge
- Pliocène continental: poudingue et calcaire lacustre
- Pliocène marin: conglomérat, marne bleue, grès et formation dunaire
- Pontier
- Miocène supérieur marin: calcaire, grès et argile
- Miocène inférieur marin (Burdigalien)
- Oligocène marin
- Eocène inférieur marin
- Crétacé supérieur marin
- Crétacé moyen (marin ou lagunaire)
- Crétacé inférieur (Vraconien à Berriasien)
- Crétacé et Jurassique non séparés
- Jurassique inférieur marin
- Trias marin ou lagunaire
- Permo-Trias: grès rouge et conglomérats
- Forage

Figure 3: Carte géologique de la région d'étude

III. LITHOLOGIE DES FORAGES

Dans ce travail, on a réalisé des mesures dans quatre (04) forages dans la région d'Ain Temouchent (Figure 1)

Les formations recoupées par les forages concernés sont :

A. Forage Bendouma

Le forage Bendouma est situé dans la commune d'Ain Kihel. Il est constitué d'une succession de marnes et de grès et a une profondeur de 190m.

B. Forage Sidi Saada

Ce forage est situé dans la commune d'Aghlal et a une profondeur de 450m. Cependant, lors des mesures, nous n'avons pu atteindre que les 120 premiers mètres à cause de l'installation de la pompe à ce niveau. Les formations qui traversent ce forage sont de bas en haut :

- formation de marnes d'âge plio-quaternaire de quelques mètres d'épaisseur;
- alternances de calcaires et de calcaires gréseux surmontés par des marnes gréseuses et des alternances de marnes et marnes gréseuses admettant des passées calcaires d'âge plio-quaternaire.

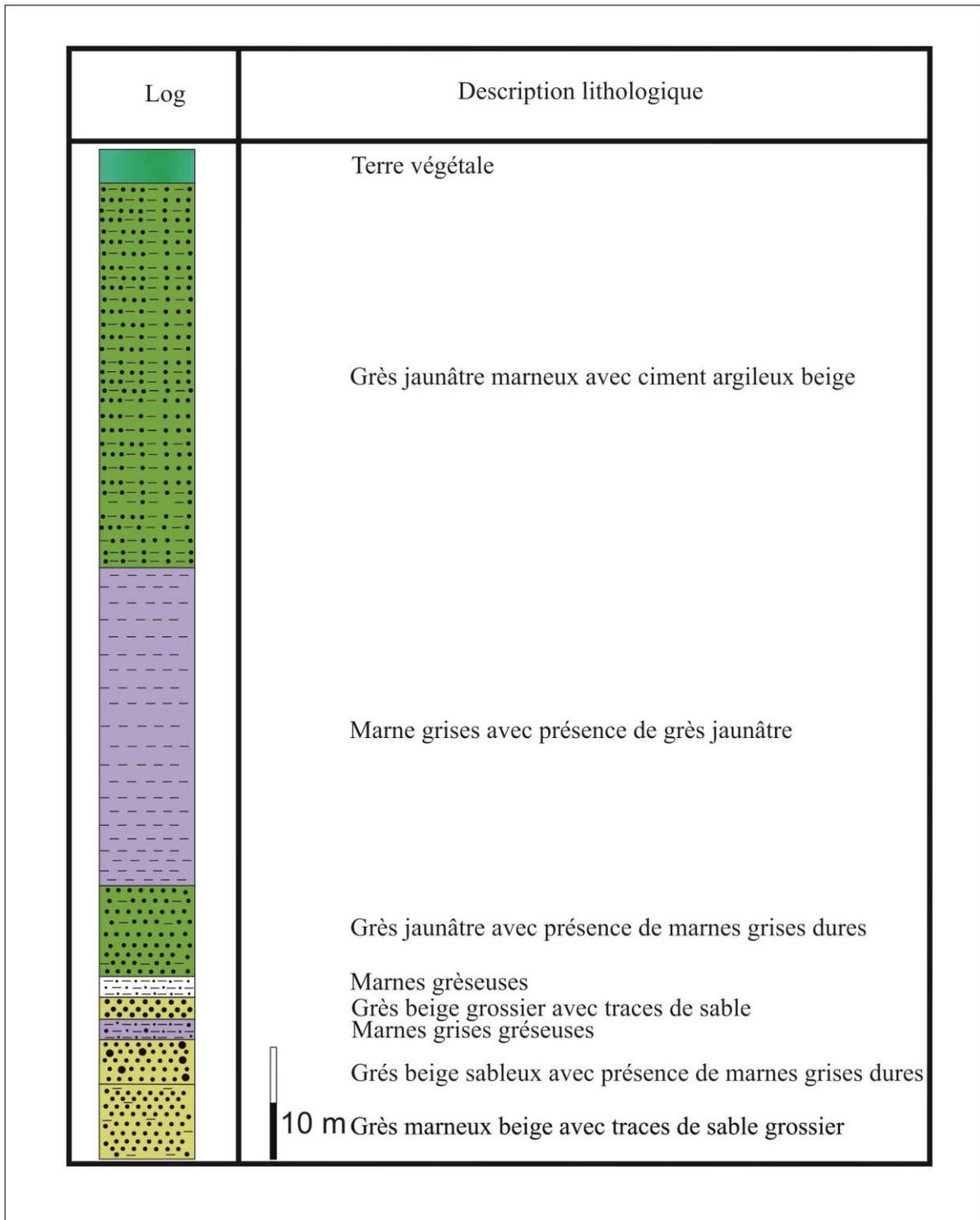


Figure 5: Log lithologique du forage Sidi Saada (0 - 72m)

C. Forage El Halfa

Situé dans la commune d'Oulhaça, ce forage fait 1061m de profondeur mais nous nous sommes arrêté à 85m à cause d'un probable remblaiement jusqu'à ce niveau. Ce forage a traversé les formations suivantes qui sont de bas en haut :

- formations de dolomie noire schisteuse ;

- intercalation de marnes et d'argiles;
- basalte avec des passages de quelques mètres de calcaires et d'argiles;
- formations de roches volcaniques.

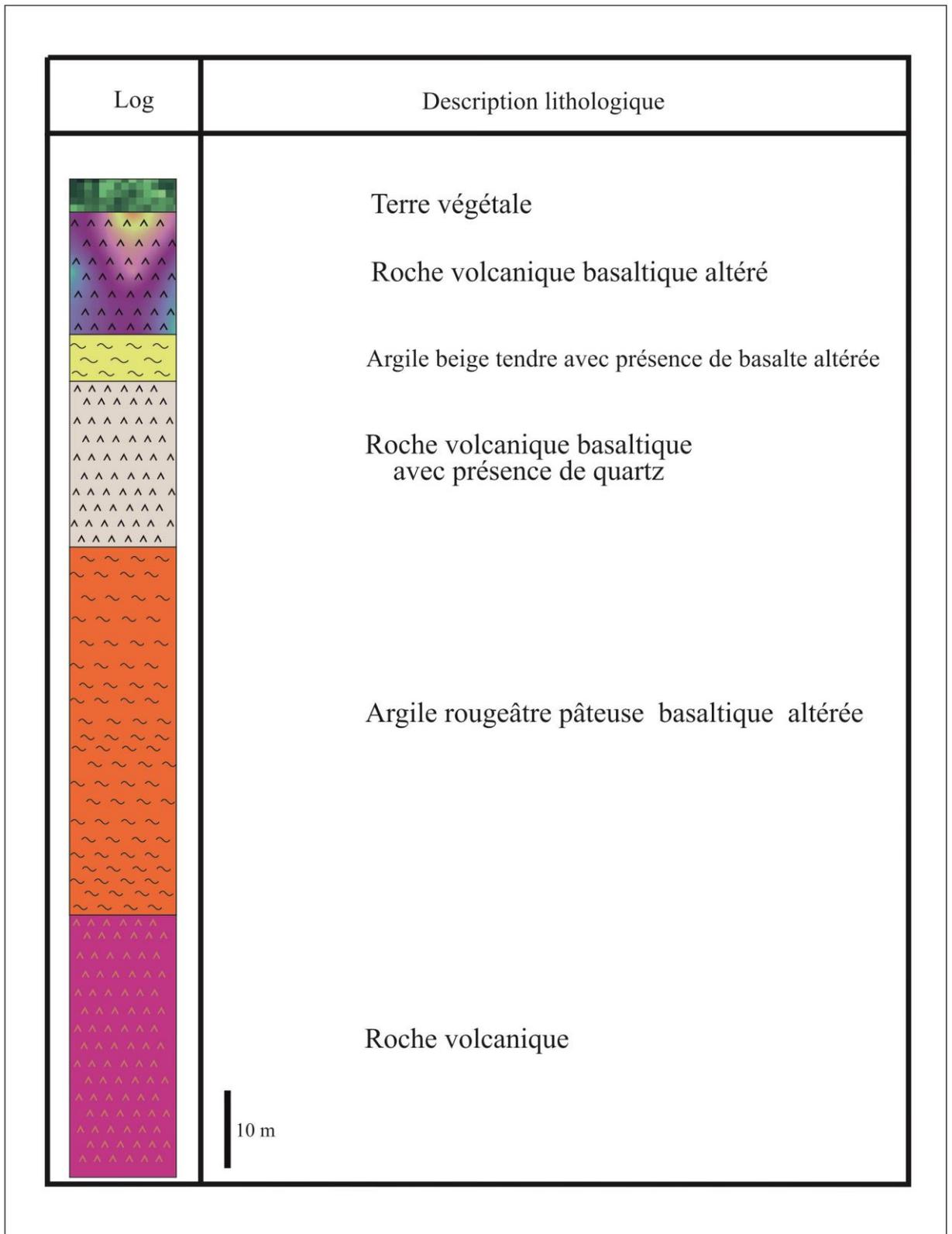


Figure 6: Log lithologique du forage El Halfa (0 – 120m).

D. Forage Kerolise

Ce forage est situé dans la commune de Hammam Bou Hadjer et fait 155m de profondeur. Il est traversé, de bas en haut, par une succession de marnes et de grès atteignant les 100m d'épaisseur et des calcaires marneux.

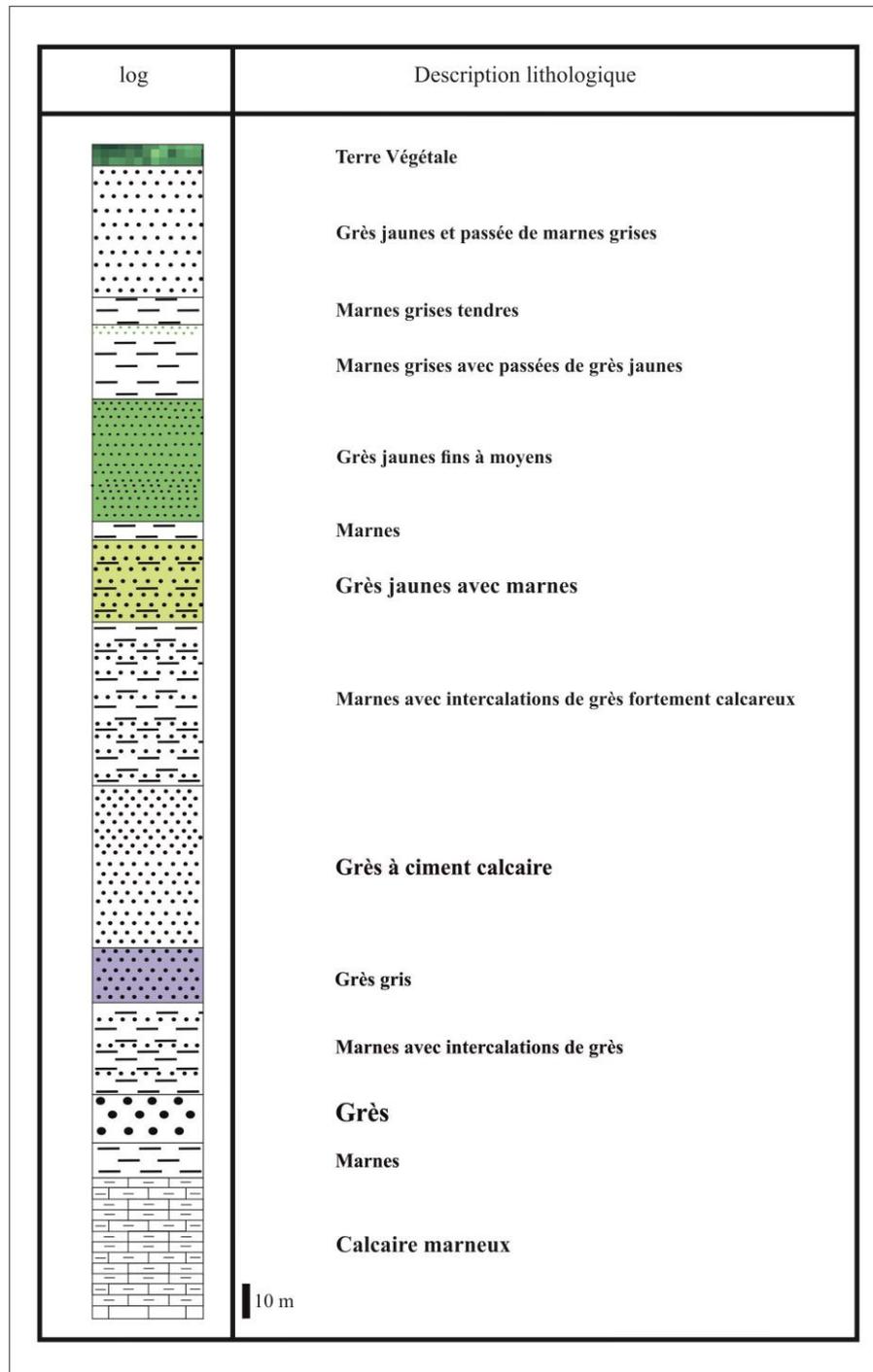


Figure 7: Log lithologique du forage Kerolise (0 – 100m)

CHAPITRE 2 : NOTIONS GENERALES

CHAPITRE 2 : NOTIONS GENERALES

I. NOTIONS SUR LA CHALEUR TERRESTRE

La température au niveau de la croûte terrestre provient en partie de l'intérieur de la Terre (origine interne). Une majeure quantité se trouve stockée dans le noyau et le manteau du globe terrestre, et c'est seulement une petite de cette chaleur qui est dirigée vers la surface de la Terre, surtout, dans les régions volcaniques et sismiques.

