



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

LARID SARAH

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : Hydraulique urbaine

INTITULE :

EVALUATION DU POTENTIEL GEOOTHERMIQUE A BASE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EMERGENCES THERMALES : EXEMPLE D'APPLICATION POUR QUELQUES SOURCES DE LA WILAYA DE BEJAIA

Soutenu le : 30 /09 /2021 devant le jury composé de :

- Président : M^r IKNI.T
- Promoteur (s) : M^r Ait Ouali A.Kader.
M^r Bedjou A.Hamid.
- Examineur (s) : M^r Saou A.Hamid.

REMERCIEMENT

Après avoir rendu grâce à Dieu tout puissant, qui m'a donné la volonté d'entamer et de réaliser ce modeste travail.

Je remercie monsieur M^r IKNI.T , pour l'honneur qu'il nous fait de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens également à remercier M^r SAOU.A pour avoir accepté d'être l'examineur de ce travail.

Ensuite, je remercie mon promoteur "M. BEDJOU .A", et mon encadreur " M .AIT OUALI " pour leur soutien .également je tiens à leur exprimer ma gratitude pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs conseils judicieux qui ont été le principal contributeur à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui m'encouragent à aller de l'avant et qui m'ont appris le chemin de la réussite et du succès.

*A mes chers parents, ce n'est qu'un simple fruit de vos sacrifices et votre éducation spéciale, Vous êtes ma raison de réussir et de continuer à avancer dans le chemin que vous avez tracé !
Tout le mérite vous revient !*

À mes très chères frères et sœurs : LYAZID, ABDSLAM, LARBI, RADIA et HASSIBA.

À mes chères belles sœurs : HAFIDA, FATIMA et DYHIA.

À mes chers beaux frères : MOUHOU et BOUZID.

À mes chères neveux et nièces : AMINE, IDIR, BILAL, MIDOU, ALYCIA, NESRIN, HANANE, MIKA et ZINOÛ.

À la mémoire de mes chers grands parents que dieu les accueille dans son vaste paradis.

À yema zahra et toute ma famille.

À mes chères amies : JOJO, FATY, ASMA, NAWEL, SORAYA, FATMA et SARAH nos moments partagés me manquent, mais malgré cette distance votre réconfort et votre soutien sont toujours présents!

À mon cher futur mari LOUNES, l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui a été tout le temps à mes côtés pour me soutenir, m'aider et m'encourager durant tout mon parcours universitaire.

Sommaire

Introduction générale	1
I. Présentation du bassin versant de la Soummam et les deux sources thermales	
I.1. Le bassin versant de la Soummam	3
I.1.1. Situation géographique	4
I.1.2. Hydrographie du bassin versant de la Soummam	5
I.1.3. Conditions climatiques	6
I.1.4. Condition du sol	6
I.1.5. Morphologie du bassin	6
I.1.6. Caractéristiques générales du bassin versant	8
I.1.6.1. Caractéristiques physiographiques	8
I.1.7. Situation géologique	13
I.1.7.1. Géologie générale du bassin versant	13
I.1.7.2. Lithologie	15
I.1.7.3. La tectonique	18
I.1.8. Situation climatique	19
I.2. Les deux sources thermales	20
I.2.1. La source thermique « Hammam sidi Yahia El Aidli »	20
I.2.1.1. Situation géographique	20
I.2.1.2. Situation géologique	20
I.2.1.3. Hydrogéologie	21
I.2.1.4. Tectonique	22
I.2.1.5. Propriétés physio-chimiques	22
I.2.1.6. Propriétés chimiques	23
I.2.2. La source thermique « Hammam Sillal »	24
I.2.2.1. Situation géographique	24
I.2.2.2. Situation géologique	26
I.2.2.3. Hydrogéologie	26
I.2.2.4. Tectonique	26

I.2.2.5. Propriétés physio-chimiques	27
I.2.2.6. Propriétés chimiques	27

II. Les eaux souterraines et les eaux thermales

II.1. Les eaux souterraines	29
II.2. L'eau dans les aquifères	30
II.3. Les types d'aquifères	30
II.3.1. Les grands systèmes aquifères	30
II.3.2. Les aquifères karstiques	32
II.3.3. Les aquifères alluviaux	33
II.3.4. Les aquifères de socle	33
II.3.5. Les aquifères volcanique	34
II.4. Les eaux thermales	35
II.4.1. Etymologie	35
II.4.2. Définition d'une eau thermale	35
II.5. Formation des eaux thermales	37
II.6. Classification des eaux thermales	37
II.6.1. Selon l'origine	37
II.6.2. Selon le degré de la chaleur (température)	37
II.6.3. Selon la minéralisation	38
II.6.4. Selon la concentration en ions	38
II.6.5. Selon l'origine géologique	41

III. L'énergie géothermique

III.1. Introduction partielle	42
III.2. Formation de l'énergie géothermique	42
III.3. La géothermie	43
III.3.1. Définition de la géothermie	43
III.3.2. Principe de fonctionnement de la géothermie	44
III.3.3. Les types de géothermie	46
III.3.3.1. La géothermie à haute énergie	46
III.3.3.2. La géothermie à moyenne énergie	46

III.3.3.3. La géothermie à basse énergie	46
III.3.4. Type des gisements géothermiques	47
III.3.5. Le flux de chaleur	48
III.3.6. La conductivité thermique	48
III.3.7. Le gradient géothermique	50
III.3.7.1. Origine du gradient géothermique	51
III.3.7.2. Calcul du gradient géothermique	51
III.4. Les systèmes géothermiques	52
III.4.1. Les systèmes hydrothermaux	54
III.4.2. Les systèmes Engineered / Enhanced Geothermal Systems (EGS)	55
III.5. La géothermie dans le monde	56
III.5.1. Applications	56
III.5.2. Exploitation géothermique	58
III.5.3. Capacité énergétique	59
III.5.4. La géothermie en Algérie	60
III.5.4.1. Exploration	60
III.5.4.2. Exploitation	61
III.6. Les avantages et les inconvénients de la géothermie	61
III.6.1. Les avantages	61
III.6.2. Les inconvénients	62
III.7. La géothermométrie	62
III.7.1. Définition	62
III.7.2. Géothermomètre à silice	63
III.7.3. Géothermomètre Na/k	64
III.7.4. Géothermomètre Na-k-Ca	64
III.8. Conclusion partielle	65

IV. Méthodologie

IV.1. Introduction	66
IV.2. Objectif de l'étude	66
IV.3. Mesures in situ	66
IV.4. Prélèvement et échantillonnage	68
IV.5. Localisation des points de prélèvement	68

IV.6. Application de la géothermométrie chimique à la region d'étude	69
IV.6.1. Géothermomètre à silice	69
IV.6.2. Géothermomètre à cation	70
IV.7. Le potentiel géothermique	71
IV.7.1. Calcul potentiel géothermique à partir des températures et des débits	71

V. Résultats et discussion

V.1. Températures calculées par la géothermométrie chimique	72
V.2. Interprétation des résultats obtenus	73
V.3. Calcul du potentiel géothermique	74
V.4. La possibilité d'utilisation thérapeutique	75
V.4.1. Résultats des analyses et faciès chimique	75
Conclusion générale	77
Références bibliographiques	78

Liste des figures

Figure I-1 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique.	3
Figure I-2 : Les grands bassin versant d'Algérie.	4
Figure I-3 : Les sous bassin de la Soummam.	7
Figure I-4 : Carte du relief du bassin versant de la Soummam.	10
Figure I-5 : Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam.	11
Figure I-6 : Courbe de niveaux.	13
Figure I-7 : Carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte géologique nord Constantine de (1/500000)).	14
Figure I-8 : Carte hydrogéologique de la Wilaya de Bejaia.	15
Figure I-9 : Zone climatique du bassin versant de la Soummam.	20
Figure I-10 : Coupe géologique de la région de « Sidi Yahia El Aidli».	21
Figure I-11 : Model de circulation des eaux thermales de « Sidi Yahia El Aidli».	22
Figure I-12 : Situation géographique des sources thermales.	25
Figure I-13 : Coupe géologique du secteur « Sillal».	26
Figure I-14 : Diagramme de PIPER pour les sources thermales étudiées.	28
Figure II-1 : Sédimentation et milieu de sédimentation.	31
Figure II-2 : Représentation synthétique d'un système karstique.	32
Figure II-3 : Schéma des types d'aquifère.	34
Figure II-4 : Schéma de classification chimique des eaux thermales.	41
Figure III-1 : Structure intérieur du globe.	44
Figure III-2 : Les principes province géothermales Algérienne.	45
Figure III-3 : Variation du gradient géothermique moyen à l'intérieur du globe.	50
Figure III-4 : Système géothermique.	54
Figure III-5 : Exemple de système hydrothermal.	55
Figure III-6 : Diagramme de LINDAL.	57
Figure III-7 : Les modes d'exploitation en géothermie de basse enthalpie.	58
Figure III-8 : Relation entre température et teneur en silice.	63
Figure IV-1 : Modèle multi paramètre portatif de marque WATERPROOF.	67
Figure IV-2 : Mesure de PH.	67

Liste des figures

Figure V-1 : Application de la géothermométrie sur la source « Hammam Sidi Yahia El Aidli».	72
Figure V-2 :Application de la géothermométrie sur la source « Hammam Sillal».	73
Figure V-3 :Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures.	75
Figure V-4 :Diagramme de Piper des deux sources étudiées.	76

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Superficie de sous bassin versant de la Soummam.	7
Tableau I.2 : Tableau définissant l'hypométrie du bassin de la Soummam.	10
Tableau II.1 : Types de sources thermales.	38
Tableau II.2 : Clasification des eaux thermales en fonctionde leur minéralisation.	38
Tableau III.1 :Les conductivités thermiques des principaux constituants de la roche en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.	49
Tableau III.2 :Conductivités thermique de divers types de roche à température ambiante.	50
Tableau III.3 : Evolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en MWe.	60
Tableau IV.1 : Caractéristiques principales des deux sources.	68
Tableau IV.2 :Résultats des analyses physiochimiques des deux sources (Mars-2017).	69
Tableau IV.3 :Application de géothermomètres chimiques (à silice) dans la région.	69
Tableau IV.4 :Application de géothermomètres chimiques (à cation) dans la région.	70
Tableau V.1 : Température du réservoir obtenue par la géothermométrie ($^{\circ}C$).	72
Tableau V.2 : Calcul du potentiel géothermique des deux sources thermales.	74
Tableau V.3 : Formules ioniques et le faciès spécifique de chaque analyse.	76

Liste des symboles et abréviations

D : Dénivelée.

∇T : Le gradient du champ de température [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$].

G : Le gradient géothermique [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$] (degré Celsius par mètre).

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveaux.

H_m : Altitude médiane [m].

H_{max} : Altitude maximale [m].

H_{min} : Altitude minimale [m].

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant [m].

I_g : Indice de pente globale.

K : La conductivité thermique du milieu [$\text{W}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{m}^{-1}$].

K_c : Indice de compacité ou de Gravelius.

L : Longueur du rectangle équivalent.

l : Largeur du rectangle équivalent.

P : Périmètre du bassin versant.

P_o : Potentiel géothermique [kWth].

Q : Débit de la source [l/s].

q : Flux de chaleur.

S : Surface du bassin versant.

S_i : Aire comprise entre deux courbes de niveaux.

T : La température initiale [$^{\circ}\text{C}$].

t : La température finale [$^{\circ}\text{C}$].

z : La profondeur [m].

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Afin de préserver et rendre durable la ressource en eaux (souterraines et superficielles), l'Algérie met des moyens et des dispositions pour suivre et contrôler cette richesse, notamment pour les systèmes à grande capacité et /ou très sollicités (même si ces moyens restent assez modestes).

L'Algérie reçoit approximativement 90 milliards m³ de pluie par an dont 85% s'évaporent et le reste s'infiltré dans le sous-sol ou s'écoule dans le cours d'eau. En matière de ressources souterraine, le volume exploitable est estimé à 1,8 milliards m³ au Nord [presque totalement exploitées aujourd'hui [1].

Par définition Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation. Ainsi nous distinguons cinq grandes familles d'énergie renouvelable qui sont :

1-L'énergie solaire

2-L'énergie Éolienne

3-L'énergie Hydraulique

4-La biomasse

5-La géothermie

L'énergie géothermique est considérée comme une énergie renouvelable dérivée de la chaleur présente dans diverses enveloppes de la terre .Cette énergie est liée à la formation géologique qui abrite les sources d'eau qui sont chauffées dans diverses conditions telles que profondeur et la présence de sources de chaleur.

Le but principal de ce travail est l'identification de la température du réservoir des eaux géothermales du système aquifère des deux sources étudiées en utilisant la géothermométrie

chimique puis évaluation du potentiel géothermique des émergences thermales, et pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons développés les chapitres suivants :

- **Le premier chapitre :** *Présentation de la zone d'étude*

Partie 01: Consacrée à la recherche bibliographique

- **Le deuxième chapitre :** *les eaux souterraines et les eaux thermales*
- **Le troisième chapitre :** *Généralités sur la géothermie*

Une introduction sur le domaine de la géothermie qui est principalement destinée à présenter la géothermie pour le lecteur, à travers des définitions sur la géothermie, et les divers domaines d'intérêt de cette nouvelle science.

Partie 02 :

- **Le quatrième chapitre :** *Méthodologies*

Présentation des étapes de notre travail commençant par la réalisation des analyses physico-chimiques, géothermomètres chimiques utilisés, les programmes informatiques (logiciels) vont être employés pour modélisations : graphique, cartographique et géochimique.

- **Le cinquième chapitre :** *RÉSULTATS ET DISCUSSION.*

C'est la principale partie dans ce travail qui est surtout consacrée à la détermination de la Température du réservoir des deux sources par les géothermomètres chimiques, qui nous permettra la détermination les différentes possibilités d'utilisation hydrothérapies, au chauffage des serres et des locaux, de séchage des produits agricoles à la pisciculture, produire l'eau chaude sanitaire, production d'électricité et de l'Hydrogène.

- **Conclusion.**

I.1 Le bassin versant de la Soummam :

Le bassin versant peut être décrit comme le territoire sur lequel tous les écoulements des eaux de surface convergent vers un même point que l'on nomme l'exutoire du bassin. Ce territoire est limité physiquement par la ligne de partage des eaux. A l'intérieure de ce domaine, toutes les pentes locales dirigent les écoulements de surface vers le point le plus bas correspondant à l'exutoire. [2]

On distingue :

- 1) *Le bassin fonctionnel (réel)* : portion de l'espace géographique dont les eaux se drainent vers un même cours d'eau.
- 2) *Le bassin topographique (hydrographique)* : portion de l'espace géographique dont les pentes convergent vers un même cours d'eau. Il peut être identique au bassin fonctionnel ou différent selon la géologie ou la perméabilité du terrain.

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (voir Figure I.1). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. Il est appelé dans ce cas **bassin versant réel**.

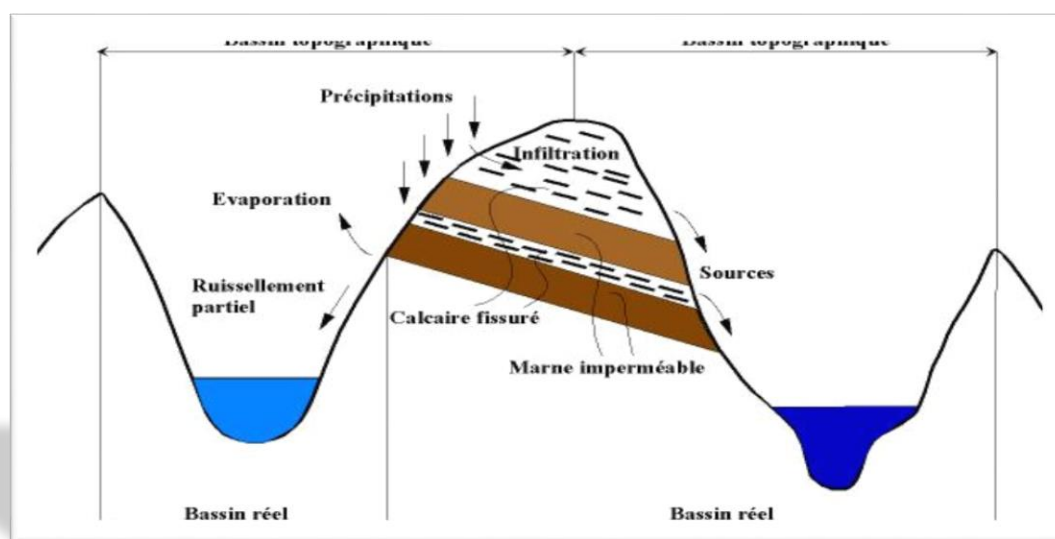


Figure I.1: Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique. [33]

I.1.1 Situation géographique :

Le bassin versant de la Soummam est situé dans la partie centrale au Nord de l'Algérie et il s'étend sur 9125 Km². Cette étendue est de forme irrégulièrement allongée suivant la direction de parallèle (35° 45' et 36° 45'). (Figure I.2).

Au Nord, ce bassin est délimité principalement par la chaîne montagneuse du Djurdjura, dont le sommet le plus élevé est de 2 308 m d'altitude (Lalla khedidja), tandis que sa limite au sud située aux monts du Hodna. Moins élevée que le Djurdjura (l'altitude maximale est de 1862 m). Vers l'Est et l'Ouest le bassin de la Soummam est ouvert, c'est dans cette partie du bassin que se situent les hauts plateaux de Sétif et de Bouira.

La plus grande longueur du bassin de la Soummam est d'environ 176 Km tandis que sa largeur, mesurée sur la ligne qui lie les crêtes des montagnes de Hadjar el Abiod et d'El ktef, est d'environ 118 Km. [3]



Figure I.2: Les grands bassins versants d'Algérie. [4]

Légende :**Echelle: 1/4000000***Limite du bassin versant**Mer Méditerranée**Région d'étude (BV Soummam)*

CODE	BASSIN
01	Chélif
02	Côtiers Algérois
03	Côtier Constantinois
04	Côtier Oranais
05	Chott Hodna
06	Chott Melghir
07	H. Plateaux Constantin
08	H. Plateaux Oranais
09	Isser
10	Kebir rhumel
11	Macta
12	Medjerda
13	Sahara
14	Seybouse
15	Soummam
16	Tafna
17	Zahrez

I.1.2 Hydrographie du bassin versant de la Soummam :

Le bassin versant de la Soummam est très développé hydrographiquement par ses divers affluents (cours d'eau), ses eaux dont la majorité est drainé par l'Oued de Bousellam et le Sahel qui en se joignant près d'Akbou formant l'Oued de la Soummam.

En ce qui concerne les eaux souterraines, dans la grande partie de bassin versant de la Soummam, elles sont confinées dans des couches profondes et ne peuvent remonter en surface que par des courants ascendants.

Le bassin versant de la Soummam, ayant pour exutoire la mer draine un cours d'eau d'une longueur de 150 Km, allant de Bou-Sellam à Oued Rhir.

I.1.3 Conditions climatiques :

Les conditions climatiques dans le bassin versant de la Soummam ne sont pas uniformes, à Bejaia et dans la basse vallée de la Soummam, le climat est essentiellement méditerranéen généralement humide avec de légers changements de température. Sur les plateaux de Sétif et de Bouira le climat est continental avec des hivers humides et des étés chauds. Les précipitations annuelles de la Soummam varient énormément entre environ 300 mm sur les plateaux de Sétif et 1000 mm près de la cote de Bejaia, elles atteignent approximativement 1500 mm sur les flancs Sud du massif du Djurdjura. Les étés sont secs, avec seulement 30% des précipitations annuelles pendant la période allant d'Avril à Septembre. [3]

I.1.4 Condition du sol :

Dans le bassin versant de la Soummam on trouve des types de sols anciens de formation paléo marécageuse qui sont caractérisés par des formations bien accentués. La carte des sols du bassin de la Soummam a été extraite de la carte des sols de l'Algérie faite par J. Durand en 1954 (Figure I.3). La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables.

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables. Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux. En outre on rencontre, en petites quantités des sols calciques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles. [3]

I.1.5 Morphologie du bassin :

Le bassin versant de la Soummam se compose de dix sous bassins correspondant aux unités hydrologiques (Figure I.4), certaines sont contrôlées par des stations hydrométriques. Il a une forme irrégulière, étiré dans la direction Est-Ouest et accède à la méditerrané par le golf de Bejaia. Le bassin versant de la Soummam est limité par les chaînes du Djurdjura, à l'Est par les montagnes de la petite Kabylie et au Sud par les montagnes des Bibans et de Mansourah. Son orographie est très prononcé, aux environs de Bouira jusqu'à Akbou, la chaîne de Djurdjura n'est à aucun endroit inférieure à 1500 m. C'est dans cette partie que se situe le plus haut sommet D'Akbou en direction Nord-Est de la mer, la hauteur diminue graduellement. Nous constatons ainsi, la présence d'un système de barrières naturelles représentée par les reliefs. Des chaînes de

montagnes qui se dressent face aux vents pluviaux du littoral, il est en effet un bassin assez bien arrosé. [3]

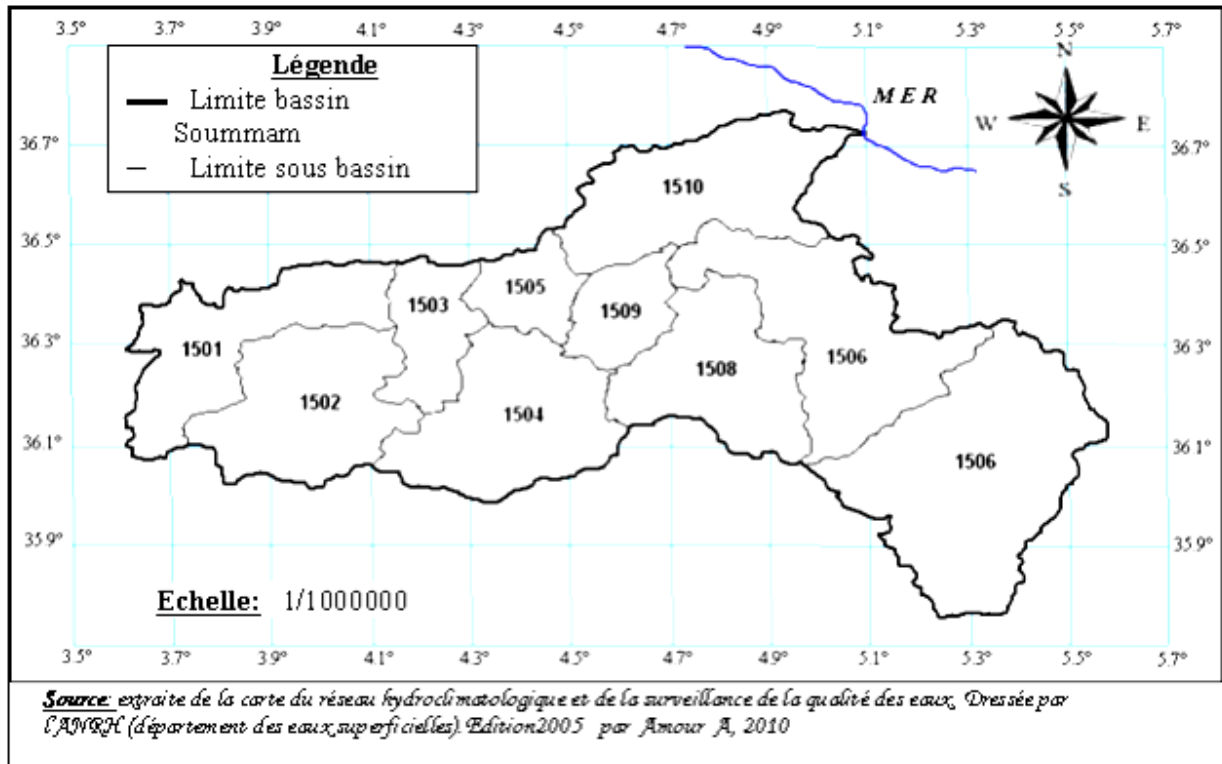


Figure I.3: Les sous bassins de la Soummam. [5]

Tableau I.1: Superficie des sous bassins versants de la Soummam. [4]

Sous bassin versant	Code	Superficie (km ²)
Oued Eddous	1501	903
Oued Zaiane	1502	1012
Oued Sahel amont	1503	430
Oued Azerou	1504	1084
Oued Sahel Aval	1505	326
Oued Bousselam Amont	1506	1785
Oued Bousselam Moyen	1507	1234
Oued El Ham	1508	930
Oued Bousselam Aval	1509	360
Oued Soummam	1510	1061

I.1.5 Caractéristiques générales du bassin versant : [3]

I.1.5.1 Caractéristiques physiographiques :

1) Paramètres géométriques :

Les bassins ont des propriétés géométriques variées qui dépendent du contexte géologique, géomorphologique et climatique de la région étudiée. Ceci inclut les héritages paléo-climatiques et tectoniques

- a) *Le périmètre* : Son calcul dépend de l'échelle de la carte et de la densité du réseau hydrométrique, il est mesuré à l'aide du curvimètre et n'est généralement pas utilisé directement, mais à travers des valeurs qui en dérive. Comme la longueur du rectangle équivalent « L ». Il est donné par la forme :

$$P=2(L+l)$$

Avec :

L: Longueur du rectangle équivalent.

l : Largeur du rectangle équivalent.

