

N° d'ordre : 06/DSTU/2022



MEMOIRE

Présenté

à



L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCCEN
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

Meriem BRIXI GORMAT

&

Amira DOUIDI

**ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR A PARTIR DES MESURES DE
TEMPERATURE DANS DEUX FORAGES DE LA REGION DE ZOUÏA
(WILAYA DE TLEMCCEN).**

Soutenu le 02 juillet 2022 devant les membres du jury :

Salamet MAHBOUBI, MC (A), Univ. Tlemcen
Abderrezak BOUZID, Directeur de Recherche, CRAAG
Kamar Eddine BENSEFIA, MC (B), Univ. Tlemcen
Sofiane AMARA, Professeur, Univ. Tlemcen
Abbas MAROK, Professeur, Univ. Tlemcen

Président
Encadreur
Co-Encadreur
Examineur
Examineur

DEDICACES

DEDICACES

Je dédie ce travail à ;

Ma très chère Grande-mère Zhor (Allah Yerhamha),

Mes très chers parents

A mes frères Ramzi, Hicham et Rayane et mon fiancé.

A toute ma famille,

A ma chère cousine Sihem Sekkal.

Mes amis et surtout mon binôme Amira Douidi.

Meriem

Je dédie ce modeste travail,

A mon cher trésor ma mère,

*Qui me donne toujours de l'espoir de l'encouragement dans ma vie et mon chemin,
c'est grâce à elle que je suis arrivée jusqu'à ce niveau-là de mes études.*

A mon très cher père,

*Pour son encouragement et son soutien, surtout son amour et son sacrifice afin que
rien n'entrave mes études.*

A mes deux chères et meilleures sœurs, pour leur soutien moral.

A ma très chère copine et binôme Meriem,

*Remerciements spécial à elle pour tout son aide et ces encouragements pendant
tout se parcourt de notre fin d'étude.*

A mes très chères copines, a tous les membres de ma famille,

Et tous ceux qui m'aiment.

Amira

Table des matières

	Pages
AVANT-PROPOS	3
RESUME	5
ABSTRACT	6
 <i>Premier chapitre : CADRE GENERAL</i> 	
I. PROBLEMATIQUE	7
II. OBJECTIFS	7
III. METHODOLOGIE	8
A. Acquisition des données	8
B. Traitement des données	9
IV. RAPPEL SUR LA GEOTHERMIE	10
A. Définitions	10
1. Gradient géothermique	10
2. Flux géothermique	10
3. Conductivité thermique	11
B. Flux de chaleur	11
C. Energie géothermique	11
1. Source de l'énergie géothermale	11
2. Types d'énergie géothermique	12
D. Principe	12
V. GENERALITES GEOGRAPHIQUES, GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES	13
A. Contexte géographique	13
B. Contexte géologique	13
1. Au plan structural	13
2. Au plan stratigraphique	14
C. Contexte hydrogéologique	15

Deuxième chapitre : TRAITEMENT ET INTERPRETATION DES DONNEES

I. INTRODUCTION	17
II. LOCALISATION ET DESCRIPTION DES FORAGES	17
A. Localisation des forages	17
B. Description des forages	18
1. Forage Nakhla 1	18
2. Forage Mohamed Salah 06	18
III. TRAITEMENT DES DONNEES	21
A. Collecte des données	21
B. Réduction des données	22
IV. DETERMINATION DU GRADIENT GEOTHERMIQUE	23
V. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE	23
A. Courbes des températures en fonction de la profondeur	24
VI. CONCLUSION	27

Troisième chapitre : DISCUSSION ET COMPARAISON

I. INTRODUCTION	28
II. DISCUSSION	28
III. COMPARAISON	30
IV. CONCLUSION	31
CONCLUSION GENERALE	33
PERSPECTIVES	34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35
LISTE DES FIGURES	37
LISTE DES TABLEAUX	38

AVANT-PROPOS

AVANT-PROPOS

En tout premier lieu, on remercie Dieu tout puissant de nous avoir donné l'effort pour dépasser toute difficulté.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui on voudrait témoigner toute notre gratitude.

On voudrait tout d'abord adresser toute notre reconnaissance à l'encadreur de notre mémoire **Monsieur Abderrezak BOUZID**, Maître de recherche (classe A) au centre de recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG) et à notre co-encadreur **Monsieur Kamar Eddine BENSEFIA**, Maître de conférences (classe B) au département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la terre et de l'Univers, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen), pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

A Mademoiselle **Salamet MAHBOUBI**, Maître de conférences (classe B) au département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la terre et de l'Univers, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen) qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

A Monsieur **Sofiane AMARA**, Professeur au département de Physique (Faculté des Sciences, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen), pour avoir accepté de faire partie du jury et d'apporter son avis et ses critiques.

On adresse tous nos remerciements et respect à Monsieur **Abbas MAROK**, Professeur au département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la terre et de l'Univers, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen), qui nous a toujours accompagné tout au long de notre cursus universitaire.

On désire aussi remercier les professeurs et toute l'équipe pédagogique de l'université Abou Bakr Belkaïd et les intervenants professionnels responsables de notre formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

On remercie également Monsieur **Mustapha BENADLA** et Monsieur **SOULIMANE Choukri** pour ces précieux conseils.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des employés de L'ADE à la direction de Maghnia, pour les conseils qu'ils ont pu nous prodiguer au cours de la journée de stage sur terrain ainsi que pour l'accès aux informations nécessaires. On remercie également

l'équipe du **CRAAG** qui nous a accompagnés au cours du stage professionnel et pour l'expérience acquise grâce à eux.

On tient à témoigner toute notre reconnaissance aux enseignants de notre formation, pour leur aide dans la réalisation de notre mémoire. On remercie également nos amis (es), qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Enfin, à toutes et à tous, on présente nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

RESUME

RESUME

Situés à proximité de la frontière Algéro-marocaine, dans la région de Zouia (Maghnia), deux forages hydrauliques en état d'équilibre thermique feront l'objet d'une estimation du flux de chaleur moyen.

Dans cette optique, des mesures de la résistance électrique ont permis de dresser des courbes des températures en fonction de la profondeur. Notons que lesdites mesures sont réalisées au cours de la descente et de la remontée de la sonde.

De ce fait, le gradient géothermique moyen dans la région de Zouia est réparti entre les valeurs de 20 et 50 °C/km. Par ailleurs, les flux de chaleurs montrent des valeurs plus ou moins importantes comprises entre $76,6 \pm 15 \text{ mW/m}^{-2}$ et $69,01 \pm 13 \text{ mW/m}^{-2}$.

La comparaison des flux de chaleur obtenus avec les travaux antérieurs montrent fort bien une homogénéité des résultats à l'échelle local avec une augmentation vers l'ouest et une légère diminution vers le NE.

Mots-clés : Zouia, Forages, Flux, Résistance, Température, Profondeur, Géothermie, Chaleur.

ABSTRACT

ABSTRACT

Located near the Algerian-Moroccan border, in the Zouia region (Maghnia), two hydraulic boreholes in a state of thermal equilibrium will be the subject of an estimation of the average heat flow.

To this end, measurements of electrical resistance have made it possible to draw up temperature curves as a function of depth. It should be noted that these measurements are taken during the descent and ascent of the probe.

As a result, the average geothermal gradient in the Zouia region is distributed between the values of 20 and 50 °C/km. Furthermore, the heat fluxes show more or less important values ranging from $76.6 \pm 15 \text{ mW/m}^2$ to $69.01 \pm 13 \text{ mW/m}^2$.

The comparison of the heat fluxes obtained with the previous works shows very well a homogeneity of the results at the local scale with an increase towards the west and a slight decrease towards the NE.

Keywords : Zouia, Boreholes, Flux, Resistance, Temperature, Depth, Geothermal, Heat.

Premier chapitre : CADRE GENERAL

Premier chapitre : CADRE GENERAL

I. PROBLEMATIQUE

L'exploitation des sources énergétiques rares de nos jours est devenue primordiale. De ce fait, les institutions de recherches focalisent leurs efforts sur la découverte et la valorisation des ressources énergétiques renouvelables. Par conséquent, l'énergie géothermique est considérée comme étant un potentiel de développement durable.

De ce fait, le gradient géothermique est représenté comme étant l'augmentation de la température par rapport à la profondeur. Le flux de chaleur ainsi enregistré est déterminé par la conductivité thermique des formations géologiques traversées.

Il est obtenu d'une part en mesurant la température en profondeur 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, les mesures de température dans deux forages en état d'équilibre thermique (i.e. non en exploitation) localisés dans la région de Maghnia (Wilaya de Tlemcen) seront réalisées. L'exploitation des logs de forages permettra d'estimer la conductivité thermique des différents faciès géologiques. Le flux de chaleur sera déduit au niveau de chaque forage et les valeurs obtenues seront interprétées pour établir une cartographie du gradient géothermique de ladite région.

II. OBJECTIFS

Ce travail a pour objectif principal d'analyser, de traiter et d'interpréter des données des conductivités thermiques afin de mettre en évidence les flux de chaleur des faciès traversés dans deux forages dans la région considérée. Par conséquent, le présent travail s'articule sur :

- Estimer le gradient géothermique de ladite région.
- L'acquisition des données de la conductivité thermique ;
- Le traitement des données
- L'établissement de plusieurs graphes sur la base des données acquises qui seront par la suite interprétées ;

III. METHODOLOGIE

La méthodologie du travail consiste à acquérir des données obtenues à partir des mesures de température sur le terrain à fin d'estimer avec prudence le flux géothermique sur des forages hydrauliques par plusieurs méthodes en se basant sur l'établissement des graphes des gradients géothermiques.

Toutefois, les estimations du flux géothermique ont été réalisées les années précédentes par différents chercheurs. A titre d'exemple, les premières mesures du flux thermique ont été réalisées en Oranie par OMAR (2019) et BENSENANE (2020). A cet effet, la méthodologie adoptée sera la même utilisée pour avoir une idée globale et homogène sur le flux de chaleur recherché.

A. Acquisition des données

Dans le présent travail, les données de températures proviennent de l'acquisition réalisée le 21/12/2021 sur deux forages. Cette acquisition a été effectuée par un enregistrement de la température avec la profondeur à partir d'équipement (Fig. 1) très fragile et sensible. Elle est mesurée à l'aide d'une thermistance dans lequel la température est enregistrée en fonction de la profondeur.



Puits de forage « Nakhla 1 »



GPS



Sonde



Câble de résistivité et un milli ohmmètre

Figure 1 : Matériels utilisés.

Pour ce faire, 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 deux forages ont été sélectionnés. Il s'agit de ceux de *Nakhla 1* et *Mohamed Salah 06*.

Notons, que le matériel utilisé est d'une sensibilité de 0.001 °C aux changements de température d'une part et que pour lesdits forages, des données géographiques (latitude, longitude et altitude) seront mesurées par un GPS d'autre part.

B. Traitement des données

Le traitement de données se fait après la soustraction de la résistance du câble utilisé lors des enregistrements.

Ainsi, les valeurs des résistances mesurées ont permis le calcul des températures via *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.

En somme, Le logigramme présenté dans la figure 2, (Fig. 2) montre clairement la méthodologie adoptée pour estimer le gradient géothermique de ladite région.