La plus grande partie de la chaleur au niveau de la croûte terrestre provient des éléments radioactifs qui sont présents à l'état naturel et en grande quantité dans les roches de la croûte terrestre et du manteau supérieur (Thorium, Uranium ou Potassium). En se désintégrant, ces éléments radioactifs libèrent de la chaleur. Ce phénomène est à l'origine de 90 % du flux de chaleur terrestre et le reste semble être due à :

- la chaleur dégagée par réaction chimique exothermique à l'intérieur de la croûte,
- la friction au niveau des failles qui sont causées par les tensions tectoniques,
- la chaleur dégagée par la cristallisation ou la solidification des roches en fusion lors du refroidissement ([Ouali et al., 2006](#)).

Il y a aussi l'apport de l'énergie solaire sur la surface de la terre qui produit une petite quantité de chaleur d'origine externe.

La chaleur peut aussi provenir des mouvements de la tectonique des plaques lors de la collision de ces dernières ([King, 2016](#)).

D'après [G. Buntebarth \(1984\)](#), on peut conclure que le champ de température peut être modifié par la variation de température à la surface causée par les changements climatiques à travers le temps ou influencée par la morphologie de la surface et de la structure géologique d'une région. Aussi, l'eau et les événements tectoniques peuvent transporter une grande quantité de chaleur par convection.

Tous ces facteurs, en plus du flux de chaleur du manteau supérieur et la croûte inférieure, produisent un état thermique dans la croûte.

II. NOTIONS SUR LA GEOTHERMIE

La chaleur de la croûte terrestre, varie d'une région à une autre. Evidemment, elle est plus accessible dans les zones volcaniques, mais cela ne veut pas dire qu'on ne peut l'exploiter ailleurs.

La géothermie est une source d'énergie dite propre et renouvelable qui vise l'exploitation de la chaleur en profondeur.

On peut distinguer deux types d'énergie géothermique : la géothermie haute énergie et la géothermie basse énergie.

A. Energie : types et production

1. Types d'énergie géothermique

a) Géothermie haute énergie

Ce type d'énergie concerne les gisements des zones continentales actives qui se caractérisent par des températures supérieures à 150 °C (Ouali et al., 2006). Elle permet de capter dans le sous-sol terrestre des eaux et de la vapeur d'eau assez chaude. Elle est utilisée principalement dans les centrales spécifiques pour la production d'électricité.

b) Géothermie basse énergie

Elle concerne les gisements des zones des plateformes continentales stables et recouvertes de terrains sédimentaires, caractérisées par une température comprise entre 30°C et 150 °C. Ce type d'énergie est surtout utilisé pour le chauffage urbain et celui des serres (Ouali et al., 2006).

2. Mode d'exploitation de l'énergie géothermique

Aujourd'hui, la géothermie est de plus en plus exploitée dans des pays à potentiel géothermique car c'est une source d'énergie propre et renouvelable. En Islande, par exemple, cette énergie inépuisable alimente la grande majorité des infrastructures en chauffage et en électricité, du fait de la position du pays, qui se situe entre deux plaques qui en s'éloignant permettant au magma de remonter.

Dans ce système de production, l'énergie est transmise par le biais d'un réseau de tuyauterie (Figure 8) en suivant quatre étapes.

D'abord il faudra creuser un premier forage qu'on appelle le puits de production par lequel l'eau géothermale (l'eau à grande température) est puisée de l'aquifère. Comme cette eau se trouve à des profondeurs importantes, donc surpression, elle remonte naturellement. Il est favorable de rajouter une pompe pour avoir plus de débits.

Une fois en surface, cette eau arrive à la centrale géothermique avec une température importante qui varie selon les régions, et passe à travers un échangeur thermique qui sert à récupérer et transmettre la chaleur à un réseau d'eau de distribution.

Après avoir utilisé cette chaleur dans les réseaux de distribution, l'eau géothermale est récupérée et réinjectée dans l'aquifère, par un autre puits, à une distance importante du point d'extraction pour éviter que cette eau ne tiédise l'eau qui devra être pompée et pour qu'elle ait assez de temps pour se recharger de chaleur.

Donc, l'eau de l'énergie géothermique circule en cycle fermé qu'on appelle « la boucle géothermale ».

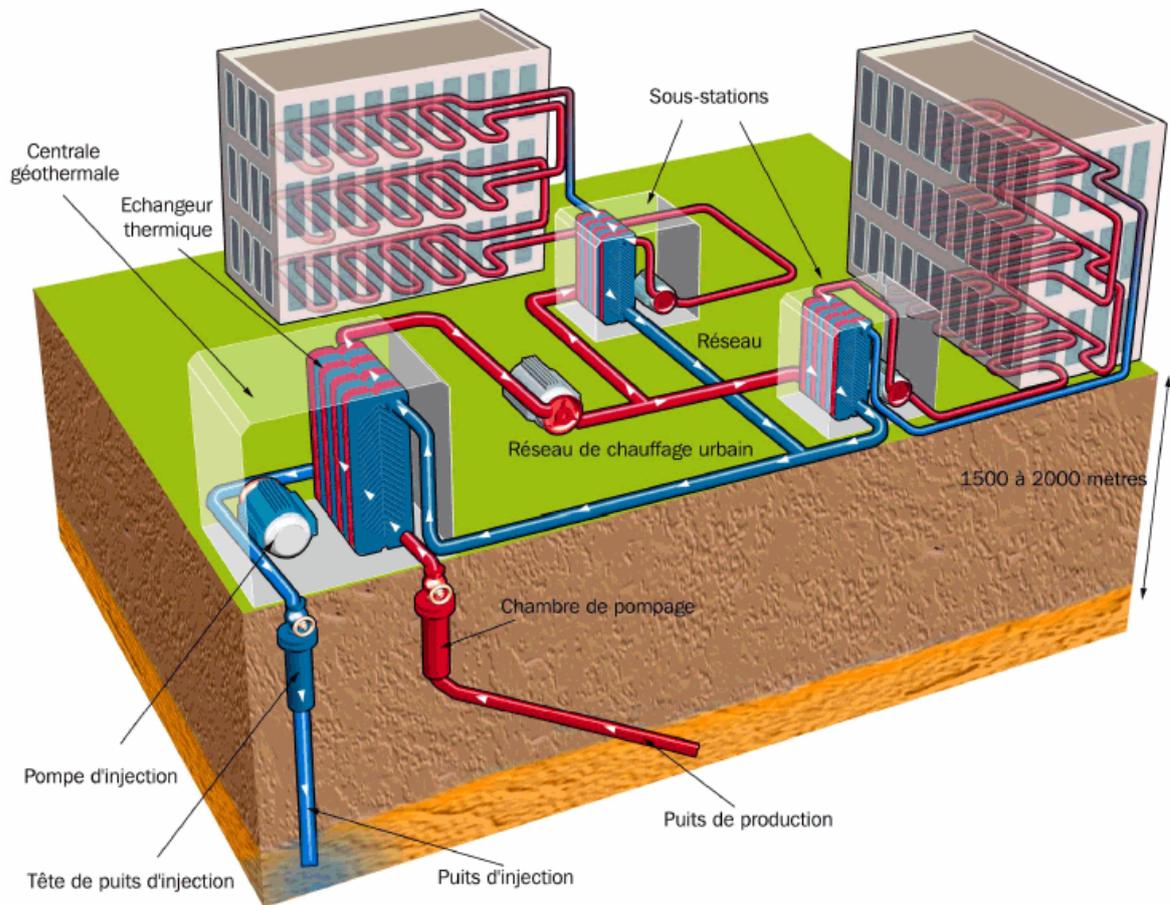


Figure 8: Schéma d'une installation type de géothermie (Magdelaine, 2017).

B. Gradient géothermique, flux et conductivité thermique

1. Gradient géothermique

Le gradient géothermique définit le taux d'augmentation de la température des roches par rapport à la profondeur. La valeur moyenne du gradient géothermique dans la croûte continentale est, en général, de $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (Ouali et al., 2006), mais elle peut varier d'une région à une autre selon :

- la conductivité thermique des couches sédimentaires (facilité à transférer la chaleur des roches),
- la présence d'éléments radioactifs dans la composition chimique des roches,
- la situation géodynamique,
- la présence de l'eau.

Le gradient géothermique (G) est donc l'accroissement de la température (ΔT) avec la profondeur (Δz). Il est donné par la formule suivante :

$$G = \Delta T / \Delta z$$

2. Flux géothermique

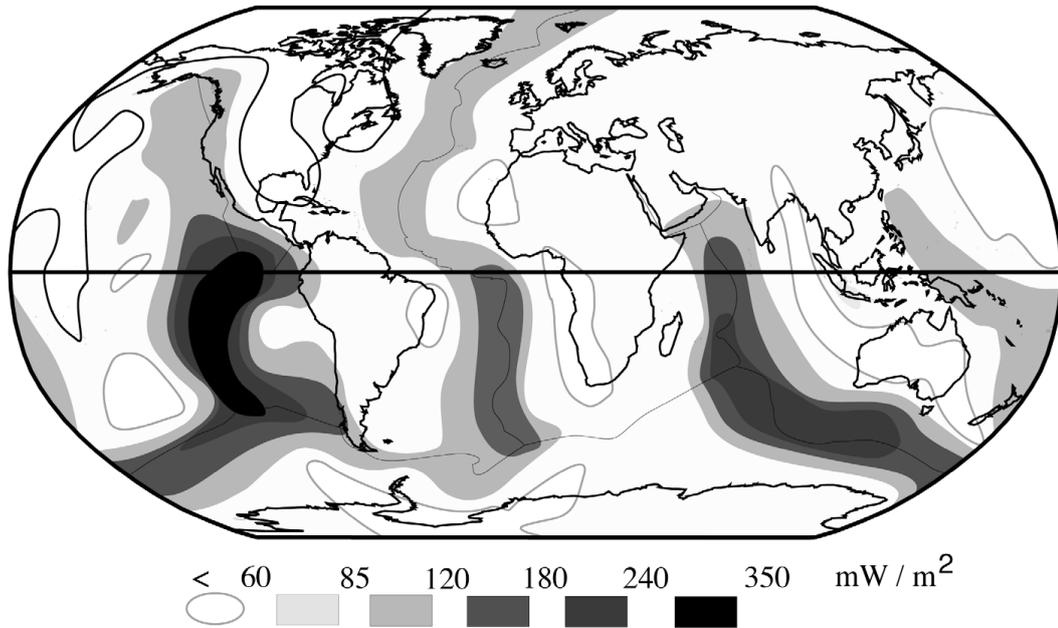


Figure 9: Flux de chaleur (Pollack et al., 1997).

La figure 9, représentant la carte du flux de chaleur terrestre, montre que les valeurs de flux géothermique les plus importantes sont liées aux rides océaniques et ceci d'autant plus que la vitesse d'accrétion est importante.

Le flux géothermique représente donc l'énergie sous forme de chaleur dissipée à travers la croûte continentale et de manière hétérogène car le flux de chaleur varie d'un endroit à un autre (Christopher et al., 1978). A titre d'exemple, il est plus élevé dans les zones volcaniques ou le long des dorsales océaniques. Dans ces zones, les eaux souterraines se réchauffent et peuvent être exploitées pour l'énergie géothermique.

Le tableau 1 montre le flux de chaleur moyen et la chaleur totale dissipée à travers la lithosphère.

	Surface (10^6Km^2)	ϕ moyen (mWm^{-2})	Chaleur dégagée (10^{12}W)
Continents	201	56.5	11.6
Océans	309	78.2	30.4
Total mondial	510	70	42

Tableau 1: Flux de chaleur moyen et chaleur totale dégagée par la Terre (Sclater et al., 1980).

3. Conductivité thermique

La conductivité thermique k est définie comme la quantité d'énergie qui traverse une épaisseur unitaire de matériau (z). Elle représente l'aptitude d'une roche à transmettre la chaleur. Ce paramètre physique est très important dans le calcul du flux de chaleur.

La conductivité d'une roche varie de 1 à 10 $\text{W/m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ (Ouali et al., 2006).

