

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Centre Universitaire ALI KAFI Tindouf**

**Institut des Sciences et de la Technologie**

**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**



## **MEMOIRE**

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master**

**Spécialité : Hydrogéologie**

*Présenté et Soutenu Par :*  
**BOUGUERN ABDELHALIM**

### ***Intitulé***

**Origine et Géothermie des Eaux Thermales  
De la Station de Ain-Ouarka  
(Atlas Saharien Occidental)**

*Soutenu le :25/05/2021*

**Devant le Jury :**

**HAMI KHELIFA**

**MCA**

**Président du Jury**

**ZEROUAL IBRAHIM**

**MCA**

**Examineur**

**MME DJELLOULI DELLA KHEIRA**

**MAA**

**Examinatrice**

**TALHI Abdelkrim**

**MCA**

**Directeur de Mémoire**

**Année Universitaire 2020-2021**

# DEDICACE

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mes parents à qui je dois tous les succès de ma vie

A mes frères et sœurs

A ma petite famille

A ma femme

A Tous mes enseignants

Mon plus grand ami

(KADDOUR Bacheikh)

## REMERCIEMENTS

Dieu soit remercié de m'avoir aidé, orienté et me donné la foi et le courage pour terminer ce travail, après une si longue rupture avec les études qui a durée 25 années. Je tiens à remercier mon Directeur de Mémoire Mr : TALHI Abdelkrim pour la confiance, son aid et d'avoir accepté de me faire bénéficié de son savoir et de son expérience en physique et en énergie renouvelable. Merci pour sa disponibilité et son encouragement constant. Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir pris le temps de juger mon travail

Monsieur : HAMI KHELIFA, président du jury, Monsieur : ZEROUAL Ibrahim, Madame DJELLOULI (DELLA KHEIRA), Examineurs.

Merci pour toutes leurs remarques et conseils que j'ai essayé de suivre pour finaliser ce document.

Je remercie chaleureusement le docteur Monsieur : HAMI KHELIFA directeur de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre pour son soutien permanent aux étudiants. Je remercie chaleureusement le Professeur Madame YAHIOUI FATNA Directrice du centre universitaire de TINDOUF. J'ajoute une mention spéciale à Monsieur le professeur : BENDELLA Mohammed pour sa disponibilité et ses explications sur la géologie de la région de Ain-Ouarka, le soutien de monsieur ZEROUAL Ibrahim, sans oublier mes brillants enseignants Monsieur BEKKOUCHE Fouazi et monsieur DJELLOULI et monsieur SENOUCI qui nous ont inculqué des notions sur l'hydrogéologie, la mécanique des sols et la gestion intégrée des ressources en eaux.

Un grand remerciement aux agents du laboratoire d'analyses des eaux de l'Algérienne des Eaux de la wilaya de Naâma. Je tiens à remercier très vivement ma femme pour son soutien psychologique, sa disponibilité, sa compréhension, sa patience, ses qualités humaines et son amour durant tout mon séjour loin de la famille et des enfants.

Un grand merci pour mes frères et mes sœurs pour leur encouragement et leur soutien. Un grand merci pour mon plus grand amis Monsieur : BACHIKH KADDOUR cadre d'état pour son encouragement et son soutien.

# SOMMAIRE

## Introduction Générale :

1	Introduction.....	1
2	Présentation de la zone d'Etude .....	4

## CHAPITRE I: GEOLOGIE

1	Introduction.....	8
2	Présentation Générale de l'Atlas Saharien.....	8
2.1	Contexte Géographique Générale .....	8
2.2	Aperçu géographique et géologique des Monts des Ksour.....	9
2.3	Cadre géologique et structural des Monts des Ksour.....	10
2.3.1	Cadre structural.....	10
2.3.2	Cadre géologique .....	12
2.4	Tectonique souple .....	15
2.5	Tectonique cassante .....	15
3	Position Stratigraphique des Dolomies du Chemarikh dans la série du Jurassique et histoire Paléogéographique du Secteur D'AIN OUARKA. gras .....	17
3.1	Coupe de référence des formations des Monts des Ksour .....	17
3.2	Grands traits Paléogéographique du secteur d'étude au cours du Jurassique inférieur et moyen .....	18
4	Historique .....	20
4.1	Brefs rappels des travaux antérieurs .....	20
5	La Tectonique du Secteur d'Etude.....	22
5.1	Rappel sur les éléments tectoniques.....	22
5.1.1	Généralités.....	22
5.1.2	Les éléments Planaires .....	20
6	Conclusion .....	23

## CHAPITRE II: CLIMATOLOGIE

1	Introduction.....	26
2	Etude des Précipitations.....	26
2.1	Répartition des précipitations moyennes annuelles à la station d'Ain-Sefra (1980-2008) : .....	26
2.2	La Pluviométrie .....	27
2.2.1	Précipitations Mensuelles.....	28
3	Etude des Températures.....	29

3.1	Définitions .....	29
3.2	Les moyennes mensuelles .....	30
3.3	Amplitude Thermique .....	30
3.4	Interprétations .....	31
4	Etude du Climat.....	31
4.1	Définition.....	31
4.2	Courbe pluviothermique (P = 2T) (Fig 20): (méthode de GAUSSEN et BAGNOULS). [26] .....	32
4.3	Courbe ombrothermique (Méthode d'EUVERTE).....	32
5	Le rapport entre précipitations et températures: Le rapport P/T représenté .....	34
6	Indices Climatiques Généraux .....	35
6.1	Indice d'aridité de De Martonne (1926) .....	35
6.1.1	Indice Annuel (Ia) de DEMARTON .....	36
6.1.2	Indice Mensuel (Im) de DEMARTON: Il est obtenu par la relation .....	37
6.2	le quotient pluviométrique .....	34
6.3	indice climatique d'Emberger .....	38
6.4	indice de Stewart: Cet indice est donné par la relation .....	39
7	Conclusion .....	40
<b>CHAPITRE III: HYDROCHIMIE</b>		
1	Introduction.....	42
2	Définition des eaux Thermales ou Minérales .....	43
3	Acquisition de la Minéralisation .....	43
4	Phénomènes Ecrans .....	44
4.1	Baisse de pression.....	44
4.2	Oxydation .....	44
4.3	Variations de température .....	44
5	Dissolution/précipitation de phases minérales.....	44
5.1	La Minéralisation.....	45
5.2	Paramètres physico-chimiques .....	46
5.2.1	La conductivité .....	47
5.2.2	Le potentiel hydrogène de l'eau (pH) .....	47
5.3	Caractéristiques chimiques.....	47
5.3.1	Les éléments majeurs.....	48
5.3.1.1	Le magnésium .....	48
5.3.1.2	Le Sodium et le Potassium (Na+ + ; K+).....	48

5.3.1.3	Le sodium.....	49
5.3.1.4	Le potassium.....	49
5.3.1.5	Le Calcium (Ca++) .....	49
5.3.1.6	Les chlorures .....	49
5.3.1.7	Les sulfates .....	50
5.3.1.8	Les bicarbonates .....	50
5.3.1.9	Le Fer .....	51
5.3.1.10	Le Souffre.....	51
5.4	Etude des Rapports caractéristiques.....	51
5.4.1	Rapport $r_{Ca^{++} + Mg^{++} +}$ .....	51
5.4.2	Rapport $Ca^{++} - Mg^{++} -$ .....	51
5.4.3	Rapport $Ca^{++} - Mg^{++} -$ .....	52
5.5	Classification d'ALEKINE des eaux thermales de Ain-Ouarka.....	52
5.5.1	Faciès Chimique .....	52
5.6	Le Résidu Sec .....	55
6	Conclusion .....	56
<b>CHAPITRE IV: GEOTHERMIE</b>		
1	Introduction.....	58
2	Les Utilisations des Energies Renouvelables.....	58
2.1	Principe de la géothermie .....	59
2.2	Sources thermales .....	60
2.3	Types de gisements géothermiques A travers le monde : Il existe trois catégories de gisements géothermiques.....	60
3	Types de géothermie.....	61
3.1	Géothermie haute énergie.....	61
3.2	Géothermie basse énergie.....	62
3.3	Géothermie très basse énergie .....	63
4	Les avantages et les inconvénients de la géothermie: .....	63
4.1	Les avantages.....	63
4.2	Les inconvénients .....	64
5	La géothermie dans le monde .....	64
5.1	Les applications .....	64
5.2	La capacité énergétique.....	65
5.3	La Production Mondiale de la Géothermie en 2018 .....	66
6	Forage géothermique.....	67

6.1	La géothermie en Algérie .....	67
6.2	Les ressources géothermiques en Algérie .....	68
6.3	L'exploitation En Algérie.....	68
6.4	Les Forages Pétroliers en Algérie.....	68
7	Le Gradient géothermique .....	69
7.1	Origine du gradient géothermique .....	69
7.2	Calcul du gradient géothermique.....	71
7.3	Le flux de chaleur .....	72
8	Détermination de la conductivité thermique.....	73
9	Le Puit Canadien .....	77
10	Prototype.....	78
10.1	Le Coût de l'Investissement .....	79
10.2	Le budget à prévoir pour l'installation d'un puits canadien .....	79
10.3	Bilan Energétique .....	79
11	Domaines d'Applications .....	79
12	Modélisation du système .....	80
12.1	Transfert Thermique.....	80
13	Conclusion .....	82
14	Recommandations .....	82
15	Références Bibliographiques .....	84
16	Annexes .....	85