Le périmètre du bassin versant de la Soummam est de :

$$P= 554 \text{ Km}$$

- b) *La surface* : Elle est mesurée à l'aide du planimètre à partir du tracé du bassin versant. Pour le bassin versant considéré on a :

$$S = 9125 \text{ Km}^2$$

La nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Les paramètres qui interviennent sont la pente, la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement.

- 2) *Les paramètres de forme* : L'étude de la forme des bassins est importante car elle permet de mieux comprendre le comportement hydrologique. Un bassin compact, de forme quasi-circulaire a une réponse hydrologique beaucoup plus rapide pour une même averse qu'un bassin allongé, parce que la plupart des points du bassin sont à peu près à la même distance de l'exutoire. Comme il est difficile d'exprimer réellement la forme d'un bassin versant, on fait appel à deux indices qui sont: l'indice **de compacité** et le **rectangle équivalent**.

a) *Indice de compacité ou de Gravelius (Kc)* : Il caractérise la forme du bassin versant, et renseigne sur la vitesse de concentration des débits et la puissance des crues ainsi que sur l'érosion. C'est le rapport entre le périmètre du bassin versant et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin versant. (Un bassin parfaitement rond aura une valeur de Kc égale à 1, et un bassin quelconque d'une forme allongée aura une valeur de Kc supérieure à 1 et un carré aurait une valeur de Kc égale à 1,12). L'indice de Gravelius est donné par la formule :

$$Kc = \frac{P}{2(\pi S)^{0.5}} = 0.28 \frac{P}{S^{0.5}}$$

Avec:

S : Surface du bassin versant.

P : Périmètre du bassin versant.

Pour le bassin de la Soummam : **Kc = 1.62**

Ce qui veut dire que notre bassin a une forme allongée.

b) *Le rectangle équivalent* : C'est une notion introduite pour pouvoir comparer deux bassins entre eux du point de vue de l'influence des caractéristiques et de la forme sur les écoulements. Il se définit comme étant le rectangle de longueur « L » et de largeur « l », qui a le même indice de compacité (Kc) et même hypsométrie que le bassin versant étudié.

Les dimensions de ce rectangle se calculent à l'aide des relations suivantes :

$$L = Kc \frac{S^{0.5}}{1.12} \left[1 + \left(1 - \frac{1.12^2}{Kc^2} \right)^{0.5} \right]$$

$$l = Kc \frac{S^{0.5}}{1.12} \left[1 - \left(1 - \frac{1.12^2}{Kc^2} \right)^{0.5} \right]$$

$$Kc \geq 1.12$$

On a: **L = 238 Km**

l = 38.34 Km

3) *Paramètres du relief* :

La caractéristique fondamentale du relief de ce bassin versant se reflète dans sa plasticité bien accentuée. De nombreux cours d'eau et leurs affluents, le plus fréquemment aux pentes raides, ont creusé leurs lits profondément dans la couche géologique peu solide. Le relief de la Soummam présente une forme assez irrégulière; au Nord, le bassin est limité par les chaînes de Djurdjura, au Sud par les montagnes de Bibans et des Djebels Mansourah, à l'Est

par les montagnes de la petite Kabylie. En allant de Bouira vers Akbou, l'orographie du bassin est très prononcée, l'altitude n'est en aucun endroit inférieure à 1500 m.

C'est dans cette région, près de Maillot qu'est situé le point culminant (Lalla Khedidja) de la Soummam (2308 m). L'altitude diminue graduellement en avançant d'Akbou vers la mer.

Les montagnes de la petite Kabylie sont également prononcées de point de vue altitude, leur plus haut sommet atteint 2004 m au Djebel Babor. De même les chaînes montagneuses du sud ne restent pas orthographiquement en arrière par rapport aux massifs cités précédemment, les pics sont atteints aux Bibans 1832 m et Djebel Mansourah 1836 m (voir Figure I.4). [7]

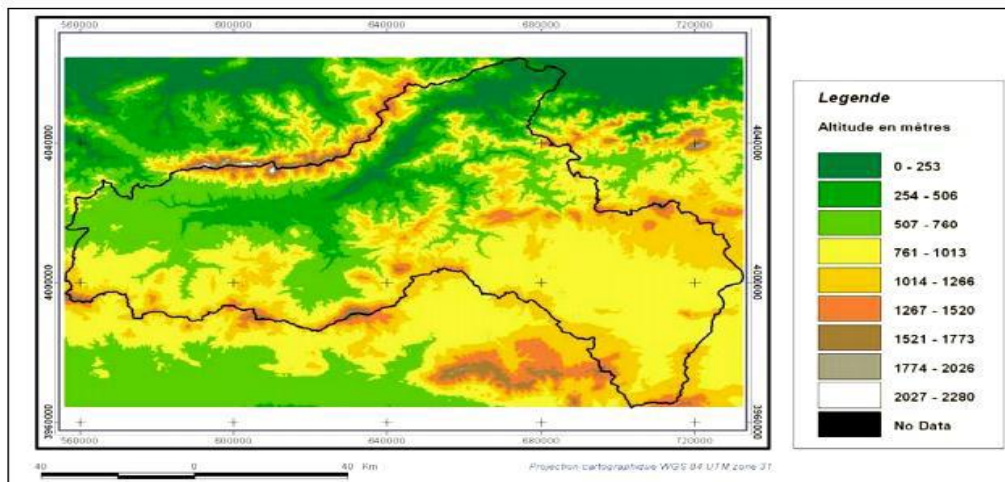


Figure I.4: Carte du relief du bassin versant de la Soummam. [5]

Le relief est caractérisé par :

- a) *Courbe hypsométrique* : Cette courbe met en relation les altitudes et les surfaces dans un bassin, sous forme de fréquences de superficies inférieures à un seuil donné. Dans un contexte d'évolution géomorphologique selon le modèle de Davis (figure 1-5), cette courbe permet de se renseigner sur le niveau de maturité d'un cours d'eau. Elle est obtenue par le cumul de l'histogramme des altitudes (tableau I.2, figure I.5).

Tableau I-2: Tableau définissant l'hypsométrie du bassin de la Soummam. [6]

Classe des altitudes (m)	Surface élémentaire (km ²)	Surfaces cumulées (%)	Altitude moyenne (m)
2-200	379	100.00	100
200-400	724	95.85	300
400-600	1425	87.91	500
600-800	1825	72.30	700

800-1000	3119	52.30	900
1000-1200	1105	18.12	1100
1200-1400	274	6.01	1300
1400-1600	174	3.00	1500
1600-1800	50	1.10	1700
1800-2000	0	0.55	1900
2000-2200	0	0.55	2100
2200-2400	50	0.55	2300

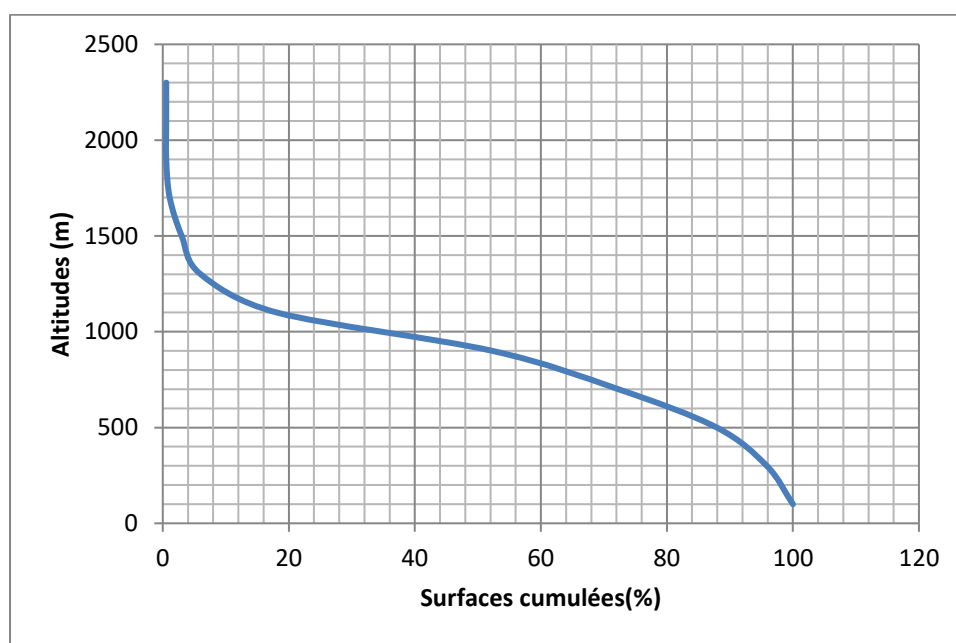


Figure I.5: Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam.

En conclusion, la forme de la courbe hypsométrique du bassin versant de la Soummam est en S. Le bassin versant de la Soummam est un bassin mature.

b) *Altitudes caractéristiques :*

- *Altitudes minimale et maximale :* Les altitudes minimale et maximale du bassin versant de la Soummam sont lues directement à partir de la carte. L'altitude minimale est celle qui correspond à l'exutoire près de la mer, tandis que l'altitude maximale se trouve sur les monts de Djurdjura tel que:

$$H_{\min} = 2 \text{ m}$$

$$H_{\max} = 2308 \text{ m}$$

- *Altitude moyenne* : L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique, elle est définie comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum H_i}{\sum S_i}$$

Tel que :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant.

S_i : Aire comprise entre deux courbes de niveaux.

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveaux.

On obtient : **H_{moy} = 785 m**

- *Altitude médiane* : Elle correspond à l'altitude lue à 50 % de la surface totale sur la courbe hypsométrique. Elle se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin considéré représente une pente régulière.

$$\mathbf{H_m = 900\ m}$$

On remarque que l'altitude médiane est supérieure à l'altitude moyenne, ce qui veut dire que le bassin présente une légère dissymétrie vers les altitudes élevées.

c) *Indice de pente globale (I_g)* : Il est d'application simple et il est donné par la relation :

$$\mathbf{I_g = D/L}$$

Avec :

D : dénivelée.

L : longueur du rectangle équivalent.

D est déterminé à partir de la courbe hypsométrique tel que :

$$\mathbf{D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1300 - 300 = 1000\ m}$$

H (5% et 95 %) sont les altitudes entre lesquelles s'inscrit 95 % de la surface du bassin versant.

D'où: **I_g = 4.16 m / Km** soit **0.42 %**

d) *Indice de pente moyenne (S_r)* : La pente moyenne **S_r** entre deux courbes de niveau peut se calculer comme suit:

$$\mathbf{S_r = dZ/l}$$

Cette distance peut être obtenue en divisant la surface dA comprise entre les deux courbes de niveau par la longueur moyenne **L** de ces courbes, comme le montre la figure I-6.

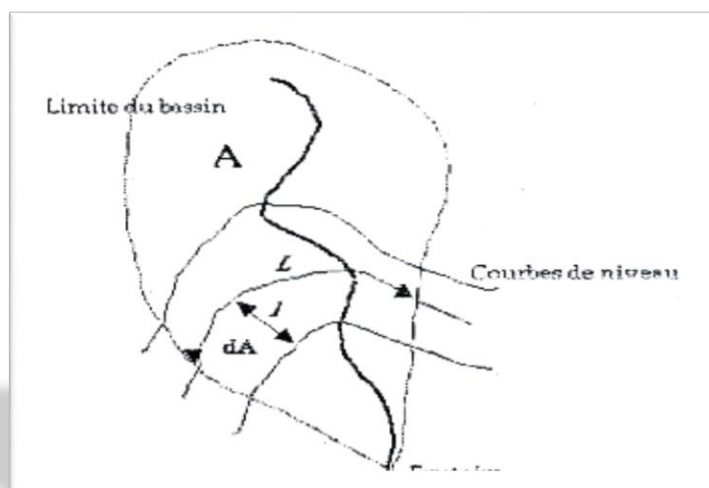


Figure I.6: Courbes de niveaux. [5]

I.1.6 Situation géologique:[7]

L'étude géologique et hydrogéologique nous permet d'identifier les formations perméables détritiques et les formations résistantes fissurées ou karstiques susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméables qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces formations; leurs épaisseurs, et leurs étendues. L'étude tectonique nous renseigne sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles entraînant la formation de fossés d'effondrement ou de soulèvement modifient ainsi la géométrie des couches qui va caractériser chaque type de nappe et permettent la communication probable entre les aquifères.

La cartographie de l'aquifère a, pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser la fonction du réservoir et son comportement hydrodynamique. [7]

I.1.6.1 Géologie générale du bassin versant :

Le bassin versant de l'oued Soummam est dans ses grandes lignes constitué, sur la rive gauche, par de l'oligocène traversé par des formations du crétacé inférieur ; du miocène inférieur apparaît dans la partie aval, en bordure de l'oued de terrasses alluviales importantes tapissent en générale pied des pentes sauf dans la région de Sidi-Aïch où le crétacé apparaît jusque dans le lit

Selon la figure I.7 la rive droite est en majeur parti formé de crétacé inférieur moyen et supérieur ; les terrasses alluviales sont beaucoup plus restreintes.

Les terrains rencontrés sont généralement imperméables : argilogrès de l'oligocène, schistes de l'alboaptien, marno calcaires du crétacé (voir figure I.8). [7]

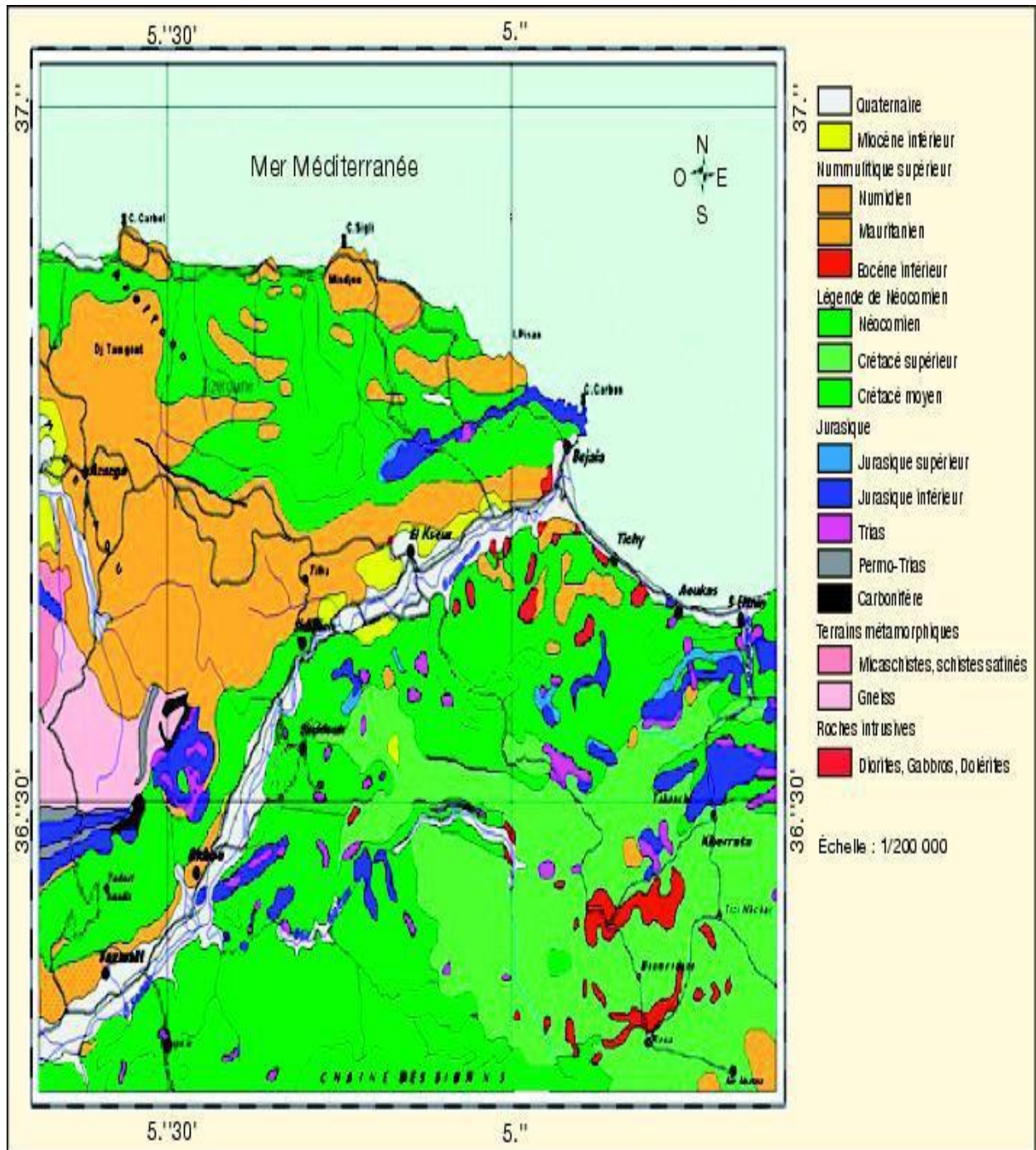


Figure I.7: carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte géologique nord Constantine de (1/500 000). [7]

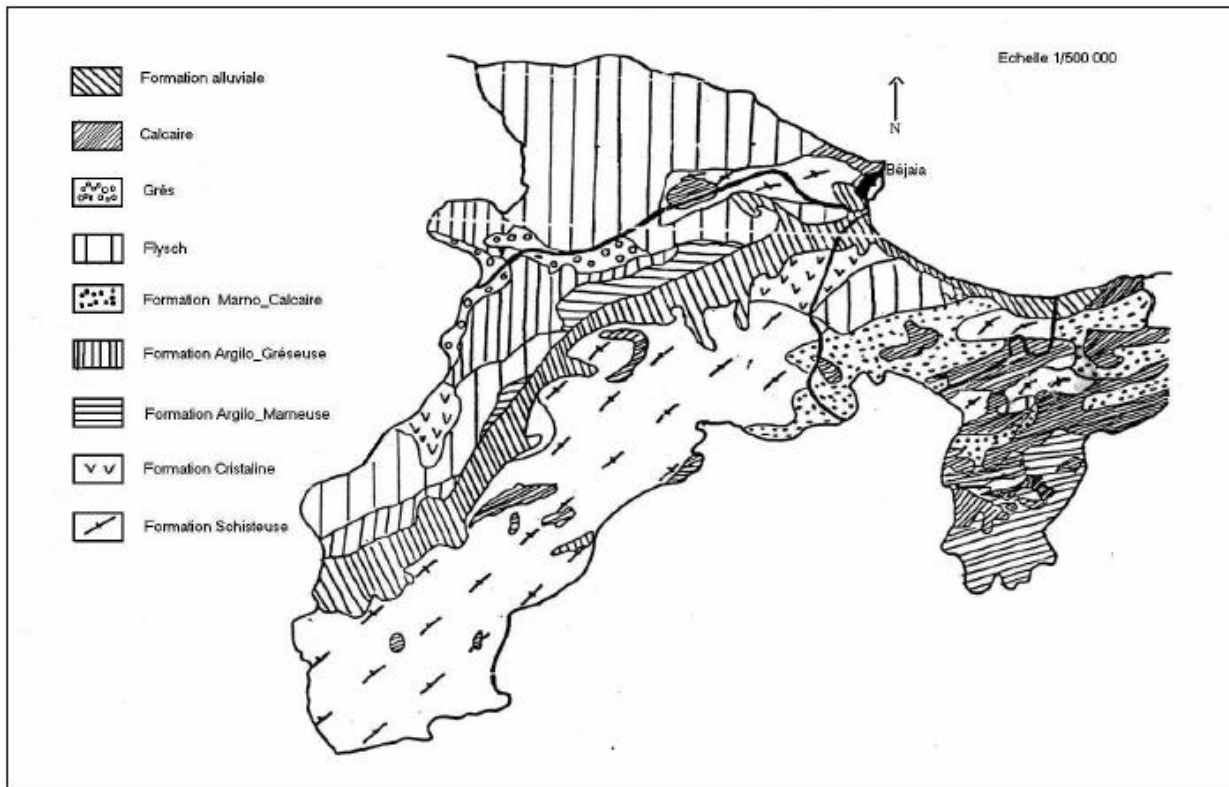


Figure I.8: Carte hydrogéologique de la wilaya de Bejaia. [7]

I.1.6.2 Lithologie :

Nous permet de localiser les différents affleurements présents dans la vallée et ses massifs environnants.

La série stratigraphique de ces formations, en partant de la plus ancienne à la plus récente est la suivante :

- 1) *Le Trias* : Il se manifeste sous forme de masses plus ou moins étendues remplissant de grandes cassures (Djebel Gueldamane), on le rencontre également le long des contacts de nappes (Région Nord d'Akbou), mais aussi sous forme d'épointements locaux (Sidi Aïch).
- 2) *Le Jurassique* : Il s'agit des écailles chevauchant au Sud (le chaînon d'Ighil Ali) au Sud-Est (l'écaille de Sidi Yahia et l'anticlinal faillé de Djebel Guemldamane) et à l'Est (les crêtes de l'Azrou Chtoug qui appartiennent au massif du Djebel Trouna et le croissant de Timezrit). Il affleure également à la limite Nord du bassin, dans les massifs de l'Arbalou, de Toudja et du Gouraya.

L'anticlinal Jurassique de Djebel Arbalou et le synclinal tectonique du Gouraya, dont la lithologie est marquée par la présence de masses calcaires et dolomitiques, sont susceptibles de constituer d'immenses réservoirs aquifères.

A cet égard, la circulation des eaux souterraines est d'une part à porosité de fracture due aux jeux de la grande faille bordière, et d'autre part, fissura le résultant des phénomènes karstiques particulièrement développés, qui sont à l'origine des grandes fissures ouvertes et des centaines de cavités. L'élargissement des joints de calcaires est accéléré par la corrosion.

De ce fait, de nombreuses résurgences apparaissent à la faveur de ces failles. L'apparition des eaux de source dans le bassin n'est pas régulière et dépend de l'intensité des précipitations, elles sont soumises à de fortes fluctuations au cours de l'année et la plupart tarissent en été. Les calcaires liasiques fissurés du flanc Sud-est de la chaîne du Djurdjura.

Le massif de Chellata, massif de l'Akfadou, le pic de L'alla Khadîdja dont la perméabilité est assurée par les nombreuses et larges fissures alimentant plusieurs sources : Tala T'raline, Tala Tiffit, Timiliouine, Ansor Lanak...etc., plus en aval le débit des sources décroît.

3) *Le Crétacé* : Le Crétacé parautochtone qui affleure en rive droite depuis l'Oued d'EI Mehrir jusqu'au Djebel Gueldamane, également entre l'Oued de Seddouk et Sidi Aïch et en rive gauche à l'Ouest du village d'Ighram.

4) *Le Néogène*:

a) *Le miocène* : Il est représenté par deux types de roches : Les roches sédimentaires et les roches éruptives.

- *Roches sédimentaires* :

Unité d'Akbou : ce sont des marnes gréseuses et conglomératiques transgressives sur le flysch numidien. Les conglomérats se montrent plus ou moins cimentés par des dépôts de travertin récents et dont les éléments de taille très variable sont empruntés aux flyschs et à la chaîne calcaire.

Unité de Takrietz : ce bassin miocène est développé sur la rive gauche de la Soummam entre Sidi Aïch et Oued Ghir. Les premiers lambeaux apparaissent à Takrietz, Il s'agit d'un lambeau de grés grossiers et de poudingues rougeâtres avec nombreux fragments d'huître épaisse et de marnes Jaunâtres à Ostrea. Il

forme une dalle faiblement inclinée vers le NW, coupée en deux par le lit de la Soummam, reposant en rive droite sur le Numidien de Takrietz.

- *Roches éruptives*: Ces roches sont essentiellement de deux types :
 - Ces roches éruptives possèdent un degré de fracturation très élevé, censé être un facteur des roches volcaniques proprement dites avec une série inférieure riche en brèches et tufs. Elle est représentée en particulier à Oued Ghir par des rhyolitoïdes associées à des tufs, des pélites et de marnes franches, et une série supérieure avec des laves abondantes. Cet ensemble volcanique est recouvert au Nord-ouest par le Mio-plio-quaternaire de la vallée de la Soummam
 - les roches plutoniques avec le granodiorite d'Ait Smail en rive droite de la Soummam et le granite monzonitique de Drour. Les argiles de base numidien sont kaolinisées au contact des roches éruptives.

b) Le pliocène :

- *Le Pliocène marin* : Il n'est connu que dans la vallée de la Soummam, à proximité de Bejaia et en contrebas de l'Oued Ghir, il s'est avancé jusqu'à 15 km vers le Sud à la faveur de la dépression occupée par la Soummam. Ce sont des marnes bleues à Globorotalia Margarita, de grés rouges et de gypses (Triasiques) sédimentés.
- *Le Pliocène continental* : Il s'agit de brèches consolidées à très gros éléments de calcaires jurassiques provenant du démantèlement du Djebel Gouraya, qui reposent sur un terrain du Crétacé supérieur tellien, et de quelques blocs de poudingues infra-crétatiques.