Pour évaluer le flux de chaleur, il faut connaître la conductivité thermique des matériaux terrestres (Tableau 2) et mesurer le gradient géothermique.

Pour la croûte terrestre, k est proche de 2 (les sols et l'océan sont plus isolants), soit une conductivité médiocre, environ 100 fois inférieure à celle de la majorité des métaux.

Constituants	Conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$)
Quartz	7.7 ± 1.2
Calcite	3.4 ± 0.3
Argile	2.7 ± 0.7
Dolomie	5.5 ± 0.5
Anhydrite	6.0 ± 0.4
Sel (halite)	6.6 ± 0.6
Gypse	3.0 ± 0.1
Eau	0.6
Air	0.03

Tableau 2: Conductivités thermiques des principaux constituants (Horai, 1971; Brigaut et Vasseur, 1989).

III. FLUX DE CHALEUR TERRESTRE

Selon Armstead et Varet (1978), la chaleur qui se propage à travers la croûte continentale n'est pas homogène.

Le flux moyen de la Terre est d'environ 65 mWm^{-2} à la surface des continents et de 100 mWm^{-2} au fond de la mer (87 mWm^{-2} pour le globe) (Pollack et al., 1993).

On peut comprendre alors que le flux de chaleur terrestre n'est pas dissipé d'une même manière. La chaleur de la terre est évacuée selon deux modes : la conduction et la convection.

Le transfert de chaleur se fait par conduction dans les solides (indéformables ou rigides) ce qui est le cas de la croûte terrestre.

A. Conduction et convection

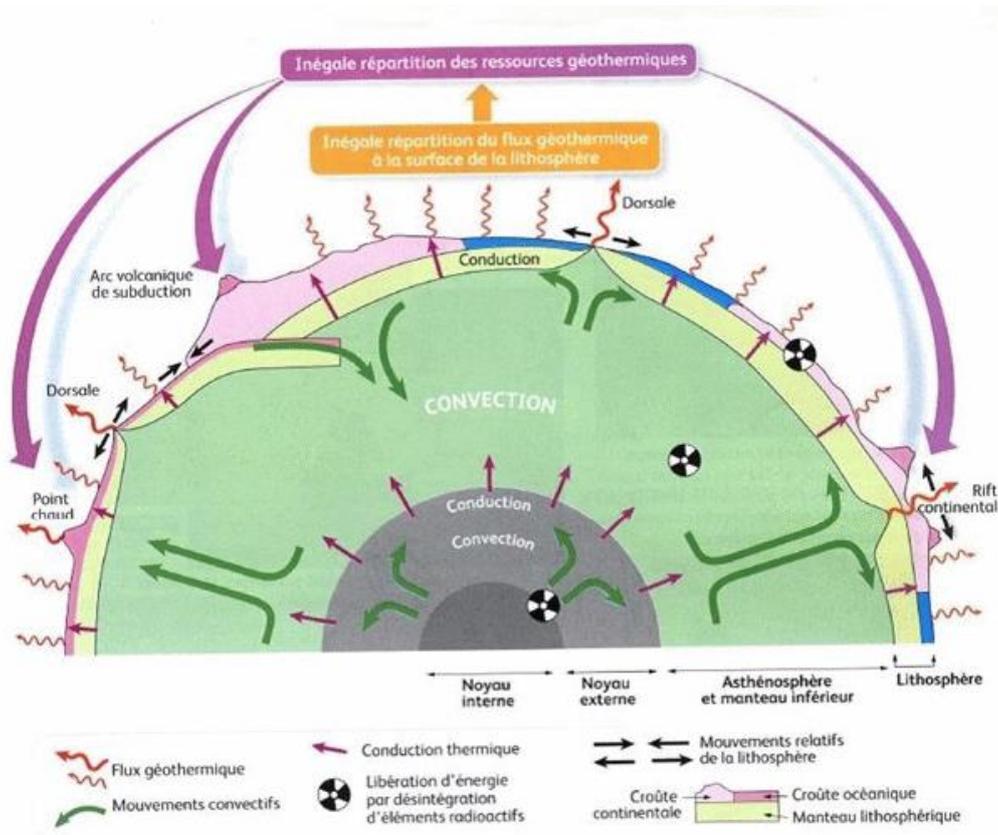


Figure 10: Coupe transversale de la Terre montrant les mécanismes de transport de chaleur dominants.

1. Mode de conduction

La conduction représente le transfert d'énergie thermique par contact direct entre des substances (solides ou fluides stationnaires) dans lesquelles il existe un gradient de température. Le mécanisme de transfert de chaleur impliqué est la diffusion (Sui et al., 2018).

La Figure 10 représente les mécanismes de transport de chaleur y compris le mode de conduction.

Selon (Pitcher et Berger, 1972), le flux de chaleur sous forme de température qui se propage de l'intérieur de la planète à sa surface par conduction, dépend de la situation topographique de cette dernière. Par exemple, lorsque le magma granitique s'introduit dans les roches.

Donc, on retient que le mouvement d'agitation thermique se transmet toujours du milieu chaud vers le milieu froid.

2. Mode de convection

Ce mode de transfert est lié aux mouvements des fluides et est spécifique aux fluides ainsi qu'aux éléments déformables (par exemple les roches à hautes pressions et hautes températures dans le manteau terrestre) (Figure 10).

Il concerne le transfert de chaleur entre deux surfaces par interaction moléculaire. Les mécanismes impliqués dans ce mode de transfert de chaleur sont la diffusion et l'advection (transfert d'énergie par mouvement des fluides en cas de présence d'un gradient de température) (Sui et al., 2018).

Il a été prouvé que le mouvement par convection du magma représentait une source majeure de flux de chaleur du noyau externe et du manteau supérieur, à la surface de la Terre depuis sa création, fournissant un mouvement de plaque tectonique dans lequel la chaleur est transférée par conduction à travers la lithosphère, et la convection dans le magma chaud. (Lister et Buffett, 1995).

B. Flux de chaleur océanique

Sur les fonds océaniques, le flux de chaleur se propage depuis le noyau de la Terre jusqu'à la surface. La chaleur est écoulee d'une partie spécifique et est propagée vers d'autres endroits.

Le cas de la dorsale médio-océanique est un exemple concret. La remontée du magma de l'intérieur de la Terre vers la surface océanique forme une nouvelle lithosphère océanique, dans laquelle l'augmentation ou la diminution du flux de chaleur dépend de l'âge de la lithosphère océanique où la lithosphère récente est plus chaude que l'ancienne (Stein et Stein, 1992).

C. Flux de chaleur continentale

Différent du flux de chaleur sur la lithosphère océanique, le flux de chaleur sur la lithosphère continentale est caractérisé par l'hétérogénéité de la lithosphère, dans laquelle le mécanisme thermique provient du volcanisme qui n'est pas de la plaque de marge ou de la tectonique des plaques, comme la distension, les mouvements de cisaillement et l'intrusion granitique (Wood et Clemens, 2000).

IV. FLUX DE CHALEUR : ESTIMATION

Tout comme les autres sources d'énergie telles que les énergies fossiles par exemple, la chaleur géothermique est une source qui devrait être estimée afin d'être exploitée. Le gradient de température de la croûte terrestre à l'intérieur de la Terre varie, en moyenne, de 25 à 30°C km⁻¹ et d'un lieu à un autre. Cette variation permet de déterminer le gradient de température utilisé dans l'estimation du flux de chaleur (Kirkland, 2010).

A. Loi de Fourier : Estimation du flux de chaleur par conduction

D'après [Pasquale et al. \(2014\)](#), la loi de Fourier stipule que, dans les solides isotropes, la conductivité thermique k est une constante de proportionnalité entre la densité de flux de chaleur q et les gradients de température.

Pour obtenir le flux de chaleur par conduction dans un espace x , ou le taux de chaleur transférée par unité de surface q_x à travers une surface plane, on utilise la loi de Fourier de la conduction thermique ([Sui et al., 2018](#)). Le flux est donné par l'équation :

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

Où

q : flux de chaleur produit (q) par le gradient de température ($\frac{\partial T}{\partial z}$);

$\frac{\partial T}{\partial z}$: gradient de température;

k : conductivité thermique de la roche ou propriété de transport de la substance.

Le signe « moins » exprime que le transfert se fait vers le haut alors que la profondeur z est comptée positivement vers le bas.

B. Estimation du flux de chaleur par convection

Le flux de chaleur convective (q) est donné par l'équation suivante:

$$Q = h (T_{\infty} - T_s)$$

Où

T_{∞} : la température du flux libre en dehors de la couche limite de vitesse;

T_s : la température de la surface sur laquelle la convection est considérée;

h : le coefficient de transfert de chaleur par convection (CHTC).

Le coefficient de transfert de chaleur par convection dépend de la géométrie du système, des propriétés thermodynamiques du fluide, des propriétés thermiques du milieu solide et des conditions aux limites du système.

C. Agents affectant le flux de chaleur

Les mesures de température prises dans un forage sont valables pour le lieu et l'heure de ces derniers, car ces valeurs dépendent de nombreux facteurs environnementaux selon [Buntebarth \(1984\)](#). On peut en citer :

- la variation de température en surface (fluctuations journalières et annuelles périodiques, changements climatiques à long terme),
- l'influence de la morphologie de la surface et la structure géologique de la région crustale adjacente (relief topographique),

- le mouvement de l'eau et les événements tectoniques,
- le taux d'érosion et de sédimentation: ces deux facteurs affectent le flux de chaleur, en particulier dans les fonds océaniques, dans lesquels les sédiments érodés se déposent sur le bassin océanique et augmentent l'épaisseur du fond marin qui perturbe l'équilibre du flux de chaleur,
- l'âge de la croûte: cela peut s'expliquer par la ride médio-océanique où se forme une nouvelle croûte, dans laquelle la croûte jeune est plus chaude que la croûte ancienne ([Stein et Stein, 1992](#)),
- la présence des éléments radioactifs: la concentration des éléments émet de l'énergie thermique et influence la production de chaleur à l'endroit où il y a peu ou pas d'éléments radioactifs ([Beck, 1965](#)),
- la porosité et la teneur en humidité: ces facteurs influencent la conductivité des roches. Plus la roche est poreuse, plus la conductivité diminue. De plus, les roches humides sont plus conductrices que les roches sèches car l'eau est plus conductrice, mais lorsque la quantité d'eau est supérieure à la normale, elle peut affecter la conductivité globale des roches ([Cermak et Rybach, 1982](#)).

CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE ET RESULTATS

CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE ET RESULTATS

Les estimations du flux thermique continental et océanique ont été réalisées depuis longtemps par différents chercheurs. Par exemple, les premières mesures du flux thermique océanique ont été réalisées par Bullard (1939) et Benfield (1939) et les premières mesures océaniques par Revelle et Maxwell (1952). De nos jours, l'estimation du flux thermique devient le domaine le plus important car c'est l'une des sources d'énergie propres et renouvelables (Pollack et al., 1993).

Dans ce travail, une étude géothermique de quatre forages situés dans la région d'Ain Temouchent a été menée. Le but de cette étude est de définir et d'interpréter le gradient géothermique moyen de la région, en mesurant les résistances électriques et en déterminant les températures moyennes à l'aide d'un matériel adapté et des séries de calculs.

I. COLLECTE DES DONNEES DE TEMPERATURE

Les mesures de températures ont été réalisées sur une durée de 3 jours (du 27/01/2020 au 29/01/2020) et sur 7 forages dispersés dans différentes communes de la région d'Ain Temouchent. Les modes opératoires des prises de mesures étaient identiques ; un équipement adéquat était mis en place pour la prise de mesures et une fois réalisée, l'équipement était remis dans son emballage avec soin à cause de sa fragilité. La durée de prise des mesures dépendait de la profondeur et de l'état de chaque forage (équipements du forage, boue, obstacles non identifiés, ...). Pour les raisons suscitées, seuls quatre forages ont été sélectionnés.

Les mesures de températures ont été réalisées à l'aide d'un équipement composé d'une sonde à thermistance composée à son tour d'un capteur, d'un câble et d'un système d'acquisition de données. Cette dernière est une résistance électrique dont la valeur dépend de la température ambiante. La mesure de la résistance électrique permet donc de déduire la température avec une très grande sensibilité. Le matériel utilisé est d'une sensibilité de 0.001 °C aux changements de température.

La thermistance a une résistance qui diminue lorsque la température augmente et une résistance accrue lorsque la température diminue.

Les mesures de la résistance ont été prises à des pas de profondeurs de 5 mètres à l'aide d'un multimètre et notées, lors de l'injection de la sonde de thermistance dans le forage, durant sa descente et sa remontée. Lors de l'acquisition des mesures, il faut prendre en considération qu'il est possible de commettre une erreur d'environ 20 cm sur la profondeur et d'à peu près 5 à 10 ohms sur la résistance.

Il est indispensable de noter l'heure, la date, les coordonnées géographiques et les données géologiques (si possible) à chaque mesure.

Les données collectées sont introduites ensuite dans un ordinateur pour un traitement ultérieur après soustraction de la résistance du câble utilisé lors des enregistrements. Les valeurs ainsi soustraites sont respectivement de 137.6, 136.2, 136.4 et 140.7 Ω dans les forages, kerolise, Sidi Saada, Bendouma et d'El Halfa.