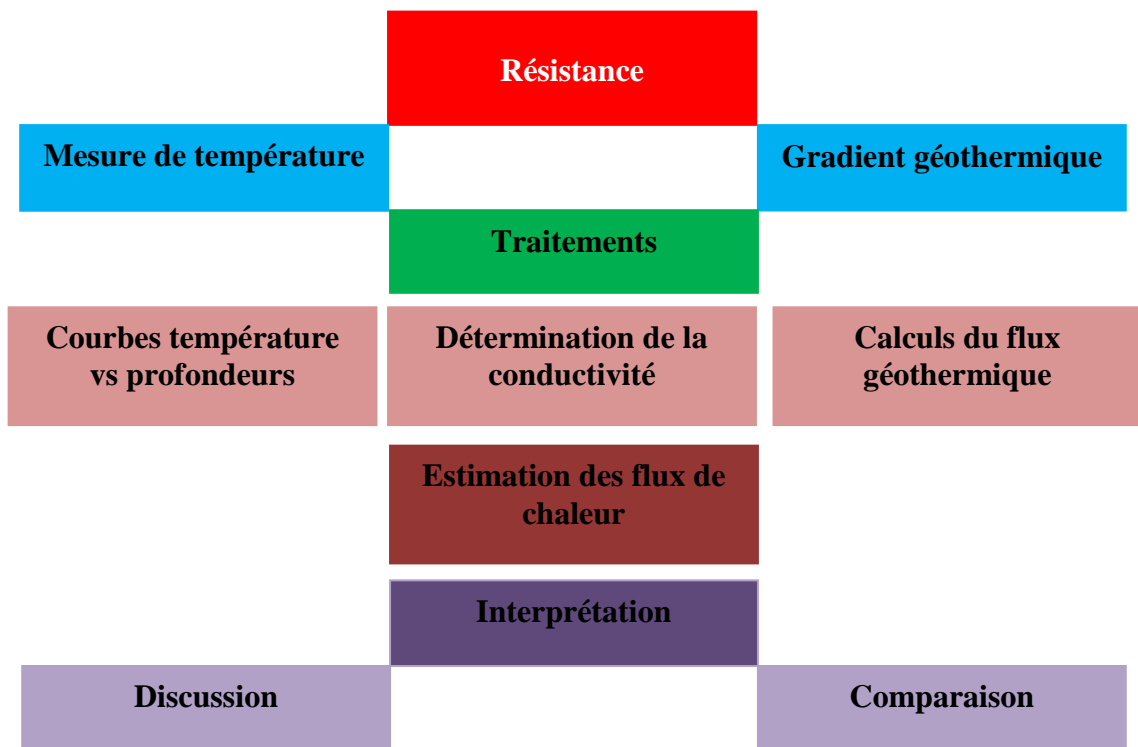


Figure 2 : Méthodologie de travail.

II. RAPPEL SUR LA GEOTHERMIE

A. Définitions

1. Gradient géothermique

Le gradient géothermique (G) est défini comme étant l'augmentation de la température (ΔT) des faciès par rapport à la profondeur (Δz). Sa valeur au niveau de la croûte continentale est généralement de l'ordre de $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (OUALI & al., 2006).

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

Par rapport au contexte géodynamique, l'hydrologie et hydrogéologie, l'état de transfert de la chaleur (conduction thermique), la géochimie des faciès géologiques, ce gradient peut varier d'une région à une autre.

2. Flux géothermique

Par définition, il représente la quantité d'énergie évacuée par la terre en un point donné. Elle est obtenue en multipliant la conductivité thermique avec le gradient géothermique. Notons, que le flux géothermique est exprimé par unité de surface et par unité de temps (Fig. 3).

Par ailleurs, les valeurs enregistrées sont plus ou moins faibles au niveau des fosses océaniques et fortes dans les zones de dorsales ainsi qu'aux régions géologiquement actives.

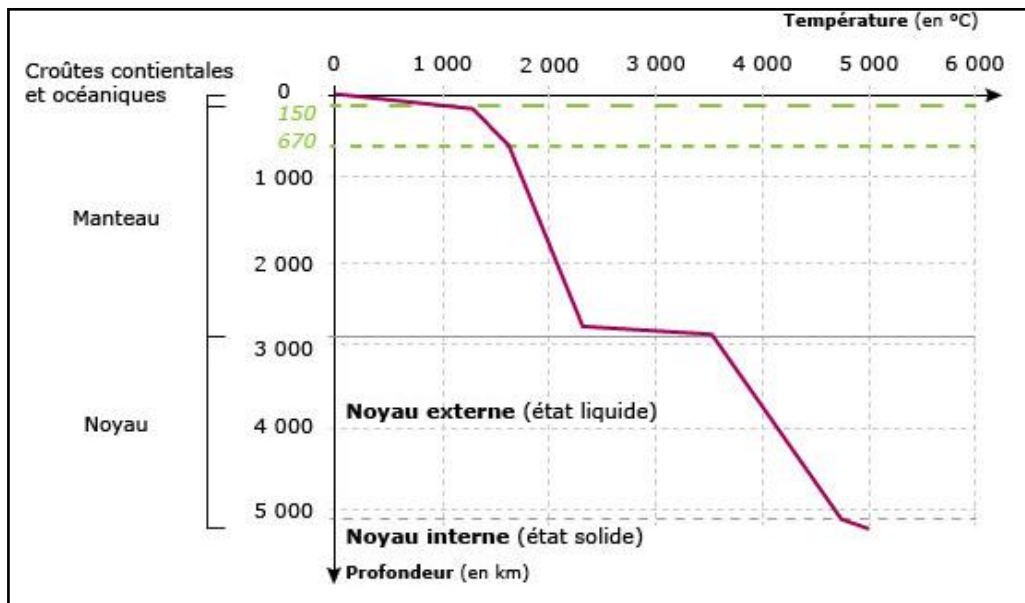


Figure 3 : Courbe représentative de la température en fonction de la profondeur (d'après, MAGDELAIN, 2017).

3. Conductivité thermique

La conductivité thermique désigne la capacité d'un corps à propager la chaleur. Cet indicateur nous renseigne sur le pouvoir isolant d'un matériel. Son unité de mesure est le « Lambda » exprimé en W/m.K, elle indique la quantité de chaleur qui se diffuse par conduction.

B. Flux de chaleur

Il est défini comme étant la quantité d'énergie thermique qui traverse une unité de surface par unité de temps. Son estimation est d'environ 65 mW m^{-2} à la surface et de 100 mW m^{-2} au fond des océans (POLLACK & al., 1993).

Néanmoins, l'hétérogénéité de la propagation de ce flux est due aux courants de conduction, responsable du transfert de chaleur dans la croûte terrestre d'une part et aux courants de convection, considérée comme source majeure de flux de chaleur depuis le noyau externe à travers les dorsales médio-océaniques et la remontée des magmas d'autre part (LISTER & BUFFETT, 1995)(Fig. 4).

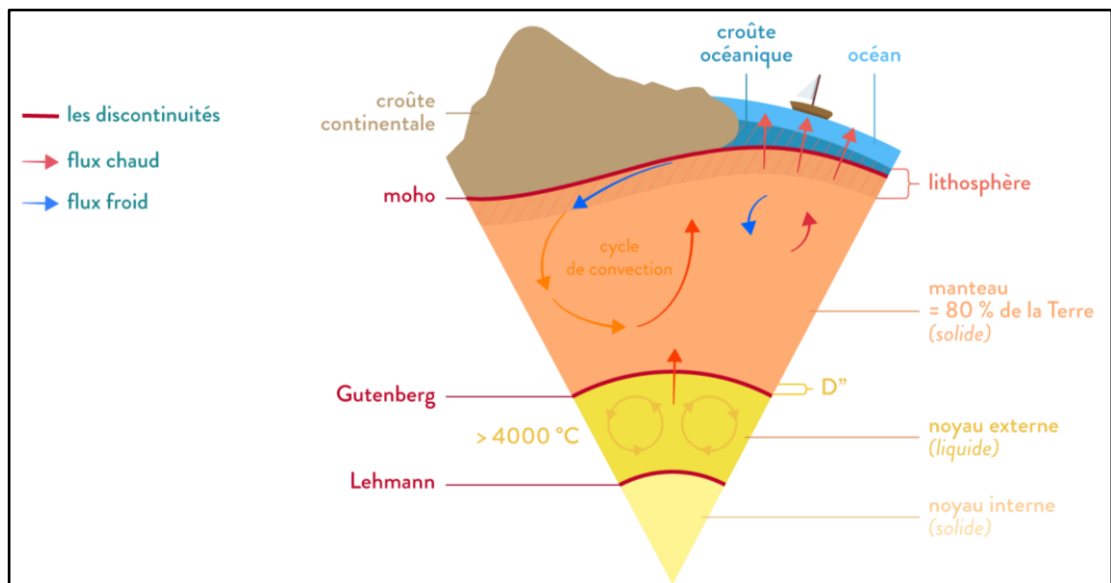


Figure 4 : Structure de la Terre et flux de chaleur.

C. Energie géothermique

1. Source de l'énergie géothermale

Suite aux différents enregistrements de l'énergie géothermique du globe terrestre, la valeur moyenne est estimée à environ $4,2 \cdot 10^{13}$ Watts à sa surface. Elle provient de différentes sources, à savoir :

-La désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches (90%) notamment l'uranium 235 et 238, le thorium 232 et le potassium 40. Les noyaux de ces atomes sont capables de se désintégrer spontanément (fission nucléaire) et produisent alors

un rayonnement et de l'énergie thermique. Cette réaction a lieu dans l'ensemble du globe, mais elle est plus particulièrement active dans la croûte terrestre ;

-La chaleur primitive issue de l'accrétion terrestre (10%).

2. Types d'énergie géothermique

L'énergie géothermique est liée à deux zones continentales bien distinctes. Il s'agit :

-Des zones actives ayant des températures très élevés ($> 150^{\circ}\text{C}$)(OUALI & al., 2006) et utilisée pour la production d'énergie électrique appelée « *Géothermie Haute Energie* » ;

-Des zones stables où s'accumulent des épaisses formations sédimentaires. L'énergie est destinée au chauffage urbain et de serre avec une température comprise entre 30°C et 150°C , c'est la « *Géothermie Basse Energie* » ;

D. Principe

Selon les travaux de KIRKLAND (2010), SUI & al., (2018), FUSCH (2015) et PASQUALE & al., (2014), l'estimation du flux de chaleur se fait soit par conduction en utilisant la loi de Fourier de la conduction thermique ou bien par convection :

- Flux par Conduction : Il 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.

-Flux 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.

V. GENERALITES GEOGRAPHIQUES, GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

A. Contexte géographique

Faisant partie de l'extrémité Nord-Ouest des Monts de Tlemcen (*s.l*). La région d'étude est limitée au Nord par la plaine de Maghnia, au Sud par les Hautes Plaines Oranaises, à l'Ouest par la plaine des Angads du Maroc, le plateau de Djorf Ouazzen et la plaine de Missiouine et enfin à l'Est par les Monts de Tlemcen (*s.s*).

Par ailleurs, la zone sélectionnée pour déterminer le flux de chaleur est celle de Zouia. Elle est située sur les piémonts Nord-Ouest des Monts de Rhar Rouban à environ 11km de Maghnia (Fig. 5).