5) *Le quaternaire* : Il tapisse le fond de la vallée creusée par l'Oued de la Soummam et ses affluents. Il comprend les importants cônes de déjections des affluents de rive gauche: Oued Béni Mellikeuch, Ighzer Illoula, Ighzer Tifrit et ceux de la rive droite : Oued Seddouk et Ighzer Oukri. La couverture alluviale de la vallée de la Soummam paraît largement épaisse. Déposée sous forme de terrasses Mio-plio-quaternaires superposées l'une sur l'autre, elle constitue, de par sa lithologie formée essentiellement d'alluvions grossières: sables, galets, graviers du Miocène, Sus-jacentes à un substratum marneux miocène, argileux oligocène et même parfois crétacé plus ou moins profond, et de par sa porosité d'interstice un réservoir considérable. D'ailleurs, l'approvisionnement en eau potable, industrielle et d'irrigation est en partie basée sur l'exploitation de cet aquifère à

travers les nombreux ouvrages hydrauliques qui y ont été implantés forages d'exploitation, puits, sondages de reconnaissance.

1.1.6.3 La tectonique :

A.Coutelle en 1979 avait résumé chronologiquement le déroulement des différentes phases tectoniques précoces dans la vallée de la Soummam comme suit :

- 1) *Phase néocomienne*: C'est une phase de plissements assez complexes orientés NE-SW, parallèle à l'actuelle direction des couches de l'Adrar Gueldamane, avec fracturations locales. Le Néocomien est partout conglomératique, tantôt concordant avec le Jurassique, tantôt discordant et affecté de failles synsédimentaires (Azrou Toudert).
- 2) *Phase sénonienne*: Dans la mesure où les plis à schistosité de l'unité de Bou Hamza ont la même direction que les plis à coeur Vracono-cénomaniens du Djebel Edni. Ces phénomènes sont alors postérieurs à ces niveaux, par comparaison avec l'unité des Béni Ourtilène, anté-sénonien.
- 3) *Phase éocène* : La sédimentation des unités externes de la vallée de la Soummam est interrompue dès le Lutétien supérieur jusqu'au Miocène anté-nappes. La structuration des unités des Bibans, de Bou Hamza et des Béni Ourtilène est antérieure à l'arrivée des nappes qui les recouvrent ;
- 4) *Phase miocène* : Elle est reconnue comme une phase très importante dans la région. Au langhien a eu lieu la phase paroxysmique responsable des charriages des nappes. Cette phase a été précédée par une autre période de tectonisation (Bizon et Gélard, 1975) où les flysch ont glissé par-dessus le domaine kabyle. La série de la Djema N'schribt, qui a été mise en évidence à Sidi Aïch, est discordante sur le Sénonien de l'unité de Barbacha. Elle est immédiatement surmontée par le Miocène post-nappe de la Soummam
- 5) *Tectonique post-nappes* : Elle est importante, l'individualisation des trois super-unités de la région d'Akbou est postérieure au dépôt du Miocène de la Soummam. Le contact faillé séparant le Miocène continental des flysch étant post-nappe.
- 6) *Tectonique récente* : À l'Est d'Akbou et à l'Ouest de Takrietz, elle est représentée par une fracturation assez importante. De nombreuses failles orientées NE-SW sont visibles telles que la faille de Tachaouaft au SE, la faille de Tibouamouchines et la faille de la Soummam, qui a été reconnue par Boudiaf (1999) comme étant active de la région de Tazmalt. Cette famille de failles est parfois décalée par une autre famille de fracturation

d'orientation moyenne WNWESE, qui paraît plus ancienne que la précédente avec laquelle semble constituer un réseau ordonné. [7]

I.1.7 Situation climatique :

Les conditions climatiques dans le bassin versant de la Soummam ne sont pas uniformes, à Bejaia et dans la basse vallée de la Soummam, le climat est essentiellement méditerranéen généralement humide avec de légers changements de température.

Sur les plateaux de Sétif et de Bouira le climat est continental avec des hivers humides et des étés chauds.

Les précipitations annuelles de la Soummam varient énormément entre environ 300 mm sur les plateaux de Sétif et 1000 mm près de la cote de Bejaia, elles atteignent approximativement 1500 mm sur les flancs Sud du massif du Djurdjura.

Les étés sont secs, avec seulement 30% des précipitations annuelles pendant la période allant d'Avril à Septembre.

Zones climatiques : Plusieurs types de climat caractérisent le bassin versant de la Soummam (figure I.10), nous en citons :

- 1) *Climat humide*: s'étend sur la zone étroite du littoral et sur la chaîne montagneuse du Djurdjura et ses contreforts.
- 2) *Climat méditerranéen*: s'étendant le long de la mer et à côte altitudinale qui domine la partie montagneuse. Le pic des précipitations est de 1500 mm.
- 3) *Climat sub-humide plus humide*: s'étend sur les terrains montagneux de la petite Kabylie et sur la partie basse de la chaîne du Djurdjura. La pluviométrie étant considérable (900 à 1000 mm).
- 4) *Climat sub-humide à humidité modérée et sub-humide plus sec*: s'étend sur les parties élargies de la vallée de la Soummam, depuis Akbou jusqu'à El Adjiba. Il est marqué par une pluviosité modérée (400 à 600 mm).
- 5) *Climat semi-aride à aride*: s'étend sur la partie nord et sud du plateau de Sétif. Il est caractérisé par une faible pluviométrie (300 à 600 mm). [8]

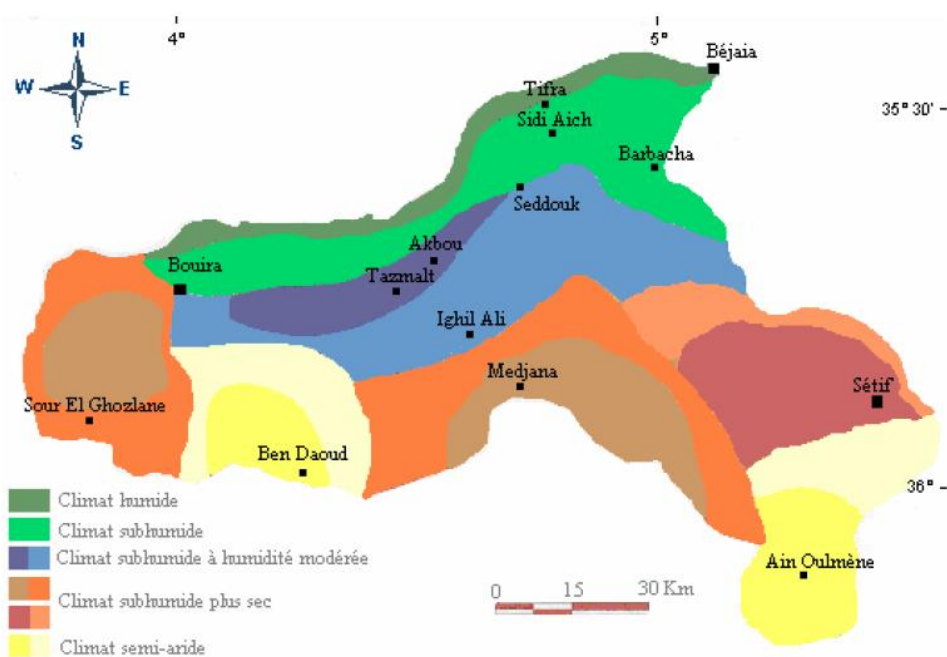


Figure I.9 : Zones climatique du bassin versant de la Soummam. [8]

I.2 Les deux sources thermales : [9]

I.2.1 La source thermique « Hammam sidi Yahia El Aidli » :

Cette émergence est utilisée depuis probablement bien avant la période française. La source a un faible débit que nous avons estimé à quelques litres par minutes. Ces eaux sont démunies de toute odeur et de dépôt ; en revanche une teinte ferrugineuse a été observée lors du mélange avec les eaux d'Oued Bou Sellam, un des affluents principaux d'Oued Soummam.

L'infrastructure d'accueil et de captage est très modeste se limitant à de petites chambres de quelques mètres carrés parfois munies d'un petit bassin.

I.2.1.1 Situation géographique :

L'émergence se trouve à environ 5 km au Sud du village d'Akbou. Une route carrossable mène du village et en longeant Dj.Trouna vers le Sud jusqu'à la source dont l'altitude est de 600 m.

I.2.1.2 Situation géologique :

La remontée des eaux est favorisée par un important contact anormal séparant les unités de Bou hamza et des Bibans. Cette dernière est en contact anormal avec une formation d'âge jurassique .

- 1) *Unité des Bibans* : Elle est constituée des formations suivantes :
- Lias* : calcaréo dolomitique (au moins 100m à Tizi Haffaf).
 - Jurassique supérieur : calcaire sur une épaisseur de 20 m Puis Il se transforme en pélites et grès sur une même épaisseur.
 - Néocomien*: calcaires marneux en bancs décimétriques (l'épaisseur varie de 0 à 25m), surmontée pas des pélites claires localement discordantes sur le jurassiques (jusqu'à 100m).
 - Vracono-Cénomanién* : alternance de calcaires marneux noirs en bancs métriques à plurimétriques et de marnes noirs (1500m au moins).
- 2) *Unité de Bou hamza* : Au sud de l'Azrou Sidi Yahia, les pélites claires néocomiennes arrivent en contact vertical avec les dolomies et calcaires liasiques de la même unité. Au NNW de la source, le contact des pélites se fait par l'intermédiaire d'un niveau peu épais de pélites à cubes de pyrites. A Sidi Yahia, le contact marque la limite entre les calcaires francs parfois oolithiques et les dolmies secondaires du jurassique établissent ainsi l'ancienneté du phénomène de dolomitisation. Quelques rares pointements triasiques effleurent au niveau de la source jalonnant les contacts séparant les différentes unités.

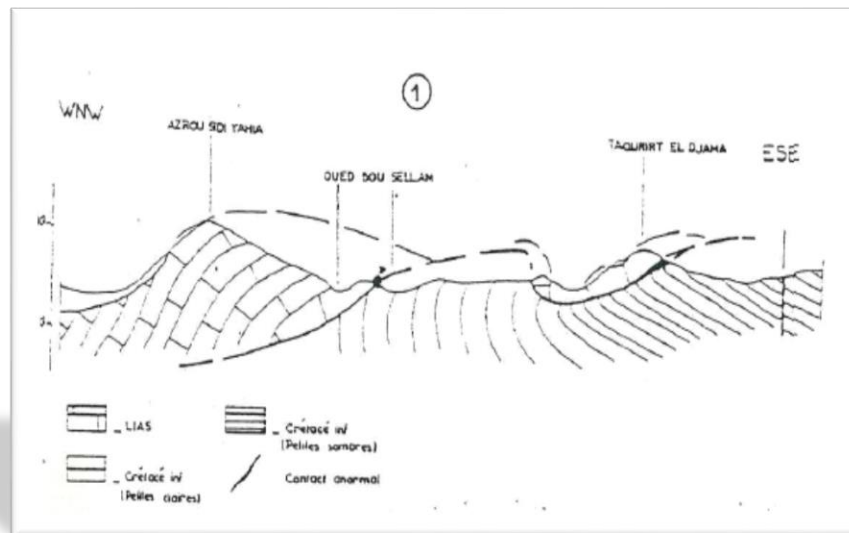


Figure 1.10 : Coupe géologique de la région de « Sidi Yahia El Aidli ». [9]

1.2.1.3 Hydrogéologie :

Les pélites constituent de véritables écrans imperméables, cependant les calcaires jurassiques sont les plus importants niveaux pouvant renfermer un potentiel hydrique considérable et alimenter par cela source de « Sidi Yahia El Aidli ». Le contact anormal parfois vertical est probablement le circuit emprunté par les eaux au cours de leur remontée.

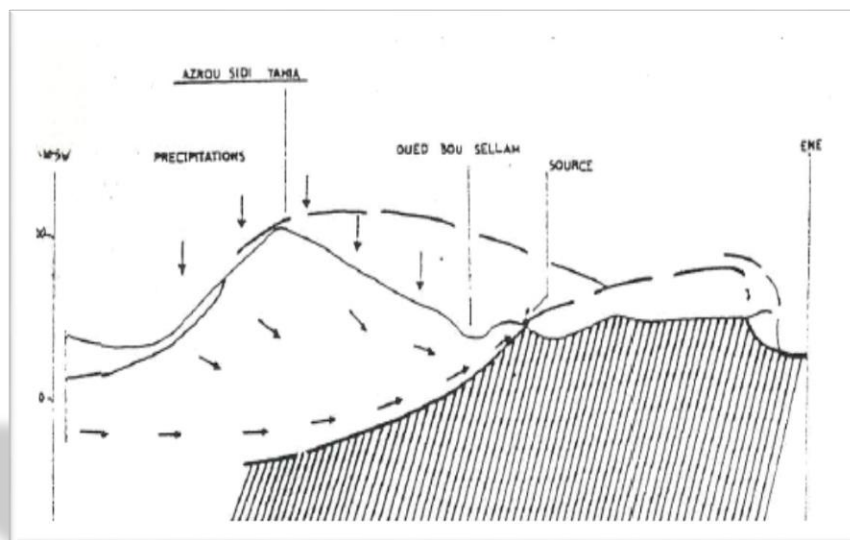


Figure I.11 : Model de circulation des eaux thermales de « Sidi Yahia El Aidli ». [9]

1.2.1.4 Tectonique :

La source se trouve dans le domaine septentrional caractérisé par une structure et une tectonique relativement complexes. Les déformations tectoniques aboutissent généralement à des chevauchements et parfois même à des stades plus poussés à des charriages donnant des nappes. Ces dernières sont limitées par des contacts anormaux soulignés par des niveaux triasiques jouant le rôle de semelle.

L'émergence se situe également à proximité d'une importante fracture orientée NW- SE nommée G (J.DEVAUX 1969). Le contact séparant les deux unités précédentes est le circuit de remontée des eaux chaudes alimentant la source.

1.2.1.5 Propriétés physico-chimiques :

- 1) **Température** : Les mesures de température effectuées pendant les différentes campagnes ont donné des valeurs variant entre 44.1°C et 42°C. Les eaux sont classées dans le groupe des méso-thermales. Une très faible variation de quelques degrés liée aux variations saisonnières, a été enregistrée au cours de nos différentes campagnes.
- 2) **PH** : Les eaux sont relativement acides. Le pH mesuré varie de 6 et accuse une très faible variation dans le temps.
- 3) **conductivité** : Les eaux de hammam Sidi Yahia sont très fortement minéralisées. Leur conductivité à 20°C est supérieure à 0.02 mho/cm (20ms/cm). Elles se classent dans le

cinquième groupe des conductivités. Le taux de dilution estimée est supérieur à 7,2 % traduisant une origine superficielle des eaux et temps de séjour est relativement court.

4) *résidu sec* : la forte conductivité des eaux s'est traduite par un fort résidu sec de 16g/l.

1.2.1.6 Propriétés chimiques :

1) *Les éléments majeurs* :

a) *Anions* : Les chlorures sont très Fortement concentrés dans les eaux prédominant sur les sulfates et en particulier sur les bicarbonates.

b) *cations* : Les concentrations des alcalino-terreux dans les eaux sont relativement faibles; en revanche, les teneurs en alcalins et en particulier en sodium sont relativement élevées (5g/l)

2) *Les éléments mineurs* : La teneur en silice totale dans les eaux est relativement élevée , traduisant une profondeur et une température du dernier équilibre relativement moyenne. Cet équilibre peut être considéré comme atteint dans ou à la sortie du réservoir. L'influence des chlorures est très faible et les corrections ne sont pas nécessaires dans ce cas.

Le fer est caractérisé par une concentration relativement importante variant autour de 3.2 mg/l.L'origine de ce fer est probablement liée aux petits cubes de pyrites des pélites marquant le contact séparant les deux unités.

Les teneurs en zinc, manganèse et ammonium sont très faibles et inférieures à 0,36 mg/l.

Les autres éléments dosés sont totalement absent (cuivre, chrome, NO₂ et PO₄).

❖ *Faciès chimique* : Les eaux sont hyper chlorurées sodiques et tires faiblement sulfatées calciques.

I.2.2 La source thermale « Hammam Sillal » :

Les nombreuses et très vieilles habitations existant sur les lieux témoignent d'une période d'exploitation relativement longue. L'infrastructure, dont a bénéficié la source thermale est très modeste limitée à deux petites salles destinées à l'accueil.

I.2.2.1 Situation géographique :

La source thermale se trouve en grande Kabylie à environ 16 km au NW de Sidi Aich, dans la commune d'Akfadou. Les émergences s'alignent le long de la rive gauche d'Oued Roumila, affluent secondaire d'Oued Soummam. L'altitude du lieu est de 330 m.

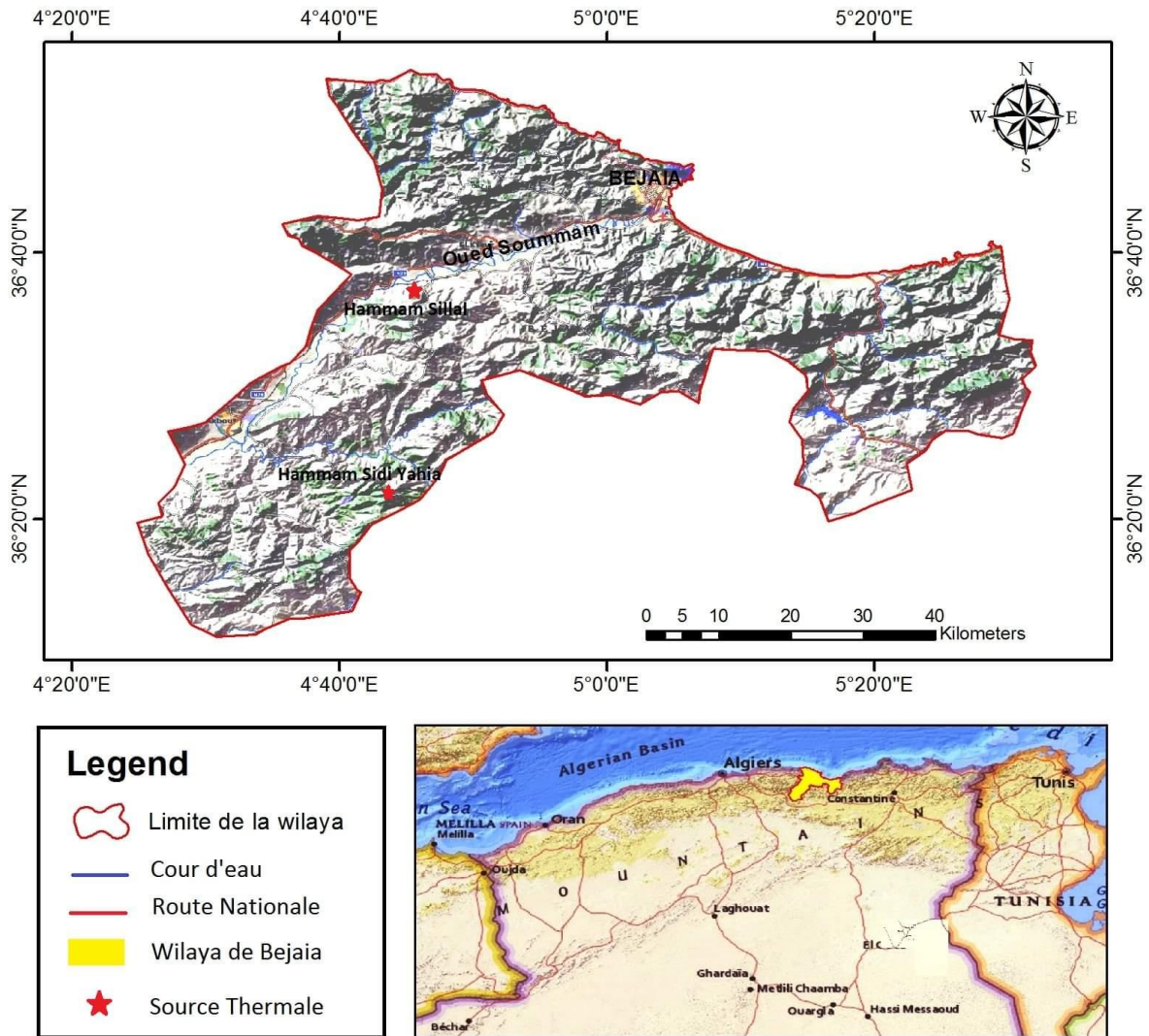


Figure I.12: Situation géographique des sources thermales (extraite de la carte régionale ANRH).

I.2.2.2 Situation géologique :

Les eaux émergent à la faveur d'une importante faille mettant en contact les grès oligocènes, les marnes de type Kabyle et les conglomérats. A quelques mètres des griffons affleurent des pointements gypseux accompagnés de tufs interstratifiés dans le Miocène.

Au Sud de la source, des formations d'âge Crétacé, constituées essentiellement de grès et de marnes schisteuses, sont surmontées par les séries précédentes.

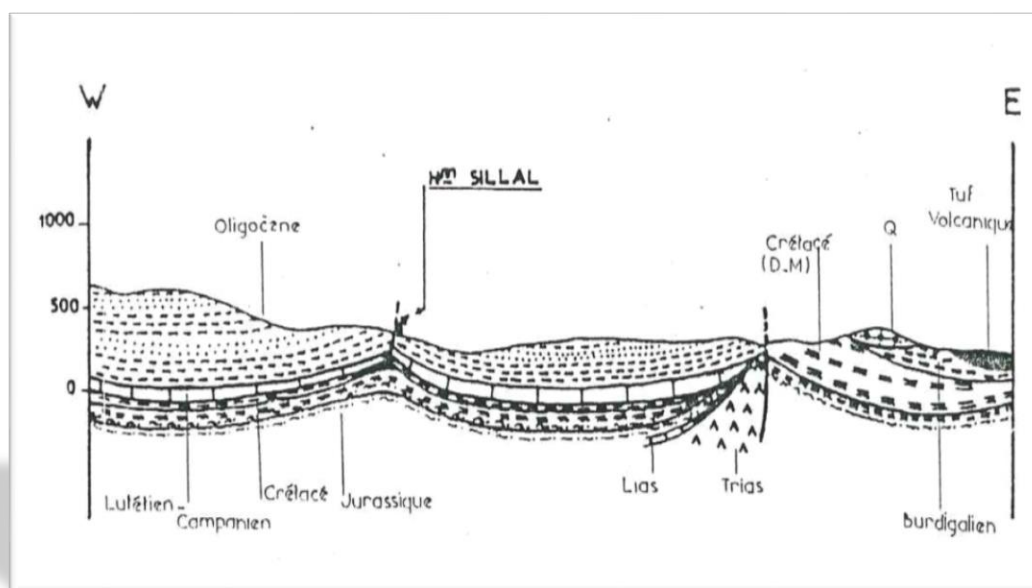


Figure 1.13 : Coupe géologique du secteur « Sillal ». [9]

I.2.2.3 Hydrogéologie :

Les sources font partie du grand bassin d'Oued Soummam. La perméabilité des formations constitutives du secteur est moyenne. Elle est cependant très importante au niveau des formations calcaires du Jurassique de la grande chaîne du Djurdjura qui entourent le secteur et constituent une très importante réserve d'eau souterraine. Cependant il existe d'autres formations carbonatées essentiellement calcaires d'âge Lutétien, relativement perméables pouvant être le réservoir thermal de cette source.

I.2.2.4 Tectonique :

La région d'Akfadou fait partie du Tell septentrional fortement accidenté. De nombreuses failles s'entrecroisent parcourant tout le secteur ainsi que les régions voisines. Les griffons

coïncident avec le point de croisement de deux importants accidents perpendiculaires ayant des directions respectives (E-W) et (N-S).

1.2.2.5 Propriétés physico-chimiques :

- 1) *Température* : Les eaux sont méso thermales. Les températures varient entre un maximum de 48,1°C et un minimum de 46°C.
- 2) *PH* : Les eaux sont relativement acides le pH voisin de 6 ne présentant qu'une faible variation dans le temps due à de probables mélanges avec d'autres eaux.
- 3) *Conductivité* : Les eaux sont faiblement minéralisées ayant une conductivité de 0.0006430 mho/cm (6.43 ms/cm). Cette dernière est variable dans le temps liée aux phénomènes de dilution saisonniers. Le taux de dilution est le plus important égal à 28.8 %, traduisant par cela l'origine météorique des eaux. Ces dernières sont classées dans le second groupe des conductivités.
- 4) *Résidu sec* : La faible minéralisation des eaux s'est traduite par un faible résidu sec d'environ 3g/l.