Les valeurs des résistances mesurées ont permis le calcul des températures à l'aide du logiciel Microsoft Excel et le tracé des graphes de la résistance en fonction des profondeurs pour déterminer l'homogénéité ou l'hétérogénéité des couches recoupées par les forages lors des mouvements descendant et ascendant de la thermistance et du câble (Figures 11, 12, 13 et 14).

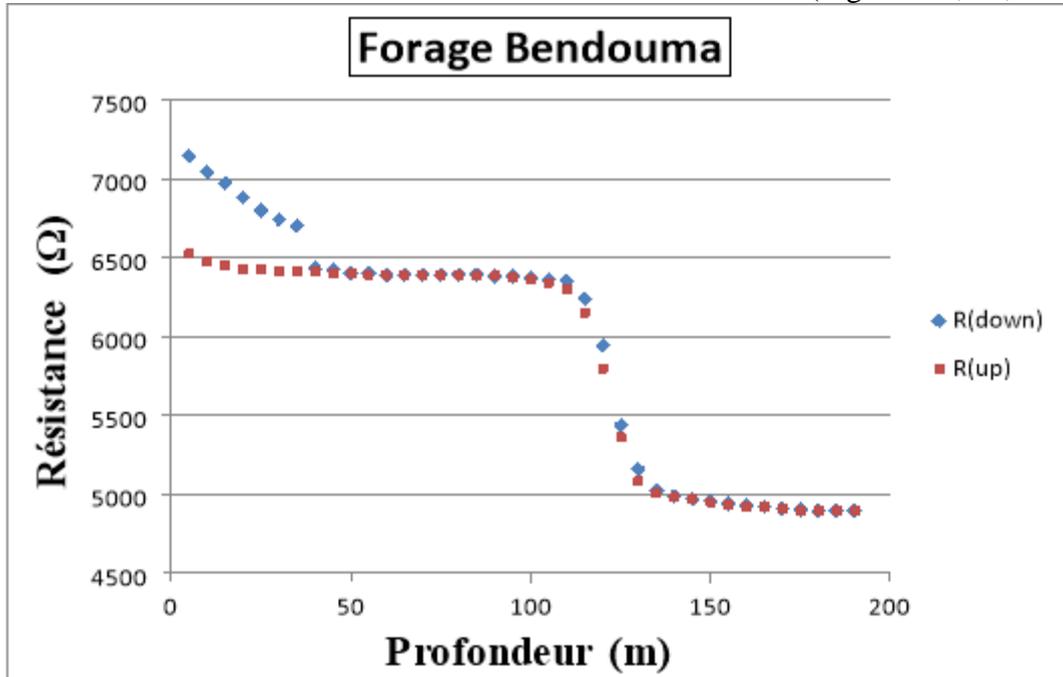


Figure 11: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage Bendouma.

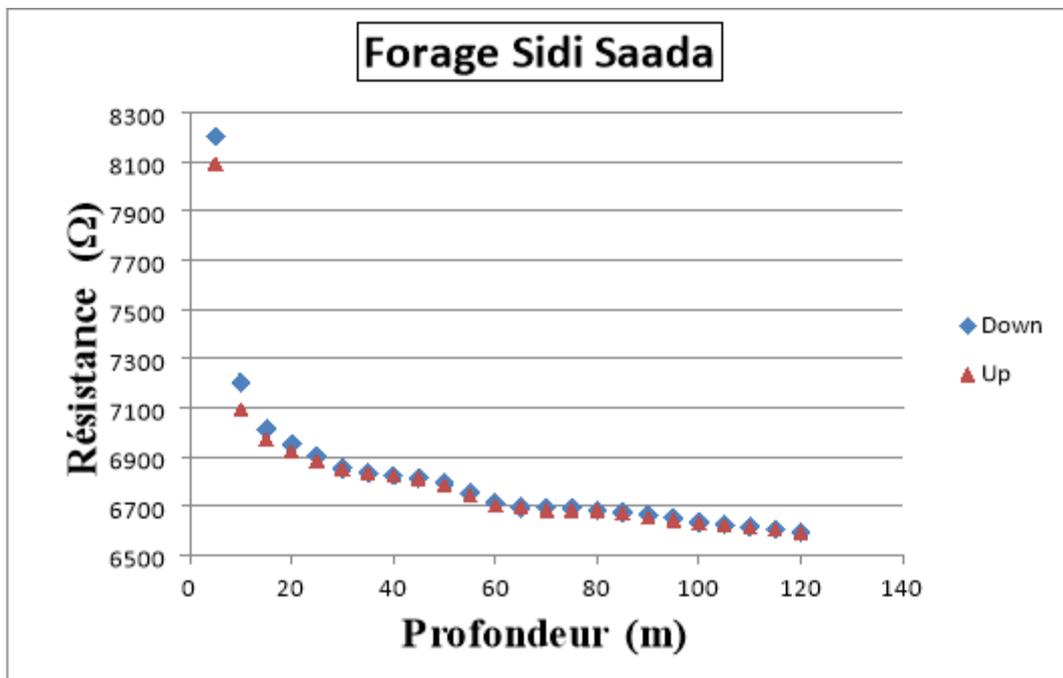


Figure 12: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage Sidi Saada.

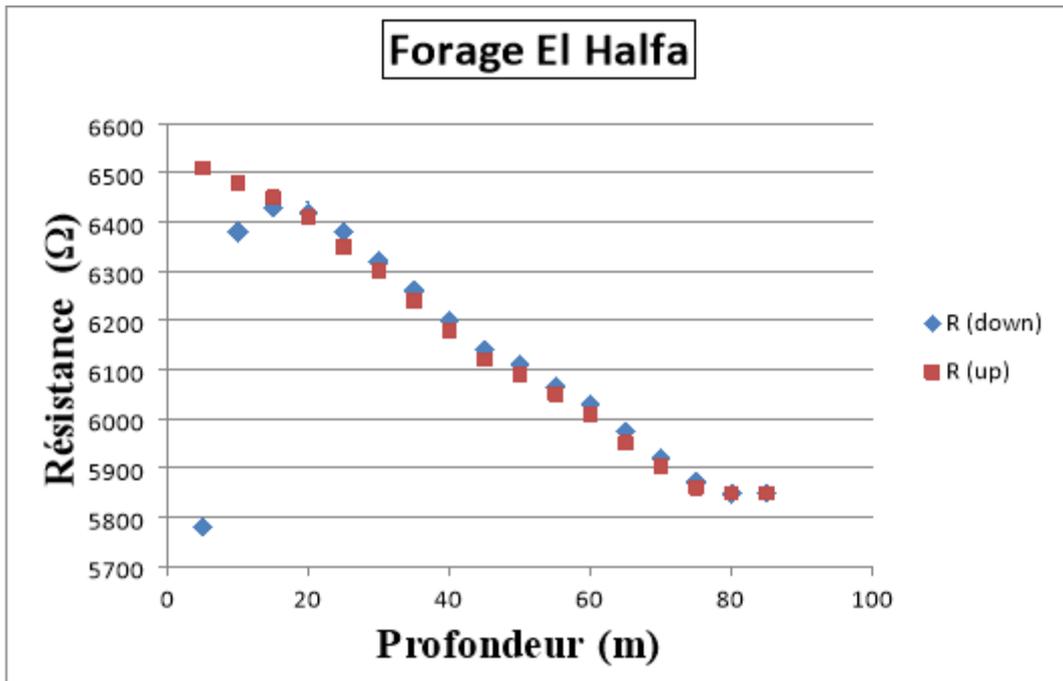


Figure 13: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage El Halfa.

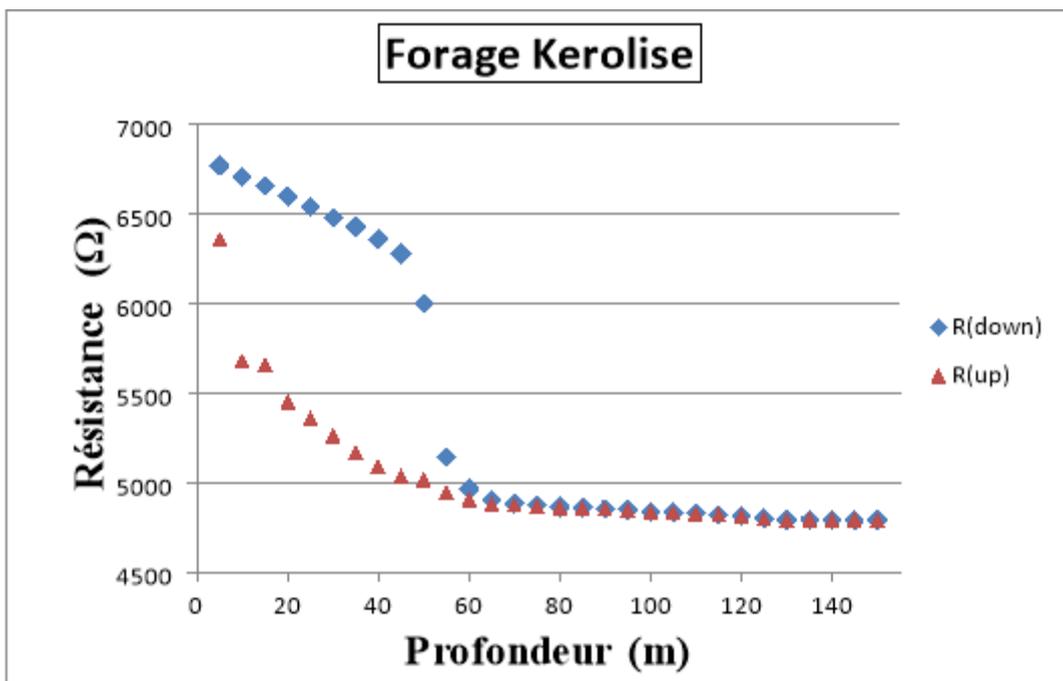


Figure 14: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage Kerolise.

II. REDUCTION DES DONNEES

Lors du traitement des données, les valeurs de températures retenues sont celles qui ont été prises dans la colonne d'eau. Celles prises dans l'air, ont été rejetées à cause de l'instabilité de la température dans cette tranche due à l'effet climatologique. Les données qui sont assez

superficielles prises dans la colonne d'eau (jusqu'à ± 60 à 70 m de profondeur dans le cas de 3 forages ; Bendouma ,Sidi Saada et Kerolise) sont probablement affectées aussi par l'effet climatique. Elles ne sont donc pas très fiables et, de ce fait, il est préférable d'avoir des mesures plus profondes (>70 m).

Après avoir sélectionné les données de résistance en ohm, il est indispensable de faire la transformation des résistances en température (°C). Cette dernière est réalisée en utilisant une courbe d'étalonnage de la thermistance ou en utilisant la relation de Steinhart-Hart (1968), donnée par l'équation suivante:

$$1/T=A+B \times \ln R+C(\ln R)^3$$

Où,

R est la résistance de la thermistance (Ω) à la température T (Kelvin) et A ($= 1298 \times 10^{-6}$) B (234×10^{-6}) et C ($=1.05 \times 10^{-7}$) sont des coefficients à valeurs constantes de la thermistance. Les constantes A, B et C ont été obtenues par calibration de la thermistance.

III. DETERMINATION DU GRADIENT GEOTHERMIQUE

Les enregistrements des variations des températures en fonction des profondeurs dans les forages permettent la détermination des gradients géothermiques. Ces enregistrements réalisés à l'aide de la thermistance, sont donnés sous forme de résistance et ensuite transformés en température.

Le gradient géothermique a été déterminé dans tous les forages à partir des courbes des températures en fonction de la profondeur établies pour chaque forage étudié (Figures 15, 18, 21 et 24).

Il faut considérer aussi une erreur d'environ 20% dans la détermination du gradient géothermique.

IV. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

La conductivité thermique peut être mesurée in-situ ou au laboratoire sur des échantillons de roches collectés sur le site lors du forage d'un puits. A défaut, elle peut être estimée à partir du log lithologique du forage même avec une erreur relativement importante, ce avec quoi nous avons travaillé.

Au forage Bendouma, la formation géologique concernée par les mesures était constituée de marnes entre les profondeurs 140 et 175m.

Au forage Sidi Saada, les deux formations géologiques retenues sont composées d'une superposition de grès, marnes, calcaires et grès comprises entre les profondeurs 80 et 95m et une intercalation de calcaires et de grès entre 100 et 125m.

Dans le forage El Halfa, la première formation géologique située entre les profondeurs 20 et 45m est constituée de basalte et d'argile. La seconde formation, représentée par des argiles, se trouve entre les profondeurs 50 et 75m.

Dans le forage Kerolise, 3 formations géologiques différentes composées d'une alternance de grès et de marnes (entre les profondeurs 70 et 130m) ont été retenues.

La conductivité thermique est donc estimée, dans chaque forage, pour chaque constituant ensuite en calculant une moyenne pour chaque formation géologique à partir des logs lithologiques, en considérant une erreur de l'ordre de 20%. Par exemple si K est de 3 W/m/K, alors on peut dire que $K = 3 \pm 0.6$ W/m/K.

Pour calculer la conductivité thermique effective d'une roche à utiliser dans la détermination du flux à partir d'un mélange de minéraux et de fluides remplissant les pores, il est nécessaire d'utiliser les valeurs appropriées des conductivités thermiques de la matrice.