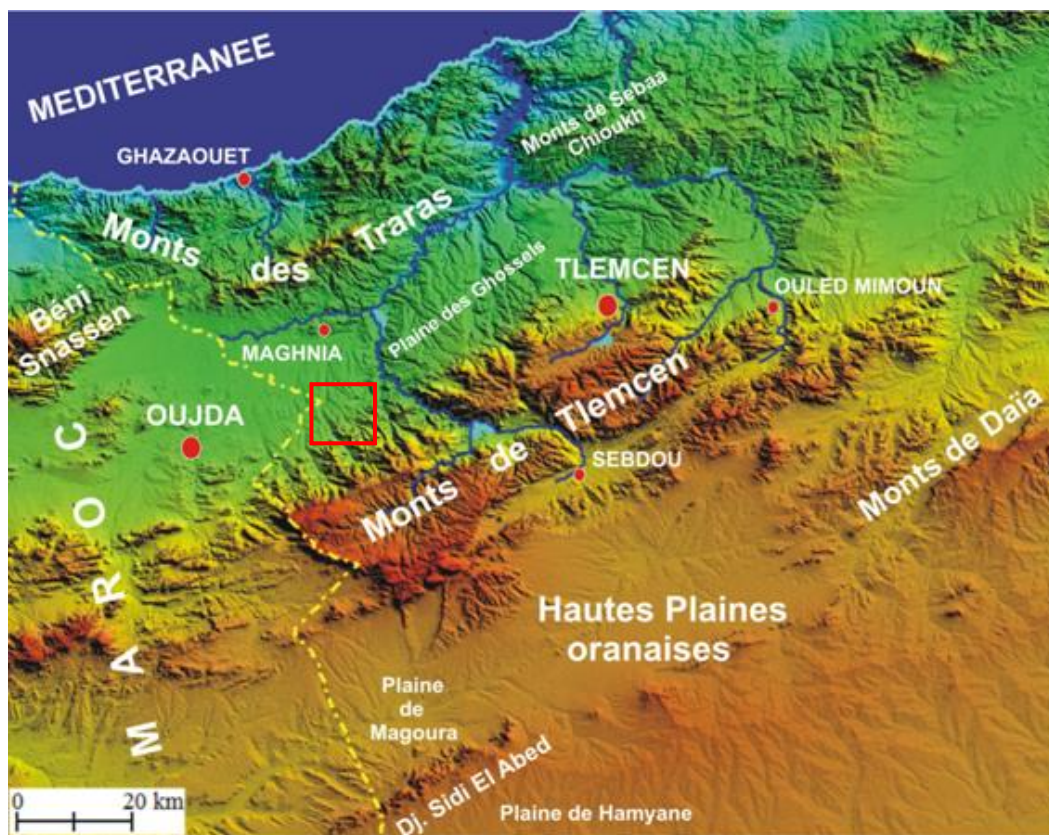


Figure 5 : Situation géographique de la région d'étude.

B. Contexte géologique

D'après les travaux de LUCAS (1942), ELMI (1983), BENEST (1982, 1985) et MAROK & REOLID (2012), les Monts de Rhar Roubane forment des unités morpho-structurale orientée généralement SW-NE.

1. Au plan structural

La structure des Monts de Rhar Roubane correspond à une barre étroite de 6km sur 30km. Ladite barre est orientée WSW-ENE est affectée par des accidents décrochant

(ELMI, 1983) de directions N10-N30E et N110-N145E et une tectonique souple de directions WSW-ENE.

2. Au plan stratigraphique

Les formations du paléozoïque affleurent dans le horst de Rhar Roubane et sont constituées essentiellement de schistes et de quartzites.

La couverture mésozoïque est représentée de bas en haut par (Fig. 6):

-le Trias : correspond à une formation détritique composée de marnes bariolées violacées, gypsifères admettant parfois des coulées basaltiques séparées par des niveaux carbonatés.

-le Jurassique : repose en discordance angulaire sur le socle paléozoïque. Le Lias est constitué par des calcaires et des calcaires dolomitiques. L'ensemble est surmonté par des marnes de l'Aalénien-Bajocien. Notons que ces formations présentent des variations des épaisseurs et des faciès.

Tandis que les dépôts des Calcaires microgréseux et des Argiles de Saïda d'âges Bathonien et Callovo-oxfordien respectivement montrent une série continue sans variations latérales de faciès.

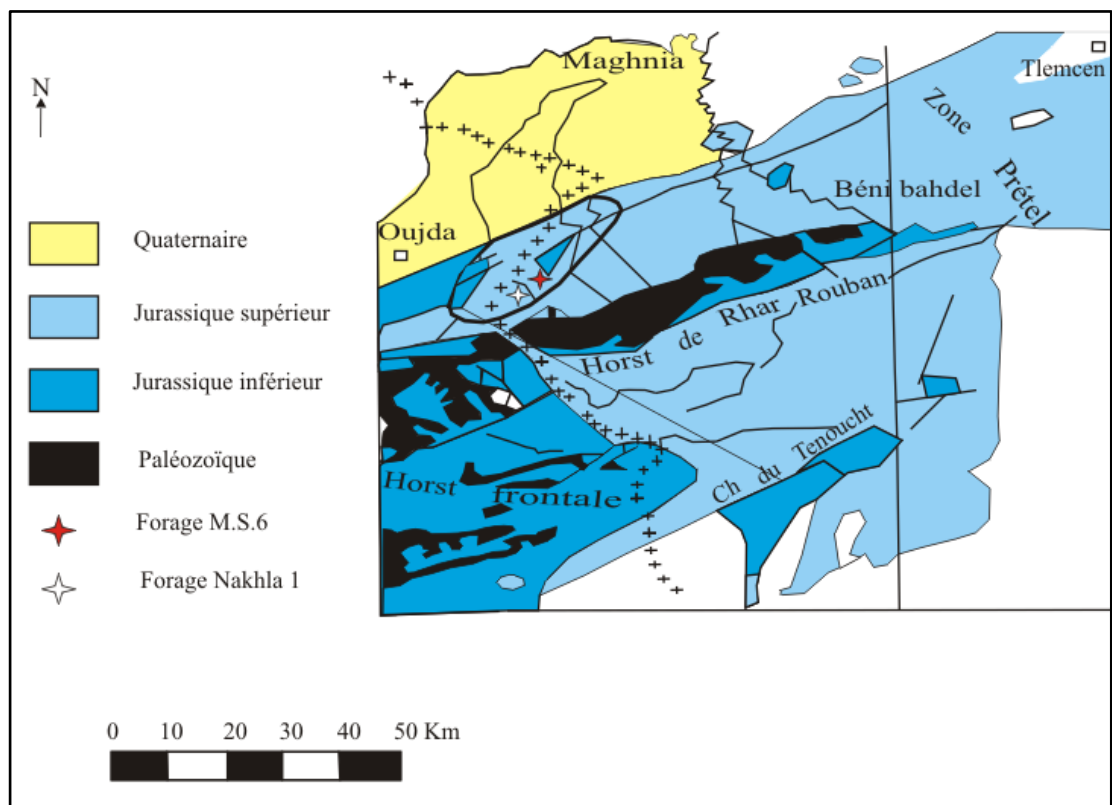


Figure 6 : Carte géologique de la région d'étude avec localisation des forages considérés (Extrait de la carte de LUCAS, 1952 in BENSOUOLA, 2005).

Dans le détail, le Lias montre des épaisseurs environs 300m et constitué par des calcaires massifs surmonté par des dolomies sur lesquelles apparaissent des calcaires blancs d'âge Domérien. Le Toarcien est formé par des calcaires argileux. Par contre l'Aalénien montre des bancs de calcaires massifs de couleurs plus foncée.

A partir du Bajocien inférieur et moyen, lesdits calcaires devient plus calcaires avec un apport important d'argile. L'ensemble est surmonté par dépôts marneux à de 50 à 100m d'épaisseur d'âge Bajocien supérieur.

Tandis que le Bathonien est formé par des calcaires moins argileux parfois dolomitiques avec des épaisseurs qui peuvent atteindre les 250m

Le Callovo-oxfordien est marquée par des argiles gréseuses montrant par endroits des niveaux marneux et des calcaires d'épaisseur 250m.

Le Jurassique supérieur commence par les grès d'âge Oxfordien avec des bancs qui peuvent atteindre jusqu'à 15m d'épaisseur. Cette formation gréseuse est séparés par des lits argileux et argileux-gréseux, parfois pélitiques d'épaisseur 550m.

Sur cette formation gréseuse, viennent une autre formée par des calcaires dolomitiques épais de 150 à 200 m, surmontée par des calcaires argileux et des dolomies massives d'épaisseurs qui peut atteindre les 150 m pour chaque formation. Notons, que ces formations sont d'âge Kimméridgien et Portlandien.

Vers le sommet, les dépôts sont plutôt complexe car ils sont constitués par des alluvions discontinus avec quelques lambeaux de basaltes d'âge plio-quadernaire (in BENSAOULA, 2005).

C. Contexte hydrogéologique

Considérée comme étant une région à aquifère transfrontalière, la zone considérée montre sur le plan hydrogéologique plusieurs réservoirs dont les plus intéressants sont profonds.

De ce fait, les différents forages réalisés montrent l'existence de plusieurs aquifères. A titre d'exemple, les grès du callovo-oxfordien et les dolomies d'âge Bajocien-Bathonien.

Ainsi, les dizaines de forages implantés sur la base des études géophysiques électriques (ANRH, 2001) d'une part, et l'interprétation des photographies aériennes (1/20.000) d'autre part, montrent que la longueur total forée est de l'ordre de 6182 m réparties comme suit : 2127 m dans les dolomies et le reste dans la couverture qui correspond aux formations gréseuses et grésopélitiques de l'Oxfordien et du Callovo-Oxfordien.

Toutefois, par rapport aux faciès détectés en subsurface et ceux cartographier en surface, la colonne hydrogéologique type de ladite zone est comme suit :

- Aquifère des alluvions du Plio-quaternaire.
- Aquifère grésopélitique d'âge oxfordien et callovo-oxfordien ;
- Aquifère de faciès dolomitique du Bajocien-Bathonien ;

En effet, l'aquifère des alluvions d'âge Plio-quaternaire montre çà et là des nappes libres dans la plaine de Maghnia et sont exploités par le biais de plusieurs puits. Cet aquifère à perméabilité de fissures et d'interstices présente des potentialités hydrogéologiques plus ou moins bonnes.

L'aquifère grésopélitique est considéré à partir des études hydrogéologiques comme étant à faible potentiel hydrogéologique marqué par une perméabilité de fissures et d'interstices, mais quand l'épaisseur des grés devient importante, ils peuvent être le siège d'aquifère de fort potentiel. A titre d'exemple, un forage a recoupé des bancs gréseux de 100 m donnant ainsi un débit de 32 l/s (BENSAOUAL et al., 2005).

Par ailleurs, celui des Dolomies d'âge Bajocien-Bathonien à aspect karstifié sont à fort potentiel hydrogéologique, du fait que la perméabilité et de fissure. Cette dernière ainsi que la présence des cavités sous terraines (1 à 13 m) est argumenté par la perte soudaine et totale de boue. Notons, que ces dolomies présentent des débits de l'ordre de 30 l/s (BENSAOUAL et al., 2005).