1.2.2.6 Propriétés chimiques :

- 1) *éléments majeurs* :
 - a) *Anions* : Les chlorures sont fortement dominants sur respectivement les sulfates et à un degré plus faible sur les bicarbonates.
 - b) *Cations* : Le Sodium est prépondérant sur les alcalino-terreux. Sa teneur moyenne varie autour de 30 méq/l. Les concentrations moyennes du Calcium et du magnésium varient autour de 10 méq/l.
- 2) *éléments mineurs* : La silice totale et le strontium sont fortement concentrés ayant des teneurs respectives de 30 mg/l et de 15 mg/l. La silice traduit une température relativement élevée du dernier équilibre; en revanche, le strontium est d'origine évaporitique (Sr/Rb= 180) ou carbonatée dû aux calcaires constituant le réservoir ou également cristalline.

Les teneurs en fer et ammonium sont moyennes à faibles. Elles varient autour de 3,1 mg/l pour le premier et 1,2 mg/l pour le second probablement liées aux formations cristallines. Le reste des éléments dosés ont des teneurs relativement faibles toutes inférieures à 1 mg/l.

❖ Faciès chimique : Les eaux de Sillal ont un faciès chloruré sodique tendant vers le faciès bicarbonaté calcique

Diagramme de Piper pour les sources thermales étudiées

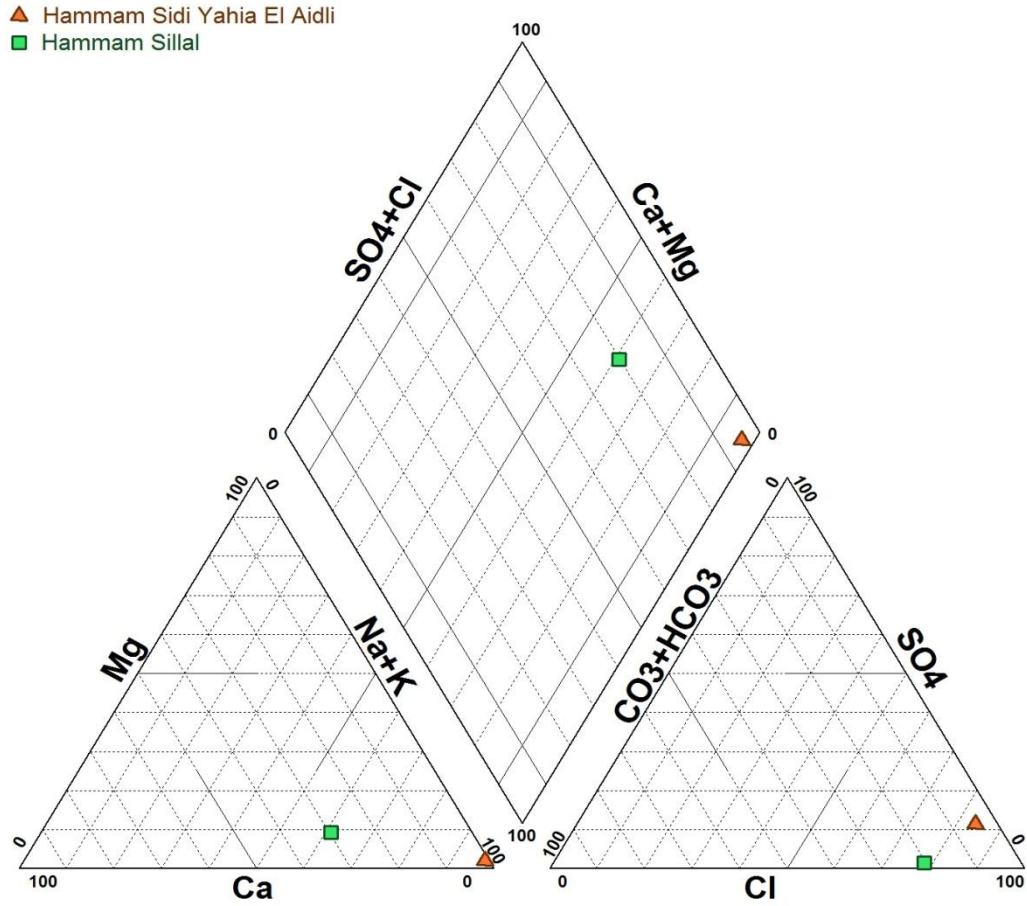


Figure I.14 : Diagramme de PIPER pour les sources thermales étudiées.

II.1 Les eaux souterraines :

L'eau souterraine est le plus grand réservoir d'eau douce au monde représentant plus de 97 % des ressources en eau douce de la planète (en excluant les glaciers et les calottes glaciaires), les 3 % restants étant principalement constitués d'eau de surface (lac, rivières, zones humides) et d'humidité du sol. Récemment, les eaux souterraines étaient principalement considérées comme une source d'eau potable, cette ressource est également très importante pour l'industrie et l'agriculture. Cependant, il est clair que l'eau souterraine est considérée non seulement comme une source d'eau potable ou un réservoir d'eau potable mais aussi comme un écosystème aquatique fragile. À ce titre, les eaux souterraines représentent un élément important du cycle de l'eau, en particulier pour la maintenance des zones humides et du débit des rivières, agissant comme un tampon pendant les périodes de sécheresse. [10]

- 1) *Nappe libre* : est une nappe dont la limite supérieure dont la formation poreuse est sur une surface libre, sans restriction physique. On appelle nappe phréatique, la première nappe libre rencontrée. La pression exercée sur le toit de cette nappe est égale à la pression atmosphérique.
- 2) *Nappe captive* : Une nappe captive est une nappe d'eau souterraine emprisonnée dans une formation géologique perméable, entre deux formations imperméables. Par conséquent, l'eau contenue dans l'aquifère actif est soumise à une pression supérieure à la pression atmosphérique. La surface fictive de cette nappe correspondant à la surface piézométrique est située au-dessus de la limite supérieure de cet aquifère captif. Lorsque la charge hydraulique est plus grande que le niveau du sol, l'eau s'écoule naturellement. Ce phénomène est appelé artésianisme et on appelle alors ce type de nappe captive, nappe artésienne. À noter qu'une nappe captive présente également une surface libre où l'eau peut pénétrer (s'infiltrer). Cette zone d'approvisionnement est connue sous le nom « Surface de captage ».

II.2 L'eau dans les aquifères :

La nature des aquifères, composés de matériaux meubles comme le sable ou le gravier ou de roches consolidées comme le grès, a un impact important sur l'écoulement des eaux souterraines et donc sur le comportement et la répartition de la pollution. D'une part, l'eau stockée dans des matériaux meubles comme le sable peut atteindre 30 % de son volume. D'autre part, les matériaux consolidés peuvent également stocker de grands volumes d'eau en raison de leur porosité, mais l'écoulement des eaux souterraines est généralement très lent en raison de la petite taille des pores.

Les aquifères sont généralement surmontés d'une zone non saturée, qui contient à la fois de l'air et de l'eau et repose sur une couche imperméable constituée, par exemple, d'argile ou de roche. La limite entre les zones non saturées se situe à des profondeurs différentes selon les caractéristiques hydrogéologiques et climatiques ; par exemple, il peut se trouver jusqu'à 100 m sous la surface dans les zones arides et près de la surface dans les zones humides. Cependant, certains collecteurs sont complètement enfermés dans des couches imperméables et contiennent de l'eau souterraine sous pression. [10]

II.3 Les types d'aquifères :

Dans l'introduction, il convient de noter que les différents types d'aquifères ne peuvent être abordés qu'avec une connaissance des structures géologiques des zones concernées. Les eaux souterraines sont considérées dans ce contexte dans l'étude éditée par JC Roux, où le lecteur est invité à consulter pour d'autres concepts de géologie. De plus, cette monographie décrit des exemples détaillés et les caractéristiques des aquifères. [10]

II.3.1 Les grands systèmes aquifères :

Les principaux systèmes des aquifères de la Terre sont décrits dans de nombreuses monographies. Ces systèmes ont un large éventail de disciplines et certains d'entre eux représentent des parts importantes de réserves et des débits mondiaux d'eaux souterraines. Ils sont formés de roches sédimentaires et se caractérisent par trois types structuraux :

- 1) *Bassins sédimentaire* : Il s'agit notamment d'un plusieurs aquifères avec de aquifères libres et un nombre variable d'aquifères partiellement interconnectés avec des aquifères fixes, dont l'eau est souvent saumâtre voire saline en profondeur et où la régénération est beaucoup moins fréquente. Des exemple en

Europe sont le bassin parisien avec de l'air sédimentaire affleurant et le bassin hongrois de type «pannonique », où les couche supérieure recouvrent complètement les aquifères profonds.

- 2) *Fosses d'effondrements* : Subsidentes, à comblement principalement alluvial, à nappe libre mais pouvant être également multicouches et comporter plusieurs nappes captives et des aires d'artésianisme (par exemple, le Fossé rhénan en Europe)
- 3) *Accumulations détritiques* : de piedmont de grande chaînes montagneuses où l'on trouve des aquifères à nappe libre

Les caractères dominants de ces grands systèmes aquifères comprennent des grandes étendues (les plus grands dépassent 1 million de km²), d'énormes réserves pouvant offrir des ressources en eau non renouvelables, une continentalité marquée. De plus, la plupart sont transfrontaliers. Enfin, leur dynamique est différenciée selon leur situation climatique: en zones humides, ils sont essentiellement drainés par les cours d'eau (et accessoirement par la mer), alors qu'en zones arides, ils sont généralement endoréiques (pas d'écoulement dans les mers) et n'ont pour exutoires que le drainage de cours d'eau eux-mêmes endoréiques ou des aires d'évaporation en bassins fermés. [10]

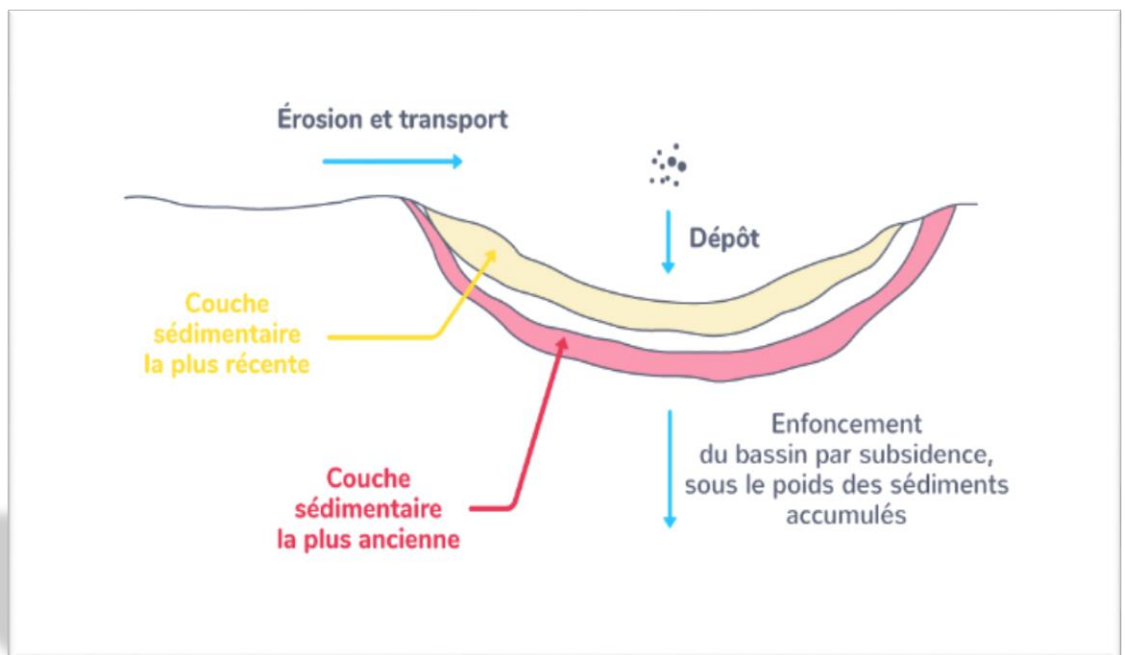


Figure II.1 : Sédimentation et milieu de sédimentation. [11]

II.3.2 Les aquifères karstiques :

Les roches carbonatées (calcaires et dolomies) sont sujettes à différents degrés de dissolution en fonction du climat actuel ou passé, de l'ancienneté de leurs affleurements et de l'évolution tectonique favorisant les fractures ou karsification. Les karsts correspondent à des aquifères discontinus comportant des réseaux souterrains de cavités et de chenaux plus ou moins complexes et très conducteurs. Il s'agit généralement d'aquifères à surface libre et profonde (allant de 100 m à parfois plusieurs centaines de mètres au-dessous du sol), le plus souvent compartimentés et divisés en systèmes d'aquifères d'extension limitée. Des réseaux de conduits karstiques, parfois étendus et complexes, peuvent raccorder et drainer différents compartiments contigus avec une fonction analogue à celle des réseaux hydrographiques (véritables « rivières souterraines »). Ces aquifères captent en général la majeure partie des précipitations qui arrosent le plus souvent les plateaux ou massifs les surplombant. Ils accaparent donc une grande partie de l'écoulement total régional. Leurs émergences sont le plus souvent concentrées et forment les sources les plus abondantes connues sur la terre, avec des débits moyens de l'ordre de dizaines de m³/s (avec des écarts très prononcés entre les régimes de crue et d'étiage). Leur exploitation se concentre souvent sur le captage de leurs émergences.

Les formations karstiques les plus développées correspondent soit à des roches carbonatées d'âge ancien, notamment primaires, ayant subi une très longue durée de karstification, soit à des formations calcaires plus récentes (secondaires ou tertiaires) affectées par la tectonique de la chaîne alpine, par exemple dans la région méditerranéenne. [10]

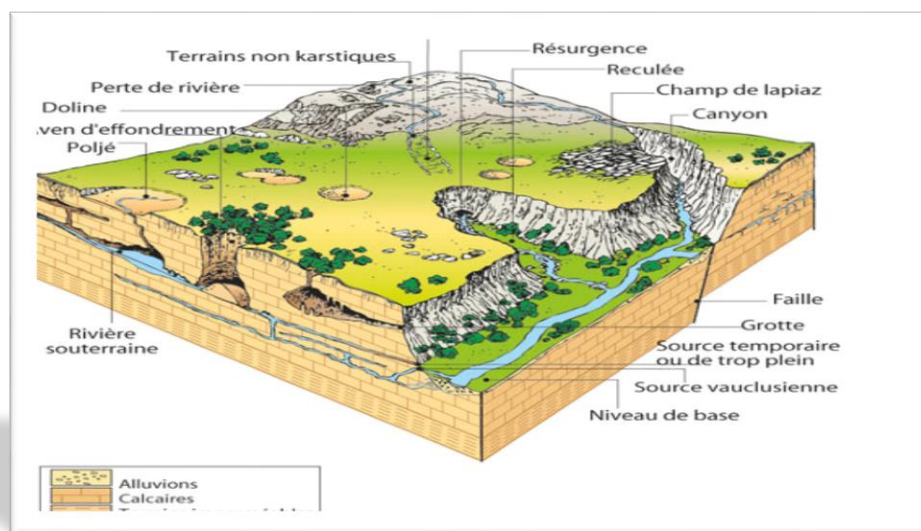


Figure II.2 : Représentation synthétique d'un système karstique. [12]

II.3.3 Les aquifères alluviaux :

Les alluvions (roches meubles non cimentées), sables et graviers d'origine fluviatile ou fluvio-glaciaire d'âge récent(Quaternaire) ou plus ancien (Tertiaire) sont les aquifères continus les plus répandus et les plus sollicités dans le monde. On distingue les aquifères localisés dans la plupart des vallées, généralement associés aux cours d'eau avec lesquels les échanges sont courants et alternatifs (alimentation en période de hautes eaux. drainage par les rivières en période de basses eaux), et les aquifères plus étendus situés dans les grandes plaines alluviales (présents surtout dans les grands deltas ou les piedmonts de grandes chaînes montagneuses)

En général, les aquifères alluviaux sont des nappes à surface libre et peu profonde de quelques mètres à quelques dizaines de mètres) ou parfois des nappes captives locales. Ils sont davantage alimentés par les infiltrations des eaux météoriques qui, en zones humides, peuvent dépasser 200 mm/an en moyenne. En amont, ils bénéficient aussi de l'apport des cours d'eaux et d'autres affluences (aquifères limitrophes). En zones aride et semi-aride, ces aquifères comportent souvent des sous-écoulements permanents dans des vallées de cours d'eau temporaires ou épisodiques. Dans certaines conditions (ex. dépression locale), ils peuvent conduire à des émergences à gros débit ou, en zones littorales, ils peuvent participer à des écoulements souterrains affluant directement dans les océans. [10]

II.3.4 Les aquifères de socle :

Les roches cristallines, plutoniques (granites, roches basiques, etc.) ou métamorphiques (gneiss, schistes, etc.) dites « de socle » constituent les soubassements de tous les continents. Elles représentent des aquifères très spécifiques, à fonctions conductrices et capacitives relativement séparées : ils sont discontinus, fissurés ou fracturés dans les zones à fracturation récente (ex. les chaînes alpines) et localement conducteurs mais à réserve généralement faible. Dans la partie altérée en sub-surface, suivant les climats actuels ou passés, les aquifères sont moins productifs et leur recharge varie naturellement en fonction du climat. Le couplage des altérites aquifères et de leur substrat fissuré forme des aquifères exploitables. Ces aquifères offrent des ressources en eau souterraines limitées mais utiles à l'alimentation en eau rurale ou pastorale, voire à l'irrigation localisée. [10]

II.3.5 Les aquifères volcanique :

Les roches volcaniques constituent des aquifères très particuliers, hétérogènes et discontinus (Ma. Ils sont composés de laves (surtout des basaltes) fissurées et de projections poreuses (ex: tufs) en général très perméables. Généralement affleurant, les terrains volcaniques facilitent les infiltrations (plus particulièrement en zone humide) même s'ils favorisent aussi le ruissellement. Les aquifères volcaniques comprennent des nappes souterraines à surface libre et des nappes captives, en particulier dans les couches profondes des bassins sédimentaires. Les assemblages de couches qui les composent les apparentent d'une certaine manière aux aquifères karstiques même s'ils sont plus cloisonnés et le plus souvent décomposés en systèmes aquifères locaux. En zone humide, ces aquifères entretiennent de nombreuses sources d'eau souterraine d'excellente qualité. Ils sont souvent associés au thermalisme dans les régions où le volcanisme est actif. [9]

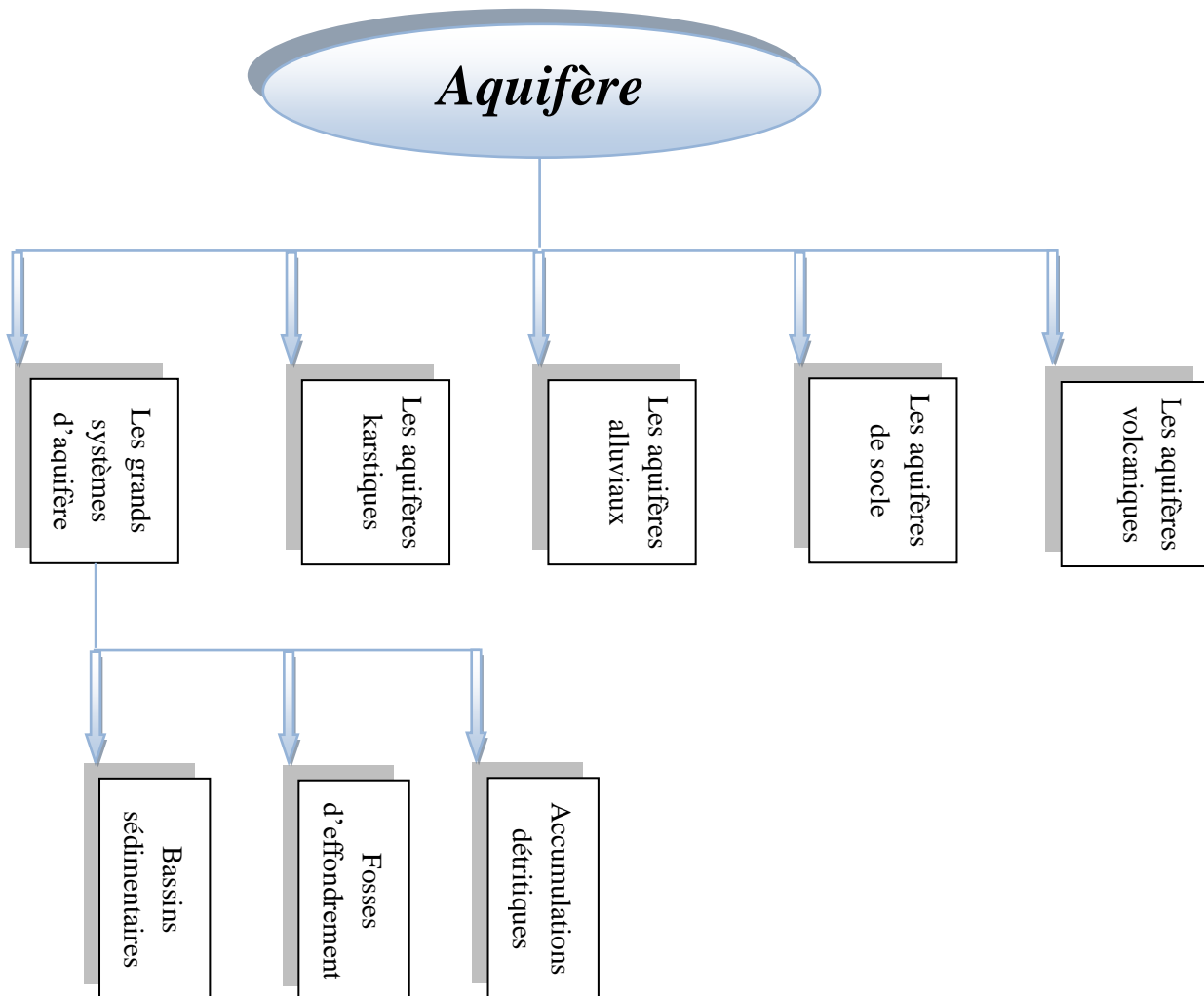


Figure II.3 : Schéma des types d'aquifère.

II.4 Les eaux thermales :

Il s'agit d'une eau dont la température est supérieure à la température moyenne des eaux de nappe de la région. En général, la température des eaux régionales des eaux est très proche de la température moyenne annuelle de l'air. La température des eaux du sol et du sous-sol suivent les variations de la température de l'air avec un décalage temporel et un amortissement qui augmentent avec la profondeur. Au-delà de 1,5 m les variations temporelles sont assez faibles et rapidement en dessous de cette profondeur, la température peut être considérée comme constante. Donc les eaux thermales sont des eaux dont la température est supérieure à cette valeur régionale. On distingue les eaux thermales de basse enthalpie (basse température) et les eaux thermales de haute enthalpie.

En effet, certaines eaux thermales, du fait de la température du réservoir, acquièrent des propriétés chimiques particulières, différentes des caractéristiques habituellement observées pour les eaux froides de surface. Du fait des températures qui peuvent être élevées dans le réservoir (200 ou 300°C), elles sont capables de dissoudre

II.4.1 Étymologie :

L'adjectif « thermal » est dérivé du nom « thermes »; les origines de « thermes » sont issues du latin « thennac », et du grec « thermos », signifiant chaud. Ce mot apparaît en 1625 dans la langue française [71], et la notion des « eaux thermales » est quand à elle attestée en 1735 par Woodward.

II.4.2 Définition d'une eau thermale

Une eau thermale est tout d'abord une eau minérale naturelle, c'est-à-dire une eau possédant un ensemble de caractéristiques qui sont de nature à lui apporter des propriétés favorables à la santé. Elle contient des minéraux, sels et gaz susceptibles d'agir efficacement sur la santé.

L'eau minérale naturelle provient d'une nappe ou d'un gisement souterrain exploité à partir d'une ou plusieurs émergences naturelles ou forées, et témoigne, dans le cadre des fluctuations naturelles connues, d'une stabilité de ses caractéristiques essentielles, notamment de composition et de température à l'émergence, qui n'est pas affectée par le débit de l'eau prélevée.

Une eau thermale est, par définition, une eau minérale chaude. Dans le langage courant, on appelle « eau thermale » toute eau minérale dotée de propriétés thérapeutiques et utilisée au sein d'un établissement thermal. [13]

Les eaux souterraines dont la température à la sortie est d'au moins 20 °C sont unanimement appelées eaux thermales (ou géothermiques). [14]

Les sources d'eau chaude ou thermales, présentent tous les degrés de chaleur depuis l'eau bouillante, qui est de 100 degrés, jusqu'à tempérée (**Dictionnaire de Paramelle, 1856**).

Une source est dite thermale quand sa température dépasse celle de la zone de température constante (**Dictionnaire de Launay, 1899**).

Une eau thermale est une eau souterraine dont la température est de 50 supérieure à la température moyenne des sources ordinaires, c'est-à-dire température moyenne du lieu, ou à la température de la zone à température constante du sol à altitude égale (**Gosselin Schoeller, 1939**).

Eau de source ayant une température élevée (**Dictionnaire Des Sciences de l'environnement**)

Eau de source chaude ou tiède (**Dictionnaire de l'environnement AFNOR, 1994**).