La formule de mélange utilisée pour calculer la conductivité globale k d'une roche (et sa capacité thermique) est basée sur la moyenne géométrique:

$$k = k_1^{f_1} \times k_2^{f_2} \times k_3^{f_3} \times \dots$$

Où f_1, f_2, f_3, \dots sont les fractions lithologiques et des fluides interstitiels ($\sum f_i = 1$) et k_1, k_2, k_3, \dots sont leur conductivités respectives (Poelchau et al., 1997).

V. ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR

Le flux de chaleur est estimé après la détermination du gradient géothermique et de la conductivité thermique en prenant en compte toujours une erreur de l'ordre de 20%, par exemple si le gradient est de 15 °C/km et K est de 4 W/m/K avec un ordre de 20% d'erreur alors, on peut dire que le flux de chaleur est de $q = 60 \pm 12$ mW/m².

A. Méthode des gradients géothermiques des courbes températures vs profondeur

Cette méthode consiste à utiliser les gradients géothermiques déterminés à partir des courbes de variations des températures en fonction des profondeurs.

1. Forage Bendouma

Nous remarquons, au niveau des courbes de variations de la température en fonction de la profondeur (Figure 15), la présence d'une seule pente qui nous permet de calculer la valeur du gradient géothermique dans ce forage. Le flux géothermique est ensuite calculé en utilisant la valeur du gradient obtenue qui est de ~11 °C/km dans ce forage (Figure 16 et 17).

Les résultats du calcul des flux géothermiques obtenus au forage Bendouma sont regroupés dans le tableau 3.

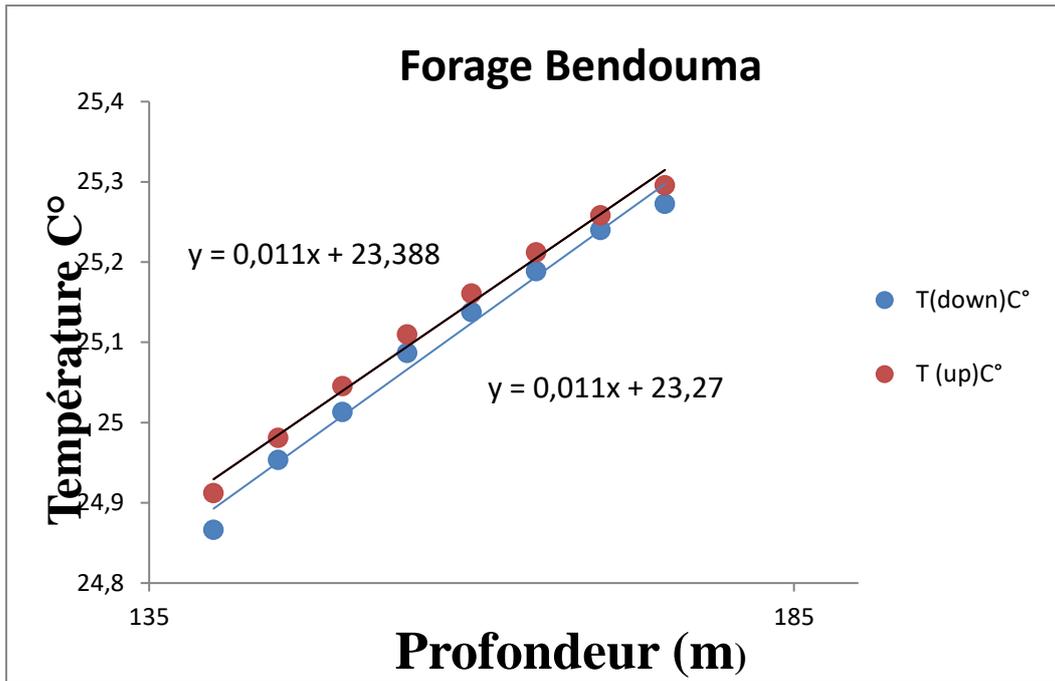


Figure 15: Courbe température vs profondeur au forage Bendouma (135-185m).

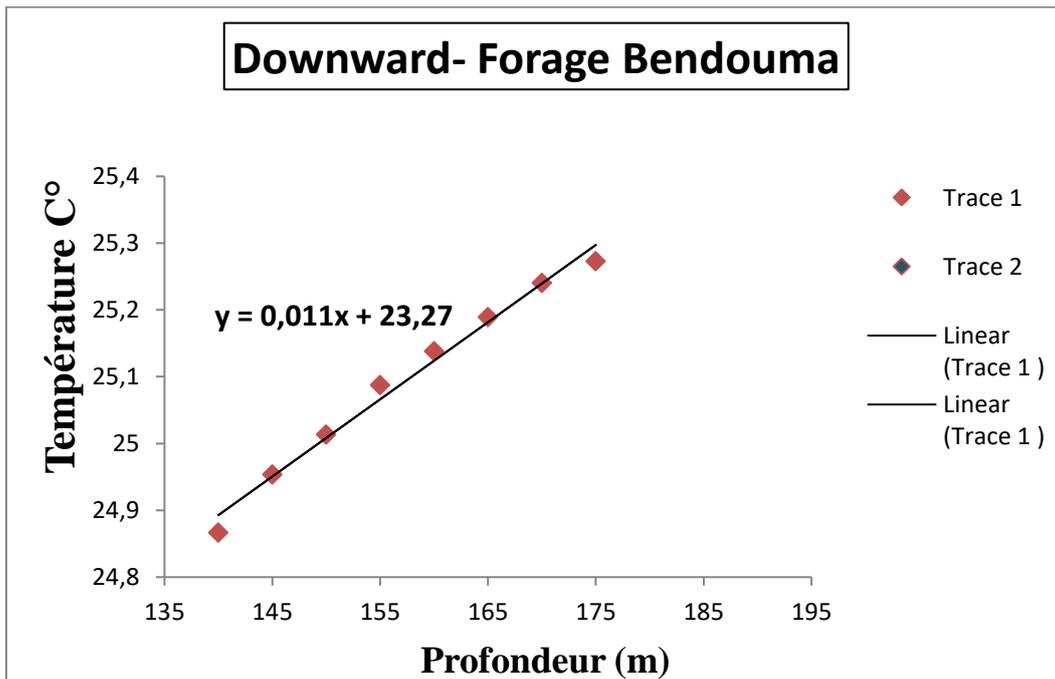


Figure 16: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Bendouma lors de la descente (135-185m).

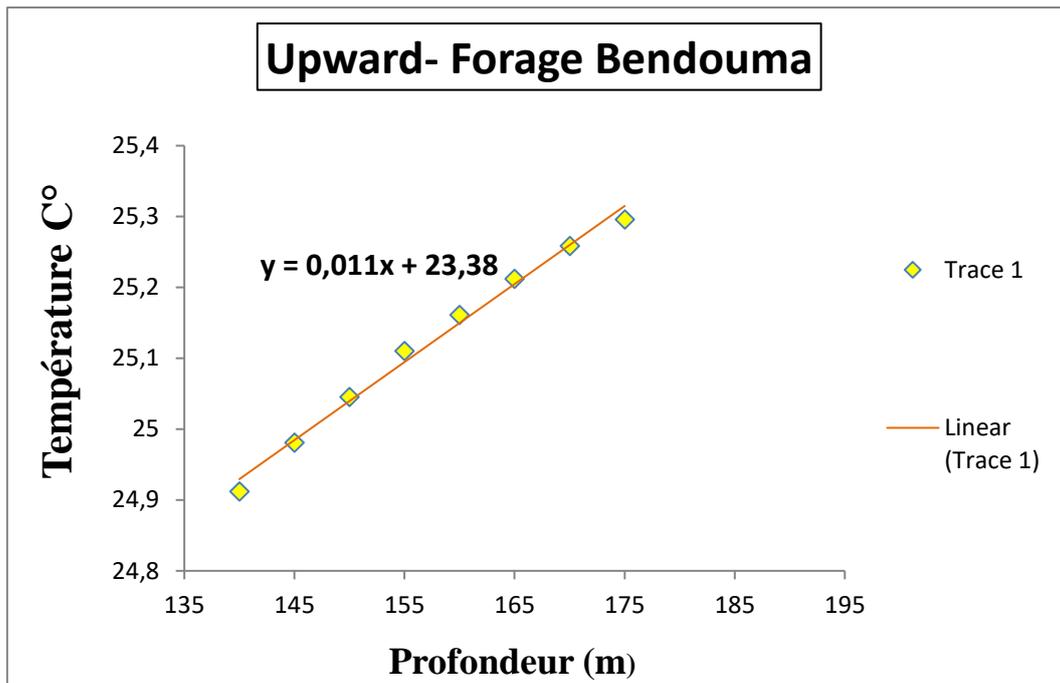


Figure 17: Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Bendouma lors de la remontée.

Formation		K (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	G (°C/km)	Flux (mW m ⁻²)
Marnes (135-175 m)	Descendant	2.21± 0.44	11	24.31± 4.86
	Ascendant			

Tableau 3: Valeur du flux géothermique au forage Bendouma.

2. Forage Sidi Saada

Au forage Sidi Saada, l'estimation du flux géothermique a été réalisée entre les profondeurs 30 et 120 m (Figure 18). Les courbes (Figure 18) représentant les variations des températures en fonction de la profondeur entre 30 et 120m indiquent la présence de deux formations lithologiques représentées par deux segments de droite.

Les flux géothermiques des deux formations ont été estimés à partir des gradients géothermiques déterminés à partir des courbes des figures 19 et 20.

Les résultats du calcul des flux géothermique au forage Sidi Saada (Tableau 4) sont de l'ordre de 6 mW m⁻².

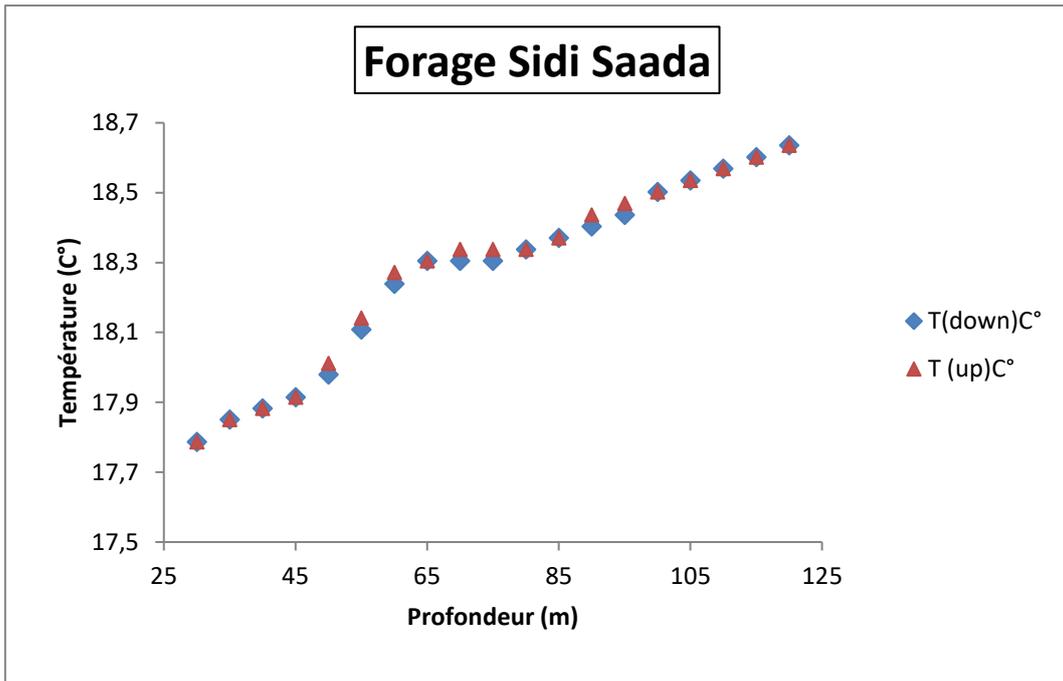


Figure 18: Courbe température vs profondeur au forage Sidi Saada (30 -120m).

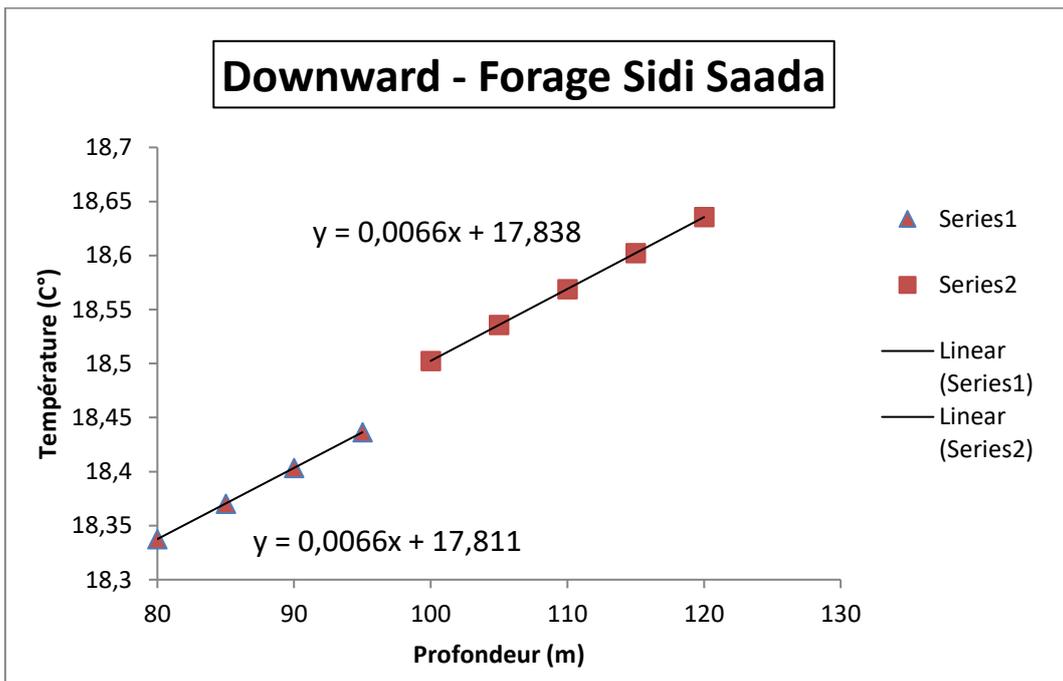


Figure 19: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Sidi Saada lors de la descente.