## Liste des Figures :

Figure 1: Hamam Ain-Ouarka [3] .....	5
Figure 2: Flanc du Djebel CHEMARIKH et Ain-Ouarka [3] .....	5
Figure 3: Situation de la Zone d'Etude dans la Wilaya de Naâma [3].....	6
Figure 4: Limites géographiques des différents domaines géologiques [5] .....	9
Figure 5: Carte Structurale et Localisation du secteur d'Etude [5].....	10
Figure 6: Situation Générale des Monts des Ksours simplifié [2].....	11
Figure 7: Carte de Situation des principaux affleurements d'une mosaïque de 4 Scènes.....	12
Figure 8: Coupe lithostratigraphique de Formation du Lias et du Dogger .....	13
Figure 9: Cadre Géologique du secteur d'Ain-Ouarka [2] .....	14
Figure 10: Alignement Tectonique de l'Atlas Saharien Occidental Echelle: 1/100.000 [5].....	16
Figure 11: Carte géologique du secteur de Ain-Ouarka [5].....	18
Figure 12: Coupe lithostratigraphique de formation du Lias et du Dogger .....	19
Figure 13 : Succession lithostratigraphique de référence de Djebel Chémarikh [5] .....	23
Figure 14: Faille Normale [8] .....	23
Figure 15: Faille Décrochantes [8].....	24
Figure 16: Variations des Précipitations Annuelles à la Station d'Ain-Séfra [20].....	28
Figure 17: Précipitations Moyennes Mensuelles [20].....	29
Figure 18: Températures mensuelles (Minimum, Maximum et Moyenne) [20].....	30
Figure 19: Amplitude Thermique Mensuelles Ain-Séfra 1980-2008 [20] .....	31
Figure 20: Courbe Pluviométrique (P=2T) [20] .....	32
Figure 21: Courbe Ombrothermique P= 2T [20] .....	33
Figure 22; Abaque d'Indice d'Aridité [29].....	36
Figure 23: Climagramme L.EMBERGER [29] .....	40
Figure 24: Diagramme de Pippert.....	53
Figure 25: Diagramme de Sholler et Berkloff .....	54
Figure 26: Répartition des Résidus Sec dans les différentes stations thermales en Algérie [13].....	55
Figure 27: Différence de Températures dans les stations thermales [13].....	56
Figure 28: Evolution de la Température avec la Profondeur Forage Pétrolier ER-1 [13].....	61
Figure 29: Evolution de la Température avec la Profondeur Forage Pétrolier AM-1 [13].....	62
Figure 30: Evolution de la Température avec la Profondeur (5Forages Pétroliers) [13] .....	62
Figure 31: Production Mondiale d'Electricité à partir de la géothermie à représentée 88.9 TWh [42].....	66
Figure 32: Production Mondial d'Electricité à partir de l'Energie Renouvelable 25.3% [42].....	66
Figure 33: Carte de Gradient Géothermique du Sud Algérien [13] .....	69
Figure 34: Le Gradient Géothermique de quelques Forages Pétroliers [13] .....	70
Figure 35: Puit Canadien [41] .....	77
Figure 36: Prototypé d'un Puit Canadien [47] .....	78
Figure 37: Coupe Longitudinale sur échangeur air-sol-eau [41] .....	80

## Tableaux :

Tableau 1: Caractéristiques de la Station d'Ain-Séfra [20] .....	26
Tableau 2: Précipitations Moyennes Annuelles [20] .....	27
Tableau 3: Précipitations Mensuelles [20] .....	28
Tableau 4: Températures mensuelles (Minimum, Maximum et Moyenne) [20].....	30
Tableau 5: Amplitude Thermique (1980-2008) Station Ain-Séfra [20].....	31
Tableau 6: Températures et Précipitations Moyennes Mensuelles [20].....	32
Tableau 7: Evolution du Climat [20] .....	34
Tableau 8: Indice de DEMARTON [28].....	35
Tableau 9: Indice Mensuel de DEMARTON [28].....	38
Tableau 10: Résultats des Analyses Hydro-chimiques (Laboratoire de l'ADE Naâma) .....	45
Tableau 11: Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [13] .....	52
Tableau 12: Les utilisations des Energies Renouvelables [41].....	59
Tableau 13: Carte d'Identité de la Géothermie [41] .....	65
Tableau 14: Conductivités Thermiques des principaux constituants [41].....	73

## Nomenclature :

**Q** : Flux de chaleur [ $\text{mWm}^{-2}$ ]

**$\lambda$** : Conductivité thermique du milieu [ $\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ]

$\vec{\nabla T}$  : Gradient de température [ $\text{°Cm}^{-1}$ ].

**$\lambda_m$** : Conductivité thermique de la matrice

**$\lambda_i$** : Conductivité thermique des constituants de la roche (le ième constituant)

**$P_i$**  : Proportion volumique des constituants de la roche (le ième constituant).

**$\sum_{i=1}^m P_i = 1$**  : L'indice  $i$  : 1, 2, 3, ...,  $m$ , représente le nombre de constituants de la roche.

**$\lambda_i$**  : Conductivité de l'électrofaciès (in-situ)

**$\lambda_f$**  : Conductivité thermique du fluide, (celle de l'eau  $\lambda_{\text{eau}} = 0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )

**$\theta$**  : Porosité exprimée en %.

**$\Delta T$** : Temps de trajet dans la roche, [ $\mu\text{.ft.s}^{-1}$ ]

**$\Delta T_m$** : Temps de trajet dans la matrice, [ $\mu\text{.ft.s}^{-1}$ ]

**$\Delta T_f$** : Temps de trajet dans le fluide, [ $\mu\text{.ft.s}^{-1}$ ]

**$\Theta_{IH}$** : Index d'hydrogène dans la roche, %

**$P_a$**  : Proportion d'argile dans la roche, %

**$\rho$**  : Densité apparente de la roche, [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]

**$\rho_m$**  : Densité de la matrice,  $\text{g.cm}^{-3}$

**$\rho_f$**  : Densité du fluide,  $\text{g.cm}^{-3}$

**$\Theta_{IH_a}$**  : Index d'hydrogène dans l'argile, %

**$\lambda_T$** : Conductibilité thermique de la formation.

## RESUME :

Le secteur de Ain-Ouarka étudié est un tronçon des Mont des Ksour (Atlas saharien occidental). Les Monts des Ksour constituent une chaîne intracontinentale avec des formations sédimentaires de nature détritique continentale et d'âge Méso-Cénozoïque et Quaternaire ; elle a été structurée en plis et failles lors de la phase atlasique (Eocène) avec une orientation générale NE-SO. On a essayé de montrer les origines de ces eaux thermales, et de déterminer la géothermie de ces eaux et de faire une simulation avec d'autres régions de notre pays et faire ressortir cette énergie renouvelable et le mode de son exploitation.

**Mots Clé :** Formations sédimentaires, Méso-Cénozoïque, quaternaire, Tectonique, Géothermie, eaux thermales, énergies renouvelables

## ABSTRACT:

The Ain-Ouarka sector studied is a section of the Mont des Ksour (Western Saharan Atlas). The Ksour Mountains constitute an intracontinental chain with sedimentary formations of continental detrital nature and of Meso-Cenozoic and Quaternary age; it was structured in folds and faults during the Atlas phase (Eocene) with a general orientation NE-SW. We tried to show the origins of these thermal waters, and to determine the geothermal energy of these waters and to make a simulation with other regions of our country and to bring out this renewable energy and the mode of its exploitation.

**Key words:** Sedimentary formations, Meso-Cenozoic, Quaternary, Tectonics, Geothermal energy, thermal waters, renewable energies

نبة مختصرة:

قطاع عين الورقة المدروس هو جزء من جبال القصور (الأطلس الصحراوي الغربي). تشكل جبال القصور سلسلة داخل القارات ذات تكوينات رسوبية ذات طبيعة قارية متدفقة وعصر حقبة الحياة الوسطى والرباعي. تم تنظيمه في طيات وأعطال (Failles) خلال مرحلة أطلس (Eocene) بتوجيه عام NE-SW. حاولنا إظهار أصول هذه المياه الحرارية، وتحديد الطاقة الحرارية الأرضية لهذه المياه وعمل محاكاة مع مناطق أخرى في بلدنا وإخراج هذه الطاقة المتجددة وطريقة استغلالها.

الكلمات المفتاحية:

التكوينات الرسوبية، العصر الوسيط، الرباعي، التكتونية، الطاقة الحرارية الأرضية، المياه الحرارية، الطاقات المتجددة

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## 1 Introduction :

### ✓ Du point de vue géologique et hydro chimique :

Ain-Ouarka, un véritable musée à ciel ouvert, où tous les âges géologiques sont représentés sur un espace restreint de quelques kilomètres carrés.

L'émergence de la source thermale de Ain-Ouarka se fait à travers une faille de direction E-W. Cette station thermale a un débit de 4 litres/seconde d'eaux riches en minéraux de type Chloro-sulfaté-sodique et fluoré. L'eau de la source est salée et possède une minéralisation de 5000 mg/l, jaillissant avec une température de 46°C degrés et présentant des vertus curatives à plusieurs pathologies.

Ses sources ont plusieurs propriétés, celles de traiter les affections rhumatismales chroniques, les vieilles entorses et luxations, les ankyloses, les maladies de la peau, la gale, les accidents syphilitiques, les anciennes fractures et la consolidation des os. Les caractéristiques chimiques principales de ce hammam sont la minéralisation élevée et la dominance des ions Na, Mg, Ca, SO<sub>4</sub>, Cl, dont l'origine est certainement la dissolution des roches gypso-salines largement répandues dans la zone d'étude et la forte teneur en soufre.

### ✓ Du Point de vue climatologique :

Ain-Ouarka est une zone humide classée dans la catégorie de RAMSAR avec la présence d'une flore et une faune remarquable.

Les différentes méthodes d'étude du climat indiquent que la région d'Ain-Ouarka jouit d'un climat semi-aride à aride avec des étés chauds et des hivers froids, conditionné par les facteurs suivants :

- ✓ Eloignement de la mer
- ✓ Altitude assez élevée (1100 m), région montagneuse à sommets élevés.
- ✓ Proximité du Sahara et des Hautes plaines Oranaises.

Les variations de la température entre l'été et l'hiver sont très importantes. Les précipitations sont peu abondantes (168 mm/an), mais arrivent souvent avec des orages violents.

### ✓ Du Point de vue géothermique :

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90 °C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C.

Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelmen et 119 °C à Biskra (Tab II.8.1) On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser.

Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni'a à 1500 mètres à Touggourt, présentant une température de 40 à 60°C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres.

En ce qui concerne notre zone d'étude, elle est caractérisée par une énergie basse température entre (40-50°C), la **géothermie basse** énergie peut être utilisée pour la pisciculture, la balnéothérapie, l'alimentation de piscines ou encore le chauffage de serres. Son application principale dans les zones à habitat dense est le chauffage urbain par réseaux de chaleur.