DEUXIEME CHAPITRE :
TRAITEMENT ET INTERPRETATION DES DONNEES

Deuxième chapitre : TRAITEMENT ET INTERPRETATION DES DONNEES

I. INTRODUCTION

Le présent chapitre constitue l'ossature de ce mémoire. Il est consacré à la détermination du flux de chaleur dans la région considérée. Cette détermination est basée sur le traitement et l'interprétation des données acquises sur le terrain. Il s'agit des conductivités thermiques mesurées avec prudence dans deux forages (Nakhla 1 et MS6) en état d'équilibre thermique.

II. LOCALISATION ET DESCRIPTION DES FORAGES

A. Localisation des forages

Les forages sélectionnés sont ceux de Nakhla 1 et mohamed salah 06 localisés dans la zone de Zouia (Fig. 7). Les données géographiques sont résumées ci-dessous (Tabl. 1) :

Forages	Coordonnées géographiques (UTM)		Altitudes (m)
	Latitudes (m)	Longitudes (m)	
Nakhla 1	560721,66	3883792,6	619
MS 6	611968,81	3838197,58	613

Tableau 1 : Données géographiques des forages sélectionnés.

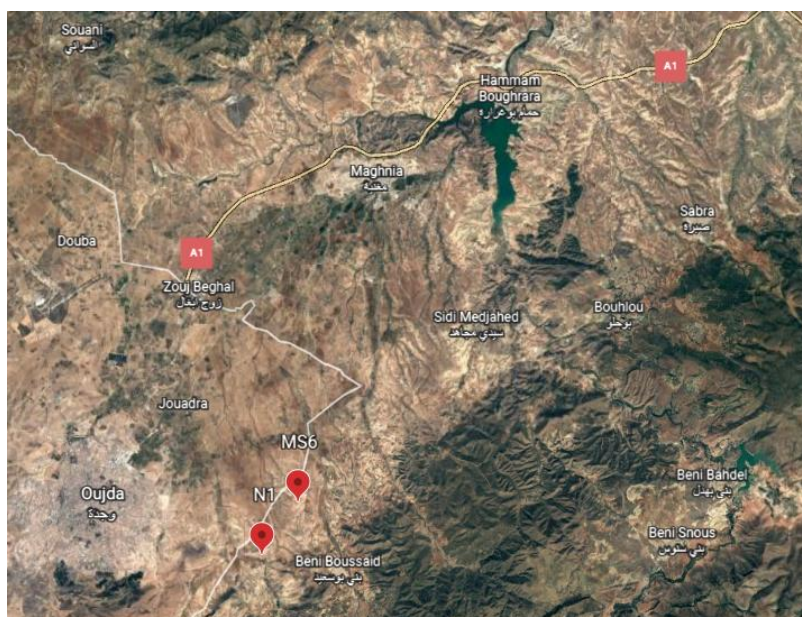


Figure 7 : Position des forages (Nakhla 1 et MS6).

B. Description des forages

1. Forage Nakhla 1

Le forage en question est situé dans la commune de Maghnia. Il s'agit d'un forage hydraulique en voie de développement, réalisé avec tubage. Opérationnelle depuis février 2005, son débit moyen est de l'ordre de 15 l/s. Notons que le niveau statique est à 146m avec une profondeur de 288 m.

La démarche adoptée s'appuie sur la mesure de la résistance du contact du câble chaque 5 m jusqu'à une profondeur de 375 m.

Par ailleurs, les formations qui traversent ce forage sont constituées de bas en haut par (Fig. 8) :

- Une alternance régulière d'Argiles et de calcaires intercalée par des passés gréseuses ;
- Des bancs de dolomies auquel fait suite une combe argileuse de couleur rougeâtre admettant des passées de Dolomies et de Calcaires.
- Grès intercalée par des niveaux d'argiles.
- Niveau microconglomératique, sur lequel repose un empilement carbonaté admettant des passées de grès ou de marnes.

2. Forage Mohamed Salah 6

Présentant les mêmes données géographiques (Commune de Maghnia) et les mêmes caractéristiques techniques que celui de Nakhla 1. Traversant 440m, il est représenté de bas en haut par les formations suivantes (Fig. 9) :

- A la base, il débute par des grès de couleur grise admettant des passés métriques de marnes grises. Passant vers le haut par des marnes grises au quel fait suite des argiles jaunâtre ;
- A ce niveau, il y a présence de gravier constitué d'éléments de différentes natures (polygéniques). L'ensemble se termine vers le sommet par des argiles rougeâtre.

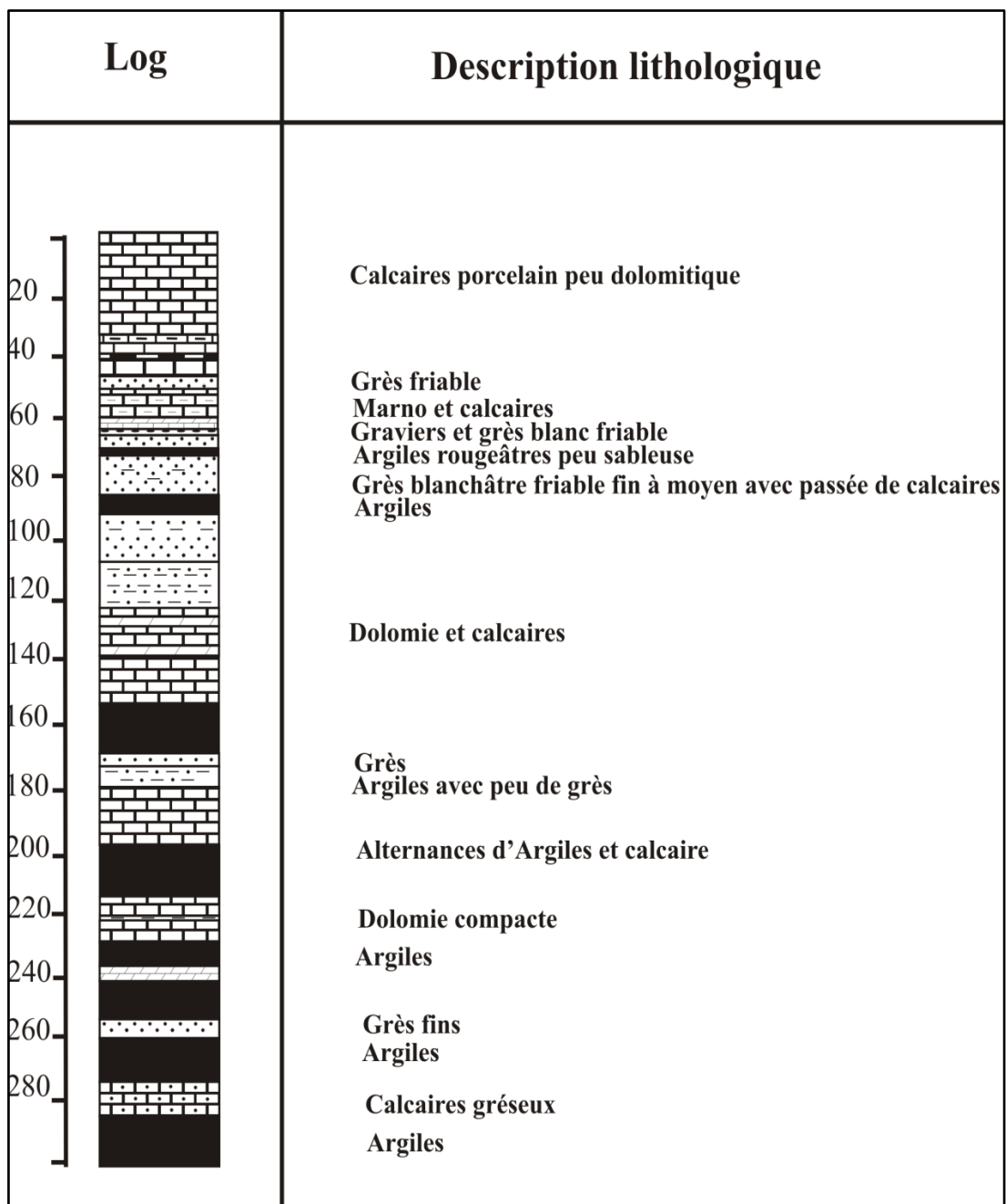


Figure 8 : Log lithologique du forage Nakhla 1 (0 - 288m).

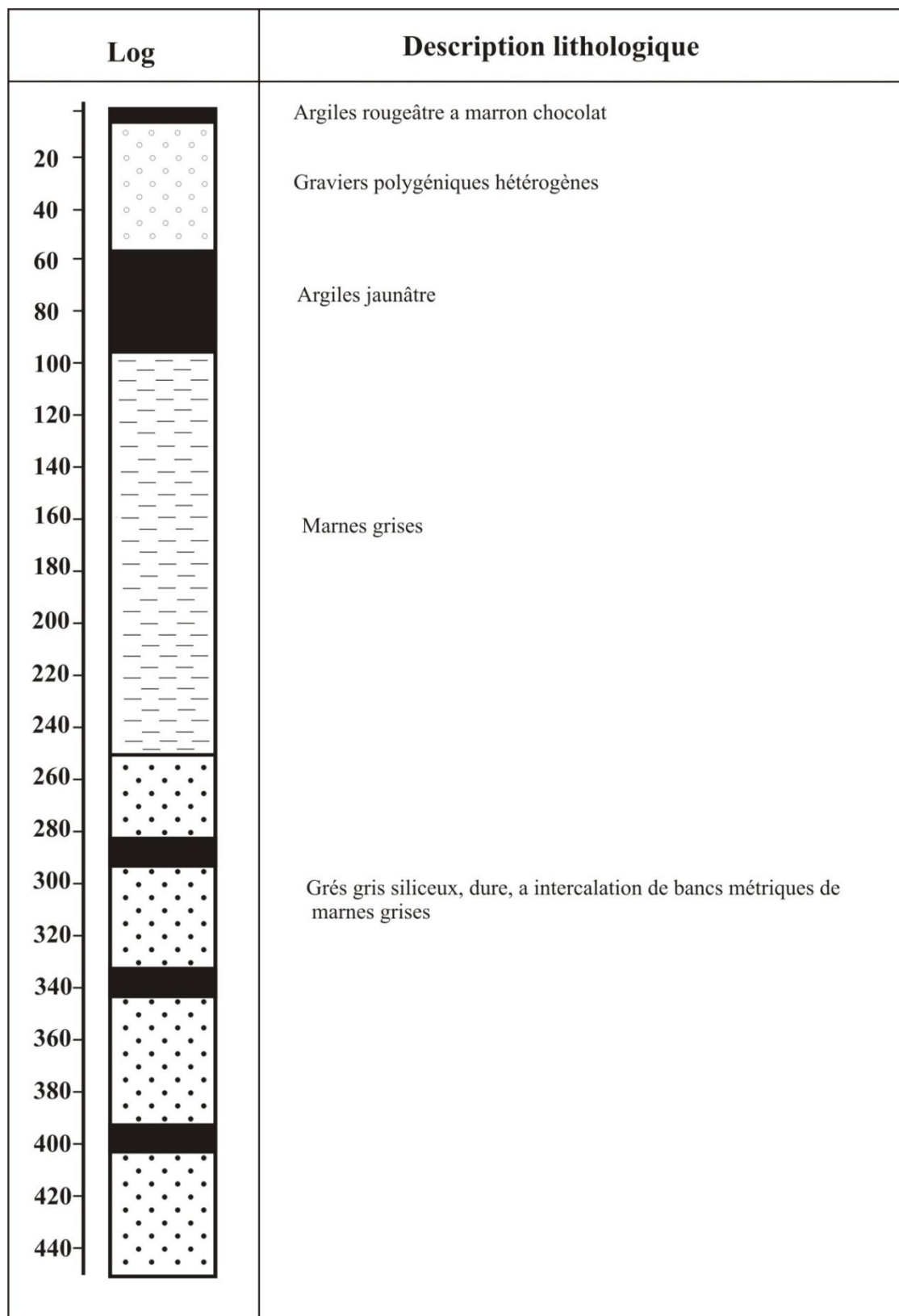


Figure 9 : Log lithologique du forage Mohamed Salah 06(0-440m).