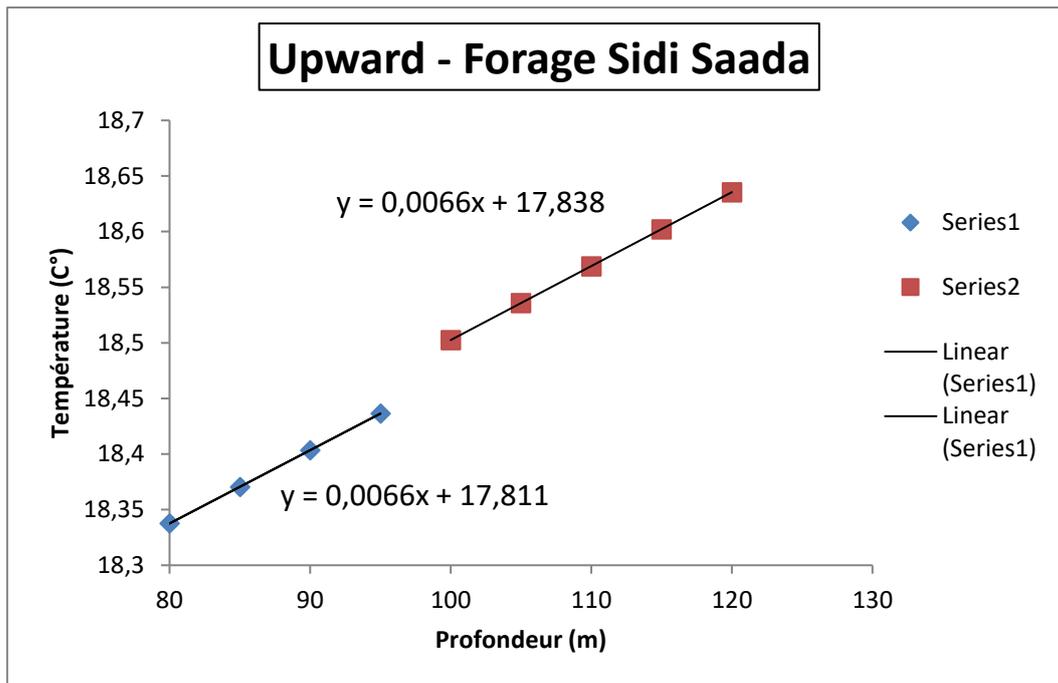


Figure 20: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Sidi Saada lors de la remontée.

Formation		K (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	G (°C/km)	Flux (mW m ⁻²)
Formation 1 (80–95m)	Descendant	2.42±0.48	6	14.54 ±- 2.91
	Ascendant			14.54±2.91
Formation 2 (100-120m)	Descendant	2.41±0.48	6	14.50±2.9
	Ascendant			14.50±2.9
Flux moyen	Descendant			14.52±2.90
	Ascendant			14.52±2.90

Tableau 4: Résultats du flux géothermique obtenus au forage de Sidi Saada

3. Forage El Halfa

Les courbes de variation de la température en fonction de la profondeur au forage d'El Halfa (Figure 21), ont permis la détermination de deux segments de pentes différentes indiquant la présence de deux formations lithologiques. Des gradients géothermiques de 41°C/km et 36°C/km ont été obtenus à partir des courbes des figures 21 et 22.

Le calcul des flux géothermiques obtenus au forage El Halfa (Tableau 5) sont respectivement de 75.6±15.12 et 81.6±16.32 mW m⁻² dans les formations 1 et 2.

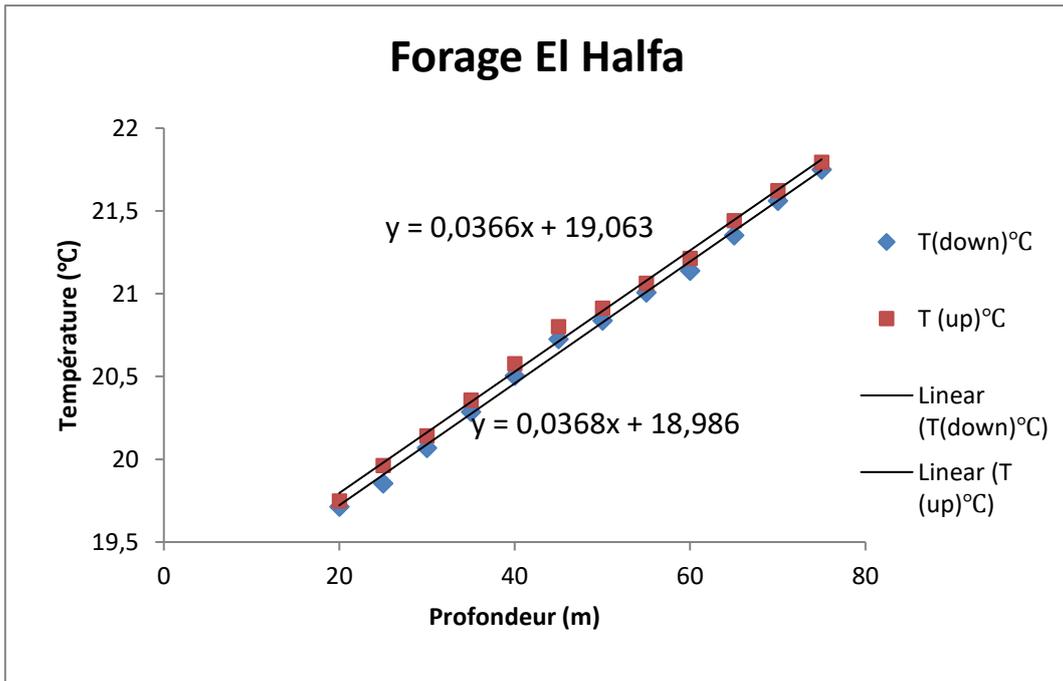


Figure 21: Courbe température vs profondeur au forage El Halfa (20m-75m).

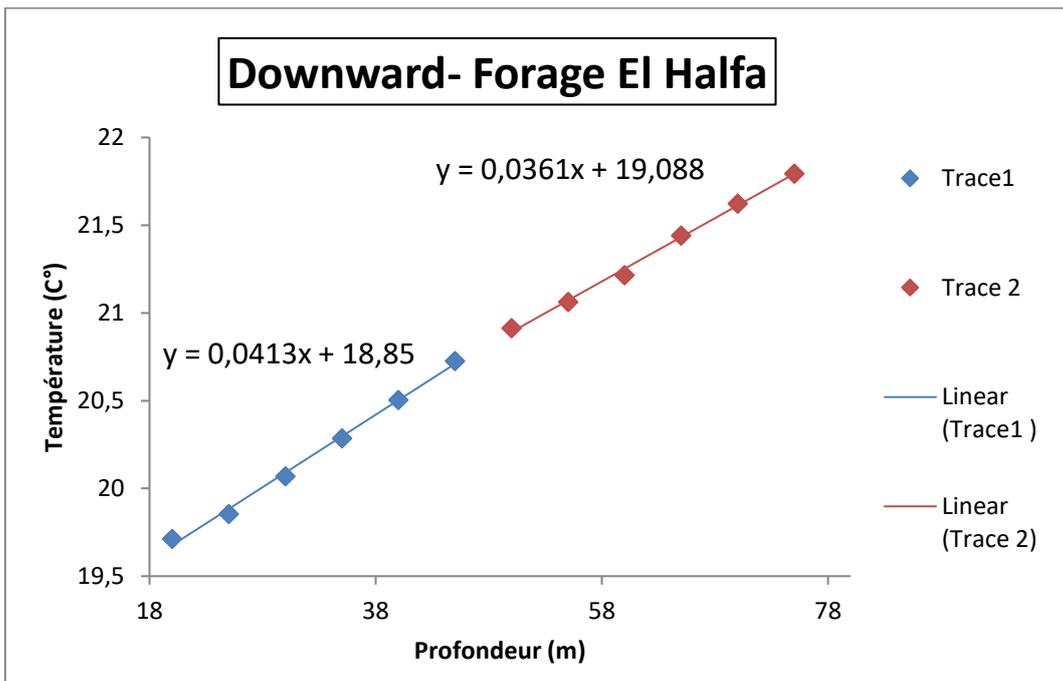


Figure 22: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage El Halfa lors de la descente

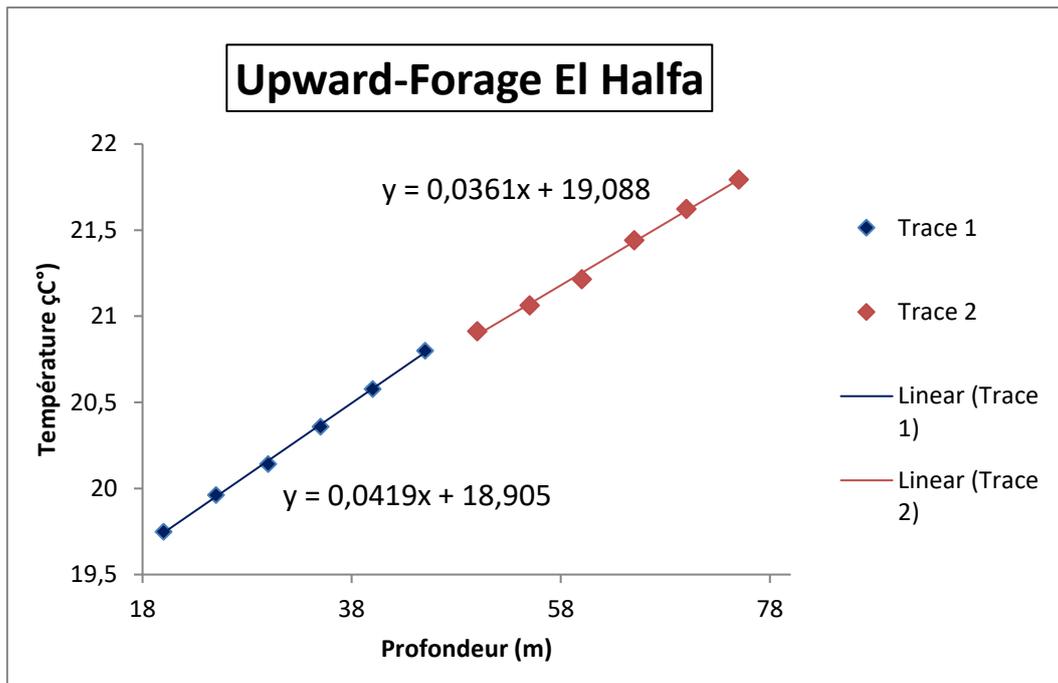


Figure 23: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage El Halfa lors de la remontée

Formation		K ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)	G ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)	Flux (mW m^{-2})
Formation 1 (20-45m)	Descendant	1.84±0.37	41	75.6±15.12
	Ascendant			75.6±15.12
Formation 2 (50-75m)	Descendant	2.26±0.45	36	81.6±16.32
	Ascendant			81.6±16.32
Flux moyen	Descendant			78.6±15.72
	Ascendant			78.6±15.72

Tableau 5: Résultats du flux géothermique obtenus au forage d'El Halfa par l'utilisation de la courbe température vs profondeur

4. Forage Kerolise

Dans ce forage nous remarquons la présence de 3 segments de droite de pentes différentes (Figure 24). Ces segments sont indiquent la présence de trois formations lithologiques. Ces pentes nous ont permis de déterminer valeurs de gradients géothermiques qui sont de 8 et 9 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ et lors de la descente et 6 et 9 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ lors de la remontée (Figures 25 et 26).

Les valeurs des flux géothermiques des trois formations lithologique au forage Kerolise sont regroupées dans le tableau 6. Elles sont comprises entre 14.10 et 20.61 mW m^{-2} .