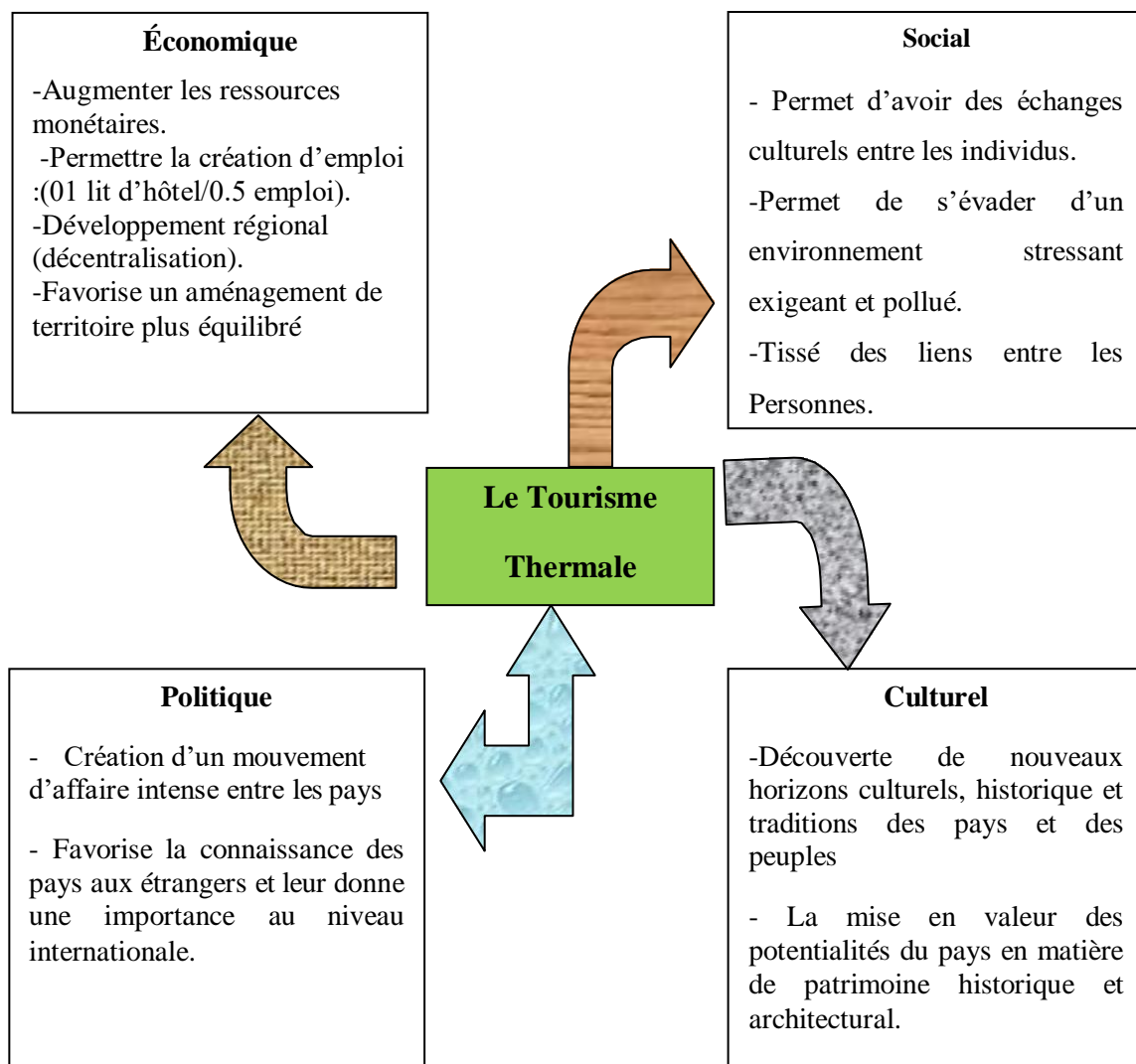
✓ **Du Point de vue touristique :**

Le thermalisme offre des possibilités et des perspectives très importantes notamment :

Ain-Ourka a de fort potentiel en tourisme, c'est une ville qui possède d'excellentes qualifications touristiques avec sa source thermale, ses propriétés médicinales et son paysage féérique.

La diversité biologique (la faune et la flore, qui fait du tourisme un facteur puissant, est un indicateur majeur de la croissance économique de la région qui peut s'améliorer en appliquant une politique rénovatrice concernant le thermalisme médicale.

Nous concluons que le tourisme thermal est un tourisme très important dans le monde et particulièrement en Algérie, grâce à ses revenus économiques, social, politique et culturel et ses bienfaits sur la santé des individus.



**Diagramme N°1** : Impact du Tourisme Thermale [39].

La géothermie s'intéresse à l'exploitation des sources d'eau chaude en profondeur. Elle constitue l'une des principales ressources d'énergie renouvelable dans le monde. Il existe à travers le monde deux types principaux de géothermie :

la géothermie haute énergie, elle concerne les gisements des zones continentales actives qui se caractérisent par des températures supérieures à 150 °C. Elle est destinée principalement à la production d'électricité ; [1]

la géothermie basse énergie, qui concerne les gisements des zones des plates formes continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires caractérisées par une température comprise entre 30 °C et 150 °C. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres. Le Sud algérien est un vaste territoire dont le potentiel géothermique est contenu dans les bassins sédimentaires des zones continentales stables.[2]

Les ressources géothermiques sont principalement de basse énergie. Afin de déterminer si cette région Ain-Ouarka a un intérêt géothermique, les cartes de gradient géothermique et de flux de chaleur ont été établies. Le présent travail se propose, par le biais d'une analyse hydrogéochimique et géothermométrique, d'apporter des informations sur le contexte géothermique et géochimique de la source thermale de la région de Hammam Ain-Ouarka Naâma (Algérie) Fig N°1. Ceci permettra l'identification de l'origine de ces eaux et la caractérisation du réservoir thermal de cette source.

Exploitées depuis des décennies pour leurs propriétés curatives, la source thermale de Hammam Ain-Ouarka Naâma Fig N°1 est parmi les sources les plus connues dans l'ouest Algérien. Le site est situé à environ 60 km au Sud-Est d'Aïn-Séfra, dans une région montagneuse ; au pied du flanc sud de Djebel Chemarikh (Fig. 2).

La région de Ain-Ouarka jouit d'un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et un Hiver Froid.

## **2 Présentation de la zone d'Etude :**

Située sur le territoire de la commune d'Asla, à 110 km de la ville de Naama et à quelque 60 kilomètres d'Aïn-Séfra, Fig N°3, la station thermale d'Aïn Ouarka offre un paysage féérique. Cette zone humide géothermique, classée au titre de la convention Ramsar, est une cuvette enserrée entre d'importantes falaises et montagnes dont certaines culminent à 1672 mètres.



**Figure 1:** Hamam Ain-Ouarka [3]



**Figure 2:** Flanc du Djebel CHEMARIKH et Ain-Ouarka [3]

Outre le thermalisme, le site est également réputé pour l'exploitation traditionnelle du sel gemme. Relief, particulièrement façonné par les activités tectoniques de type jurassien, affiche un paysage exceptionnel où, au fil du temps, un étang, produit par des écoulements d'eaux, complète le décor et abrite quelques anatidés (palmipèdes) migrateurs qui, finalement se sont sédentarisés.

Ce magnifique site qui est une Zone d'Expansion Touristique (ZET), fait l'objet de plusieurs études de promotion touristique. Le site se trouve au sud du chef-wilaya, fait partie de la commune d'ASLA.

✓ **Coordonnées géographiques :**

- Latitude 32° 46' Longitude 3° 24'.
- Altitude : 1058 mètres
- Superficie : 2350 hectares
- Type de zone humide : Continentale



**Figure 3:** Situation de la Zone d'Etude dans la Wilaya de Naâma [3]

**CHAPITRE I**  
**GEOLOGIE**

## **1 Introduction :**

L'Algérie est subdivisée en deux domaines qui s'opposent par leur histoire et leur structure géologique. Un domaine septentrional ou Algérie du Nord qui fait partie de la chaîne alpine, édifié au cours du Tertiaire et qui demeure encore instable aujourd'hui.

L'Algérie saharienne, domaine relativement stable depuis la fin du Précambrien, constitué d'un socle déformé par les orogénèses éburnéenne et panafricaine, d'une couverture paléozoïque affectée localement de plis hercyniens et d'une couverture méso-cénozoïque tabulaire.

La frontière entre ces deux domaines est délimitée par l'accident sud atlasique qui suit le revers sud de l'Atlas saharien. Les Monts des Ksour appartiennent au premier domaine et font partie de l'Atlas Saharien. Il s'agit d'une chaîne intracontinentale formée au Tertiaire et qui constitue l'avant-pays de la chaîne alpine d'Afrique du Nord ou les Maghrébines [1].

## **2 Présentation Générale de l'Atlas Saharien :**

### **2.1 Contexte Géographique Générale :**

Le système atlasique magrébin éparpillé sur la partie septentrionale de la plaque africaine, est représenté par des ensembles bien distincts. De l'Ouest à l'Est, on distingue, le Haut-Atlas et Moyen-Atlas (Maroc), l'Atlas saharien (Algérie) et l'Atlas tunisien.

Ce système atlasique correspond à des terrains mésozoïques et cénozoïques formant des blocs stables peu ou pas déformés par les événements compressifs du Tertiaire. Ils sont limités par les Mesetas (Hautes-Plaines et Mésétas marocaines ;[4]

L'Atlas saharien sépare l'Algérie du Nord et le Sahara avec une orientation générale NE-SW. Il se compose des Monts des Ksour, Amour et Ouled Naïl. Il est limité au Nord par le domaine tello-rifain à terrains allochtones, au Sud par la plate-forme saharienne ou par l'accident sud-atlasique traduit par un système de failles et pli-failles aligné d'Agadir (Maroc) au Gabès (Tunisie) ; à l'Est, il continue avec les Aurès pour franchir la frontière algéro-tunisienne (Atlas tunisien) et la frontière algéro-marocaine par les Haut-Atlas et le Moyen Atlas.[1]