III. TRAITEMENT DES DONNEES

A. Collecte des données

A fin de calculer, puis interpréter les résultats acquises. Nous avons utilisés les valeurs de la résistance mesurées dans chaque forage. De ce fait, après avoir introduit et analyser les données de plusieurs forages (Zouia 2, Zouia 3, Nakhla 1 et Mohamed Salah 6). Nous avons sélectionnés seulement deux forages (Nakhla 1-N1 et Mohamed Salah 6-MS6) en raison des résultats non exploitables.

Après soustraction de la résistance du câble utilisé au cours des enregistrements. Nous procédons à l'opération de collecte des données. Ainsi, les valeurs de la résistance sont de l'ordre de 138,8 Ω pour le forage de Nakhla 1 et 137,6 Ω pour le forage de Mohamed Salah 06.

Ces valeurs de résistance seront utiles après pour calculer les températures et construire les graphes de la résistance en fonction des profondeurs et voir si les formations traversées sont homogènes ou bien hétérogènes lors des mouvements ascendants et descendants de la thermistance et du câble (Fig. 10 et 11).

Notons, que lesdits graphes, montrent d'une part, que les données sont exploitables et que les formations traversées sont homogènes d'autre part.

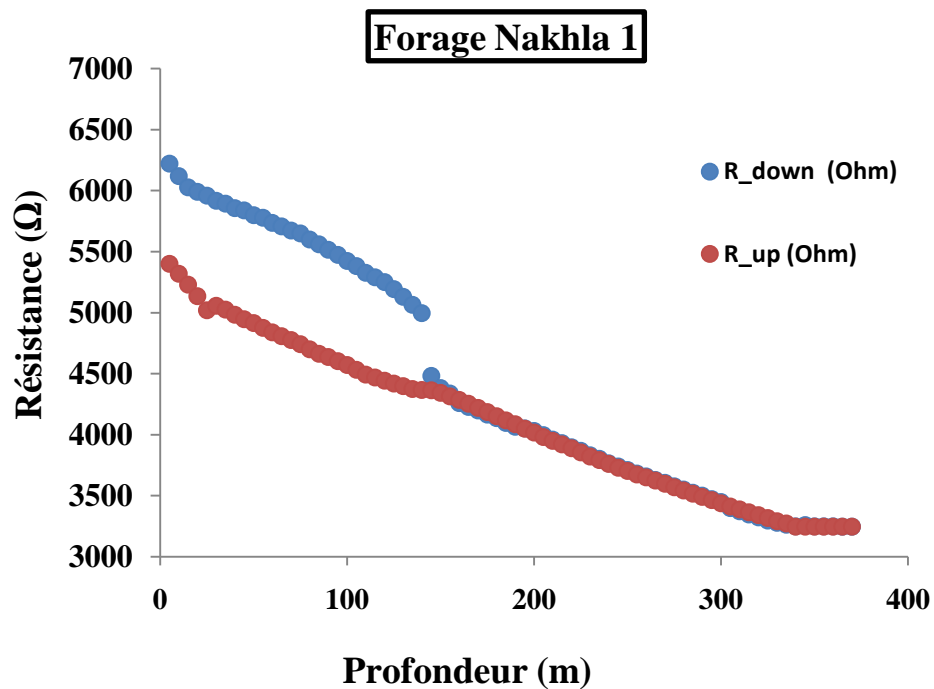


Figure 10 : Variation de la résistance en fonction de la profondeur du forage Nakhla 1.

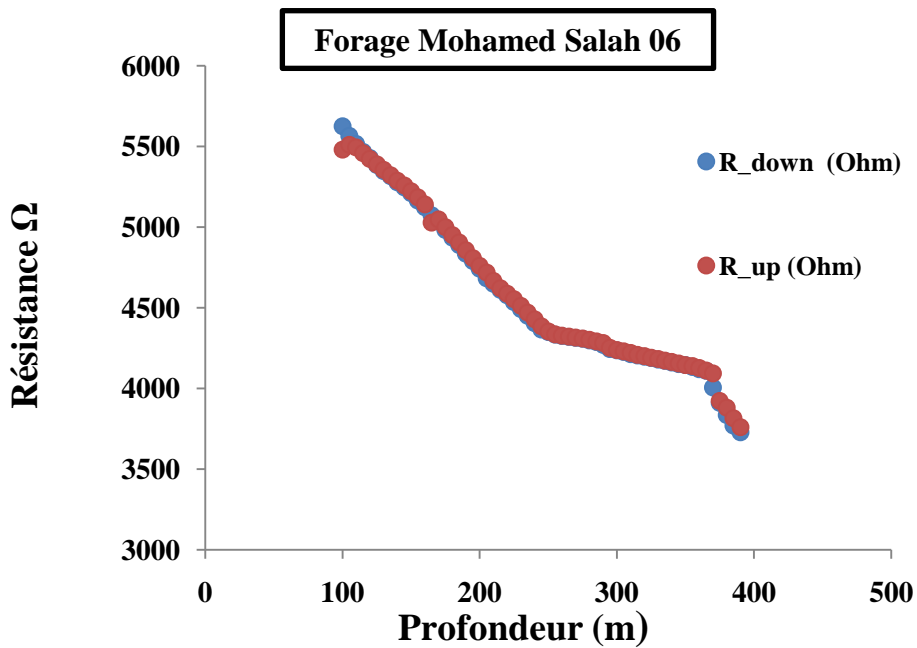


Figure 11 : Variation de la résistance en fonction de la profondeur du forage Mohamed Salah 06.

B. Réduction des données

Suite aux perturbations dues aux problèmes de couplage du capteur avec l'air et de la turbulence de l'air, ce qui donne des valeurs plus ou moins aléatoires au niveau de la partie superficielle du forage. Seules les valeurs de températures prises dans la colonne de l'eau seront retenues. A cet effet, au forage Mohamed Salah 6 les mesures ont été faites dans la partie d'eau du log à partir de 100m jusqu'à 390m et pour Nakhala 1 de 145 jusqu'à 330m.

La transformation de la résistance en température (°C) consiste à utiliser soit la courbe d'étalonnage de la thermistance (Fig. 12) ou bien l'équation de STEINHART-HART (1968) :

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

D'où ;

$$T(^{\circ}\text{C}) = \left(\frac{1}{A + B \times \ln R + C(\ln R)^3} \right) - 273.15$$

T: température (°C)

R: résistance (Ohm)

A, B et C coefficients de Steinhart, ils caractérisent la thermistance

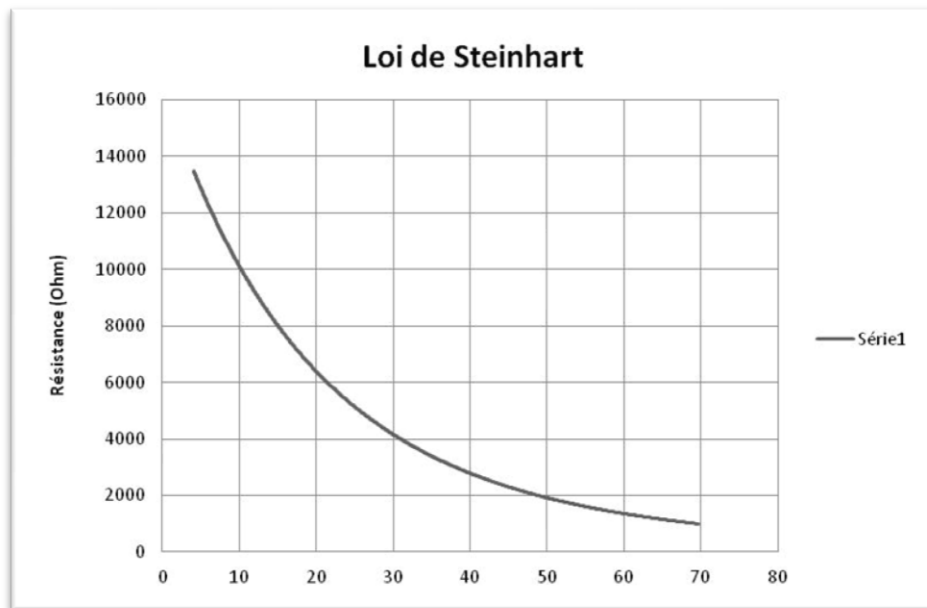


Figure 12 : Courbe d'étalonnage d'une thermistance (d'après STEINHART-HART (1968)).

IV. DETERMINATION DU GRADIENT GEOTHERMIQUE

Le gradient géothermique est déterminé grâce à la lecture des courbes des températures en fonction de la profondeur dans les forages considérés (Fig. 13 et 14).

Notons, qu'au forage Nakhla 1, la température atteint 35°C à une profondeur de 330m, par contre, celle de Mohamed Salah 6 la température approche de 33°C jusqu'à 390m. Le gradient géothermique moyen est de 38,81°C/km (erreur 3,88) à Nakhla 1 et de 28,94 °C/km (erreur 2,89) pour Mohamed Salah 6.

V. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Nous avons opté pour l'estimation de la conductivité thermique à partir des logs lithologiques des forages avec une erreur relativement importante.

La formation concernée par les mesures dans le forage Nakhla 1 est composée d'alternances d'Argiles et de Calcaires entre les profondeurs 145 et 300m. Par contre, au forage Mohamed Salah 6, les formations sont représentées par des intercalations de marnes et de grès entre les profondeurs 100 et 390m.

A. Courbes des températures en fonction de la profondeur

Après avoir déterminé le gradient géothermique et la conductivité thermique, le flux de chaleur est alors estimé en prenant en considération une erreur de l'ordre de 20%. Le calcul du flux se fera avec l'équation suivante :

$$q = (\partial T / \partial Z) \cdot k$$

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

$\partial T / \partial z$: gradient de température;

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

Le flux géothermique moyen est ensuite calculé en utilisant l'équation suivante :

$$q_{\text{moyen}} = \sum q/n$$

Nous allons entreprendre l'estimation du flux de chaleur par la méthode dite gradients géothermiques des courbes températures en fonction de la profondeur.

En effet, au forage Nakhla 1 (Fig. 13 et 14), nous remarquons quatre pentes permettant de calculer par la suite quatre gradients géothermiques. Le flux ainsi estimé est de l'ordre de 76.60 mW m⁻².