La définition des eaux thermales s'est enrichie par la suite d'un aspect thérapeutique :

Une eau thermale a une température élevée à la source et propriétés thérapeutiques (**Le petit robert.1994**).

Eau souterraine naturellement chaude à son émergence (source, puits jaillissant) et utilisable de ce fait à des fins particulières : thermalisme, chauffage (**Dictionnaire Français d'hydrogéologie, 1977**).

Les laboratoires pierre Fabre (Neuzil et al.3) donnent cette définition aux eaux thermales et notamment à celle d'avène : « Eau de source naturellement minéralisée dont la composition permet une utilisation thérapeutique (reconnu par l'académie de médecine) »

Ces définitions ne sont pas concordantes : les unes se réfèrent au seul critère de température.

En accord avec l'étymologie, « eau thermale », alors synonyme de « eau chaude », avec une comparaison à un seuil de température ; les autres associent la température et un usage en conséquence, que ce soit balnéaire ou thérapeutique ; l'eau thermal est alors incluse dans les eaux minérales (de même que le dérivé « thermalisme » désigne toutes activités d'usage d'eau minérale, chaude ou froide).

Au vu de toutes les définitions envisagées, une eau thermale pourra se caractériser par : -une origine profonde (qui garantit sa pureté), des caractéristiques physiques et chimiques déterminés stables, malgré les fluctuations naturelles et des effets pharmacologiques (ce qui la différenciera d'une eau de source).

II.5 Formation des eaux thermales :

La densité de l'eau diminue quand sa température augmente, l'eau réchauffée dans les profondeurs de la terre tend à remonter vers la surface ; sa circulation est facilitée par le fait que l'élévation de température diminue sa viscosité.

Le captage d'une eau thermal est une opération délicate qui nécessite des forages parfois profonds, de 150 à 1500 mètre. En approchant de la surface, l'eau peut être exposée à un risque de mélange (avec des eaux naturelles) ou de pollution. [15]

II.6 Classification des eaux thermales :

Il existe plusieurs façons de classer l'eau minérale, en fonction de ce qui est considéré comme clé, comme la température de l'eau, la teneur en minéraux ou la composition minérale.

II.6.1 Selon l'origine :

- 1) *Superficielles* : mers et lacs froides, qui vont de 7 à 15°C.
- 2) *Infiltration* : Réseau hydrologique souterrain, dont l'origine est le cycle hydrologique. C'est dans ce type d'eaux souterraines que se trouvent les eaux thermales. [9]

II.6.2 Selon le degré de chaleur (température) :

Bien que le mot "thermale" évoque l'idée de chaleur, toutes les eaux ne sont pas chaudes.

Selon leur température, les eaux ne seront pas utilisées de la même manière, d'où l'utilité de cette classification :

- 1) *Les eaux froides* : ont une température inférieure à 20°C. Leur utilisation thérapeutique est réservée à l'usage interne (les cures de boisson, dont l'usage est principalement digestif, urinaire, et métabolique).
- 2) *Les eaux hypo-thermales* : ont une température comprise entre (20°C et 35°C)
- 3) *Les eaux méso-thermales* : ont une température comprise entre (35 et 50°C). Généralement de minéralisation faible, elles sont utilisées pour les bains prolongés.

- 4) *Les eaux hyperthermales* : ont une température supérieure à 50°C. Elles sont le plus souvent radioactives, propriété qui peut être utilisée en crénothérapie. [9]

Tableau II.1 : Types de sources thermales. [16]

Eaux thermo minérales	Température (°C)
1. Sources froides	$T < 20^{\circ}\text{C}$
2. Sources thermals	
• Sources tièdes/Hypo-thermales	$20^{\circ}\text{C} < T < 35^{\circ}\text{C}$
• Sources chaudes/Mésothermales	$35^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$
• Sources très chaudes/Hyperthermales	$T > 50^{\circ}\text{C}$

II.6.3 Selon la minéralisation :

La minéralisation de l'eau est déterminée principalement par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elle traverse . Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias si répandu en Algérie. [17]

L'eau thermale a une teneur en sels minéraux variable, lui conférant des propriétés différentes. Ces minéraux permettent de les classer selon leurs sels minéraux, obtenus après déshydratation à 180°C. [13]

Tableau II.2 : Classification des eaux thermales en fonction de leur minéralisation. [19]

Eau	Teneur en sel minéraux
Très faiblement minéralisée	$[\text{C}] < 50 \text{ mg/L}$
Faiblement minéralisée (oligo-minérale)	$50 \text{ mg/L} < [\text{C}] < 500 \text{ mg/L}$
Moyennement minéralisée	$500 \text{ mg/L} < [\text{C}] < 1000 \text{ mg/L}$
Minéralisée	$1000 \text{ mg/L} < [\text{C}] < 1500 \text{ mg/L}$
Fortement minéralisée	$[\text{C}] > 1500 \text{ mg/L}$

II.6.4 Selon la concentration en ions :

- 1) *Les eaux sulfurées* : Les eaux sulfurées se caractérisent par une odeur particulière caractéristique due à la présence de H₂S, mais également par une instabilité au contact de l'air [18]. Les espèces chimiques du soufre sont nombreuses. D'un point de vue

thermodynamique les différentes espèces peuvent coexister soit par réaction d'équilibre pH ou d'oxydoréduction. La présence des cations, calcium et sodium essentiellement, permet de les subdiviser en eaux sulfurées calciques, sodiques ou mixtes. Elles sont indiquées principalement pour des processus rhumatisants, dermatologiques comme eczémas, kératose, psoriasis ou prurits et respiratoires chroniques, comme la laryngite, rhinite, bronchite, et l'asthme.

2) *Les eaux sulfatées* : Ce type d'eau se caractérise par sa température et minéralisation qui sont variables. Elles peuvent être classées comme : calciques, sodiques et magnésiques. Elles sont également indiquées pour lutter contre les affections dermatologiques. On distinguera :

a) *Sulfatées calciques*: Elles sont indiquées dans des affections du rein et dans certaines maladies métaboliques

b) *Mixtes (calcique et magnésienne)*: Leur apparition nécessite une double conjoncture : présence de terrains évaporitiques du Trias et existence d'une structure plissée ou faillée permettant la circulation et la remontée de l'eau minérale

3) *Les eaux chlorurées* : Les ions chlorures sont dominants (supérieur à 250 mg/l) associés le plus souvent au sodium (au moins 200 mg/L).Elles ont effet stimulant sur la croissance et sont indiquées dans le traitement des troubles du développement et de l'énurésie. [15]

4) *Les eaux bicarbonatées* : Eaux de basse minéralisation, alcalines et froides. Leur utilisation se fait par ingestion, en agissant sur le métabolisme de sorte qu'elles alcalisent le PH gastrique si elles sont prises à jeun, en diminuant l'acidité et en aidant le processus digestif. Elles stimulent aussi la sécrétion pancréatique et ont des fonctions diurétiques. Ce type d'eaux peut s'associer à la composition d'un autre type de minéraux qui vont varier leurs actions. Celles plus communes sont :

a) *Bicarbonatées sodiques* : : indiquées dans les affections gastriques comme l'hypermotilité intestinale, les ulcères duodénaux, les diarrhées et affections hépatiques et rénales.

b) *Bicarbonatées calciques* : ont un effet anti-inflammatoire apaisant et cicatrisant qui agit sur les maladies de la peau .elles sont indiquées pour le traitement de l'acné et des brulures. [15]

c) *Bicarbonatées mixtes* : elles améliorent la digestion

- d) *Bicarbonatées sulfatées* : indiquées dans des empoisonnements hépatiques et en cas de constipation.
 - e) *Bicarbonatées chlorurées* : indiquées dans les affections rhumatisantes.
- 5) *Les eaux Ferrugineuses* : Eau qui contient une forte teneur en fer, bien qu'elles soient accompagnées généralement bicarbonates ou sulfates. Elles sont indiquées dans des cas d'anémies anémie sidéropénique et d'autres types d'anémies, puisque ce type d'eau est considéré comme reconstituant. Les eaux ferrugineuses sont indiquées en cas d'obésité, de rhumatismes, d'affections hépatiques, biliaires et pour certaines affections dermatologiques, ainsi que pour des bouleversements du développement infantile.

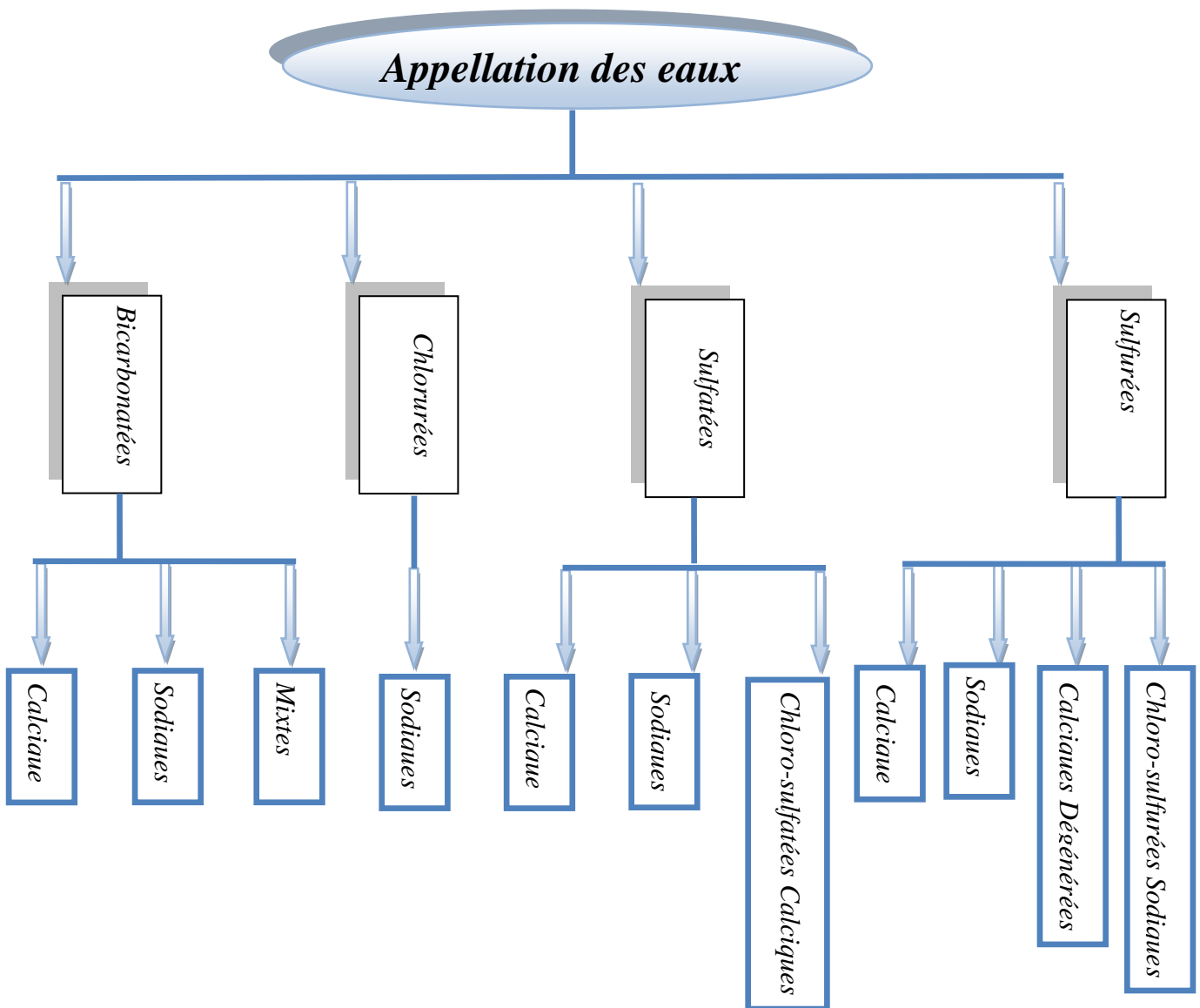


Figure II.4 : Schéma de Classification chimique des eaux thermales. [16]

II.6.5 Selon l'origine géologique :

- 1) Eaux magmatiques : Eaux dont l'origine est à caractère éruptif et le débit constant en composition et température.
- 2) Eaux telluriques : leur débit varie suivant l'époque de l'année puisqu'il provient de l'infiltration des pluies. [9]

III.1 Introduction partielle :

Tout le monde sait que la température de la terre est plus élevée en profondeur qu'en surface. L'existence de manifestations thermales à la surface en constitue des preuves évidentes. La géothermie est la discipline qui s'intéresse à l'étude de cette température et des phénomènes qui influencent sa distribution.

Au-dessous de quelques mètres de la surface, où les variations de la température dépendent du rayonnement solaire, la température augmente graduellement avec la profondeur : c'est le gradient géothermique. Dans les régions tectoniquement stables, cette augmentation de la température est de l'ordre de 3°C pour 100m, alors que dans les zones actives, les roches en fusion peuvent remonter et devenir proches de la surface de la terre causant ainsi une augmentation anormale de la température dans ces zones.

Plusieurs phénomènes (activités volcaniques, les fumerolles, les sources thermales, les émissions de gaz, l'extraction d'hydrocarbures, l'exploitation des fluides de haute et basse enthalpie etc...) contribuent à la dissipation de l'énergie emmagasinée dans la terre : énergie géothermique. La quantité de chaleur dissipée définit le flux de chaleur terrestre qui est d'une valeur moyenne mondiale d'ordre de 60 mW/m².

L'énergie géothermique concerne l'utilisation de sources profondes d'eau chaude. Son exploitation, qui présente de nombreux aspects positifs, peut-être réalisée de façon durable : c'est l'une des principales sources d'énergie renouvelable pratiquement inépuisable. Il existe deux grands types d'énergie géothermique dans le monde: - la géothermie à haute énergie, qui concerne les gisements dans les zones continentales actives avec des températures supérieures à 150 ° C. Elle est principalement destinée à la production d'électricité; - la géothermie basse énergie, qui concerne les gisements dans des zones de plates-formes continentales stables recouvertes de sols sédimentaires caractérisés par une température comprise entre 30 ° C et 150 ° C. Elle est principalement destinée au chauffage urbain et au chauffage des serres. [20]

III.2 Formation de l'énergie géothermique :

L'énorme quantité d'énergie enfermée dans le sous-sol de la Terre, issue notamment du processus de formation primitif de l'univers, vient en partie de la désintégration des isotopes radioactifs (uranium, thorium et potassium) présents principalement dans la croûte terrestre, et en second lieu dans le manteau. Le centre de la Terre, dont la température est estimée à plus de 5000 °C, émet donc un flux thermique en direction de la surface, qui s'ajoute au flux thermique

d'origine radiogénique. Au total, d'après les estimations, la puissance thermique ainsi émise par la Terre serait d'environ 42×10^{12} W [21]. Le flux thermique terrestre moyen, quant à lui, équivaudrait à 65 mW/m² pour la croûte continentale et à 101 mW/m² pour la croûte océanique. Étant donné que la surface de la terre n'est pas continue, mais formée d'un ensemble de plaques adjacentes en mouvement les unes par rapport aux autres, comme le montre la théorie de la tectonique des plaques, il est évident que, du fait de ces discontinuités dans la surface irrégularités de l'épaisseur ou fractures de la croûte terrestre, cette grande quantité d'énergie en provenance du sous-sol peut être transférée à la surface de façon plus efficace et plus visible, provoquant au passage quelques phénomènes physiques remarquables et bien connus comme le volcanisme, les fumerolles, les geysers et les sources thermales. [22]

III.3 La géothermie :

III.3.1 Définition de la géothermie :

La géothermie provient du mot grec : géo (terre) et thermie (chaleur). C'est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Des phénomènes naturels, tels que les volcans, les geysers, les fumerolles, les sources chaudes et les mers de boue bouillante, sont les preuves visibles de la chaleur terrestre. Ces manifestations, qui se produisent dans différentes parties du monde, sont souvent associées à des tremblements de terre. [27].

En géothermie, on s'intéresse particulièrement à la chaleur de la croûte terrestre stockée en subsurface, à des profondeurs accessibles pour l'homme, dans des réservoirs poreux ou fracturés. Cette chaleur est étudiée par les scientifiques qui visent à comprendre son évolution, dans le but de l'exploiter. [20]

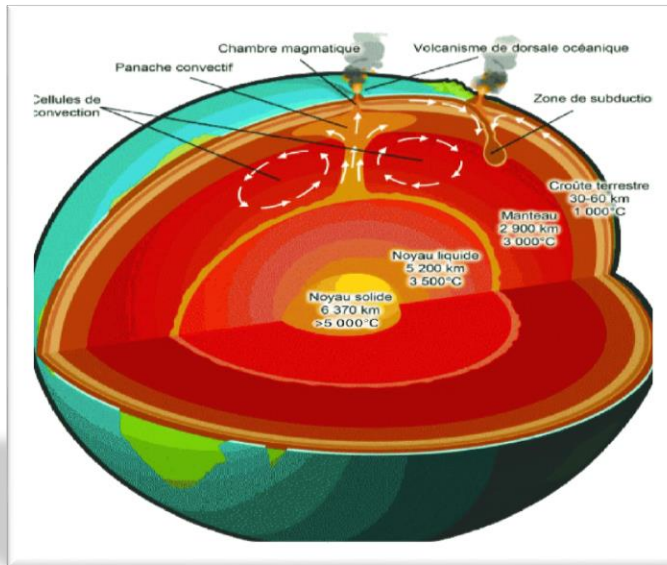


Figure III.1: Structure intérieur du globe. [28]

III.3.2 Principe de fonctionnement de la géothermie :

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe. La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre. En présence d'un flux de chaleur élevé les eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être :

1) *Geysers*: Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut.

Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;

2) *Fumerolles*: Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère.

Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;

3) *Sources thermales*: Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées.

Exemple : Les sources thermales du Nord de l'Algérie. [32]

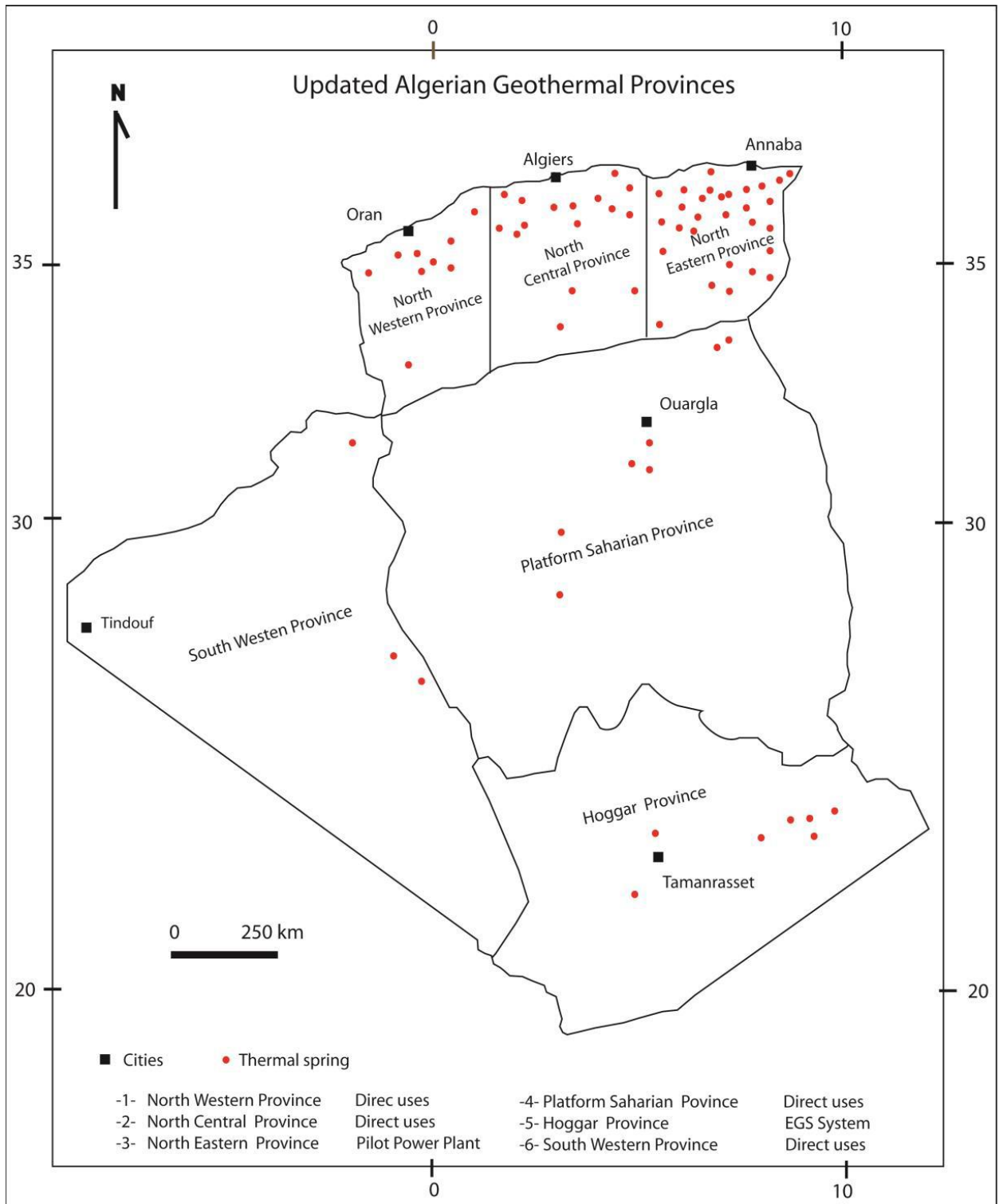


Figure III.2 : Les principales provinces géothermales Algérienne. [20]

III.3.3 Les types de géothermie :

L'exploitation des ressources géothermique dépend du type de gisements et du fluide géothermique existant. Ainsi, il se distingue trois principaux types de géothermie dans le monde :

III.3.3.1 La géothermie à haute énergie :

Les gisements à haute température désignent des fluides qui atteignent des températures supérieures à 150 °C. Dans les zones instables à fort gradient géothermique, les réservoirs se situent généralement entre 1 500 et 3 000 mètres de profondeur. Ces zones correspondent à des zones volcaniques situées à proximité des limites des plaques tectoniques. Le liquide peut être capturé sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'énergie. Les réservoirs géothermiques à haute température sont principalement utilisés pour produire de l'électricité. [20]

Un exemple de ce type de géothermie est donné par la centrale de Bouillante à Guadeloupe (France).

III.3.3.2 La géothermie à moyenne énergie :

Ce type de géothermie est caractérisé par des gisements profonds, dont la température est comprise entre 90 et 150°C et se situe dans des zones continentales stables ou actives. Il est conçu principalement pour des applications directes : séchage de produits agroalimentaires, pisciculture, chauffage de locaux. [23]

III.3.3.3 La géothermie à basse énergie :

Ce sont des réservoirs généralement à des profondeurs comprises entre 1500 et 2500 mètres, avec des températures allant de 30°C à 90°C. On les trouve dans des régions relativement stables, la plupart des réservoirs exploités dans le monde étant situés dans des bassins sédimentaires, titre d'exemple, nous citons le réservoir de l'Albien en Algérie capté par forges avec une température en tête de forage de l'ordre de 55°C. [20]

III.3.4 Type des gisements géothermiques :

A travers le monde, il existe trois catégories de gisements géothermiques :

1) *Les gisements géothermiques des zones volcaniques récentes* : Ce type de gisement se caractérise par l'existence en profondeur d'une chambre magmatique très chaude (1300°C) qui représente la source de chaleur naturelle. Cette chambre magmatique cède sa chaleur aux couches géologiques superficielles. Dans ce cas, les eaux sont très chaudes; elles sont plus adaptées à la production d'électricité. Parmi les pays concernés par ce type de gisements, on peut nommer la Nouvelle-Zélande et l'Islande.

2) *Les gisements des zones de plateforme continentales stables*, recouvertes de terrains sédimentaires. Dans ce type de gisement il n'existe pas de source de chaleur particulière en profondeur, mais la chaleur est uniquement due au gradient géothermique. Dans ce cas les réserves sont généralement très profondes et leur exploitation nécessite la réalisation de forages. Ce type de gisements est rencontré en France (les bassins parisien et aquitain) et en Algérie (le bassin du Sahara septentrional).

3) *Les gisements géothermiques des zones continentales actives* : Dans ce troisième cas, les eaux résultent de la circulation d'eau thermale à travers les failles et les discontinuités géologiques et arrivent en surface sous forme de sources.

On retrouve ce type de gisement en Algérie, à travers les diverses sources thermales qui jaillissent au Nord. Exemple : Hammam Bouhadjar.

Suivant leurs thermalismes, ces gisements géothermiques sont classés en deux types de champs géothermiques :

-*Les champs hyperthermiques*: Concernent la première catégorie de gisements correspondants aux gisements géothermiques des zones volcaniques récentes.