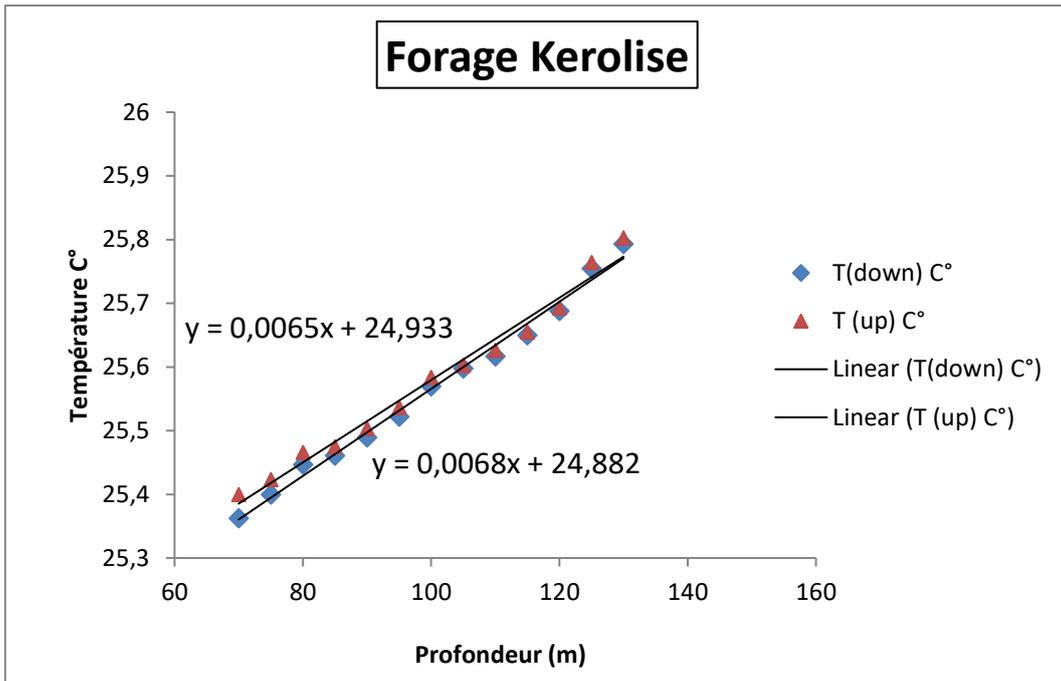


Figure 24: Courbe température vs profondeur au forage Kerolise (78m-130m)

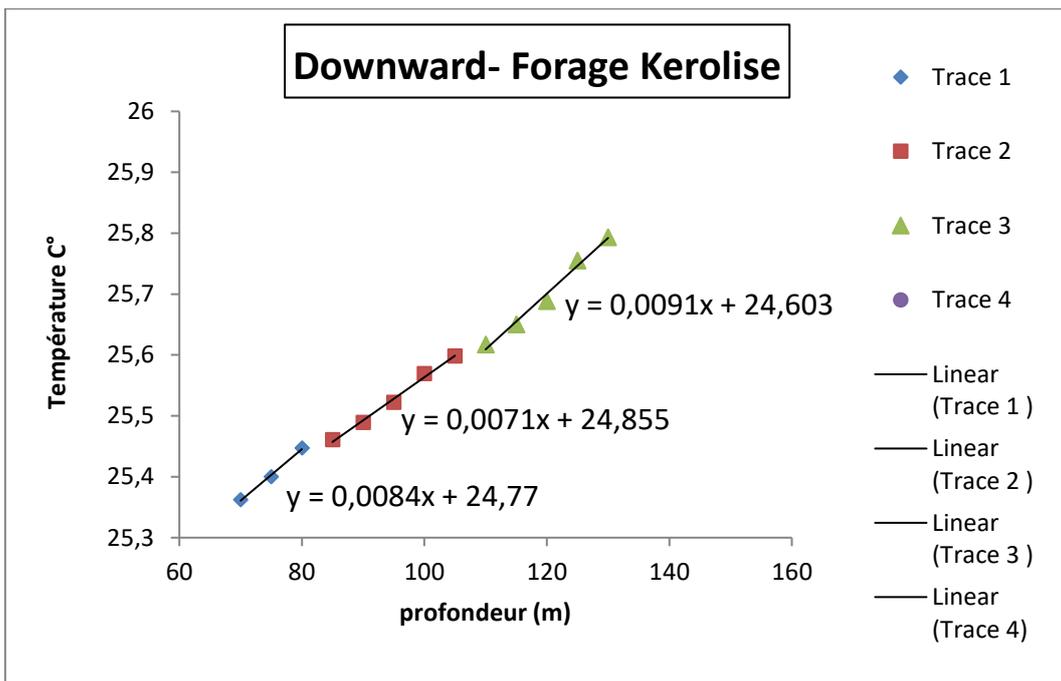


Figure 25: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Kerolise lors de la descente

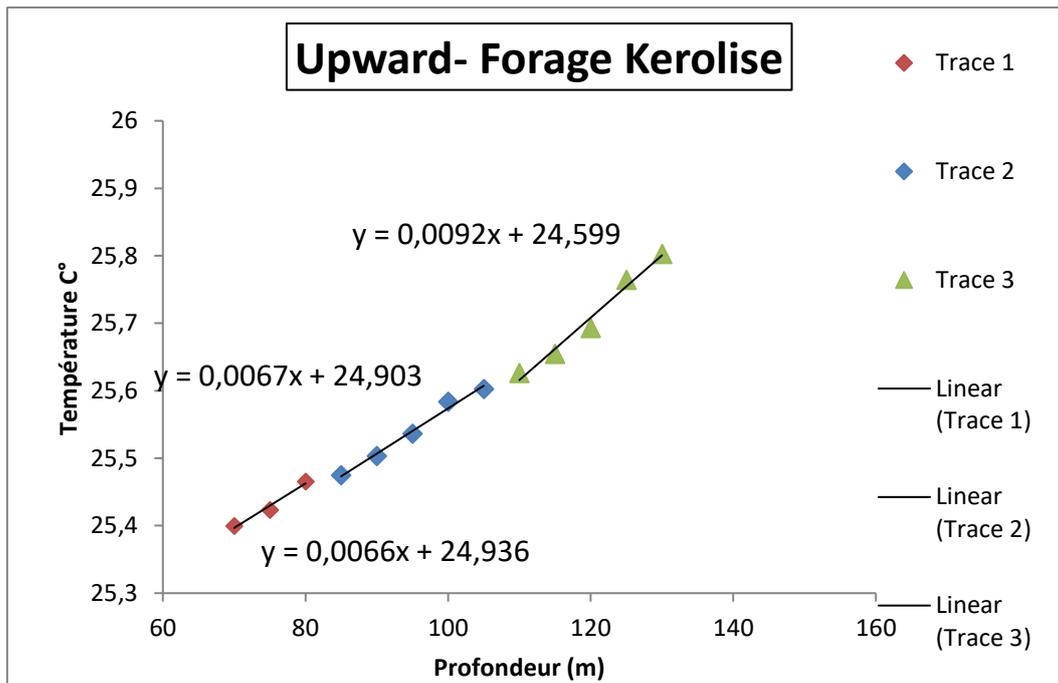


Figure 26: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Kerolise lors de la remontée

Formation		K ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)	G ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)	Flux (mW m^{-2})
Formation 1 (70-80m)	Descendant	2.38±0.476	8	19.10±3.82
	Ascendant		6	14.32±2.86
Formation 2 (85-105m)	Descendant	2.35±0.47	7	16.45±3.29
	Ascendant		6	14.10±2.82
Formation 3 (115-135m)	Descendant	2.29±0.45	9	20.61±4.12
	Ascendant		9	20.61±4.12
Flux moyen	Descendant			18.72±3.74
	Ascendant			16.34±3.26

Tableau 6: Résultats du flux géothermique obtenus au forage Kerolise.

CHAPITRE 4 : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

CHAPITRE 4 : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

I. DISCUSSION

Dans les forages que nous avons étudiés, nous avons mesuré les températures en fonction de la profondeur et nous les avons traitées pour estimer le gradient géothermique et le flux de chaleur.

Les valeurs du gradient géothermique déterminées à partir des courbes $T = f(P)$ nous ont permis d'aboutir à un gradient géothermique moyen pour chaque forage (Tableau 7).

Forages	Sens des mesures	Flux ($mW m^{-2}$)	Gradients géothermiques ($^{\circ}C/km$)
EL Halfa	Descendant	78.6 ± 15.72	~37
	Ascendant	78.6 ± 15.72	
Sidi Saada	Descendant	14.52 ± 2.90	~8
	Ascendant	14.52 ± 2.90	
Kerolise	Descendant	18.72 ± 3.74	~7
	Ascendant	16.34 ± 3.26	
Bendouma	Descendant	24.31 ± 4.86	~11
	Ascendant	24.31 ± 4.86	

Tableau 7: Tableau récapitulatif des gradients et des flux géothermiques dans chaque forage.

Dans le détail, au forage d'El Halfa, les gradients géothermiques déterminés à partir de la courbe des gradients (température en fonction de la profondeur) sont de $41^{\circ}C/km$ dans la première formation constituée de basalte et d'argile et de $36^{\circ}C/km$ dans la deuxième formation constituée d'argile lors de la descente et de la remontée de la sonde.

Les valeurs des flux géothermique, calculées à partir des courbes de température en fonction de la profondeur dans ce forage, sont comprises entre 75.6 ± 15.12 et $81.6 \pm 16.32 m Wm^{-2}$ (Flux moyen: $78.6 \pm 15.72 m Wm^{-2}$) lors du mouvement descendant de la sonde et entre 75.6 ± 15.12 et $81.6 \pm 16.32 m Wm^{-2}$ (Flux moyen : $78.6 \pm 15.72 m Wm^{-2}$) lors de son mouvement ascendant.

Au forage Sidi Saada, les gradients géothermiques déterminés à partir de la courbe des gradients (température en fonction de la profondeur) sont de $6^{\circ}C/km$ dans les deux formations constituées d'une alternance et de calcaires, lors de la descente et de la remontée de la sonde.

Les valeurs des flux géothermique calculées à partir des courbes de température en fonction de la profondeur dans ce forage sont comprises entre 14.54 ± 2.91 et $14.503 \pm 2.9 m Wm^{-2}$ (Flux moyen $14.52 \pm 2.90 m Wm^{-2}$) lors du mouvement descendant de la sonde et entre 14.54 ± 2.91 et $14.50 \pm 2.9 m Wm^{-2}$ (Flux moyen : $14.52 \pm 2.90 m Wm^{-2}$) lors de son mouvement ascendant.

Au forage Kerolise, les gradients géothermiques déterminés à partir de la courbe des gradients (température en fonction de la profondeur) sont de 8 et 9 °C/Km lors de la descente et de 6 et 9 °C/km lors de la remontée dans les 3 formations dont les deux première sont constituées de grès et des marnes et la troisième de calcaires. .

Les valeurs des flux géothermiques calculées à partir des courbes de température en fonction de la profondeur dans ce forage sont comprises entre 19.10±3.82, 16.45±3.29 et 20.61±4.12 m Wm⁻² (Flux moyen : 18.72±3.74 m Wm⁻²) lors du mouvement descendant de la sonde et entre 14.32±2.86, 14.10±.82 et 20.61±4.12 m Wm⁻² (Flux moyen : 16.34±3.26 m Wm⁻²) lors de son mouvement ascendant.

Enfin au forage Bendouma, le gradient géothermique déterminé à partir de la courbe des gradients (température en fonction de la profondeur) est de 11 °C/km lors de la descente et la remontée dans la formation marneuse traversée.

Les valeurs des flux géothermique calculées à partir des courbes de température en fonction de la profondeur dans ce forage sont de 24.31±4.86 m Wm⁻² lors du mouvement descendant de la sonde et de 24.31±4.86 m Wm⁻² lors de son mouvement ascendant.

II. INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Forage	Gradient moyen (°C/km)	Profondeurs retenues (m)	Altitudes (m)	Coordonnées (km)	
				X	Y
El Halfa	~37 °C/Km	18 - 78m	227	395.521	215.071
Sidi Saada	~8 °C/km	80 - 120m	555	351.741	212.201
Kerolise	~7 °C/km	70 - 130m	155	350.589	231.247
Bendouma	~11 °C/km	140 - 175m	140	362.663	212.509

Tableau 8: Situation des forages étudiés.

En observant les résultats et les valeurs obtenues à partir des courbes de températures en fonction de la profondeur et les données mentionnées dans le tableau 8 nous remarquons qu'il existe une légère variation spatiale du gradient géothermique moyen entre les 3 forages Sidi Saada, Kerolise et Bendouma (entre 8 et 11 °C/Km).

Les forages Bendouma et Kerolise se situent à environs 20km l'un de l'autre mais en altitude, le premier est situé à environs 140m et le second à environ 155m. La faible différence entre les gradients dans ces deux forages pourrait s'expliquer par leur nature lithologique semblable d'âge crétacé. Géologiquement, avoir deux forages avec la même lithologie peut être possible, mais lorsqu'on remarque que les formations traversées ont les mêmes épaisseurs, nous devons nous poser des questions sur l'exactitude des données de lithologies. Malheureusement à cause de la crise sanitaire qu'ont traversés le pays et le Monde, nous n'avons pas pu avoir plus de renseignements ou collecter des données supplémentaires à celles déjà obtenues avant la crise.

Concernant le forage El Halfa nous avons un gradient géothermique assez important (Tableau 8) d'une valeur de $\sim 37\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ due probablement à la nature volcanique des formations traversées dans cette région et un flux géothermique moyen compris entre $78.6\pm 15.72\text{ m Wm}^{-2}$ lors des mouvements ascendant et descendant.