Au forage Mohamed Salah 06 (Fig. 15 et 16), les courbes de la variation de la température en fonction de la profondeur ont permis l'identification de trois segments montrant deux formations lithologiques. Le flux est estimé avec une valeur importante. Elle est de l'ordre de 69,01 mW m⁻² avec une erreur de 13,8.

Les résultats des calculs du flux géothermique sont résumés dans le tableau suivant :

Forages	Formation	G (°C/km)	K (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	Flux (mW m ⁻²)
Nakhla 1	F1 (145-160m)	53,9±5,4	2.0±0.2	162,8±21,6
	F2 (165-195m)	38,2±3,8	1,9±0.9	72,9±14,6
	F3 (200-300m)	38.4±3,8	2,1±0.2	81,6±16,3
	Flux moyen	76,6±15,9		
Mohamed Salah 6	F1 (100- 245m)	40,0 ± 4,1	2,2 ± 0,2	88,4±4,4
	F2 (250- 390m)	20,1 ± 2,08	2,4±0,2	49,6±2,4
	Flux moyen	69,0±13,8		

Tableau 2 : Flux géothermique obtenus aux forages Nakhla 1 et Mohamed Salah 6.

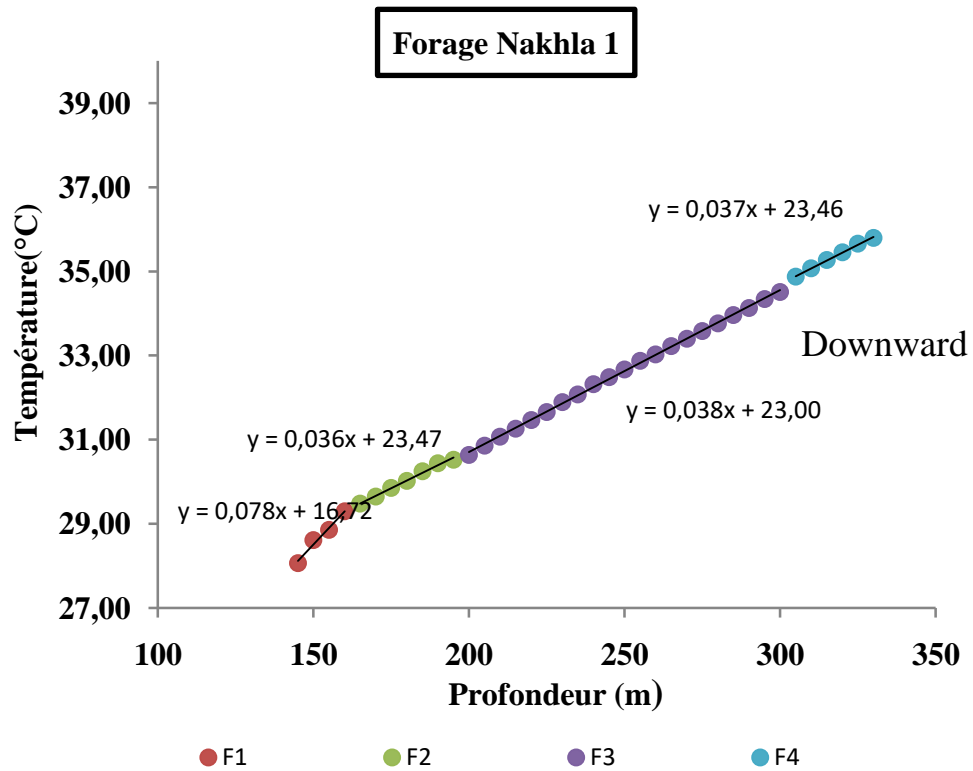


Figure 13 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Nakhla 1 lors de la descente.

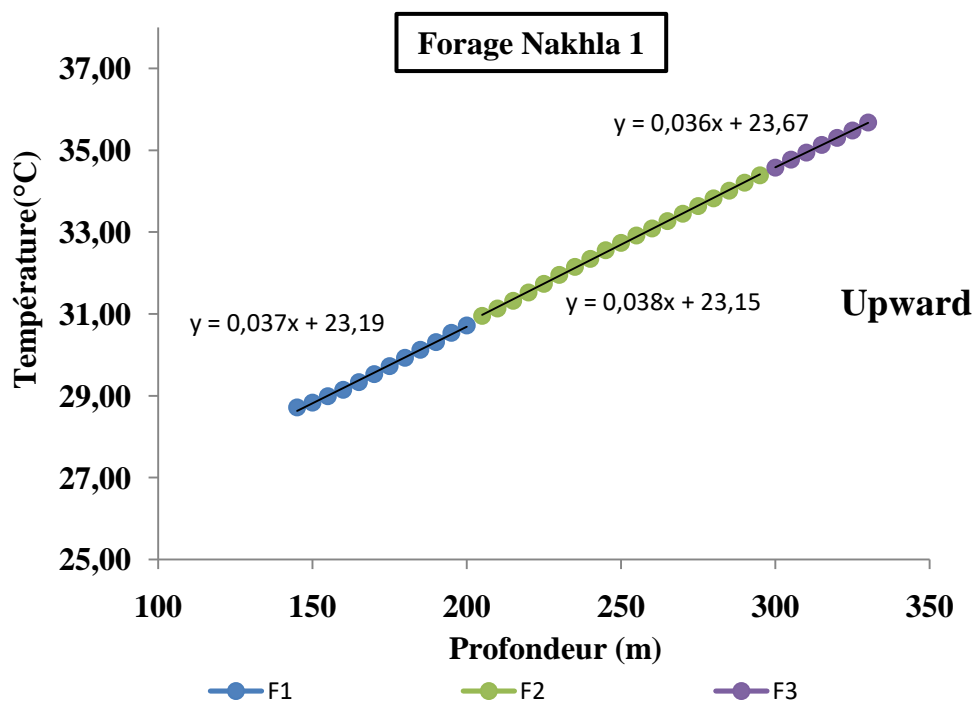


Figure 14 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Nakhla 1 lors de la remontée.

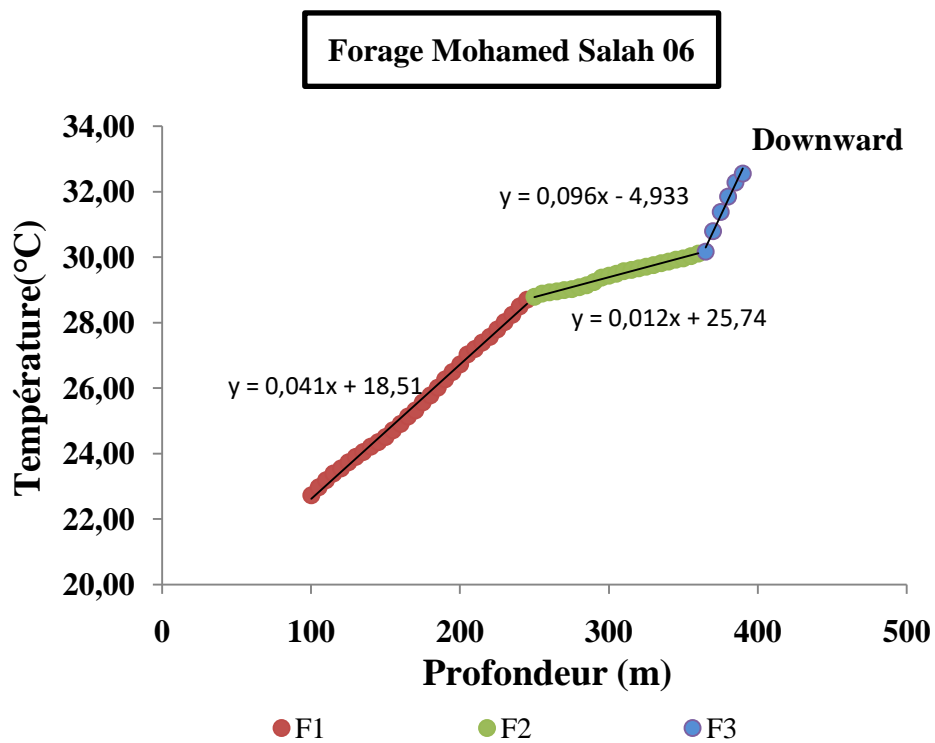


Figure 15 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Mohamed Salah 06 lors de la descente.

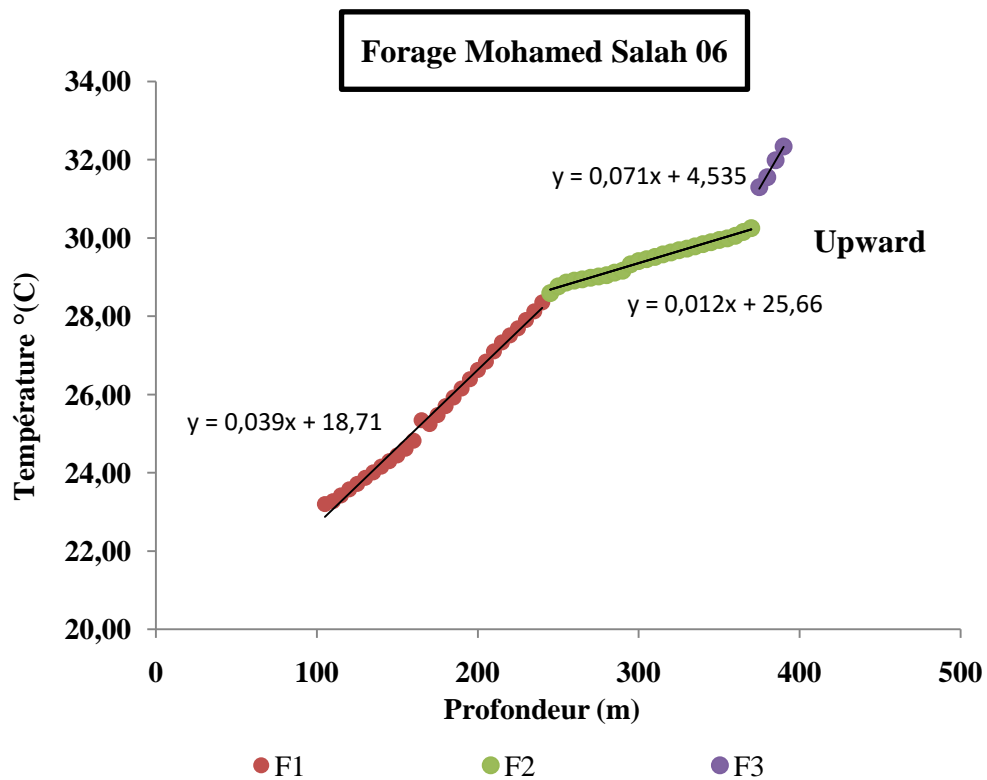


Figure 16 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Mohamed Salah 06 lors de la remontée.

VI. CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, nous pouvons conclure qu'à partir de l'interprétation des logs lithologiques des forages Nakhla 1 et Mohamed Salah 6 et les des données collectées. La résistance mesurée est de 138,8 Ω pour le forage de Nakhla 1 et 137,6 Ω pour le forage de Mohamed Salah 6. Par ailleurs, le gradient géothermique moyen des deux forages ne dépasse pas 40 °C/km.