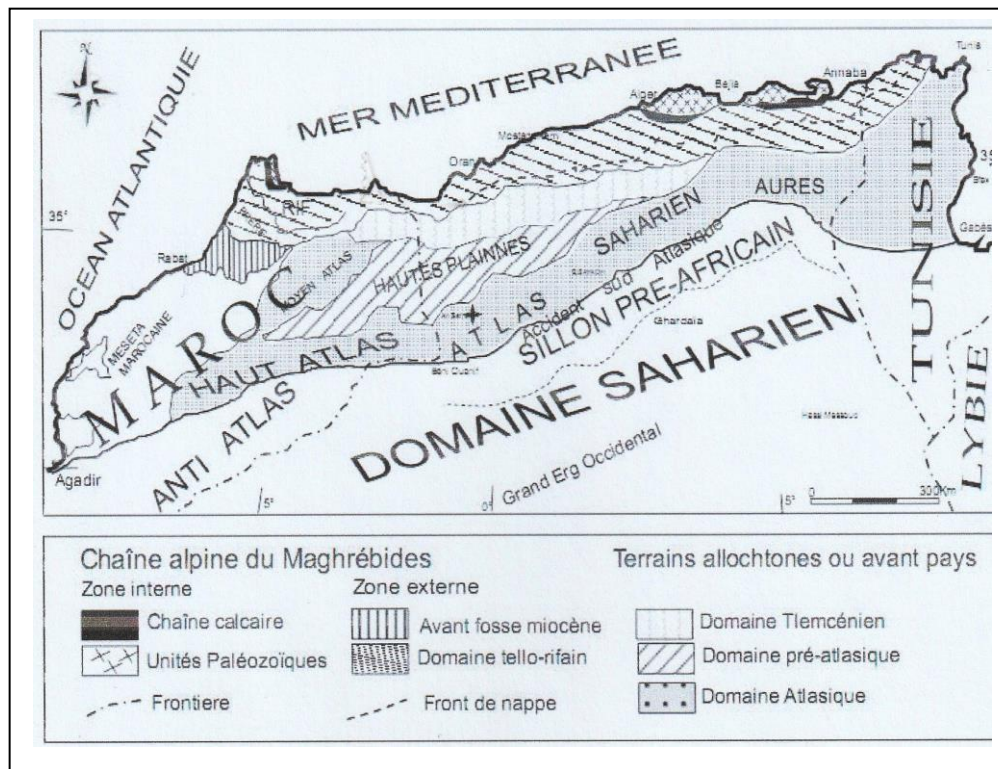


Figure 4: Limites géographiques des différents domaines géologiques [5]

**22 Aperçu géographique et géologique des Monts des Ksour :**

Sur le plan géologique et géographique, l’Atlas saharien occidental (Monts des Ksour) est relativement élevé où les masses montagneuses peuvent atteindre 2000 m : à titre d’exemple, Djebel Aïssa près d’Aïn Sefra forme la troisième altitude en Algérie 2236 m. Cette chaîne plissée comprise entre les Hautes-Plaines oranaises et la plate-forme saharienne.

Elle apparaît comme une structure tabulaire au Nord dont la limite est mal définie et le Sahara, au Sud qui est un craton stable à travers la flexure de Lafitte (1939) nommée ultérieurement la flexure sud-atlasique (Marok, 1996) et au Sud-Ouest par la frontière algéromarocaine.

La géomorphologie est de type jurassien à reliefs plissés et de structures simples [5]. Les synclinaux de type perchés correspondent à des vastes dépressions et plaines séparant les reliefs couverts par des dépôts tertiaires et quaternaires. Tandis-que les anticlinaux sont apparus comme une ligne de hauteur et de voûte. Cette région est caractérisée par un style tectonique très varié, composé par des reliefs monoclinaux, en éventails, en plis coffrés et en coupoles.[1]

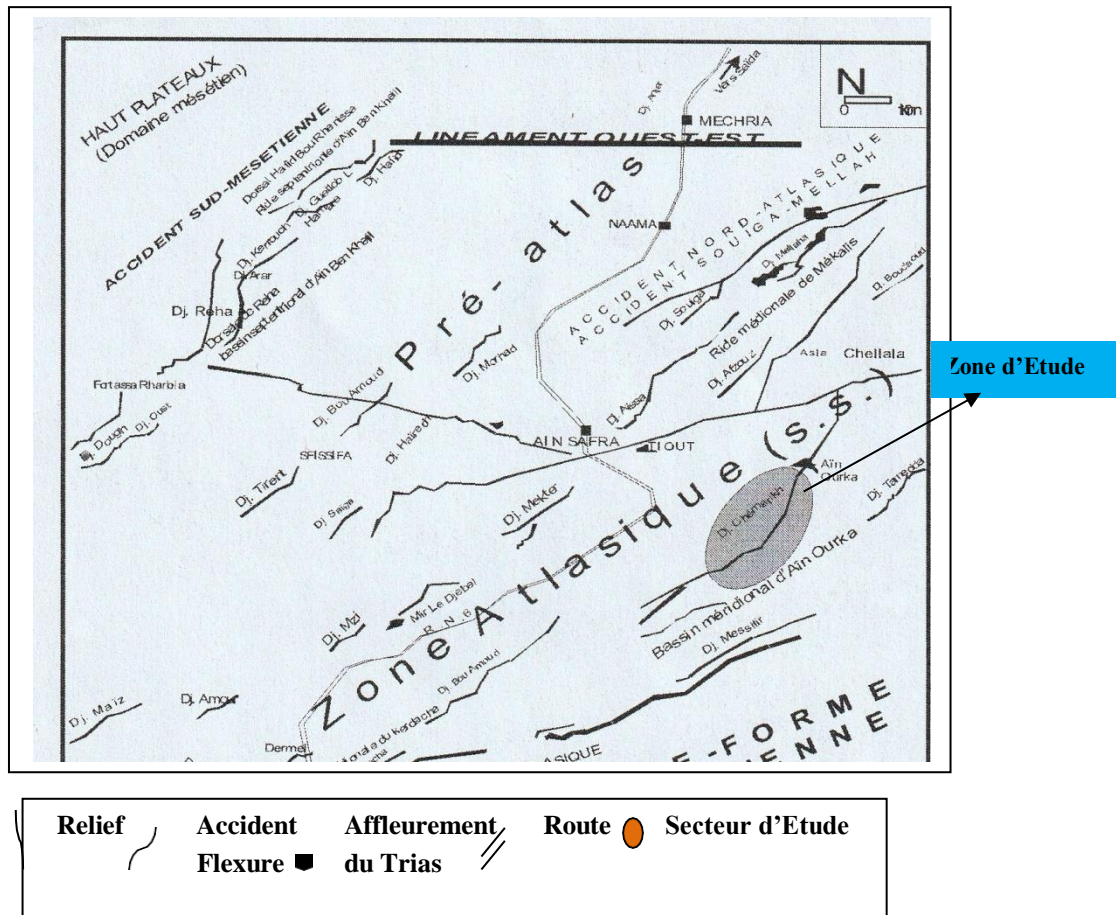


Figure 5: Carte Structurale et Localisation du secteur d'Etude [5]

### 23 Cadre géologique et structural des Monts des Ksour :

#### 2.3.1 Cadre structural :

L'Atlas saharien correspond à une chaîne intra-cratonique plissée, affectée par une tectonique superposée, s'intercalant entre deux domaines stables ; le domaine des hautes plaines au Nord et celui de la plate-forme saharienne au Sud. Cette chaîne se trouve également comprise entre deux grands accidents majeurs [2]

L'Accident Nord Atlasique (Accident Sud-Mésésien au sens de [6]) : Représenté par une suite de failles en relais formant une limite entre le style des hautes plaines oranaises au Nord et le style atlasique au Sud.

L'Accident Sud Atlasique : Connu également sous le nom de Flexure Sud-atlasique Laffite (1939) ou encore Flexure Nord-saharienne ; il est matérialisé par des enfoncements brutaux des couches récentes sous la plate-forme saharienne. Ce dernier accident constitue une limite paléogéographique

Entre le cycle orogénique alpin au Nord et le cycle varisque au Sud. Il s'étend Agadir au Maroc jusqu'à Gabès en Tunisie.

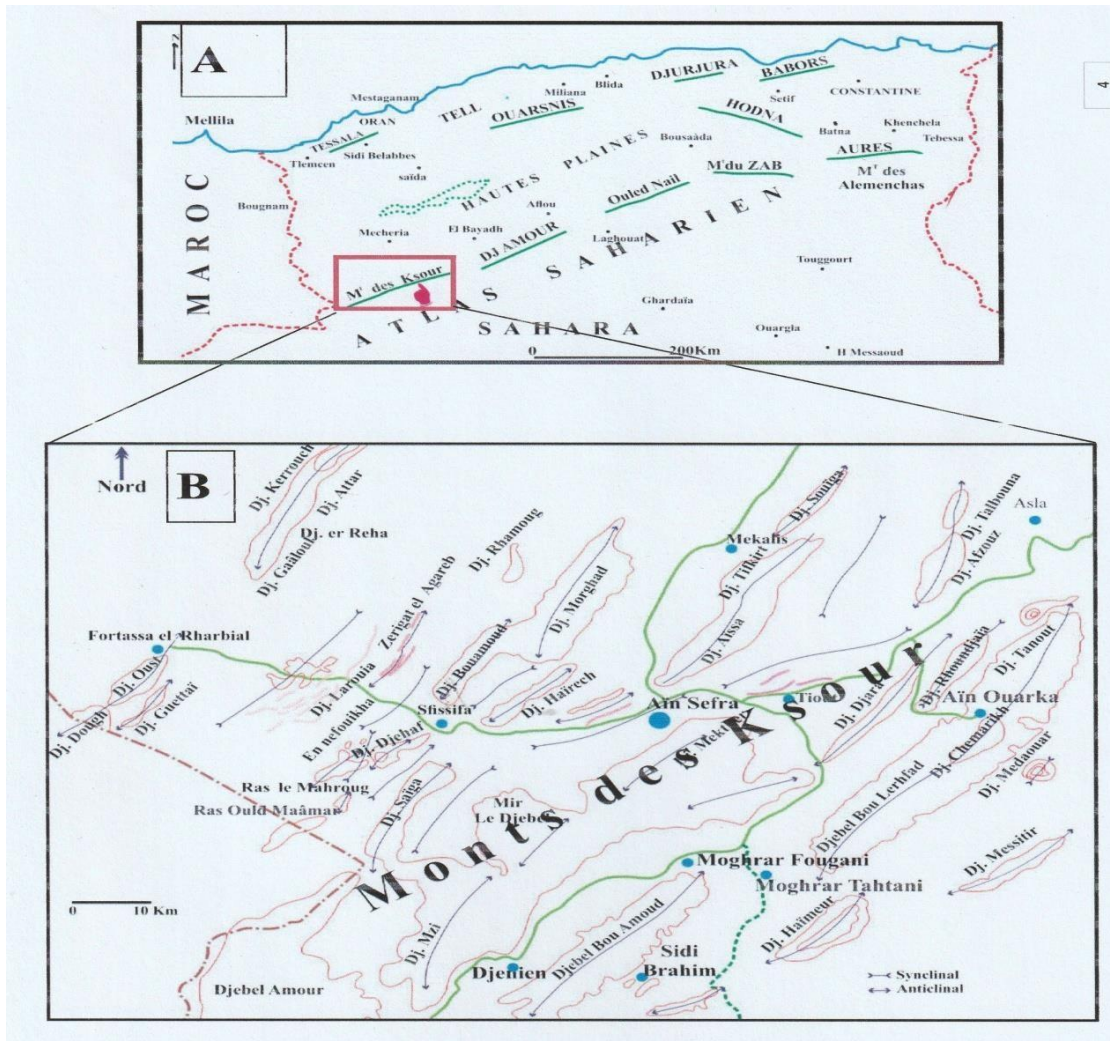


Figure 6: Situation Générale des Monts des Ksour simplifiée [2]

A : Situation su Secteur d'Etude

B : Carte d'Affleurement des ensembles structuraux des Monts des Ksour [8].