En raison de l'indisponibilité d'informations sûres concernant le flux de chaleur régional dans la région d'Ain Temouchent et ses alentours, il nous a paru intéressant de faire une comparaison avec le flux de chaleur régional de la partie Nord-occidentale du Maroc, se situant uniquement à une centaine de kilomètres de l'Ouest de la région d'Ain Temouchent.

Selon Takheristet et Lesquer (1988), le gradient moyen en Algérie du Nord est de $26\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ et, d'après Rimi (2001), dans le Maroc Oriental le gradient et le flux géothermiques sont tous deux élevés. Dans le Nord-Est du Maroc, ces flux importants sont associés au volcanisme et selon Zarhloul (2004) le gradient géothermique régional moyen est de $28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ pour le bassin du Maroc nord-oriental.

Nous pouvons remarquer dans la carte de densité de flux de chaleur de la partie nord du Maroc (Figure 27) que les valeurs du flux varient entre 80 et 110 mWm^{-2} .

Les valeurs de gradients et de flux de chaleur obtenues dans le forage d'El Halfa se rapprochent beaucoup des valeurs régionales du Maroc oriental.

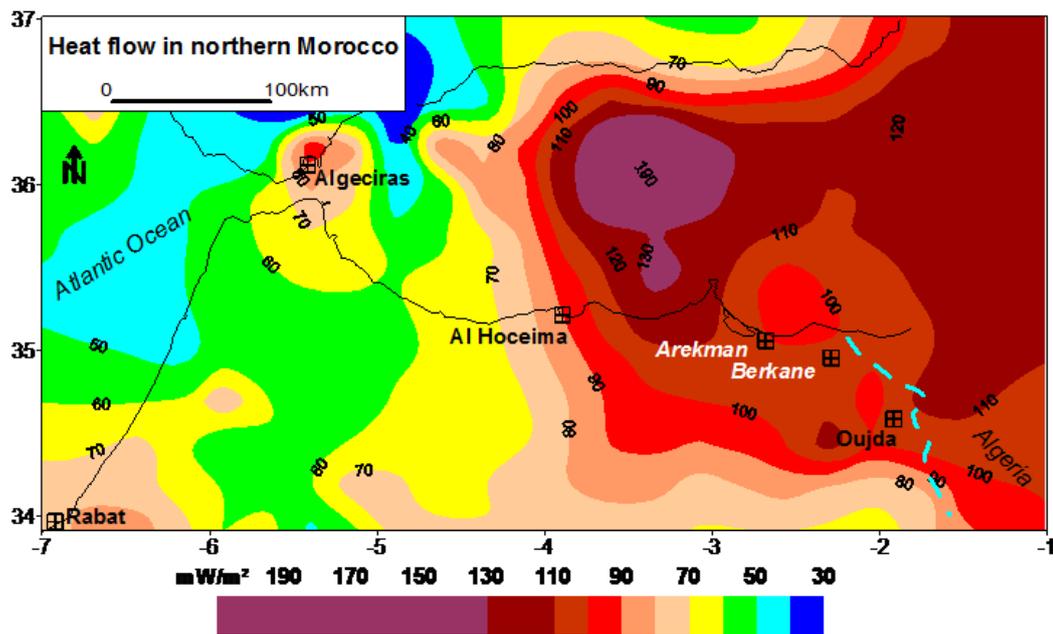


Figure 27: Carte de densité de flux de chaleur de la partie nord du Maroc (Coreia et al. 2017)

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Des valeurs de résistance ont été mesurées in situ puis traitées dans le but d'estimer le gradient et les flux géothermiques de quatre (4) forages dans la région d'Ain Temouchent situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie.

L'estimation ponctuelle des gradients géothermiques à partir des courbes $T = f(P)$, a indiqué des valeurs moyennes comprises entre $41\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ et $36\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ dans le forage El Halfa, $6\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ dans le forage Sidi Saada, entre $8\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ et $9\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ dans le forage Kerolise et de $11\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ dans le forage Bendouma.

L'estimation du flux de chaleur, réalisée à partir des gradients géothermiques déterminés par le biais des courbes de variation de la température en fonction de la profondeur, a donné des valeurs comprises entre 75.6 ± 15.12 et $81.6\pm 16.32\text{ mWm}^{-2}$ (Flux moyen: $78.6\pm 15.72\text{ mWm}^{-2}$) lors du mouvement descendant de la sonde et entre 75.6 ± 15.12 et $81.6\pm 16.32\text{ mWm}^{-2}$ (Flux moyen : $78.6\pm 15.72\text{ mWm}^{-2}$) lors de son mouvement ascendant dans le forage El Halfa.

Dans le forage Sidi Saada les valeurs du flux de chaleur sont comprises entre 14.54 ± 2.908 et $14.503\pm 2.9\text{ mWm}^{-2}$ (Flux moyen: $14.52\pm 2.90\text{ mWm}^{-2}$) lors du mouvement descendant de la sonde et entre 14.54 ± 2.908 et $14,503_{+/-}2,9\text{ mWm}^{-2}$ (Flux moyen : $14.52\pm 2.90\text{ mWm}^{-2}$) lors de son mouvement ascendant.

Dans le forage Kerolise les valeurs du flux de chaleur sont comprises entre 19.10 ± 3.82 , 16.45 ± 3.29 et $20.61\pm 4,12\text{ mWm}^{-2}$ (Flux moyen : $18.72\pm 3,74\text{ mWm}^{-2}$) lors du mouvement descendant de la sonde et entre 14.32 ± 2.86 , 14.10 ± 2.82 et $20.61\pm 4.12\text{ mWm}^{-2}$ (Flux moyen : $16.34\pm 3.26\text{ mWm}^{-2}$) lors de son mouvement ascendant.

Et dans le forage Bendouma, Les valeurs des flux géothermique calculées à partir des courbes de température en fonction de la profondeur dans ce forage sont de $24.31\pm 4,86\text{ mWm}^{-2}$ lors du mouvement descendant de la sonde et de $24.31\pm 4,86\text{ mWm}^{-2}$ lors de son mouvement ascendant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Armstead H.C.H., Varet J. (1978). La Géothermie, Exploration – Forage - Exploitation. Edition du Moniteur, Paris.

Bechlaghem S., Dekhli K. (2015). Etude des sables des mer de trois plages de la wilaya d'Ain Temouchent (Terga, El-Hilal, des Mouches). Mem. de Master, Univ. Tlemcen, 87p.

Beck A.E. (1965). Technique of measuring heat flow on land. American Geophysical Union 8:24-50. Terrestrial heat flow Lee W.H.K. eds.

Bendoukha R., Megastsi M., Cottin J., Tabeliouna M. (2009). Nouvelles données sur les caractères dynamiques et géochimiques du volcanisme alcalin mio-plio-quadernaire de l'Oranie (Algérie nord-occidentale). Bulletin du SerAvice Géologique National 20(3) : 263-296.

Benfield A. F. (1939) Terrestrial heat flow in Great Britain, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 173, 428-450.

Brigaut F., Vasseur G. (1989). Mineralogy, Porosity and Fluid Control on Thermal Conductivity of Sedimentary Rocks. Geophys. J. 98 : 525 – 542.

Bullard E. C. (1939). Heat flow in South Africa, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A. 173 : 474-502.

Buntebarth G. (1984). Geothermics: An introduction. Springer Verlag, 152p.

Cermak V., Rybach L. (1982). Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks: Introductory remarks. Subvolume A, 305–310. doi:10.1007/10201894_6.

Correia, A., Rimi, A., Zarhloule, Y., Carneiro, J. (2017). North-eastern Morocco: a high geothermal prospect. Procedia Earth and Planetary Science 17 (2017) 746 – 749

Courtillet V., Francheteau J. (1976) Chapitre 40 du traité de géophysique Interne, J. coulomb et G. Jobert ed., Masson.

Horai K. (1971) Thermal Conductivity of Rock-Forming Minerals, Journal of geophysical research 76(5) :1278-1308.

King S.D. (2016). Mantle convection, the asthenosphere, and Earth's thermal history. Department of Geosciences, Virginia Tech, Blacksburg, 58p.

Kirkland K. (2010). Geothermal Energy a Furnace beneath the Soil, Earth sciences, notable research and discoveries. Frontiers of science, 212p.

Lister, J.R. Buffett B.A. (1995) The strength and efficiency of thermal and compositional convection in the geodynamo. *Phys. Earth Planet. Inter.* 91: 17–30. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(95\)03042-u](https://doi.org/10.1016/0031-9201(95)03042-u).

Louni-Hacini, A., Bellon, H., Maury, R., Megartsi, M., Coulon, C.; Belkacem S., Cotten, J, Coutelle, A (1995). Datation $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ de la transition du volcanisme calco-alcalin au volcanisme alcalin en Oranie au Miocene Supérieur. *C. R. Acad. Sci. Paris* 321: 975– 982.

Magdelaine C. (2017). La géothermie ou l'énergie de la Terre. www.notre-planete.info

Ouali S., Khellaf A., Baddari K. (2006). Etude géothermique du Sud de l'Algérie. *Revue des Energies Renouvelables* 9 (4) : 297 - 306.

Pitcher W.S., Berger A.R. (1972). The geology of Donegal: a study of granite emplacement and unroofing 3:288-289 DOI: 10.1016/0012-8252(73)90111-6.

Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R. (1993). Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics* 31 : 267-280.

Revelle R., Maxwell A. E. (1952) Heat flow through the floor of the eastern North Pacific Ocean, *Nature*, 170 : 199-200.

Rimi A. (2001). Carte du gradient géothermique au Maroc. *Bull. Inst. Sci., sect. Sci. Terre* 23: 1-6.

Sclater J.G., Jaupart C., Galson D. (1980). The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth, *Rev. Geophys. Space Phys.* 18: 269-311.

Stein C.A., Stein S. (1992). A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age. *Nature international journal of sciences* Vol 359, Num 6391: 123– 129.

Steinhart J.S., Hart S.R. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep-Sea Res.* 15: 497-503.

Sui D., Wiktorsk E., Røkslan M, Basmoen, T.A. (2018). Review and investigations on geothermal energy extraction from abandoned petroleum wells. *J Petrol Explor Prod Technol* 9: 1135. doi.org/10.1007/s13202-018-0535-3

Wood S.H., Clemens D.M. (2002). Geologic and tectonic history of the western Snake River Plain, Idaho and Oregon, in Bill Bonnichsen, C.M. White, and Michael McCurry, eds., *Tectonic and Magmatic Evolution of the Snake River Plain Volcanic Province*: Idaho Geological Survey Bulletin 30: 69-103.

Zarhloule Y. (2004). Le gradient géothermique profond du Maroc : détermination et cartographie. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre* 26: 11-25.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Flux de chaleur moyen et chaleur totale dégagée par la Terre (Sclater et al., 1980).	24
Tableau 2: Conductivités thermiques des principaux constituants	25
Tableau 3: Valeur du flux géothermique au forage Bendouma.	36
Tableau 4: Résultats du flux géothermique obtenus au forage de Sidi Saada.....	38
Tableau 5: Résultats du flux géothermique obtenus au forage d'El Halfa par l'utilisation de la courbe température vs profondeur.....	40
Tableau 6: Résultats du flux géothermique obtenus au forage Kerolise.....	42
Tableau 7: Tableau récapitulatif des gradients et des flux géothermiques dans chaque forage.	44
Tableau 8: Situation des forages étudiés.	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation des forages étudiés.	10
Figure 2: Contexte morpho-tectonique de l'Oranie nord-occidentale	11
Figure 3: Carte géologique de la région d'étude	14
Figure 4: Log lithologique du forage Bendouma (0m - 190m).....	16
Figure 5: Log lithologique du forage Sidi Saada (0m - 72m)	18
Figure 6: Log lithologique du forage El Halfa (0m – 120m).....	19
Figure 7: Log lithologique du forage Kerolise (0 - 100).....	20
Figure 8: Schéma d'une installation type de géothermie (Magdelaine, 2017).....	23
Figure 9: Flux de chaleur (Pollack et al., 1997).	24
Figure 10: Coupe transversale de la Terre montrant les mécanismes de transport de chaleur dominants.	26
Figure 11: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage Bendouma.	31
Figure 12: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage Sidi Saada.	31
Figure 13: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage El Halfa.....	32
Figure 14: Variation de la résistance en fonction de la profondeur au forage Kerolise.....	32
Figure 15: Courbe température vs profondeur au forage Bendouma (135-185m).....	35
Figure 16: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Bendouma lors de la descente (135-185m).	35
Figure 17: Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Bendouma lors de la remontée.	36
Figure 18: Courbe température vs profondeur au forage Sidi Saada (30 -120m).....	37
Figure 19: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Sidi Saada lors de la descente.	37
Figure 20: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Sidi Saada lors de la remontée.	38
Figure 21: Courbe température vs profondeur au forage El Halfa (20m-75m).....	39

Figure 22: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage El Halfa lors de la descente	39
Figure 23: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage El Halfa lors de la remontée	40
Figure 24: Courbe température vs profondeur au forage Kerolise (78m-130m)	41
Figure 25: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Kerolise lors de la descente	41
Figure 26: Variations de la température en fonction de la profondeur au forage Kerolise lors de la remontée	42
Figure 27: Carte de densité de flux de chaleur de la partie nord du Maroc (Coreia et al. 2017)	46