Tandis que l'estimation du flux de chaleur à Nakhla 1 et Mohamed Salah 6 est de l'ordre de 76.6 mW/m⁻² et 69,0mW/ m⁻² respectivement.

TROISIEME CHAPITRE :
DISCUSSION ET COMPARAISON

Troisième chapitre : DISCUSSION ET COMPARAISON

I. INTRODUCTION

Pour pouvoir appréhender la répartition spatiale du flux de chaleur, nous avons essayé dans ce dernier chapitre de récapituler les différents résultats des forages considérés d'une part et de les comparer avec les travaux antérieurs réalisés en Algérie (OMAR, 2019 & BENSENANE, 2020) et au Maroc (CHIOZZI et al, 2017).

II. DISCUSSION

Dans les forages étudiés le gradient géothermique et le flux ont été estimés à partir des valeurs des résistances mesurées.

Les valeurs du gradient géothermique ponctuel déterminées à partir des courbes $T=f(P)$, ont permis d'aboutir à un gradient géothermique moyen. De ce fait, l'estimation du flux géothermique est calculée à partir des valeurs des gradients géothermiques (Tabl. 3)

Forage	Alt. (m)	Lat.	Long.	P (m)	Lithologie	G (mk m ⁻¹)	λ (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	q (mWm ⁻²)	q moyen (mWm ⁻²)
N1	619	560721,66	3883792,6	145-160 m	Dolomie et calcaires avec passage d'argiles	53,9 (5,4)	2 (0,2)	162,8 (21,6)	76,6 (15)
				165-195 m	Alternance argilo-calcaires	38,1 (3,8)	1,9 (0,9)	72,9 (14,6)	
				200-288 m	Alternance Argilo-calcaires avec passage de grès	38,4 (3,8)	2,1 (0,2)	81,6 (16,3)	
MS 6	613	611968,81	3838197,58	100-245 m	Marnes	40,0 (4,0)	2,2 (0,2)	88,4 (17,68)	69,01 (13)
				250-390m	Grès dure à intercalation de bancs métriques de marnes	20,8 (2,08)	2,5 (0,2)	49,6 (9,92)	

Tableau 3: Données des forages et flux de chaleur.

Dans le détail, au forage Nakhla 1 (Fig. 17) les gradients géothermiques moyens déterminés à partir des courbes des gradients $T=f(P)$ sont de 53,9 °C/km dans la première

formation constituée des dolomies et des calcaires. Par contre, les valeurs diminues jusqu'à 38,1 °C/km dans la deuxième formation contenant une alternance d'argile et de calcaire. Enfin, la troisième formation gréseuse présente un gradient de l'ordre de 38,4 °C/km au cours de la descente et de la remontée de la sonde (Tabl. 2).

Toutefois, les valeurs du flux géothermiques, calculés à partir des courbes de température en fonction de la profondeur dans ce forage, sont comprises entre $162,8 \pm 21,6$ et $81,6 \pm 16$ m Wm⁻² (flux moyen $76,6 \pm 15$ m Wm⁻²) lors des mesures descendant et ascendant de la sonde.

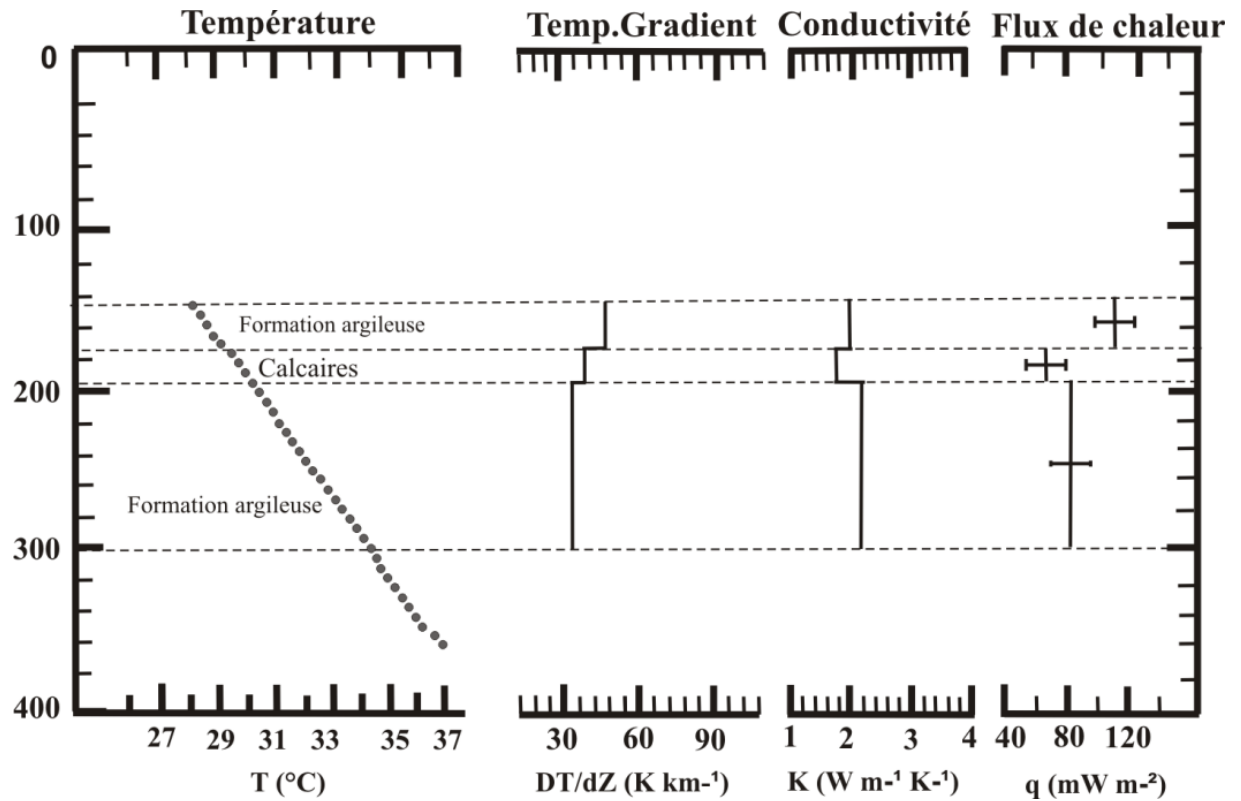


Figure 17 : Gradient, conductivité et flux de chaleur du forage Nakhla 1.

Au forage Mohamed Salah 06 (Fig. 18), les gradients géothermiques sont :

- 40 °C/km dans la première formation constituée de marnes ;
- 20,8 °C/km dans la dernière formation constituée de grès (Tabl. 2).

Les valeurs des flux géothermique sont comprises entre $88,4 \pm 17,68$ m Wm⁻² et $49,6 \pm 9,92$ m Wm⁻² (Flux moyen $69,01 \pm 13$ m Wm⁻²) lors du mouvement descendant et ascendant de la sonde.

Notons, que les résultats des valeurs obtenues à partir des courbes de température en fonction de la profondeur marquent un rapprochement du flux et du gradient géothermique dans a zone d'étude.

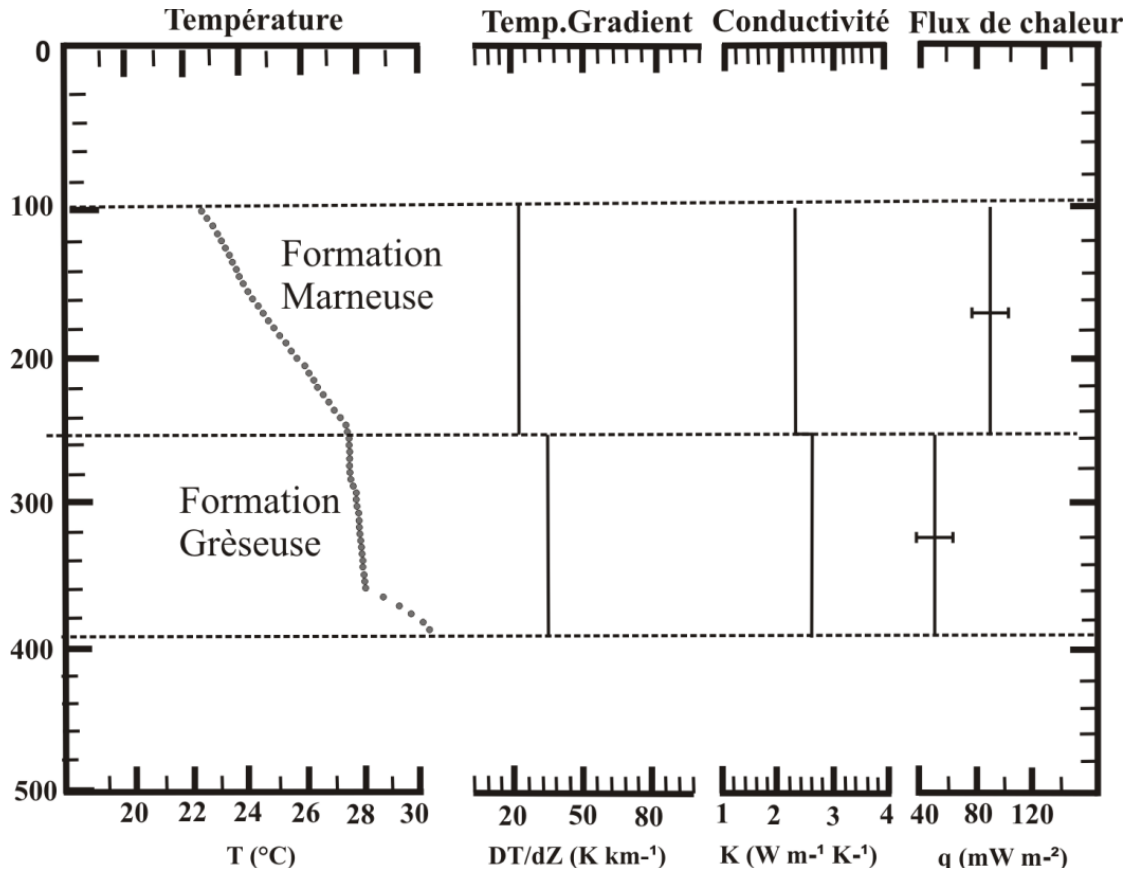


Figure 18 : Graphe des mesures faites sur le forage Mohamed Salah 06.

III. COMPARAISON

Afin d'avoir une meilleure vision sur la répartition spatiale du flux de chaleur dans l'Algérie nord occidentale, nous avons comparé dans un premier temps nos résultats sur le plan local avec ceux de Maghnia (OMAR, 2019). Puis ladite comparaison est prolongée vers l'Ouest avec les résultats du flux de chaleur obtenus dans la région d'Ain Temouchent (BENSENANE, 2020). Enfin, une dernière comparaison se fera avec les flux de chaleur estimés à l'extrémité orientale du Maroc (CHIOZZI et al, 2017).

Les différents résultats des flux dans les régions sélectionnées (Tabl. 4), montrent clairement que le flux de chaleur dans les forages Nakhla 1 ($76,6 \text{ m.W/m}^{-2}$) et Mohamed Salah 6 ($69,01 \text{ m.W/m}^{-2}$) se rapprochent de ceux de Zouia 1 ($58,71 \text{ m.W/m}^{-2}$) et BBS07 ($63,5 \text{ m.W/m}^{-2}$). Ceux du Maroc, montrent une légère augmentation du flux (M1 : 111 m.W/m^{-2} ; M2 : 87 m.W/m^{-2}).