-*Les champs semi-thermiques* : Concernent la deuxième et la troisième catégorie de gisements correspondant aux gisements des zones de plate-forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires et aux gisements géothermiques des zones continentales actives. [24]

III.3.5 Le flux de chaleur :

En géothermie, le flux de chaleur quantifie la chaleur qui s'échappe à la surface de la terre. Il constitue une importante manifestation de l'activité interne de celle-ci. En l'hypothèse de la seule conduction (en l'absence de mouvements de masse), le flux de chaleur représente la quantité de chaleur passant par unité de temps au travers d'une unité de surface, il est défini par la loi de Fourier :

$$\vec{q} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z \right) = -k \nabla T \quad (\text{III.1})$$

Où les \vec{e}_i sont les vecteurs unitaires du repère orthonormé, k est la conductivité thermique du milieu [$\text{W}^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-1}$], T la température [$^\circ\text{C}$] et ∇T représente le gradient du champ de température [$^\circ\text{C}/\text{m}$]. En considérant un milieu isotrope, le flux de chaleur dans la croûte terrestre est principalement vertical. Il peut être approximé par :

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{III.2})$$

Où z est la coordonnée vers le bas de la terre.

Le flux de chaleur conductif mesuré à la surface de la terre est de l'ordre de 60 à 80 mW/m². Des valeurs supérieures, indiqueraient des conditions d'anomalies géothermiques dans le sous-sol. La chaleur totale évacuée par la terre est de 3×10^{13} à 4.3×10^{13} W et la production de chaleur interne atteint 2×10^{13} W. En d'autres termes, la terre évacue plus de chaleur qu'elle n'en produit ; elle se refroidit. On estime ce refroidissement à environ 130°C par milliard d'années. [23]

III.3.6 La conductivité thermique :

La conductivité thermique est l'un des paramètres physiques des roches qui désigne leur aptitude à conduire la chaleur. Ce paramètre peut être mesuré directement au laboratoire avec un appareil de mesure de la conductivité thermique (un appareil à barre divisée) ou bien estimé par un modèle théorique basé sur l'interprétation des données de diagraphies.

L'estimation de la conductivité thermique grâce aux modèles mathématiques a été le sujet de nombreuses études. Ces études ont conclu que la conductivité thermique des roches dépend essentiellement de la proportion des phases minéralogiques et fluides qui constituent la roche et de la porosité. [23]

Tableau II.1 : Les conductivités thermiques des principaux constituants de la roche en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$. [23]

Constituants de la roche	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
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

La conductivité thermique varie aussi avec les différents types de roches. Ainsi, les grès et les quartzites sont plus conducteurs que les argiles et les calcaires. Dans les bassins sédimentaires à systèmes géothermiques profonds, les sédiments agissent comme des matelas isolants et la chaleur de l'intérieur de la terre est accumulée dans le sous-sol, en dessous des sédiments. Pour les roches, la conductivité thermique a tendance à diminuer avec la température ; elle diminue, environ, de moitié entre 25 et 700°C. A température ambiante, la majorité des roches possèdent des valeurs de conductivité thermique allant de 0.6 à 5 $W.m^{-1}.C^{-1}$. [23]

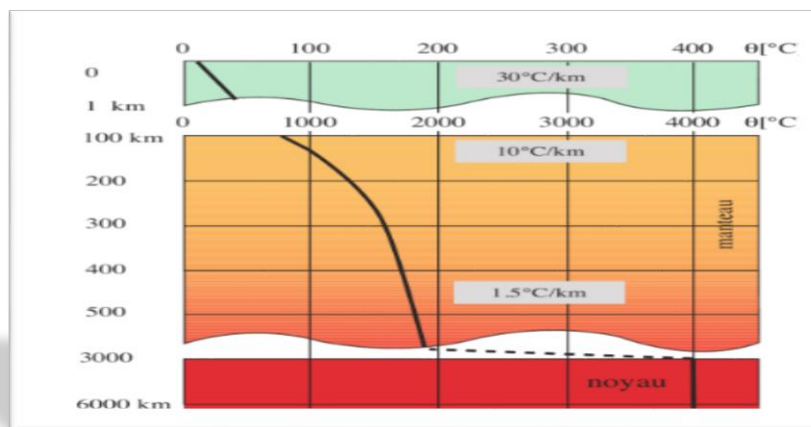
Dans le tableau, sont données les conductivités thermiques correspondantes à différents types de roches :

Tableau III.2 : Conductivité thermique de divers types de roche à température ambiante. [23]

Roche	Conductivité thermique [W/m°K]
Granite	2.5-3.8
Gabbro/Basalte	1.7-2.5
Péridotite/Pyroxénite	4.2-5.8
Calcaire	1.7-3.3
Dolomite, sel	~ 5.0
Grés	1.2-4.2
Argile	0.8-2.1
Roches volcaniques	1.2-2.1
Sédiments marins	0.6-0.8
Eau	0.6

III.3.7 Le gradient géothermique :

La variation de température en fonction de la profondeur définit le gradient géothermique. Près de la surface (jusqu'à quelques kilomètres de profondeur), il est en moyenne de 3 degrés par 100 mètres. Il est évident que cette valeur se modifie localement d'une manière importante en fonction des conditions géologiques (par exemple dans les zones volcaniques où il peut atteindre plus de 100°C par 100 m). En profondeur, Le gradient diminue progressivement [30].

**Figure III.3** : Variation du gradient géothermique moyen à l'intérieur du globe. [30]

Le gradient géothermique est calculé avec la relation suivante : [23]

$$G = \frac{dT}{dz} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

G: Le gradient géothermique [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$] (degré Celsius par mètre).

T: La température [$^{\circ}\text{C}$].

z: La profondeur [m].

III.3.7.1 Origine du gradient géothermique :

A travers les travaux réalisés sur le gradient géothermique, il apparait qu'il peut être associé à trois principales causes [23] :

- 1) *origine magmatique*: des valeurs très élevées de gradient géothermique sont expliquées par la présence, à quelques milliers de mètres sous la surface de la terre, de roches chaudes correspondant soit à des poches magmatiques liées à des phénomènes volcaniques actuels ou assez récents, soit à une remontée locale du manteau.
- 2) *origine tectonique*: les mouvements orogéniques des plaques tectoniques peuvent produire de l'énergie calorifique liée aux déformations mécaniques et surtout aux frictions au niveau des failles causées par les tensions tectoniques,
- 3) *origine chimique*: les réactions physico-chimiques exothermiques résultant de la réduction des sulfates, de l'oxydation des sulfures de fer et de la transformation de l'anhydrite en gypse et la désintégration des minéraux radioactifs peuvent aussi engendrer une élévation considérable de la température des eaux.

III.3.7.2 Calcul du gradient géothermique :

La méthode de calcul du gradient géothermique utilisée dans l'exploration géothermique implique les mesures de la température de sub-surface à des profondeurs spécifiées, dans des forages d'exploration. Le plus souvent, le gradient géothermique est calculé à partir des données de températures de fond de puits (BHT) de forages miniers ou pétroliers. Ces mesures sont enregistrées à l'aide d'une sonde thermique dont la précision est du dixième de degré. Il est préférable de disposer de plusieurs dizaines de mesures de températures à différentes

profondeurs afin d'estimer un gradient thermique moyen stable. Actuellement, avec le développement de la géothermie et la réalisation de forages géothermiques dans certains pays, le gradient géothermique est directement calculé à partir du log de température.

Plusieurs facteurs peuvent influencer les données de températures enregistrées ; les plus importants sont :

- 1) *la topographie*: le gradient géothermique mesuré diminue sur les montagnes et augmente dans les vallées et les dépressions.
- 2) *l'environnement*: les effets de l'activité humaine (constructions, reboisements et déboisements, etc.) changent fréquemment la conductivité du sol et modifient la température moyenne en surface.
- 3) *l'érosion*: la sédimentation rapide réduit le gradient géothermique enregistré en surface alors que l'érosion produit l'effet contraire.
- 4) *l'hydrographie*: dans les bassins sédimentaires, les effets de l'écoulement des eaux peuvent affecter sérieusement les mesures de gradient de température.

La carte de gradient géothermique est fondamentale dans la prospection géothermique car elle permet de définir les anomalies de gradient géothermique qui sont nécessaires pour délimiter les régions intéressantes pour les applications géothermiques et pour évaluer l'étendue et le potentiel des réservoirs. [23]

III.4 Les systèmes géothermiques : [14]

Sous la croûte terrestre, la température augmente avec la profondeur, même si elle varie selon les endroits. Le gradient géothermique moyen se situe entre 25 et 30°C/km, mais peut être plus élevé dans certaines régions, jusqu'à atteindre 300°C/km, en cas d'anomalie géothermique. L'énergie géothermique doit être exploitée en surface, un système géothermique, qui achemine l'énergie thermique captée en profondeur à la surface, est alors nécessaire. Du point de vue pratique, un tel système se compose de quatre éléments principaux :

- 1) *Une source de chaleur* : permet un transfert constant par conduction de l'énergie thermique aux roches environnantes et aux eaux souterraines interstitielles (ou fissurées) en augmentant leur température et le gradient géothermique de la zone.
- 2) *Un réservoir* (c'est-à-dire l'aquifère) : qui joue un rôle de réservoir géothermique, est le volume de roches chauffées et perméable qui peut être exploité par extraction d'eau thermique (ou vapeur). Le réservoir géothermique est généralement recouvert d'une couche

de roches imperméables et relié à la zone de recharge, où les eaux météoriques peuvent partiellement remplacer les fluides qui s'échappent du réservoir par des sources ou sont extraits par des forages.

3) *Un fluide c'est-à-dire l'eau thermale* (ou la vapeur) qui transfère la chaleur à la surface (vecteur de chaleur). La convection du fluide (eau) chauffé par la source de chaleur à la base du système de circulation est la force motrice. La base du système de circulation constitue une force motrice dans le réservoir géothermique ; le fluide chauffé de faible densité tend à s'élever vers le haut, laissant la place au fluide le plus froid et de densité plus élevée provenant du réservoir géothermique. En fonction des différents hydrogéologiques et géologiques et des conditions thermiques, les systèmes géothermiques peuvent varier considérablement.

Les systèmes géothermiques peuvent être distingués :

(a) *Selon le mode de transport de la chaleur :*

- Systèmes conductifs
- Systèmes convectifs

(b) *Selon la mobilité des composants :*

- Les systèmes à composants mobiles (eau, gaz, et même magma)
- Systèmes sans composants mobiles (ex, roche chaude et sèche)

(c) *Selon la nature des composants :*

- Systèmes de roches chaudes et sèches
- Systèmes magmatiques
- Systèmes à eau thermale

(d) *Selon l'état des composants :*

- Systèmes de composants solides
- Systèmes de masses magmatiques fondues avec et sans gaz et vapeur
- Systèmes à haute enthalpie (généralement dominés par la vapeur)
- Systèmes à basse enthalpie (dominés par l'eau liquide)

(e) *En fonction de la fermeture hydraulique des composants :*

- Systèmes fermés où le fluide thermique est confiné par des strates de faible perméabilité, la recharge en eau est lente, et sur de longues distances, le rejet d'eau ou de vapeur est intermittent
- Systèmes ouverts - où l'eau s'écoule d'une zone de recharge à une zone de décharge et n'est pas confinée par une couche de faible perméabilité.

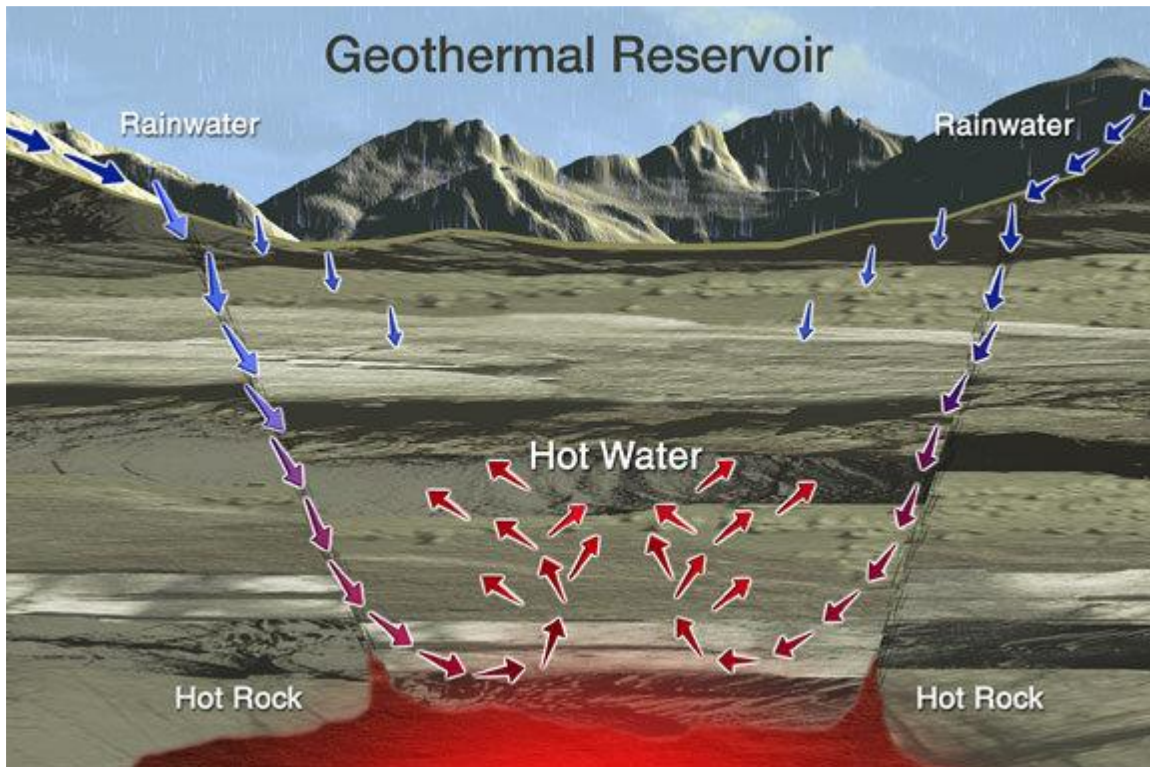


Figure III.4: Système géothermique [26].

III.4.1 Les systèmes hydrothermaux :

Un système hydrothermal peut être défini comme une zone de circulation d'eau au contact de la roche chaude. Ces conditions peuvent être réunies dans une variété d'environnements géologiques. Il en résulte une importante diversité des systèmes hydrothermaux.

Dans ce type de système, le fluide géothermique est constitué d'eau généralement d'origine météorique. En effet, les eaux froides des météorites dans le système descendant dans les profondeurs, traversent la roche poreuse et se réchauffent ainsi sous l'influence du flux thermique auquel elles sont soumises, s'enrichissant en traversant facilement les roches en sel et minéraux soluble dans l'eau sous l'action d'une température locale élevée, avant de remonter à la surface, créant ainsi des sources thermales. Dans un contexte hydrogéologique similaire, le forage de puits permet aux fluides géothermiques de remonter à la surface et d'être prêts à être extraits dans une centrale géothermiques .Généralement, le puits de régénération du fluide géothermique est ajouté au puits de production. [22]

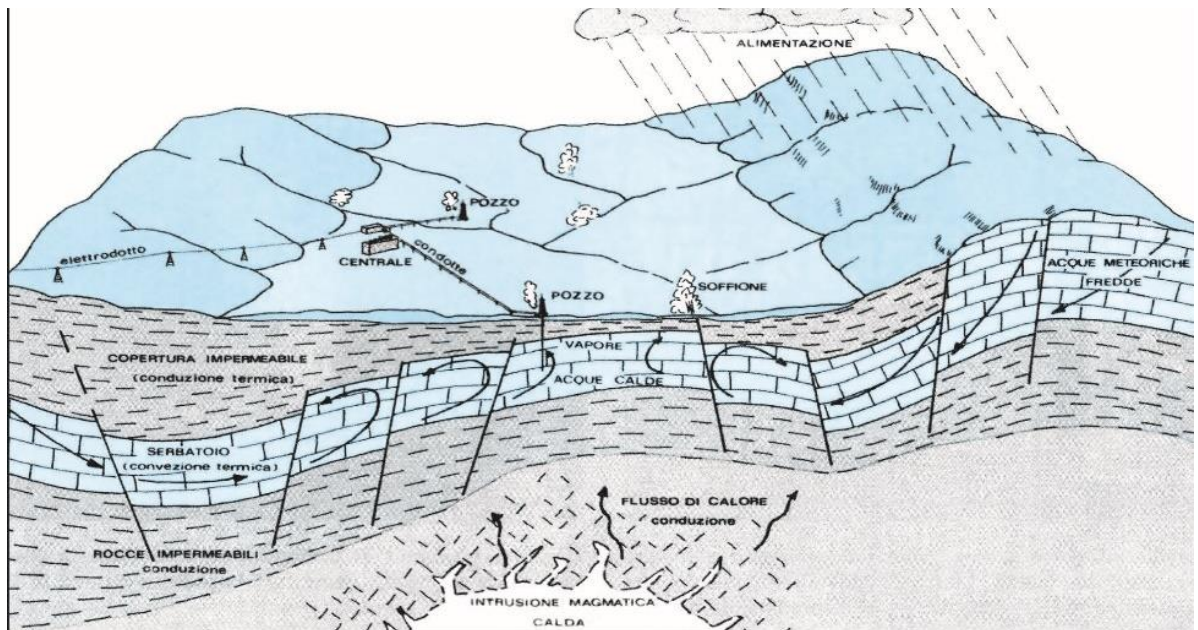


Figure III.5 : Exemple de système hydrothermal. [22]

III.4.2 Les systèmes Engineered / Enhanced Geothermal Systems (EGS): [22]

L'idée d'exploiter les formations rocheuses à haute température et faible perméabilité n'est pas nouvelle et remonte à la fin des années 1960, avec le concept de *Hot Dry Rock*: depuis, les choses ont évolué avec des hauts et des bas, jusqu'au développement des systèmes EGS. À l'origine, l'objectif du système *Hot Dry Rock* était de reproduire artificiellement ce que la nature crée spontanément dans les systèmes hydrothermaux, en associant une source de chaleur naturelle existante à un réservoir artificiel dans lequel pouvait circuler un fluide caloporteur approprié : il s'agissait avant tout d'identifier une formation rocheuse adaptée, éventuellement dans une région possédant un gradient géothermique local élevé à une profondeur suffisante pour garantir la bonne température, et de la fracturer artificiellement en injectant de l'eau à très haute pression afin de la rendre poreuse et perméable.

Le système EGS prévoit de récupérer l'énergie thermique des roches les plus profondes en créant dans la roche un système de fractures artificielles interconnectées, de façon à permettre la circulation de l'eau injectée par les puits qui, une fois réchauffée au contact des roches chaudes, remonte en surface, formant ainsi un circuit pratiquement fermé. De l'expérience *Hot Dry Rock*, il ressort qu'il est plus facile d'agrandir des fractures déjà existantes que de créer des fractures dans une roche compacte, d'où le terme *EGS*

Le grand avantage des EGS réside dans le fait que les exigences inhérentes à la création du système sont limitées et, dans les cas où le gradient thermique local est insuffisamment élevé, en

compensant par une profondeur supérieure, on augmente considérablement l'extension des secteurs adaptés à la production d'électricité géothermique.

La possibilité de satisfaire à l'avenir une part non négligeable de la demande d'énergie électrique par le biais de la géothermie s'appuie sur l'utilisation des EGS, c'est-à-dire sur la capacité à réussir à fracturer la roche, à faire circuler un fluide caloporteur sans qu'il soit dispersé dans le réservoir, et à maintenir sous des niveaux acceptables (non perceptibles par la population et non dangereux) la microsismicité induite par l'injection de fluide, ce qui est le cas de l'*Enhanced Oil Recovery*, pratique très répandue dans le secteur pétrolier.

III.5 La géothermie dans le monde :

III.5.1 Applications :

La plus ancienne application des sources thermales est la balnéothérapie. Elle fut utilisée par les grecs, les turques, les romains...etc.

La plus importante exploitation de la géothermie est dans le domaine de la production d'électricité. En 1904, le prince Piero Ginori Conti promut cette industrie pour la première fois dans le monde à Larderello en Italie.

C'est donc grâce à l'Italie qu'un élan considérable dans le domaine de l'exploitation de l'énergie géothermique a été accompli.

Après un demi-siècle, la Nouvelle Zélande commença alors la production de l'énergie géothermique: suivie par la suite par les États-Unis en Californie notamment et à San Francisco en particulier.

Depuis, bien d'autres Pays ont à leurs tours investis dans ce domaine, c'est le cas du Japon, du Mexique, du Salvador, de l'Islande et de la Turquie.

La diversité des applications découle de la nature de la demande et des caractéristiques de la ressource. À cet égard, il faut distinguer :

- 1) les zones continentales stables, dans lesquelles le gradient géothermique permet d'exploiter la chaleur du sous-sol, soit directement, soit par recours à des pompes à chaleur, à des profondeurs variables depuis la sub-surface jusqu'à 2000m ;

- 2) des zones géodynamiques actives, dans lesquelles le flux de chaleur plus élevé permet la production d'électricité à partir de la vapeur extraite par forage à une profondeur intéressante (500 à 2500m).

Les utilisations de la géothermie dans le monde sont nombreuses. Les Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température (d'après B. Lindal). [24]

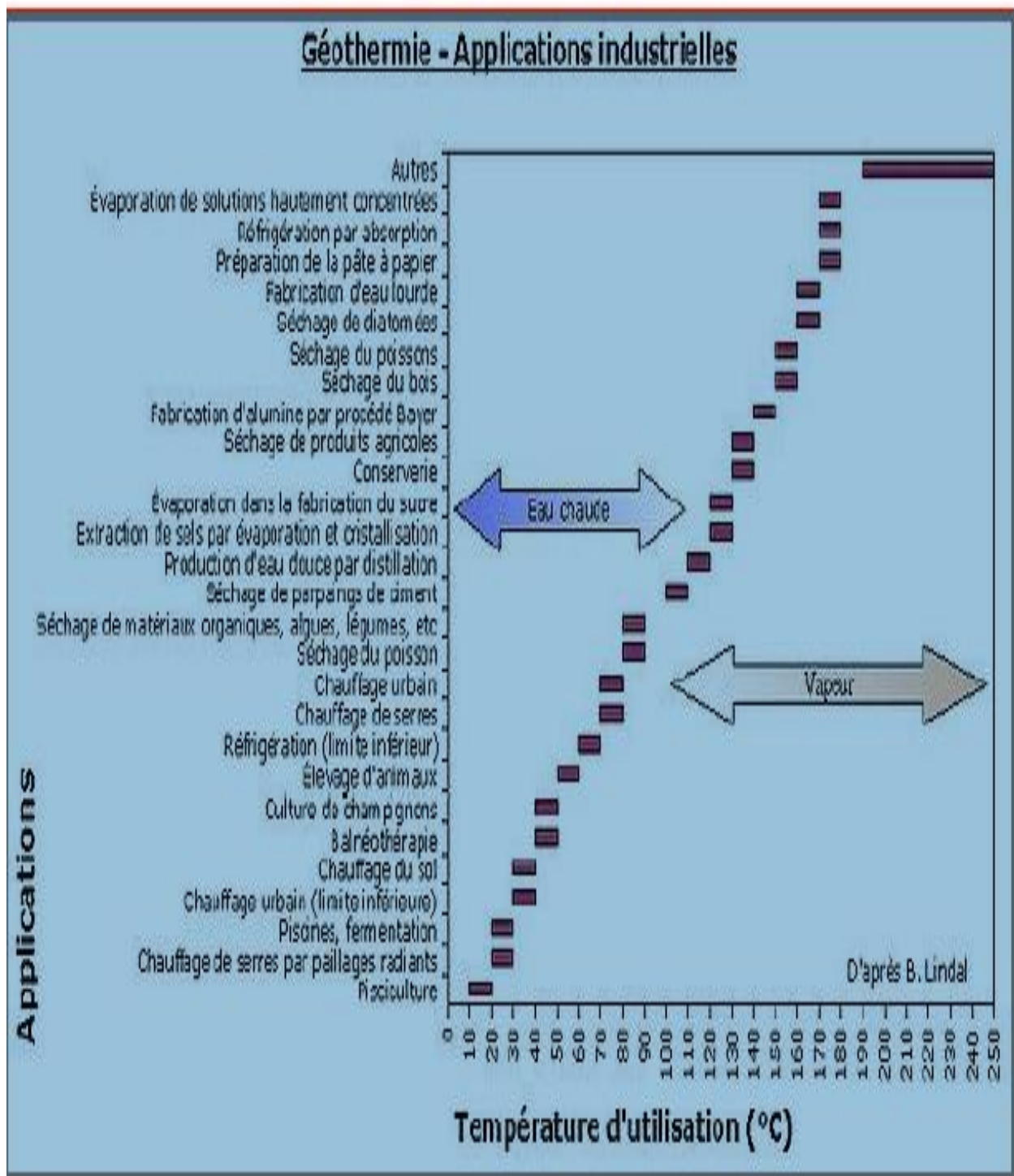


Figure III.6 : Diagramme de LINDAL. [24]

III.5.2 Exploitation géothermique : [20]

L'exploitation géothermique du sous-sol nécessite, en plus de la chaleur, l'existence d'un fluide capable de transférer cette chaleur depuis la profondeur jusqu' à la surface. Cette exploitation se fait par deux méthodes :

- 1) *Exploitation par puits unique* : L'exploitation par puits unique est conditionnée par les caractères physico-chimiques de l'eau géothermale. Ces caractéristiques doivent permettre un rejet en surface de l'eau, après extraction de l'énergie sans risque de pollution. Cependant, pour que le réservoir ne s'épuise pas, il faut qu'il y ait l'intervention d'une alimentation naturelle. En général l'eau pompée est très salée, et pour éviter tout risque de pollution, on fait appel à la méthode suivante.
- 2) *Exploitation par doublet* : Un doublet est l'ensemble de deux forages ; un destiné à la production de l'eau chaude et l'autre à sa réinjection après extraction de la chaleur.