La subdivision de l'Atlas saharien à fait l'objet d'une étude Ritter (1902) qui a distingué trois faisceaux de plis :

- Les Monts des Ksour (ou Atlas saharien occidental)
- Djebel Amour (ou Atlas saharien central)
- Les monts des Ouled Nail (ou Atlas saharien oriental).

Au cours de l'histoire tectonique, l'Atlas Saharien a été le siège d'une tectonique cassante et souple, bien marquée respectivement par des accidents cassants et des plis à structures complexes. Le



Représenté par des marnes irisées, du gypse, du sel gemme et des basaltes. La série litho stratigraphique des monts des Ksour a été subdivisée en cinq ensembles lithologiques [8].

- Des argiles versicolores à gypse : elles sont surmontées par du sel d'épaisseur importante à Aïn Ouarka par exemple. Elles sont recoupées par des Basaltes lithologiques verts du Trias, à texture ophitique [5].
- Un ensemble carbonaté où apparaissent des marnes au sommet du Lias jusqu'à l'Aalénien ;
- Un ensemble détritique argilo-gréseux, intercalés avec des niveaux carbonatés du Bajocien inférieur au Bathonien inférieur ;
- Un ensemble détritique argilo-gréseux, intercalé par des niveaux dolomitiques à la base. Les terrains qui le composent s'échelonnent depuis le Bathonien jusqu'à l'Albien ;





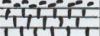

Etage	Formation	Epaisseur	Colonne Lithologique	Description Lithologique
OXFORDIEN BATHONIEN SUPERIEUR	Du DJARA	470 m		Grès Siliceux à stratification Oblique Intercalés dans les Argiles et de rares bancs Dolomitiques
BATHONIEN MOYEN BAJOCIEN SUPERIEUR	De TIOUT	500 m		Calcaire dolomitique à oolithes Argile Alternance Calcaire, Grès, Argile et de calcaire oolithique et lumachellic
BAJOCIEN SUPERIEUR	TENIET EL KLAKH	515 m		Marnes vertes entrecoupées par des niveaux de calcaire sub-lithographique et oolithique Intercalation d'Argile et de Grès siliceux
AALENIEN TOARCIEN DOMERIEN	AIN-OUARKA AIN-OUARKA	70 m 112 m		Grès Furigineux à micro-fissurations entrecroisées Marnes grises avec intercalation de niveau de Calcaire Alternance de niveau de Marne vertes et de Calcaire
SINEMURIEN		02 m		Alternance de niveau de Marne vertes et de Calcaire
INFRA-LIAS	CHEMARIKH AIN-OUARKA	200 m		Intercalation d'Argile et de Grès siliceux

Figure 8: Coupe lithostratigraphique de Formation du Lias et du Dogger dans la Partie centrale des Monts des Ksour AIN-s2FRA [9]

- Des argiles à bancs gréseux et dolomitiques puis à gypses surmontés par des marno-calcaires. La série va du Vraconien au Turonien.

Dans le détail, les formations du Jurassique inférieur et moyen sont représentées par :

Le Lias : Le Lias carbonaté débute par une grande masse dolomitique de l'Hettangien. Elle est suivie d'une alternance marno-calcaire rythmique jusqu'à l'Aalénien. Au Domérien inférieur s'installe un faciès "Ammonitico-Rosso". Le Toarcien supérieur est riche en pyrite, parfois en granules macroscopiques.

Le Dogger : A partir du Bajocien, les dépôts détritiques comblent le sillon [9]. Cette période est également marquée par l'installation des calcaires oolithique et de calcaire récifaux. (2)

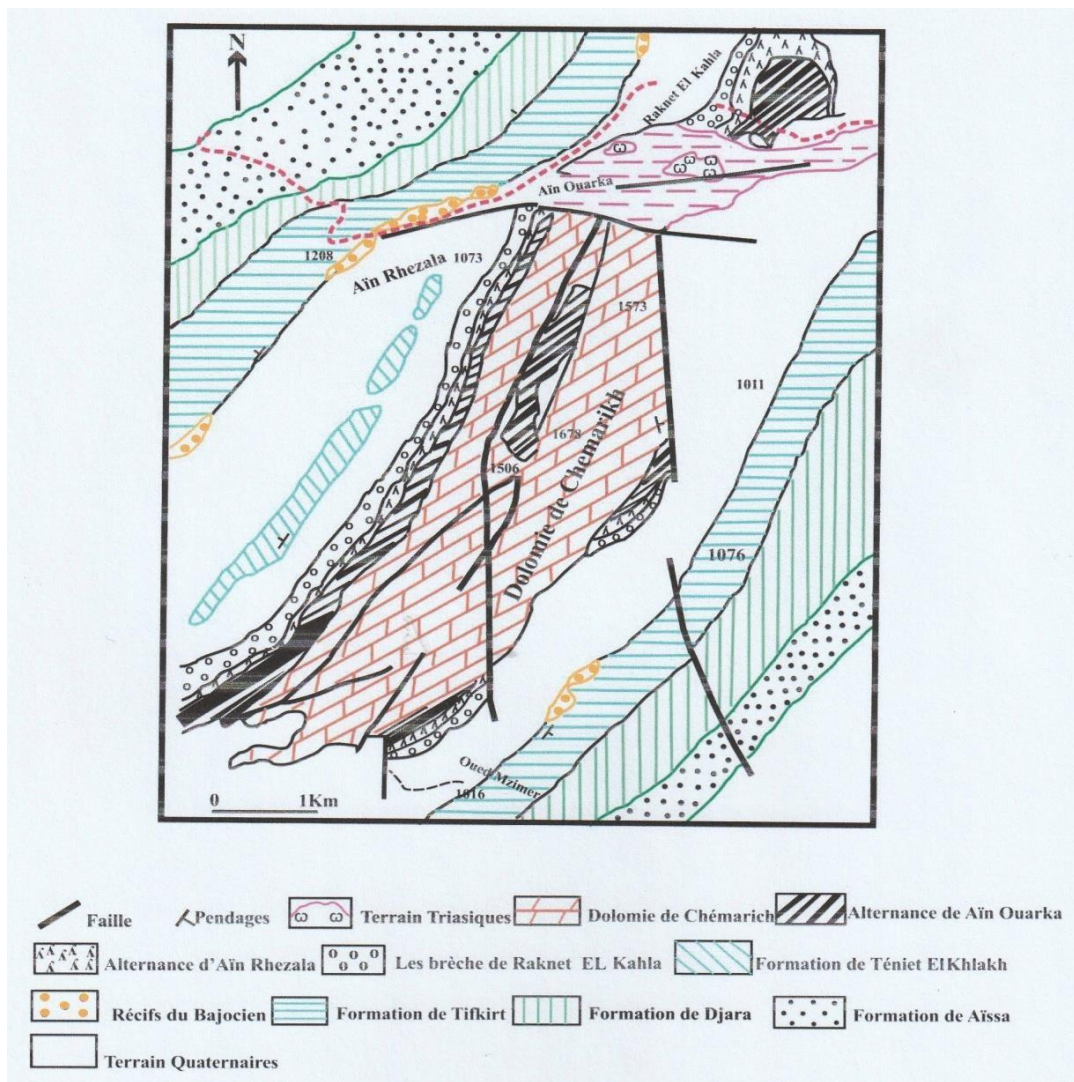


Figure 9: Cadre Géologique du secteur d'Ain-Ouarka [2]

Au Bajocien, on assiste à une alternance marno-calcaire gréseuse avec les premières décharges détritiques et des dolomies dans la région d'Ain Ben Khelil. La limite Bajocien inférieure-Bajocien moyen est marquée par la présence de récifs et de calcaires oolithiques et béchiques indiquant la formation de Tifkirt, [2]. Au Bathonien, les apports détritiques s'accroissent et les dépôts gréseux prédominent, favorisant une sédimentation d'abord calcaire-détritique puis, dolomitico-détritique.

### ✓ Aperçu structural

L'Atlas saharien, chaîne intra-cratonique plissée s'interpose entre deux domaines stables ; les Hautes plaines oranaises au Nord et la plateforme Saharienne au Sud. Cette chaîne est affectée par deux grandes lignes de démarcation qui correspondent aux accidents Nord et Sud atlasique. Au cours de son histoire tectonique les monts des Ksour ont acquis des structures complexes. Elles sont le résultat de plusieurs phases tectoniques qui ont débuté au Permotrias, donnant une architecture en horsts et grabens selon un contexte géotectonique global distensif [10]

## 24 Tectonique souple :

Les dépôts turoniens affectés par des plissements dans l'ensemble de l'Atlas Saharien permettent selon différents auteurs.[11], [35] d'attribuer un âge tertiaire à la phase orogénique. A la phase principale des plissements intenses de la série mésozoïque, succèdent d'autres enjeux non synchrones d'Est en Ouest et qui sont selon [11].

Une phase de plissement ayant affectée « les poudingues des Ksour » : Une phase récente liée au décrochement N 80° E et N 160°E, recoupe presque toutes les structures. En fonction de Leur densité et leur direction, les plis complexes de petites dimensions, de formes irrégulières où les synclinaux sont bien plus marquées que les anticlinaux.

Une zone centrale (Djebel Aïssa et Djebel Mekther) englobe les structures à matériel jurassique. Ces dernières sont trapues, larges et constituées par des grès. Les voûtes sont surbaissées coffrées et massives.

## 25 Tectonique cassante :

L'étude de la fracturation permet d'individualiser trois zones principales dans l'Atlas saharien occidental :

- Une zone occidentale à très forte fracturation, où les accidents N-S et N 30° à N40° jouent un rôle prépondérant,
- Une zone centrale où la fracturation diminue, mais demeure importante, elle est représentée par les directions N 70° et N 85° et des cisaillements importants,



### 3 Position Stratigraphique des Dolomies du Chemarikh dans la série du Jurassique et histoire Paléogéographique du Secteur D'AIN OUARKA. gras

#### 3.1 Coupe de référence des formations des Monts des Ksour :

La Formation des "Dolomies du Chémarikh" est encadrée par des affleurements volcaniques du Trias, appartenant à la Province Magmatique de l'Atlantique Central [5], et les formations jurassiques inférieur et moyen [35], [14], [5]. On adopte la succession litho stratigraphique définie par ces derniers auteurs.