Par ailleurs, les valeurs sont relativement inférieures à ceux d'Ain Temouchent (Bendouma : $24,31 \text{ m.W/m}^{-2}$; Kerolise : $18,72 \text{ m.W/m}^{-2}$; Sidi Saada : $14,52 \text{ m.W/m}^{-2}$) à l'exception du forage d'El Halfa ($78,6 \text{ m.W/m}^{-2}$), où il présente des valeurs proches aux zones de Maghnia et du Maroc.

	Forages hydrauliques	Flux de chaleur moyen (m.W m ⁻²)
Maghnia	Nakhla 1 (N1)	76,6
	Mohamed Salah 6 (MS6)	69,01
	Zouia 1 (Z1)	58,71
	BBS07	63,5
Ain Temouchent	El Halfa (H1)	78,6
	Sidi Saada (SS)	14,52
	Kerolise (K)	18,72
	Bendouma (B)	24,31
Maroc	2952/12 (M1)	111
	2362/12 (M2)	87

Tableau 4: Tableau comparatif des résultats du flux de chaleur dans les forages

La carte de densité élaborée (Fig. 19) par rapport aux données du flux de chaleur montre que les zones les plus intéressantes se situent plutôt à l'Ouest avec une légère diminution vers l'Est. Néanmoins, une étude d'estimation du flux nécessite plus de données surtout dans les régions caractérisées par un volcanisme (Ghazaouet, Massif de Tifaraouine, Beni saf, Msirda,...).

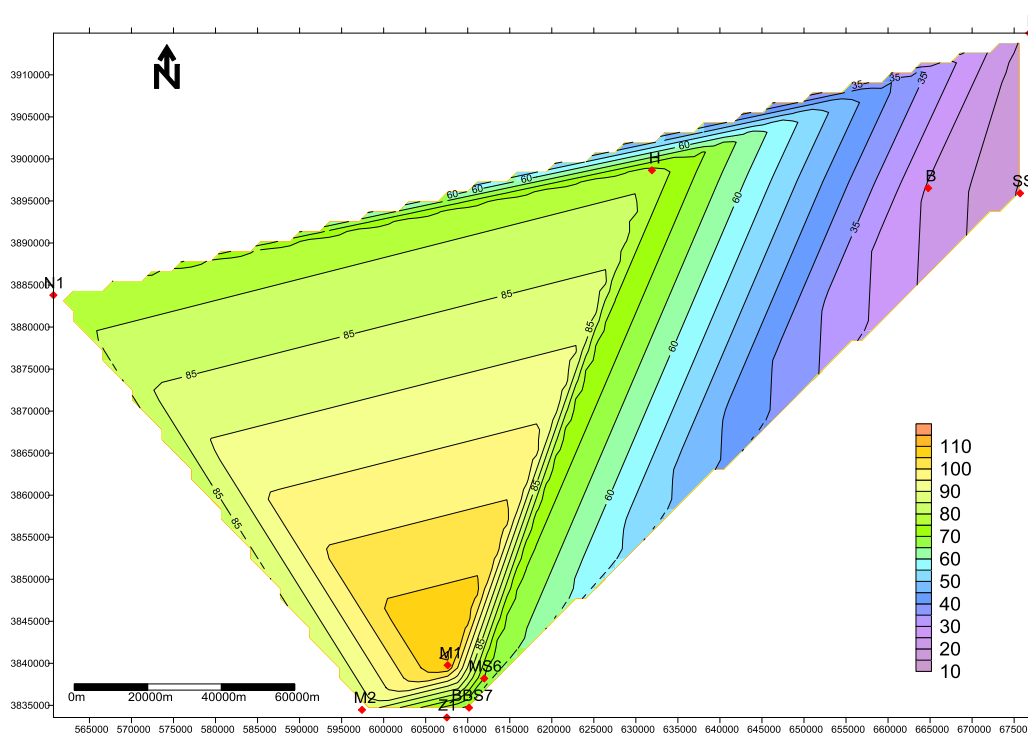


Figure 19 : Carte d'iso-flux de chaleur de l'Ouest algérien.

IV. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons récapitulé les résultats obtenus. Il s'agit du gradient géothermique et le flux de chaleur moyen. En effet, les gradients géothermiques au forage nakhla 1, et Mohamed Salah 6 ne dépassent pas 53,9°C/km et 40°C/km respectivement.

Les flux moyen enregistrés dans les deux forages est relativement fort ($69,01 \text{ mW m}^{-2}$ – $76,6 \text{ mW m}^{-2}$). Ainsi, la comparaison avec les régions situées à l'Est et à l'ouest montre plutôt une augmentation du flux à l'Ouest du pays.

**CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail de master, les différents résultats obtenus seront récapitulé ici :

- L'estimation des gradients géothermiques au forage Nakhla 1, nous a permis de calculer des valeurs comprises entre $38,4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ et $53,9^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Par contre, celui de Mohamed Salah 6 montre des valeurs réparties entre $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ et $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$.
- A partir des courbes des températures en fonction de la profondeur, nous avons calculé le flux de chaleur.
- Au forage Nakhla 1, les valeurs dudit flux de chaleur sont comprises entre $72,9 \pm 14,6 \text{ mW m}^{-2}$ et $107,8 \pm 21,6 \text{ mW m}^{-2}$ (Moy : $79,6 \pm 15,9 \text{ mW m}^{-2}$ lors du mouvement descendant et ascendant de la sonde).
- Par ailleurs, les valeurs des flux géothermique sont comprises entre $88,4 \pm 17,68 \text{ mW m}^{-2}$ et $49,6 \pm 9,92 \text{ mW m}^{-2}$ (Flux moyen $69,01 \pm 13 \text{ mW m}^{-2}$) lors du mouvement descendant et ascendant de la sonde.

En somme, nous avons enregistré un flux important dans les deux forages avec une estimation comprise entre $76,6 \pm 15 \text{ mW m}^{-2}$ dans le forage Nakhla 1 et $69,01 \pm 13 \text{ mW m}^{-2}$ dans le forage Mohamed Salah 06.

La comparaison avec les travaux antérieurs réalisés à l'Ouest et à l'est de la région à Ain temouchent et au Maroc respectivement montre une progression de ce flux du NNO vers le SSE.

PERSPECTIVES

Afin d'appréhender la répartition spatiale du flux de chaleur dans l'Algérie nord occidentale, nous avons jugé utile de donner pour les études ultérieures quelques perspectives :

- Recenser les forages hydrauliques dans la région de l'Ouest algérien ;
- Réaliser plus de mesures dans les régions de Ain Témouchent et Maghnia ;
- Elaborer des cartes de répartition spatiales desdites régions ;
- Etendre les recherches dans les Monts de Tlemcen et des Traras ;
- Réaliser des études de faisabilité par rapport aux résultats obtenus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANRH (2001)- Rapports inédits.

BENEST M. (1982)- Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie Occidentale). *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique*, 23, pp. 345-362.

BENEST M. (1985)- Evolution de la plate-forme de l'Ouest Algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire. *Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, n°95, 581 p.

BENSAOULA F., BENSALAH M. & ACHACHI A. (2005)- Etude des circulations d'eaux profondes dans les dolomies du Dogger de Zouia, Bordure occidentale des Monts de Tlemcen, nord ouest algérien, *Bulletin d'hydrogéologie*, n.21, 16-32.

BENSENANE B.Y. (2020)- Détermination du flux de chaleur dans la région d'Ain T'émouchent. *Mémoire Master*. Univ. Tlemcen, 51 p.

CHIOZZI P., BERKAOUI A., RIMI A., VERDOYA M. & ZARHLOULE Y. (2017)- A review of surface heat- Flow data of northern middle atlas Morocco, *Journal of Geodynamics*. 112 : 58-7.

ELMI S. (1983)- L'évolution des Monts de Rhar Roubane (Algérie occidentale) au début du Jurassique. Livre Jubilaire Gabriel Lucas. *Mém, Univ. Dijon*, 7, pp. 401–412.

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.

LUCAS G. (1942)- Description géologique et pétrographique des Monts de Ghar-Roubane et du Sidi-El Abed (Frontière Algéro-marocaine). *Bulletin du service géologique de l'Algérie*, n°16, 539p

LUCAS G. (1952)- Bordure Nord des hautes plaines en Algérie occidentale, XIX Congrès géologique international, Alger. *Monographies régionales d'Algérie*, n°1, vol.21, 139 p.

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

MAROK A. & REOLID M. (2012)- LowerJurassic sediments from the Rhar Roubane Mountains (Western Algeria): Stratigraphic precisions and synsedimentary block-faulting. *Journal of African Earth Sciences*, 76, pp. 50-65.

OMAR A. A. (2019)- Estimation du flux de chaleur dans la région de Tlemcen (Algérie). *Mémoire Master*. Univ. Tlemcen, 35 p.

OUALI S., KHELLAF A. & BADDARI K. (2006)- Etude géothermique du Sud de l'Algérie. *Revue des Energies Renouvelables* 9 (4): 297- 306.

STEINHART J.S. & HART S.R. (1968)- Callibration 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 Explore Prod Technol* 9: 1135.

LISTES DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Matériels utilisés.	8
Figure 2 : Méthodologie de travail.	9
Figure 3 : Courbe représentative de la température en fonction de la profondeur.	10
Figure 4 : Structure de la Terre et flux de chaleur.	11
Figure 5 : Situation géographique de la région d'étude.	13
Figure 6 : Carte géologique de la région d'étude avec localisation des forages considérés (Extrait de la carte de LUCAS, 1952 in BENSAOULA, 2005).	14
Figure 7 : Position des forages (Nakhla 1 et MS6).	17
Figure 8 : Log lithologique du forage Nakhla 1 (0 - 288m).	18
Figure 9 : Log lithologique du forage Mohamed Salah 06(0-440m).	19
Figure 10 : Variation de la résistance en fonction de la profondeur du forage Nakhla 1.	21
Figure 11 : Variation de la résistance en fonction de la profondeur du forage Mohamed Salah 06.	22
Figure 12 : Courbe d'étalonnage d'une thermistance (d'après STEINHART-HART (1968)).	23
Figure 13 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Nakhla 1 lors de la descente.	25
Figure 14 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Nakhla 1 lors de la remontée.	25
Figure 15 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Mohamed Salah 06 lors de la descente.	26
Figure 16 : Variation de la température en fonction de la profondeur au forage Mohamed Salah 06 lors de la remontée.	26
Figure 17 : Gradient, conductivité et flux de chaleur du forage Nakhla 1.	29
Figure 18 : Graphe des mesures faites sur le forage Mohamed Salah 06.	30
Figure 19 : Carte d'iso-flux de chaleur des forages .	31

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1 : Données géographiques des forages sélectionnés.	17
Tableau 2 : Flux géothermique obtenus aux forages Nakhla 1 et Mohamed Salah 6.	24
Tableau 3: Données des forages et flux de chaleur.	28
Tableau 4: Tableau comparatif des résultats du flux de chaleur dans les forages.	31