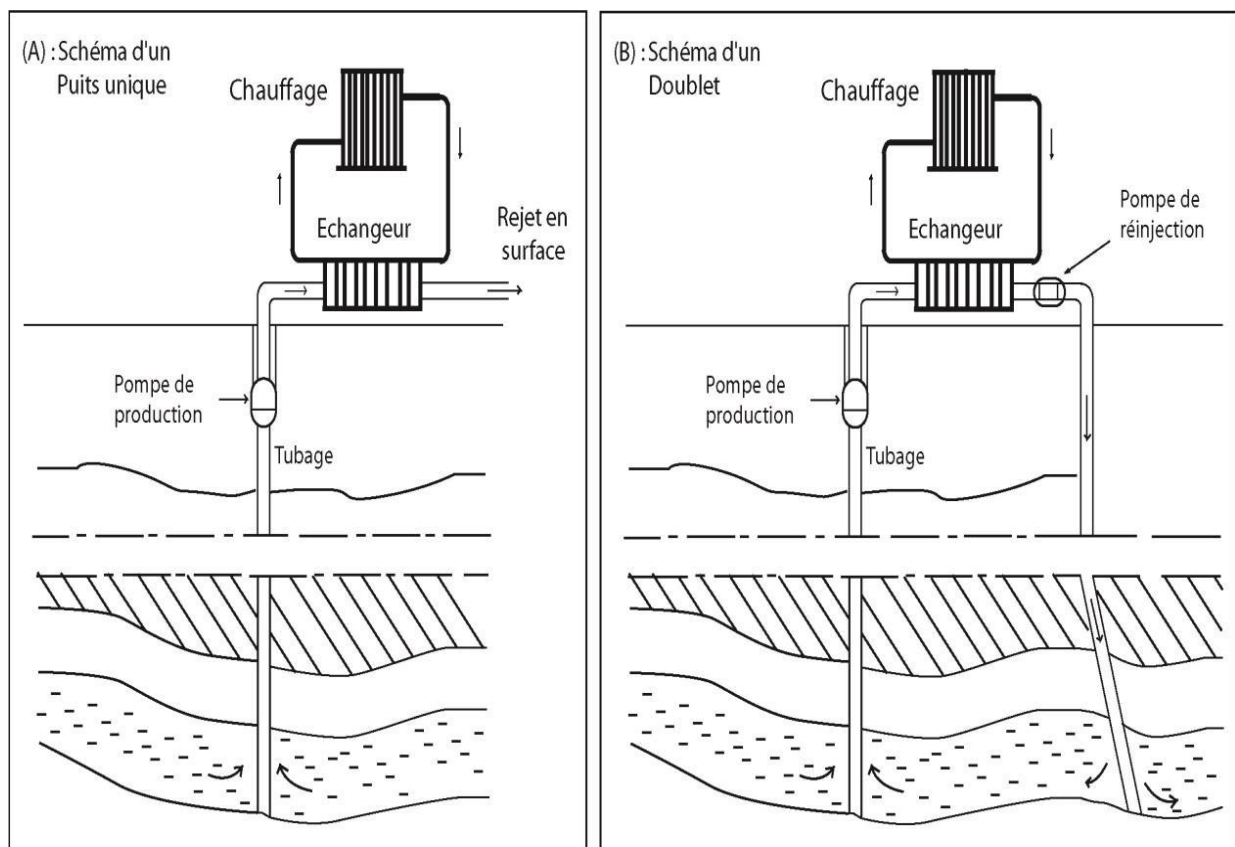


Figure III.7: Les modes d'exploitation en géothermie de basse enthalpie. [20]

La réinjection se révèle nécessaire lorsque le rejet de l'eau géothermale en surface, après son passage dans l'échangeur, n'est pas possible et aussi pour maintenir la pression dans le réservoir.

Le fluide géothermal suit ainsi un circuit que l'on appelle boucle géothermique (figure. III-1b) constitué par :

- ✓ un puits de production,
- ✓ la pompe de production,
- ✓ l'échangeur de chaleur,
- ✓ la pompe de réinjection,
- ✓ le puits de réinjection.

Le puits de réinjection doit être suffisamment éloigné du puits de pompage et ce pour que cette eau réinjectée ne provoque pas de refroidissement de la source au niveau du puits de production. Cette distance est généralement de 1000 à 1500m. Le doublet peut être exploité avec deux puits verticaux ou inclinés, ou avec un puits incliné.

III.5.3 Capacité énergétique :

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui produit deux types d'énergies, l'énergie électrique et l'énergie calorifique. Sur le plan exploitation, elle est classée troisième dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. Aujourd'hui, elle représente 3 % de la production énergétique mondiale dont 0.4 % dans l'énergie électrique.

L'énergie géothermique est aujourd'hui utilisée dans plus de soixante Pays, mais cependant elle est particulièrement développée dans certains pays seulement comme les États-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse. L'Islande étant un pays volcanique, il est par conséquent très riche en eau thermale.

Afin de rentabiliser ce type de gisements il faut surtout une bonne étude d'intérêt économique qui concerne tous les aspects, tels que, le coût des installations géothermiques, quantité de calorie fournie, transformation des calories en énergie...etc. [24]

Tableau III.3: Évolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en MWe. [24]

Pays	1995	2000	2002
Amérique du nord	3570	2983	2971
Amérique centrale et du sud	231	407	416
Totale Amérique	3801	3390	3387
Asie	1979	3075	3220
Union européenne	641	805	883
Autres pays d'Europe	81	213	297
Total Europe	722	1018	1180
Océanie	286	437	441
Afrique	49	54	128
Totale monde	6837	7974	8536

III.5.4 La géothermie en Algérie :

En Algérie, mis à part les utilisations balnéothérapies pratiquées d'ailleurs depuis les temps anciens, peu d'applications on vu le jour. La recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du CDER équipe géothermique de Bouzaréah.

III.5.4.1 Exploration :

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien ; parmi ces études on peut citer :

Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Prés de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) à Setif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord- Est et au Centre-Nord de l' Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du Continental intercalaire. [24]

III.5.4.2 Exploitation :

En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l'époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits.

Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales.

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

Depuis 1990, une récente application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara algérien. C'est dans la région de Touggourt qu'une première installation d'équipements destinés aux chauffages des serres est assurée par l'équipe du laboratoire Thermique du C.D.E.R

Bien que cette application ait donné de bons résultats, elle ne s'est pas encore généralisée et reste très modeste en rapport avec le potentiel géothermique du Sud algérien. Il reste cependant à noter que l'exploitation de l'énergie géothermique peut être facilitée considérablement au Sud de l'Algérie grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le sous sol saharien. [24]

III.6 Les avantages et les inconvénients de la géothermie :

III.6.1 Les avantages :

La géothermie a fait l'objet de longues années de débat mais est à ce jour considérée comme étant une énergie renouvelable. Une des raisons de ce questionnement était que la source utilisée est renouvelable mais fait appel à une source électrique qui ne l'est pas toujours. De plus, les réservoirs exploités ont une durée de vie de 30 à 40 années (refroidissement de la source). Cependant, chaque unité d'électricité utilisée pour faire fonctionner un système géothermique permet de produire trois à quatre unités d'énergie sous forme de chaleur.

La production d'énergie géothermique entraîne très peu de rejet de CO₂ (environ 20 fois moins que le charbon). La géothermie présente l'avantage d'être indépendante des conditions climatiques, des saisons et de l'heure contrairement à d'autres formes d'énergie propre comme

les éoliennes ou les panneaux solaires. Les installations ne sont pas encombrantes et leur entretien est bien moins coûteux que celui du gaz, du fuel ou des autres énergies renouvelables comme les pales des éoliennes qui nécessitent d'être changées tous les deux ans. La géothermie peut être mise en œuvre absolument partout, nous comptons déjà un grand nombre de sites adéquats sur tous les continents sans exception. D'autre part, c'est une énergie nationale, son développement permettrait donc de gagner de l'indépendance par rapport aux pays producteurs de pétrole. [31]

III.6.2 Les inconvénients :

Il existe des inconvénients liés à la mise en œuvre d'une centrale géothermique. Elle conduit notamment à des rejets de gaz autres que le CO₂ dans l'atmosphère (H₂S, SO₂, H₂SO₄). Citons également la microsismicité induite lors de simulations hydrauliques comme à Bâle (Suisse) où des séismes atteignant une magnitude de 3.4 se sont produits en 2006, causant plus de dommages psychologiques que matériels. La radioactivité naturelle peut également provoquer des problèmes : la circulation se fait dans des réservoirs cristallins riches en éléments radioactifs, des dépôts de minéraux enrichis en radioéléments peuvent donc être déposés en surface. Le bruit des turbines, aérocondenseurs et pompes ainsi que l'impact visuel des centrales qui s'intègrent mal dans le paysage peuvent constituer une réelle nuisance. Enfin, la géothermie est un concept complexe nécessitant beaucoup de recherche et de développement ainsi que des données de température précises, comme nous allons l'illustrer dans ce mémoire. [31]

III.7 La géothermométrie : [29]

L'hydrochimie joue un rôle dans l'exploitation en surface des manifestations thermiques. Ainsi, en se basant sur la composition chimique des points d'eau thermale, la géothermométrie permet la détermination de la température de l'eau profonde et, par la suite le calcul de la profondeur du réservoir qui est à l'origine de ces sources chaudes.

III.7.1 Définition :

Les méthodes géothermométriques chimiques ont une grande utilité pour connaître la température de profondeur du fluide thermal en équilibre avec la roche encaissante.

Les concentrations des ions dans l'eau sont contrôlées par des réactions chimiques qui dépendent de la température du dernier équilibre thermodynamique entre l'eau et la roche, cet équilibre a eu lieu dans l'aquifère, qui fonctionne comme un réservoir géothermique.

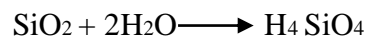
Tout constituant, dont la concentration est contrôlée par une réaction dépendante de la température, peut, théoriquement être utilisé comme géothermomètre ; mais, avec les conditions imposées suivantes :

- les réactions chimiques dépendent principalement de la température, et doivent avoir lieu en profondeur pour déterminer la concentration des éléments chimiques utilisés en géothermométrie
- les éléments qui interviennent dans les réactions chimiques doivent exister dans le réservoir.
- l'ascension de l'eau du réservoir vers la surface doit être rapide pour éviter les rééquilibrations des systèmes chimiques.

III.7.2 Géothermomètre à silice :

Le géothermomètre silice est basé sur la variation déterminée expérimentalement de la solubilité des différentes variétés allotropiques de la silice et en particulier du quartz, en fonction de la température et de la pression.

La réaction de solubilisation des différentes formes de silice (quartz, calcédoine et silice amorphe) :



Cette réaction est indépendante du pH, excepté si celui-ci est très élevé.

D'après la **figure III.8**, on voit que la variété allotropique précipitée dépend de la température de la solution.

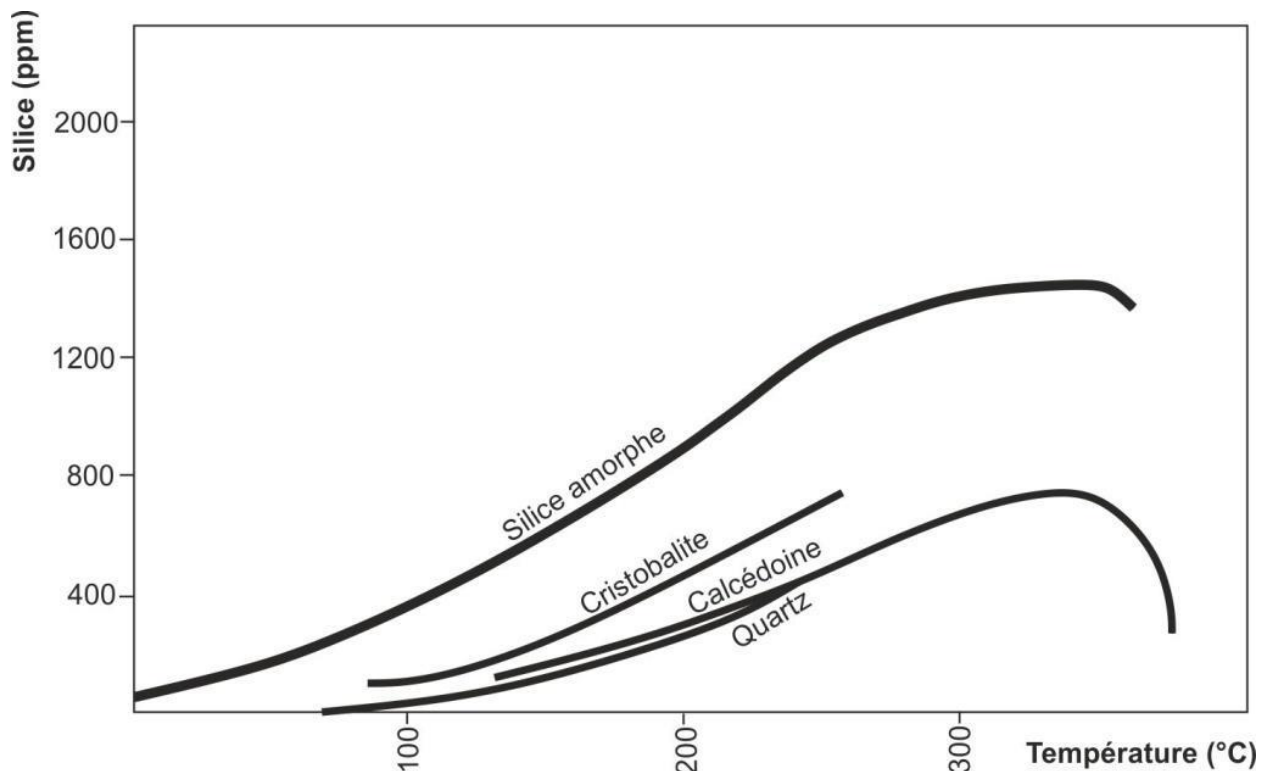


Figure III.8 : Relation entre température et teneur en silice.

- au dessus de 160°C, la forme précipitée est le quartz.
- entre 120°C et 160°C, précipite le quartz ou la calcédoine.
- au dessous de 120° C, précipite uniquement la cristobalite

- à la température ordinaire, on peut atteindre la solubilité de la silice amorphe.

Les équations utilisées sont établies par R. O. Fournier (1973) :

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \text{Log}SiO_2} - 273.15 \quad (\text{III.4})$$

III.7.3 Géothermomètre Na/k :

Le géothermomètre Na/K permet en théorie le calcul de la température maximale atteinte par l'eau en profondeur. Les teneurs en Na^+ et K^+ des eaux proviennent de la mise en solution de ces éléments vers la surface.

De nombreux auteurs ont présenté des courbes expérimentales et empiriques qui permettent de déduire directement la température en connaissant le rapport Na/K.

L'équation utilisée est:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{855.5}{0.857 + \text{Log}Na/K} - 273.15 \quad (\text{III.5})$$

Les teneurs en sodium et potassium des eaux proviennent de la dissolution de ces éléments par les eaux chaudes en profondeur dans les roches cristallines particulièrement dans les feldspaths. En l'absence de terrains évaporitiques dans la couverture sédimentaire, lors de la remontée des eaux chaudes vers la surface, ces teneurs ne varient pas.

III.7.4 Géothermomètre Na-k-Ca :

L'utilisation du géothermomètre Na-K-Ca proposé par Fournier et Truesdell (1973) fait intervenir l'ion Ca^{+2} provenant des plagioclases qui peut modifier les conditions de solubilité des autres éléments.

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1674}{2.24 + \text{Log}Na/K + \beta \left[\text{Log} \sqrt{\text{Ca}/\text{Na} + 2.06} \right]} - 273.15 \quad (\text{III.6})$$

$\beta = 4/3$ Pour $(\text{Log} (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na} + 2.06}) > 0$ et $T < 100^{\circ}\text{C}$

$\beta = 1/3$ Pour $(\text{Log} (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na} + 2.06}) < 0$ et $T > 100^{\circ}\text{C}$

III.8 Conclusion partielle :

Les sources chaudes sont d'excellents indicateurs du potentiel géothermique d'une région en fonction de leurs caractéristiques (température, débit, composition chimique) selon sa nature et son environnement, la géothermie offre un large éventail d'utilisations pratiques, de la simple pisciculture à la production d'électricité.

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes de notre travail commençant par la réalisation des analyses physicochimiques des eaux effectués sur les 02 échantillons prélevés des deux sources étudiées le long de la zone d'étude.

Des géothermomètres chimiques utilisés sont basée sur des méthodes géochimiques, qui permettent d'estimer la température du réservoir géothermique à partir de la composition chimique.

IV.2 Objectif de l'étude :

Le but du géothermomètre est d'estimer la température en profondeur, donnée par des concentrations des substances dissoutes en surface. Cette méthode suppose que des concentrations en profondeur sont préservées pendant que les eaux coulent sur la surface, et mesure le degré auquel les substances étaient en équilibre en profondeur.

IV.3 Mesures in situ :

Les mesures des paramètres physicochimiques in situ sont essentielles pour la reconstitution de l'état de l'eau à la sortie de l'hydro- système.

Les paramètres physicochimiques de l'eau mesurés sur site sont :

- 1) *La température* : La température d'une eau thermale est fonction de la profondeur du réservoir d'origine, de la longueur du trajet parcouru et de la vitesse de remontée. Elle est influencée par les mélanges avec les eaux superficielles et peut ainsi être variable d'une source à l'autre.
- 2) *Le potentiel d'hydrogène* : Le pH est par définition, la mesure de l'activité des ions H^+ contenus dans une eau. C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau.
- 3) *La conductivité électrique* : La conductivité électrique (CE) joue un rôle très important dans la connaissance de la minéralisation des eaux souterraines et principalement l'ensemble des cations et des anions dissous dans l'eau.

-Mesure de la Température :

Elle a été réalisée à l'aide d'une électrode reliée au multi paramètre portatif de marque **WATERPROOF**. La valeur de température est donnée en degré Celsius (°C).



Figure IV.1 : Model multi paramètre portatif de marque WATERPROOF

-Mesure du pH

La mesure du potentiel d'hydrogène de l'eau est réalisée à l'aide d'une électrode reliée au multi paramètre portatif de marque **WATERPROOF**



Figure IV.2 : Mesure de PH

-Mesure de la conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique, a été réalisée à l'aide d'une électrode reliée au multi paramètre portatif de marque **WATERPROOF**.

IV.4 Prélèvement et échantillonnage :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, il convient que le préleveur est une connaissance précise des conditions du prélèvement et de son importance pour la qualité des résultats analytique.

Une campagne de terrain réalisée en Mars 2017. Les eaux des différentes sources thermales présentes dans la zone d'étude (Ouarsenis-Biban-Kabylie) ont été analysées. Pour chacun des prélèvements, les paramètres physico-chimiques de terrain (température, conductivité et pH) ont été mesurés in situ. Les éléments chimiques majeurs ont été analysés par chromatographie ionique à détection conductimétrique (Dionex© ICS 90) au laboratoire EDYTEM de la Savoie université (UMR-CNRS 6524) et le laboratoire de chimie analytique du CRD de Boumerdès (Sonatrach). [20]

IV.5 Localisation des points de prélèvement :

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisie deux sources dans la wilaya de Bejaia. Le tableau ci-dessous regroupe des informations indispensables sur les deux points d'eaux sélectionnés.

Tableau IV.1: Caractéristiques principales des deux sources. [20]

Sources	λ (°)	Φ (°)	H(m)	Q (l/s)
Hamam Sidi Yahia El Aidli (S1)	4.59	36.41	300	10
Hamam Sillal (S2)	4.67	36.65	330	26

H = altitude, λ = Longitude et Φ = Latitude.

Tableau IV.2 : Résultats des analyses physicochimiques des deux sources (Mars-2017). [20]

ID Sources	T (°C)	PH	TDS	CE (mS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
S1	44	6.45	12720.1	19.5	36	47.1	4360	92	6400	1175	610	21
S2	46	6.30	2186	6.1	220	41	500	25	950	23	427	29

IV.6 Application de la géothermométrie chimique à la région d'étude :

IV.6.1 Géothermomètre à silice :

Tableau IV.3 : Application de géothermomètres chimiques (à Silice) dans la région

Géothermomètres	Formule	Condition d'application	Référence
<i>Quartz (pas de perte de vapeur)</i>	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \text{LogSiO}_2} - 273.15$	0-250 °C	<i>Fournier 1977</i>
<i>Quartz (avec perte de vapeur)</i>	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1522}{5.75 - \text{LogSiO}_2} - 273.15$	0-250 °C	<i>Fournier 1977</i>
<i>Calcédoine</i>	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1112}{4.91 - \text{LogSiO}_2} - 273.15$	0-250 °C	<i>Arnorsson 1983</i>
<i>Quartz</i>	$T^{\circ}\text{C} = -42.198 + 0.2831S - 3.6686 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 + 3.1665 \cdot 10^{-7} \cdot S^3 + 77.034 \cdot \log S$	0-250 °C	<i>Fournier et Potter 1982</i>

IV.6.2 Géothermomètre à cations :

Tableau IV.4 : Application de géothermomètres chimiques (à Cations) dans la région.