- Dolomies du Chémarikh: c'est la formation L1 qui est datée relativement à l'Hettangien et au Sinémurien en partie [14]. Elle correspond à des calcaires dolomitiques et dolomies en bancs épais et massifs de couleur gris-beige. La découverte d'une ammonite de la Zone à Planorbis [9], a précisé l'âge Hettangien inférieur [2].

- Alternances de Aïn Ouarka : elles sont composées par des :

1°) Calcaires noirâtres lités ;

2°) Calcaires à traînées rouges ;

3°) Alternances de marnes et de calcaire à silex ;

4°) Alternance de marnes et de calcaire ondulés (Sinémurien). Ces alternances sont surmontées par les marnes et calcaires (Carixien) sur lesquelles se trouvent les Alternances violacées et les Alternances noirâtres de marnes et de calcaires du Domérien.

- Marno-calcaires d'Aïn Rhézala : [14] subdivisés en trois membres [5] :

1°) Alternance espacée de marnes et de calcaires (Toarcien inférieur.) ;

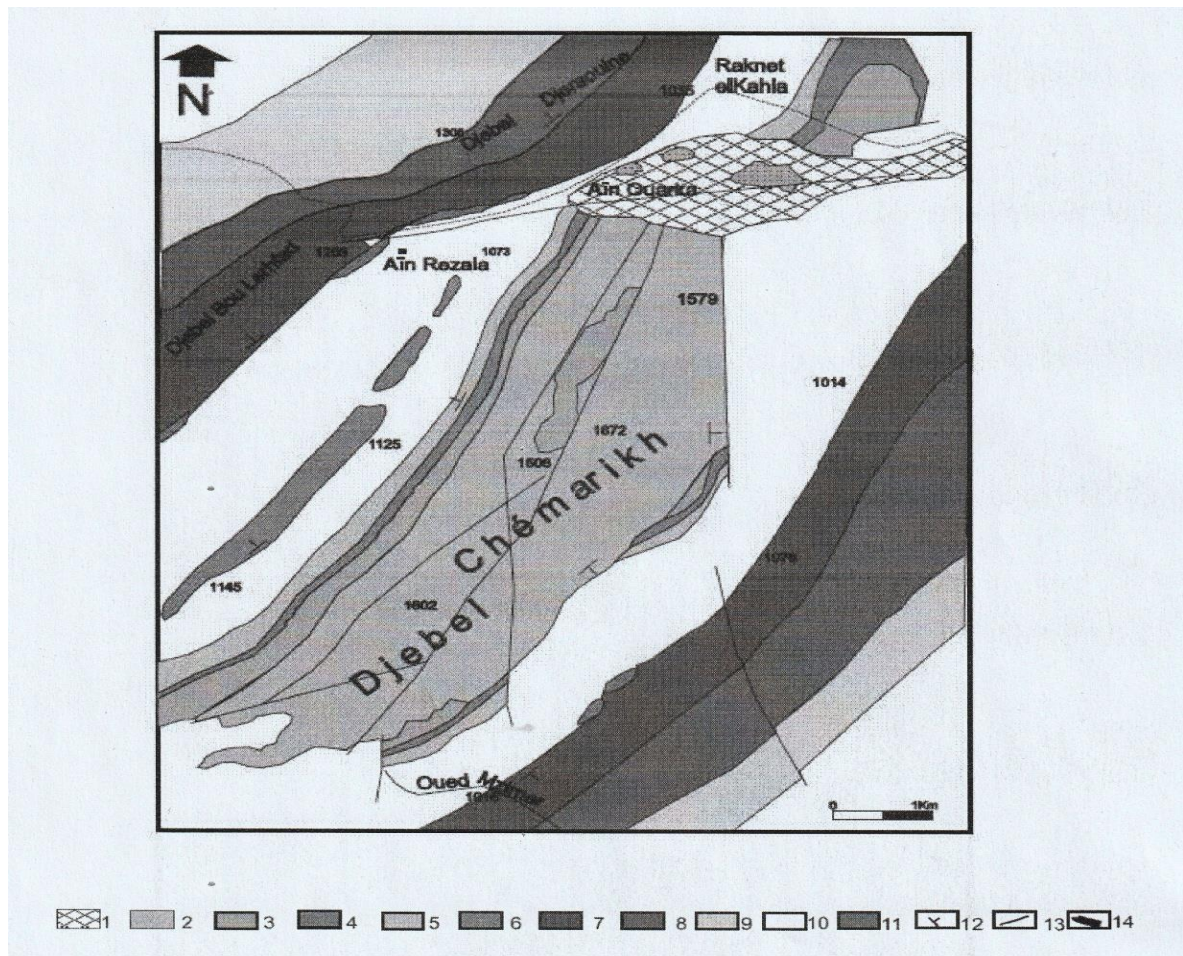
2°) Alternance rapprochée de marnes et de calcaires à filaments (Toarcien Moyen) ;

3°) Alternance rapprochée de marnes et de calcaires à Zoophycos (Toarcien supérieur).

- Brèches de Raknet el Kahla : d'âge Aaléno-Bajocien, elles sont composées par des : - Alternances de marnes et de calcaires gris-noir et des - Alternances de marnes et de calcaires à aspect schisteux.

**32 Grands traits Paléogéographique du secteur d'étude au cours du Jurassique inférieur et moyen.**

L'évolution paléogéographique au cours du Mésozoïque complétée par les synthèses bio stratigraphiques [13], [15], [5], retrace une chronologie des événements au cours du Mésozoïque. Depuis la première phase de naissance, le bassin n'a pas cessé d'activer. Il est le siège de subsidence active et continue grâce à des phénomènes tectoniques. Ces derniers résultent de contraintes en extension du Trias correspondant à l'ouverture du rifting [14], [9]. De nombreux changements ont été marqués et enregistrés pendant le Jurassique :[2]



1- Facies volcano-sédimentaire avec épanchement basaltique (Trias) ; 2- Dolomie de Chémarikh (Hettangien) ; 3- Alternance de Ain Ouarka( Sinémurien-Domérien) ; 4- Marno-calcaire d'Aïn Rhezala(Toarcien) ; 5- Brèche de Raknet el Kahla (Aalénien-Bajocien) ; 6- Formation de Théniel el Klakh (Bajocien sup.) ; 7- Formation de Tifkirt (sommet du Bajocien sup.-Bathonien) ; 8 et 9 - Formation du Djara et Formation du Aïssa (sommet du Dogger et Jurassique sup.) ; 10-Formation superficielle récente ; 11- Récifs du Bajocien sup. ; 12 - Pendages ; 13- Limites des formations ; 14- Failles.

**Figure 11:** Carte géologique du secteur de Ain-Ouarka [5]

Vers la fin du Trias, où un dépôt lagunaire occupait cette région du bassin [9], une plate-forme carbonatée s’installe avec une faible profondeur dans des conditions assez chaudes favorisant ainsi la dolomitisation secondaire

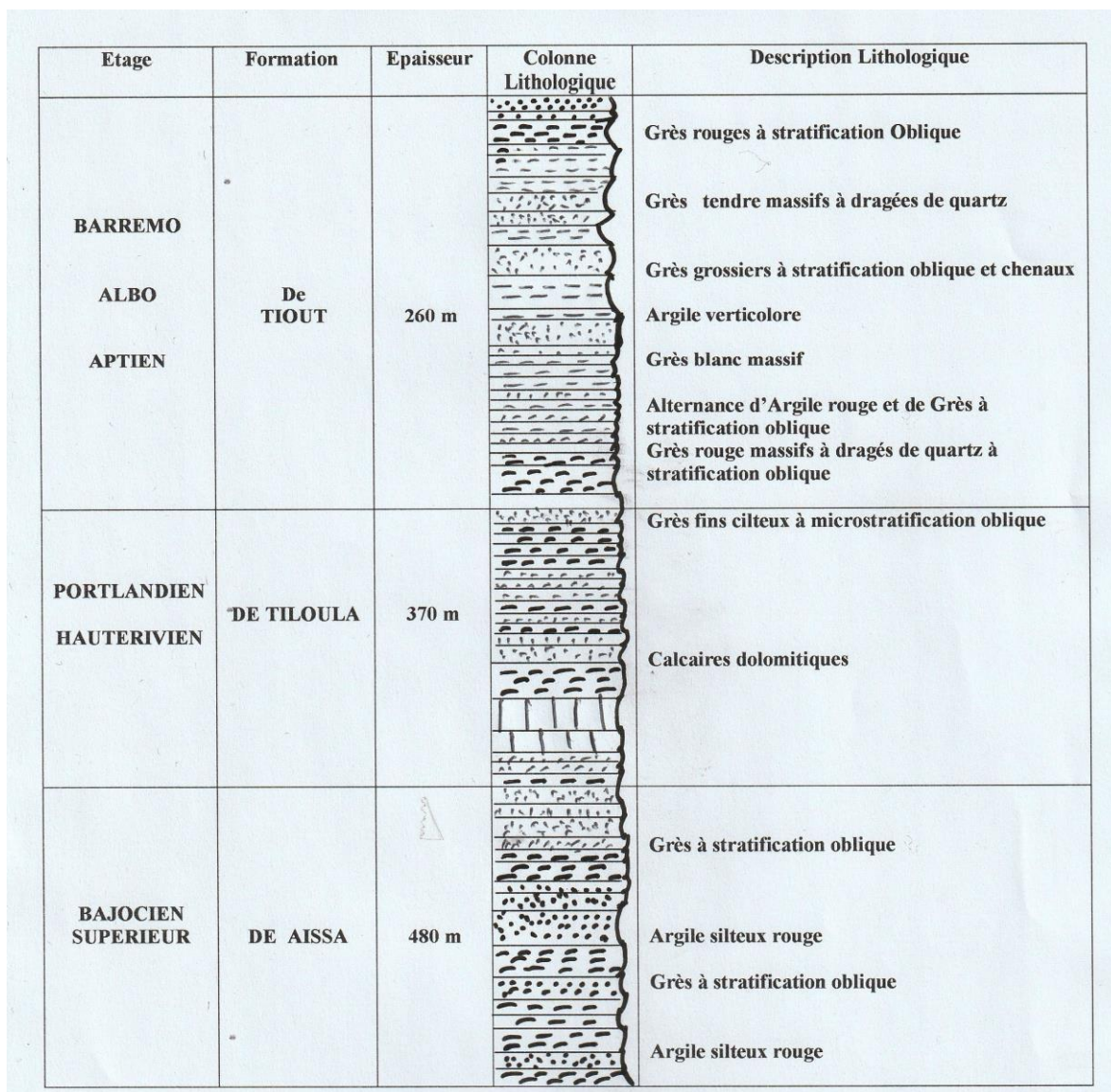


Figure 12: Coupe lithostratigraphique de formation du Lias et du Dogger dans la partie centrale des Monts des Ksours Ain-Séfra [9]

Le début de l’Hettangien génère un apport sédimentaire important et une très forte subsidence dans le sous-bassin d’Ain Ouarka, illustrant les premiers indices d’ouverture sur la mer ouverte matérialisé par les "Dolomie du Chémarikh".

Au Sinémurien, des prémices d’approfondissement commencent dès le Sinémurien inférieur dans ce secteur et il se généralise en atteignant les différents ombilics. Au cours du Carixien, le sillon d’Ain Ouarka est bien marqué par les sédiments de la plateforme externe.

En contre-partie, le milieu de plate-forme interne perdure dans les autres secteurs. Ces derniers sont marqués par le début d'une dislocation de la plate-forme au moment que le secteur de l'Aïn Ouarka montre un grand dénivellement de la pente sédimentaire à la fin de cette période.

Au Domérien, un faciès d'ammonitico-rosso et marneux à silex occupe successivement les secteurs d'Aïn Ouarka, Mékalis et Ben Khelil indiquant l'installation d'une pente sédimentaire avec un passage au bassin [4].

Au Toarcien, c'est l'ouverture maximum du sillon atlasique et l'individualisation des domaines qui s'enrichissent en faunes nectoniques et benthiques. A l'Aalénien et au Bajocien inférieur, le caractère de milieu ouvert, profond à fort subsidence, persiste au secteur d'Aïn Ouarka et de Mékalis.

Tandis que les bordures (secteur de Aïn Ben Khelil) sont occupées par une sédimentation de plate-forme interne qui montre une pro gradation de faciès. A Djebel Mellah, le retour d'un faciès d'ammonitico-rosso marneux indique une pente distale vers un dépôt marneux riche en ammonites.

Le Bajocien supérieur débute par l'installation des barrières récifales qui manquent une diminution de la profondeur au secteur d'Aïn Ouarka surtout avec l'arrivée des premières décharges détritiques.

#### **4 Historique :**

##### **4.1 Brefs rappels des travaux antérieurs :**

Cette partie relève les plus grands et importants travaux qui retracent l'évolution des connaissances géologiques sur l'Atlas saharien particulièrement de l'ère Mésozoïque. Les premiers travaux consistent à une exploration préliminaire pour la géologie régionale, citons parmi les plus anciens ceux de : Pouyanne et Peron (1874-1883) ; Welsch (1890). [4]

Ainsi, plusieurs cartes géologiques de l'Atlas saharien au 1/800.000, au 1/400.000 et 1/200.000 ont été menées par G.B.M Flamand (1900) et publiées en 1911 dans une grande thèse consacrée à toute l'Oranie. Ces travaux serviront comme une base de plusieurs recherches multidisciplinaires ultérieures (géologie, géomorphologie, tectonique et paléontologie) notamment dans le secteur d'Aïn Ouarka.

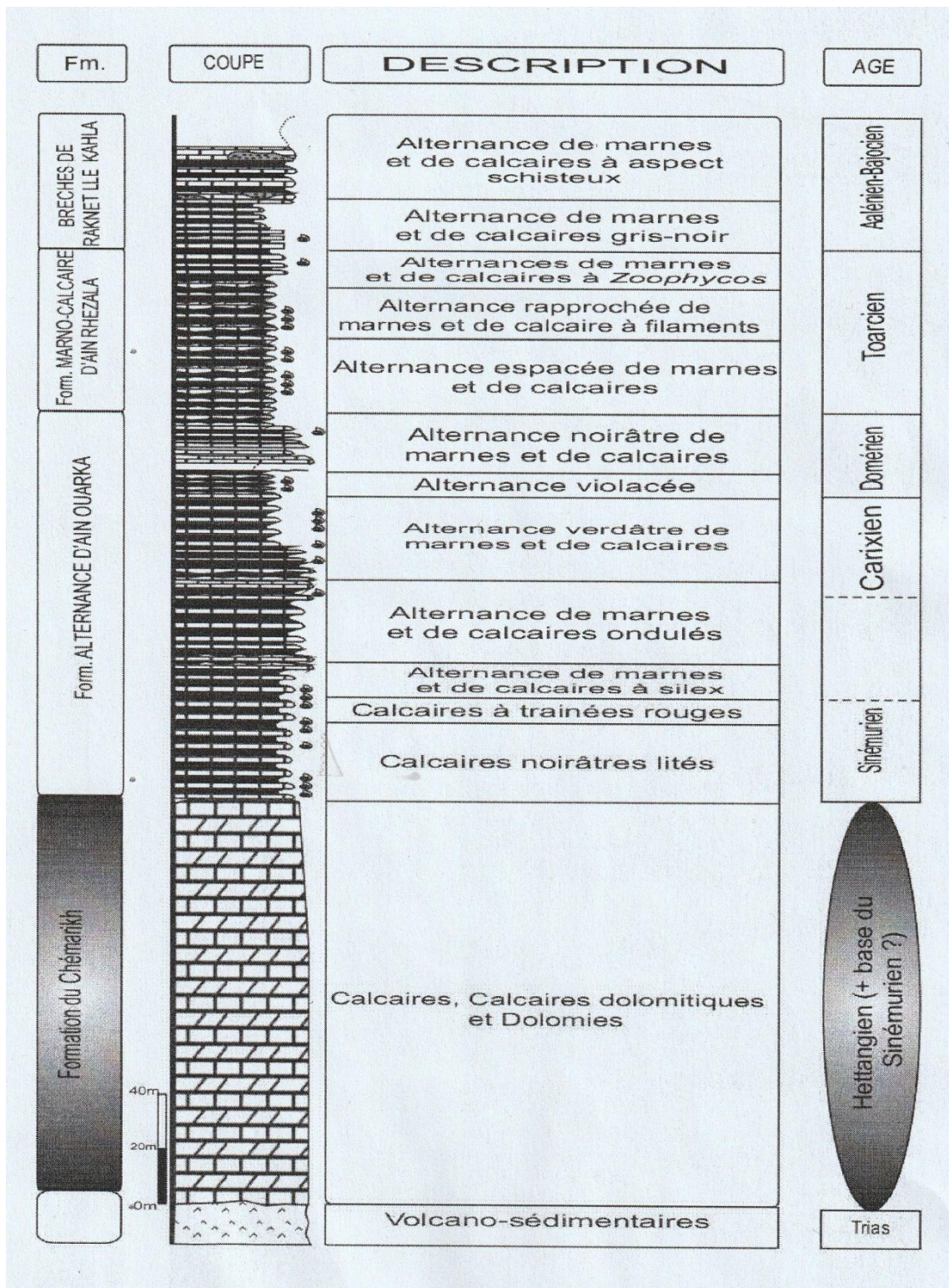


Figure 13 : Succession lithostratigraphique de référence de Jebel Chémariikh [5]

La période jurassique des Monts des Ksour a intéressé les géologues dès la fin du 18ème siècle. Les premiers travaux réalisés sont, en majeure partie, d'ordre stratigraphique : Arkell et Lucas (1953), Lasnier (1965), Bassoullet (1966). Les deux premiers ont signalé le genre *Ermoceras* dans les séries Bajociennes de l'Atlas saharien au niveau du Jebel Guettaï. Le dernier (Bassoullet) a mis en

évidence le Lotharingien (Sinémurien supérieur) grâce à la découverte d'un niveau à Asténoceras dans le Djebel Chémariikh.

Une année après, Bassoullet et Alliou découvrent des dinosauriens de l'Infra-Lias et du Crétacé inférieur. Parallèlement, de nombreuses analyses tectoniques et cartographiques ont été menées dans l'Atlas saharien, citons :

Flamand (1911), Lafitte (1939), Cornet (1952). Les travaux de Cornet et Lafitte ont obtenu des résultats complémentaires où ils distinguèrent l'accident Nord-atlasique. Ils donnèrent également une analyse tectonique et stratigraphique modifiant l'échelle stratigraphique définie par Flamand. Les neuf cartes photogéologiques au 1/100 000<sup>e</sup> qui ont été réalisées par Galmier (1970), ont incité les géologues d'approfondir l'étude géologique.

Ces cartes présentent une vue d'ensemble sur la tectonique des Monts des Ksour. La réalisation de ces cartes a poussé G. Busson (1970) à faire une synthèse fondamentale sur le Mésozoïque saharien en établissant une corrélation entre le domaine saharien et le domaine atlasique.

Des travaux récents ont été résumés essentiellement dans des thèses, citons : L. Mekahli (1995, 1998), Mekahli et Elmi (1997, 1999) ; N. Kazi-Tani (1986) ; R. Aït Ouali (1991) ; Yelles-Chaouche et al. (2001) ; Sebane (2007) ; Meddah (2010).

Ces travaux traitent principalement la stratigraphie paléontologique fine et les différentes phases d'ouverture du bassin du Ksour. On peut ajouter des sujets de Magister très pointus : sur les édifices récifaux du Bajocien (Tlili, 1994), sur les peuplements des brachiopodes du Bajocien supérieur et le Bathonien (Ouali-Mehadji, 1995) ,sur la plate-forme saharienne (Charef-Fendi) (Mekaoui, 2000) et enfin sur la plate-forme du domaine Pré-atlasique (Salhi, 2001). Tous ces travaux ont été actualisés dans des publications de synthèse (Elmi, 1978-1986 ; Elmi et al., 1998).

## **5 La Tectonique du Secteur d'Etude :**

### **5.1 Rappel sur les éléments tectoniques :**

#### **5.1.1 Généralités :**

Toutes les mégastructures, méso structures et microstructures enregistrées à l'échelle cartographique, affleurement et microscopique, résultent généralement des événements tectoniques à travers les temps géologiques. Cette déformation peut correspondre à des mouvements minimes difficilement décelables, comme elle peut être spectaculaire, provoquant des déplacements

Kilométriques. Les failles sont des cassures accompagnées d'un déplacement relatif des deux compartiments.