Géothermomètres	Formule	Conditions d'application	Référence
Na-k	$T^{\circ}C = \frac{855.5}{0.857 + \text{LogNa} / K} - 273.15$	T>120°C	Truesdell 1976
Na-k	$T^{\circ}C = \frac{833}{0.780 + \text{LogNa} / K} - 273.15$	25- 250°C	Tonani1980
Na-k	$T^{\circ}C = \frac{908}{692 + \text{LogNa} / K} - 273.15$	25- 250°C	Arnorsson 1983
Na-k	$T^{\circ}C = \frac{933}{0.993 + \text{LogNa} / K} - 273.15$	250- 350°C	Arnorsson 1983
Na-k	$T^{\circ}C = \frac{1217}{1.483 + \text{LogNa} / K} - 273.15$	T>120°C	Fournier198 3
Na-k	$T^{\circ}C = \frac{1178}{1.470 + \text{LogNa} / K} - 273.15$		Nieva1987
Na-K	$T^{\circ}C = \frac{1390}{1.750 + \text{LogNa} / K} - 273.15$	T>350° C	Giggenbach 1988
Na-K-Ca	$T^{\circ}C = \frac{1674}{2.24 + \text{LogNa} / K + \beta [\text{Log} \sqrt{\text{Ca} / \text{Na}} + 2.06]} - 273.15$		Fournier et Truesdell 1973

IV.7 Le potentiel géothermique :

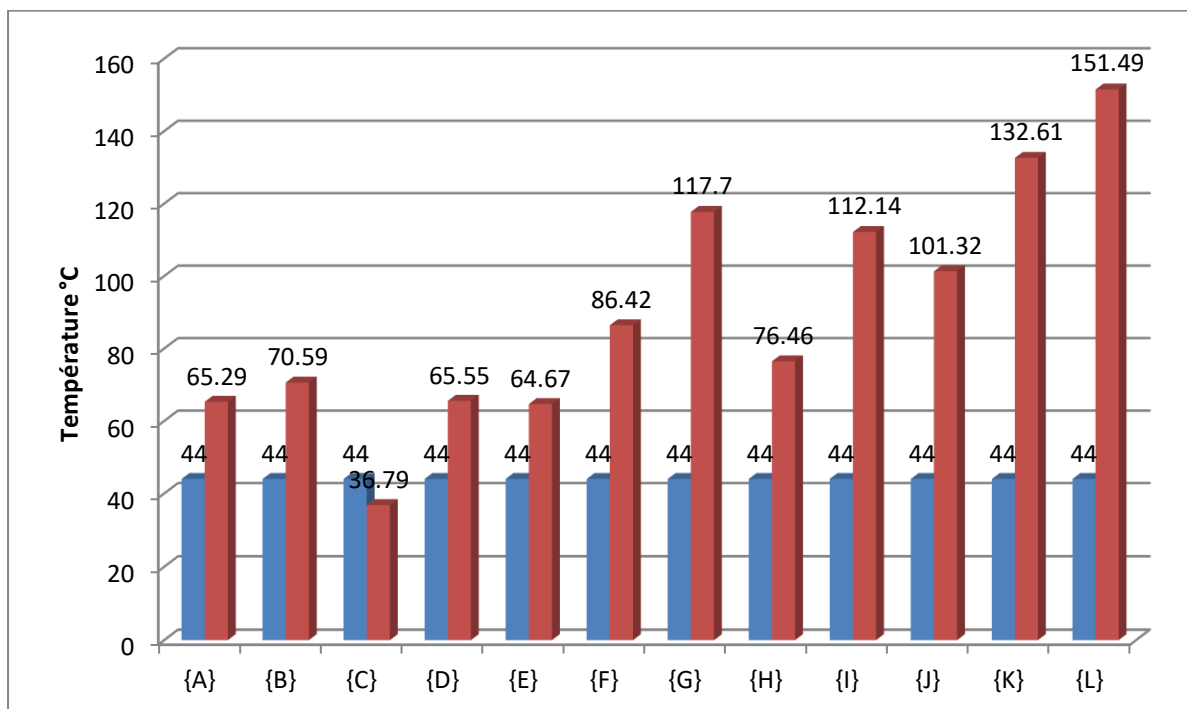
IV.7.1 Calcul du potentiel géothermique à partir des températures et des débits :

Le potentiel géothermique est calculé en utilisant l'équation suivante **(IV.1)** (Signorelli, 2004) où P correspond au potentiel géothermique (kWth), Q est le débit de la source en (l/s), T est la température initiale (°C), et t est la température finale après le refroidissement (°C), arbitrairement fixé au 10° C. Les débits utilisés sont issus de quelques études récentes sur les sources thermales du nord Algérien. [20]

$$Po = 1000 \frac{Q(T-t)}{239} \quad \text{IV.1}$$

V.1 Températures calculées par la géothermométrie chimique :*Tableau V.1 : Température du réservoir obtenue par la géothermométrie (°C)*

Géothermomètres		S1	S2
(1) Quartz, fournier1977	{A}	65,29	78,01
(2) Quartz, fournier1977	{B}	70,59	81,83
(3) Calcedoine arnorsson 1983	{C}	36,79	49,39
(4) Quartz Fournier et poter 1980	{D}	65,55	78,51
Na/K truesdell1976	{E}	64,67	123,32
Na/K tonani1980	{F}	86,42	151,16
Na/K Arnorsson1983	{G}	117,7	166,51
Na/K Arnorsson1983	{H}	76,46	133,56
Na/K Fournier1983	{I}	112,14	163,99
Na/K Nieva1987	{J}	101,32	151,96
Na/K giggenbach 1988	{K}	132,61	182,43
Na k Ca Fournier et Truesdell1973	{L}	151,49	143,98

*Figure V.1 : Application de la géothermométrie sur la source**« hamamSidiYahia El aidli ».*

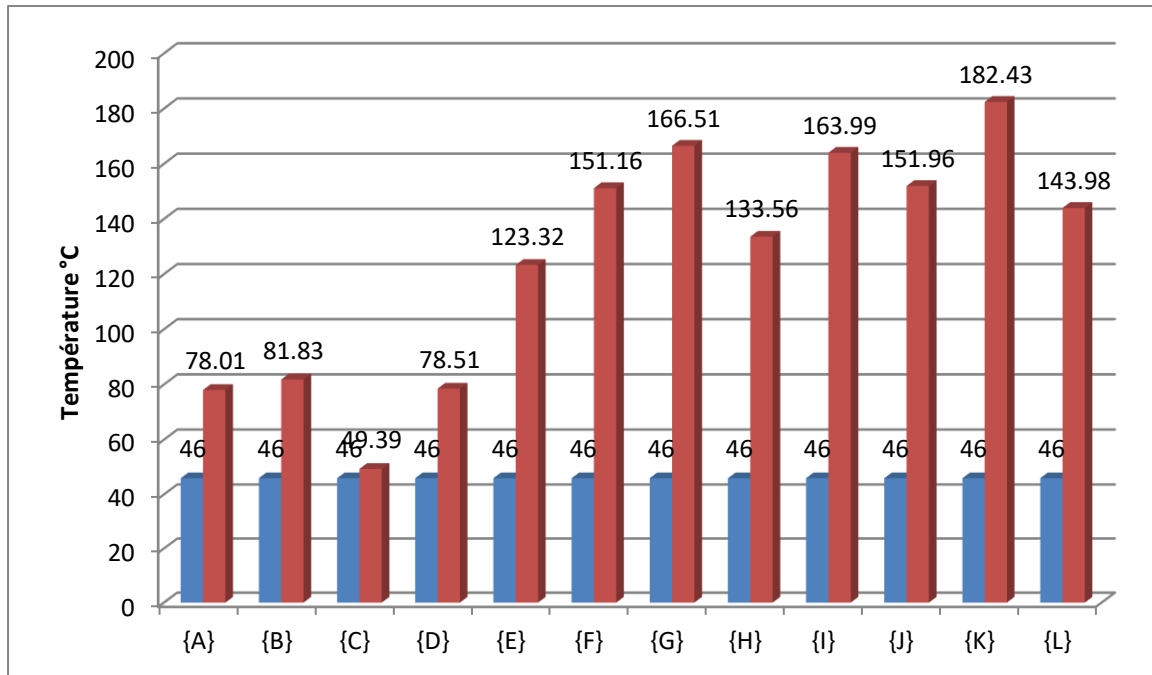


Figure V.2 : Application de la géothermométrie sur la source
« Hammam Sillal ».

V.2 Interprétation des résultats obtenus :

Les concentrations des espèces chimiques dissoutes dans les fluides géothermaux sont une fonction de la température de l'eau dans l'aquifère et de l'assemblage minéralogique altéré. Ces espèces dont la concentration est contrôlée par une réaction thermo dépendante peuvent, théoriquement, être utilisées comme supplémentaires doivent être remplies. Ces conditions incluent :

La disposition d'une quantité suffisante de ces espèces chimiques ; l'établissement d'un équilibre entre l'eau et les minéraux dans le réservoir ; l'absence d'interaction additionnelles lors de la remontée du fluide jusqu'au point d'échantillonnage (précipitation et/ou dissolution de phases secondaires au cours de la remontée du fluide.

Cette technique suppose la présence d'équilibre entre la roche et le fluide en profondeur du réservoir avant la remontée des eaux vers la surface .

La température du réservoir estimée varie de 36,79°C à 182,43°C pour l'ensemble des géothermomètres étudiés.

Les températures de profondeur obtenues par les différents géothermomètres donnent des résultats différents et parfois anormaux (inférieures à la température d'émergence). Cette différence peut être expliquée par des phénomènes de dilution avec les eaux superficielles.

Les géothermomètres à cation donnent de fortes valeurs de l'ordre de 182,43° C pour les sites d'étude. La forte valeur de la température des géothermomètres à cations est due à l'origine des éléments chimiques Na et K, qui proviennent de la dissolution des minéraux argileux en faibles profondeur.

D'autre part le géothermomètre à Quartz est le plus efficace pour l'estimation de la température du réservoir géothermique, parce que le Quartz contrôle la dissolution de la silice.

V.3 Calcul du potentiel géothermique :

Tableau V.2 : Calcul du potentiel géothermique des deux sources thermales.

	<i>Q (l/s)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>t (°C)</i>	<i>Po(KW_{th})</i>
<i>S1</i>	26	44	10	3698.74
<i>S2</i>	10	46	10	1506.27

La distribution du potentiel géothermique dans les deux sites pilotes (Hammam Sidi-Yahia et Hammam Sillal) est en harmonie avec la variation des températures des sources thermales avec leurs débits respectifs. Le tableau (V.2) illustre la répartition du potentiel géothermique calculé sur les deux sites étudiés.

Un important potentiel géothermique est observé dans la source *S1* d'une valeur plus de 3698.74 kW_{th}.

Ce potentiel présente un excellent intérêt économique dans les domaines suivant : Chauffage domestique, chauffage des serres agricole et pompe à chaleurs.

Comme on observe une valeur moyenne calculé pour la source *S2* de l'ordre de 1506.27 kW_{th}.

Divers applications seront possible pour la source *S2* tels que : le tourisme thermique, l'aquaculture et le séchage des produit agricole.

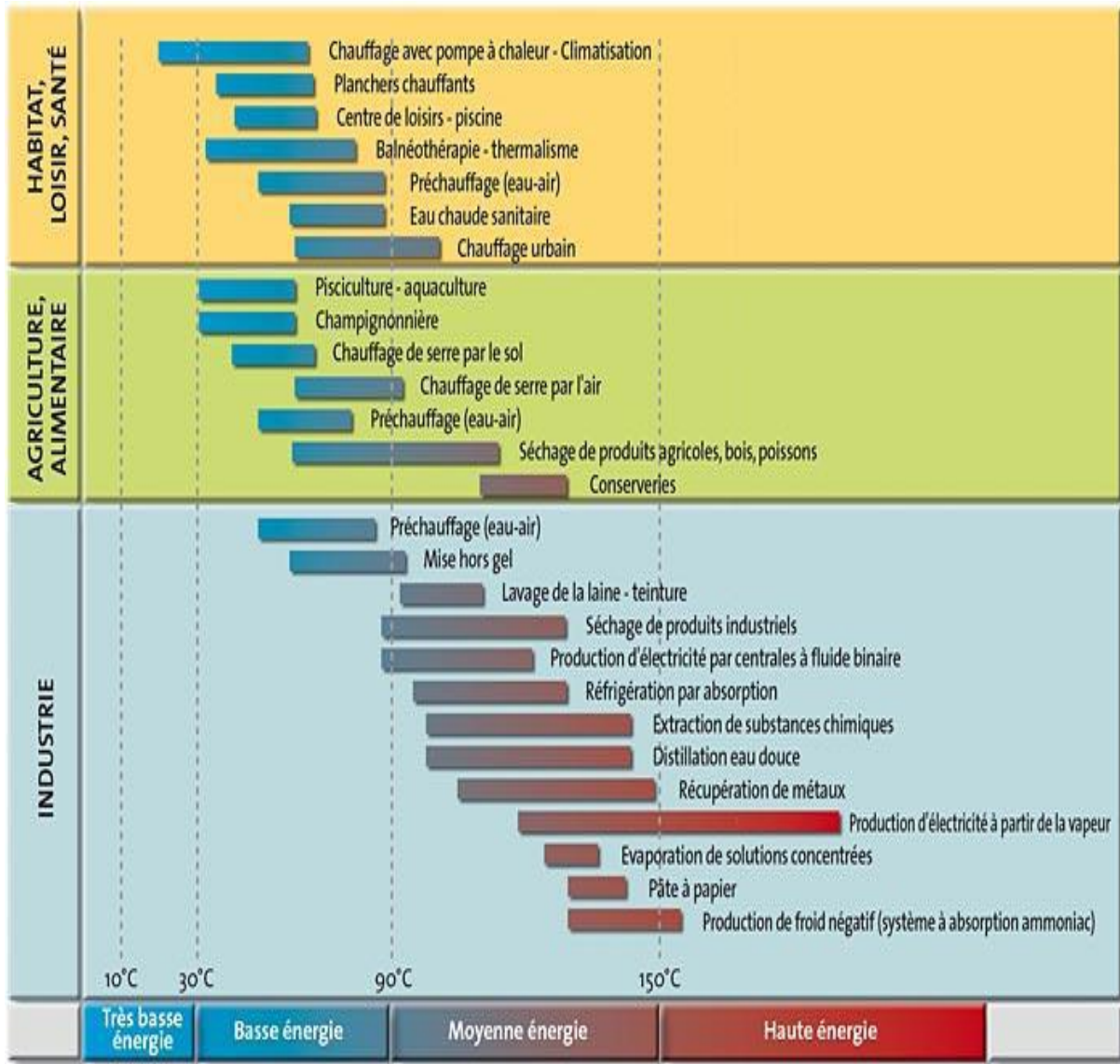


Figure V.3: Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures.

V.4 La possibilité d'utilisation thérapeutique:

V.4.1 Résultats des analyses et faciès chimique :

Au total 02 échantillons ont été pris en considération, et les résultats des analyses chimiques, sont consignés dans le (Tableau V.3)

Afin de vérifier la fiabilité des analyses, on a vérifié les résultats obtenus en établissant la balance ionique pour chaque analyse, nous avons établi la formule ionique et cela en classant par ordre décroissant de gauche à droite par ordre décroissant les anions puis les cations.

A partir de ces formules ioniques, découle le faciès spécifique de chaque analyse (Tableau V.3).

Tableau V.3 : Formules ioniques et le faciès spécifique de chaque analyse.

Source thermale	Formule caractéristique (ionique)	Faciès chimique
S1	$rCl > rSO_4 > rHCO_3$ $rNa > rCa > rMg > rK$	Chloruré sodique et faiblement sulfaté calcique
S2	$rCl > rHCO_3 > rSO_4$ $rNa > rCa > rMg > rK$	Chloruré sodique et bicarbonaté calcique

Diagramme de Piper pour les sources thermale étudiées

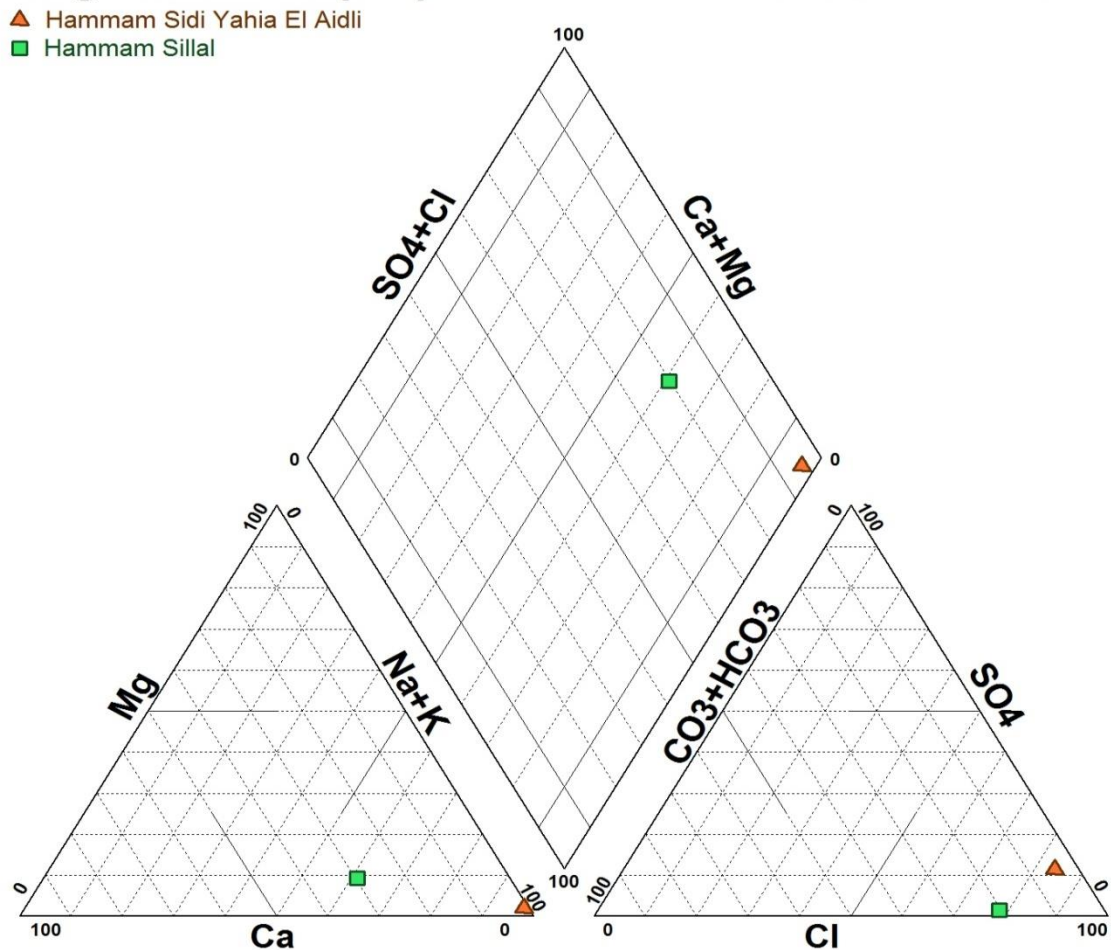


Figure V.4 : Diagramme de Piper des deux sources étudiées.

D'après les analyses chimiques reportées sur le diagramme de Piper, on observe une dominance d'un faciès **chloruré et carbonaté calcique et Sodique**. Cela est lié à la géologie locale de la région.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude, réalisée dans le cadre d'étude de potentialité énergétique des eaux géothermale du système aquifère de Nord d'Algérie.

Les géothermomètres chimiques utilisés, sont basée sur des méthodes géochimiques, permettent d'estimer la température de réservoir géothermiques du site étudié, la température moyenne des deux réservoirs étudiés est de 60°C pour « Hammam Sidi Yahia El Aidli » et 70°C pour « Hammam Sillal ».

Sur la base des résultats précédents et afin d'assurer une meilleure exploitation possible des ressources géothermiques du site étudié, il est suggéré l'utilisation de la géothermie à basse énergie, dans :

- Le chauffage de l'habitat ou/et pour produire l'eau chaude sanitaire avec la mise en place par exemple de réseaux de chaleur urbains capables de desservir plusieurs milliers de logements.

Les deux applications principales de la géothermie dans le domaine agricole sont la pisciculture et les serres agricoles. Il y a aussi d'autres applications telles que le chauffage des piscines, d'établissements thermaux, de champignonnières, de bassins de pisciculture, et de locaux de séchage de bois.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **KOUIDRI.A,RAHMOUNI.A** , *CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE ET L'EVOLUTION DES FACIES HYDROCHIMIQUES DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE DE LA REGION D'ADRAR, UNIVERSITE de TLEMCEEN,2016.*
- [2]**BOUDJELIL.el,DJAFARIA.A** , *Étude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Souk El Tenine par la méthode GALDIT, Université Abderrahmane Mira-Bejaia,2018.*
- [3]**OULD FAH.M**, *Étude hydrologique du bassin versant de la Soummam, Université Mouhamed Boudiaf-M'SILA ,2016.*
- [4]**A.N.R.H.**, 1979, 1980 : *Annuaire hydrologique de l'Algérie, Alger.*
- [5]**Charifi.S**, *Application du modèle hydrologique GR2M sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser. Mémoire de magistère, École National polytechnique,Alger ,2006.*
- [6]**DHWB, 2006**,*Étude de la protection de la ville de Bejaia contre les inondations (Rapport de la mission C « Hydrologie »).Bureau d'étude : INGEROP.*
- [7]**Beyragued.A ,Boudiaf.A** ,*CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA BASSE VALLEE DE LA SOUMMAM-BEJAIA, Université Mouhamed Boudiaf-M'SILA ,2017.*
- [8]**KESSASRA.R**, *Étude hydrogéologique sous l'aspect de la modélisation mathématique en vue d'une gestion rationnelle des écoulements souterrains de la vallée de la Soummam, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène, 2006.*

[9] **Nedjaï.R**, 'Étude Hydrogéologique et Hydro chimique des Eaux Thermales du Centre Algérien (Nord)', Thèse de Doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1987.

[10] **Quevauviller .ph**, 'Protection des eaux souterraines', Edition Tec et Doc Paris, Lavoisier, 2010 .

[11] <https://www.kartable.fr/ressources/svt/cours/sedimentation-et-milieus-de-dimentation/49853>.

[12] **Bakalowicz,M**, *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les regions karstiques*, Guide technique n°3, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon, 1999.

[13] **AMRANE.M, TIFOUR.H**, *Évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux thermales de Hammam Righa « Ain Defla »*, Université de Khemis-Miliana, Algérie, 2018.

[14] **POROWSKI.A**, *Mineral and thermal waters. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Germany, 2018.

[15] **LAKHDARI.F, BOUAICHA.k**, *Diagnostic de la qualité des eaux de source et thermales De la Wilaya de Saida-Algérie- Effets thérapeutiques*, Université Abdelhamid Ibn Badis- Mostaganem, Algérie, 2016.

[16] **Rafalimanana.J.M**, *Possibilité d'aménagement de microcentrale géothermique à Madagascar. Site d'Andranomafana Betafo*, Mémoire d'Ingénieur en Hydraulique, Ecole Supérieur Polytechnique, Antananarivo, 1982.

[17] **Guigue.S**, *Les sources thermo minérales de l'Algérie*, ' Étude géochimique, Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie', série 3, volume 2, 1947.

[18] **Olivier Grière**, *Exploitation des eaux thermales. Qualification de la ressource et stabilité des fluides*, La Houille Blanche, 1996.

[19] **ABEDERRAHMANI.L, BOUABBA.N**, *Etude de la qualité physico-chimique de différentes eaux minérales consommées en Algérie*, Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, 2019.

[20] **Ait Ouali.A.**, *Etude des Potentialités Géothermiques du Tell Centre Algérien : Région des Bibans*, 2020.

[21] **STACEY F.D., LOPER D.E.**, *Thermal history of the Earth : a corollary concerning non-linear mantle rheology*, in *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 53, pp. 167-174, 1988.

[22] **BOMBARDA.A ,GAIA.M.**, *Énergies géothermique :une importante ressource cachée*, *Encyclopédie de l'Algérie*, 2017.

[23] **Ouali.S** , *Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie* , *Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene*, 2015.

[24] **Ouali.S.**, *Étude géothermique du sud de l'Algerie* ', *Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bouguerra-Boumerdes* , 2005.

[25] **Jacques VARET**, *Géothermie basse énergie : Usage direct de la chaleur. Les objectifs scientifique du demain*, 13, *MASSON Paris - New York - Barcelone - Milan - Mexico - Rio de Janeiro*, 1982.

[26] **L.Y. Bronicki**, in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2013.

[27] **Benfateh.H.**, *Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat*, *mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra*, 2009.

[28] www.geothermie-perspectives.fr, 2019

[29] **Mekbret.I.**, *Synthèse hydrogéologique et origine de la salinité des eaux thermo-minérales du littoral oranais par les méthodes géochimiques et isotopiques* , *Université d'Oran 2* , 2017.

[30] **Aurele Parriaux**, *Géologie bases pour l'ingénieur, deuxième édition revue et augmentée*, 2009.

[31] **GARIBALDI.C.**, *Détermination des températures profondes du bassin SUD-EST de la France et relations entre anomalies thermiques, géologie et circulations hydrothermales par modélisation 3D*, *Université de Nice-Sophia Antipolis*, 2010.

[32] **Garneau M. et Fauteux M.**, *Geysers et sources thermales* , 2006.

[33] **Roch.M**, *Hydrologie de surface*, Ed. Gauthier-Villars, Paris 1963.

ملخص

تتعامل الطاقة الحرارية الأرضية مع الحرارة التي تأتي من أعماق الأرض والتي تنتقل إلى المناطق الأقرب إلى السطح مما يؤدي إلى تسخين المياه الجوفية. يمكن العثور على الينابيع الحرارية الأرضية في جميع أنحاء العالم، وهي متوفرة ودائمة شهدت المنطقة الشمالية من الجزائر تحضراً سريعاً مع ارتفاع الطلب على الطاقة أياً كان شكلها (التدفئة أو الكهرباء).

تتناول هذه الأطروحة دراسة الطاقة الحرارية الأرضية وتأثيرها الاجتماعي والاقتصادي، من خلال التعرف على المصادر الحرارية لمنطقة ولاية بجاية ثم تقدير درجة حرارة خزانات الحرارة الأرضية باستخدام القياس الهندسي الكيميائي. وفي النهاية، سوف نحتاج إلى تقييم الإمكانيات الحرارية الأرضية استناداً إلى العوامل الفيزيائية الكيميائية للينابيع الحرارية.

الكلمات المفتاحية الطاقة الحرارية الأرضية، درجة الحرارة، الهندسة الأرضية الكيميائية، القدرة الحرارية الأرضية

Résumé

La géothermie traite de la chaleur qui provient des profondeurs de la terre et qui se transmet vers les zones les plus proches de la surface chauffant ainsi les eaux souterraines. Les sources géothermales se trouvent un peu partout à travers le globe, elles sont disponibles et en permanence.

La région Nord de l'Algérie a subi une urbanisation rapide avec une forte demande en énergie quelque que soit sa forme (chauffage ou électricité).

La présente étude traite de l'énergie géothermique et son impact socioéconomique, en identifiant les sources thermales de la région de la wilaya de Bejaia, ensuite l'estimation de la température des réservoirs géothermiques à l'aide de la géothermométrie chimique. Au final, on aura besoin d'évaluer le potentiel géothermique à base des paramètres physico-chimique des sources thermales.

Mots clés : Énergie géothermique, Température, Géothermométrie chimique, Potentiel géothermique.

Absract

Geothermal energy deals with the heat that comes from the depths of the earth and is transmitted to the areas closest to the surface, thus heating the groundwater. Geothermal sources are found all over the world, and are permanently available.

The northern region of Algeria has undergone rapid urbanization with a high demand for energy in any form (heating or electricity).

The present study deals with renewable energy (geothermal energy) and its socio-economic impact, by identifying the thermal springs in the region of the wilaya of Bejaia, then estimating the temperature of geothermal reservoirs using chemical geothermometry. Finally, we will need to evaluate the geothermal potential based on the physico-chemical parameters of thermal springs.

Keywords : Geothermal energy ,Temperature,Chemical geothermometry, Geothermal potential.