La faille est le résultat d'un cisaillement dont les effets se localisent en surface (Plan de faille). Le rejet vertical d'une faille c'est la valeur du déplacement relatif d'une couche, son pendage est l'angle que fait le plan de faille avec l'horizontale [8].

Lorsque le plan de faille est incliné vers la lèvre affaissée, la faille est dite normale. Elle est inverse dans le cas contraire, si le plan de faille surplombe la lèvre affaissée. Les failles de rejet horizontal sont dites décrochantes. Lorsque le bloc se déplace vers la gauche, il est dit que le mouvement est senestre, il est dextre lorsqu'il est vers la droite. Si le plan de cassure contient des éléments plus durs par rapport à la matrice, ceux-ci creusent des stries dont on peut répéter la direction et le sens.[8]

### 5.1.2 Les éléments Planaires :

Ce sont toutes les failles caractérisées par un plan de glissement, portant sur leurs miroirs des indicateurs de mouvement. Ce plan est caractérisé par une direction dont la valeur est comprise entre ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ) et un pendage qui va de  $0^{\circ}$  à  $90^{\circ}$ . [8]

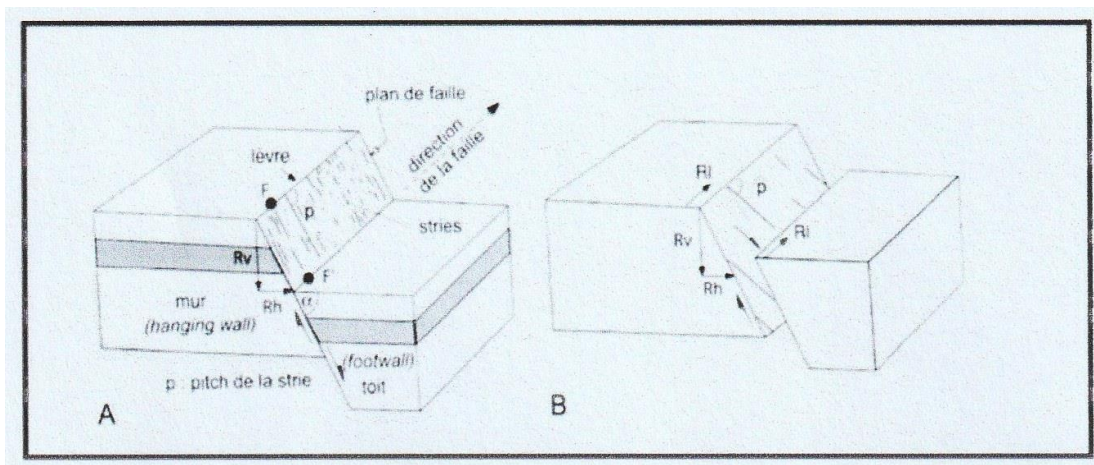


Figure 14: Faille Normale [8]

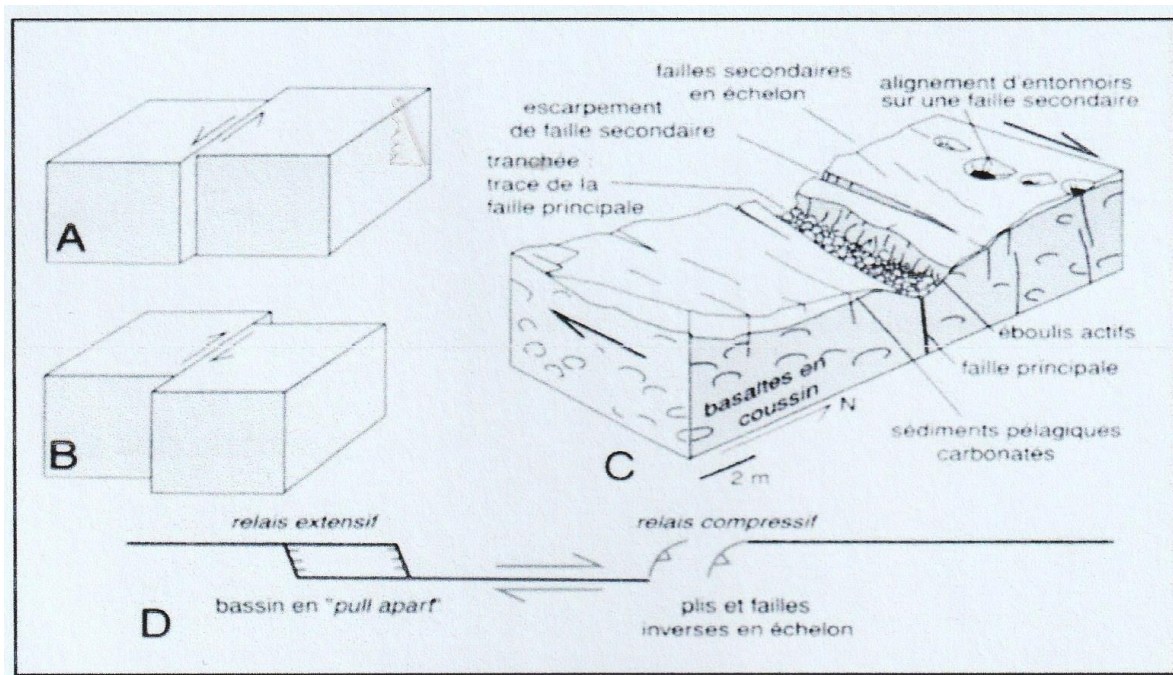
**Faille Décrochant :**

Figure 15 : Faille Décrochantes [8]

**6 Conclusion :**

Ain-Ouarka, est un véritable musée à ciel ouvert, où tous les âges géologiques sont représentés sur un espace restreint de quelques kilomètres carrés. L'apparition des sources minérales et surtout thermales à Ain-Ouarka est due à l'existence d'un circuit hydraulique à forte perméabilité entre la profondeur et la surface résultant généralement d'une fracturation liée à un accident géologique récent. Les mécanismes qui permettent la circulation sont obligatoirement l'existence d'un gradient hydraulique important entre la zone d'alimentation et la zone d'émergence.

Accessoirement une élévation importante de la température provoquant une baisse de densité de l'eau et / ou un dégagement abondant de CO<sub>2</sub> mantélique (gaz –lift) à la faveur de failles profondes et ouvertes, de ce fait les structures géologiques commandent l'apparition des sources thermo – minérales dans la région d'étude.

L'anticlinal de Aïn Ouarka illustre parfaitement le type de déformation souple. Le Trias affleure au cœur de cet anticlinal sur environ 2 km d'Est en Ouest et forme une colline s'élevant à 1050 m, il est constitué d'argiles bariolées formant la plus grande partie du Diapir, avec du sel de basalte et des roches vertes.

**CHAPITRE II**  
**CLIMATOLOGIE**

## 1 Introduction :

La climatologie est l'étude du climat et de l'état moyen de l'atmosphère, c'est-à-dire la succession des conditions météorologiques sur de longues périodes dans le temps [31]. Le climat de l'Algérie est varié, car le pays a une très grande superficie (quatre fois celle de la France) : la partie nord possède un climat méditerranéen, alors que le reste du pays possède en majorité un climat désertique [31].

Cependant entre ces deux grands types de climats, existent des climats de transition, notamment le climat semi-aride ; qui correspond à un climat méditerranéen avec une sécheresse ne se limitant plus uniquement à la saison estivale mais à une bonne partie de l'année mais aussi un climat méditerranéen aux influences montagnardes, un petit plus continental. Néanmoins, l'Algérie est un pays de la zone subtropicale où le climat dominant est chaud et sec [31].

Les paramètres hydro climatiques ont une grande importance pour toute étude hydrogéologique, car ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères. L'étude climatique sera effectuée à partir des données météorologiques température et précipitations moyennes mensuelles de la station météorologique d'Ain Sefra, dont les caractéristiques de la station sont représentées au tableau suivant :

**Tableau 1:** Caractéristiques de la Station d'Ain-Séfra [20]

Station	Code	X	Y	(Altitude) Z
Ain-Séfra	605600	724838.035	362956.25	1058 m

## 2 Etude des Précipitations :

Toutes les formes d'eau qui tombent sur la surface de la terre sont appelées précipitations. Les précipitations soient de la neige, de la pluie, du verglas ou de la grêle dépendent de la température de l'air à travers lequel l'eau tombe. Nous nous intéressons dans cette étude uniquement aux précipitations liquides (pluies), qui constituent le facteur fondamental dans le comportement hydrogéologique de la région.[21].

### 21 Répartition des précipitations moyennes annuelles à la station d'Ain-Sefra (1980-2008)

Les précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station d'Ain Sefra pour la période allant de 1980 à 2008, soit une observation de 31 années, sont mentionnées au tableau 2, [20].

**Tableau 2:** Précipitations Moyennes Annuelles [20]

Périodes	Précipitations (mm)	Périodes	Précipitations (mm)
1980	155.00	1995	215.70
1981	63.90	1996	183.20
1982	218.40	1997	157.80
1983	50.30	1998	87.30
1984	89.50	1999	158.40
1985	163.80	2000	39.40
1986	147.30	2001	84.10
1987	194.80	2002	125.90
1988	147.60	2003	163.90
1989	181.10	2004	212.70
1990	329.50	2005	163.50
1991	376.92	2006	212.90
1992	151.60	2007	165.10
1993	122.30	2008	417.37
1994	106.40		

La variation interannuelle des précipitations, montre une année exceptionnelle correspondante à l'année 2008 avec 417 mm, alors que le minimum est de 39.9 mm pour l'année 2000. La moyenne interannuelle est de 168mm.

## 22 La Pluviométrie :

La pluviométrie est l'évaluation quantitative des précipitations, de leur nature (pluie, neige, grésil, brouillard) et distribution. Elle est calculée par diverses techniques<sup>1</sup>. Plusieurs instruments sont utilisés à cette fin, dont le pluviomètre/pluviographe est le plus connu. L'unité de mesure varie selon que le type de précipitations est solide ou liquide, mais elle est ramenée en millimètre d'équivalence en eau par mètre carré de surface à fin de comparaisons. Toute précipitation de moins de 0,1 mm est qualifiée de « *trace* »<sup>2</sup>. La pluviométrie, avec la répartition de la température terrestre, conditionne les climats terrestres, la nature et le fonctionnement des écosystèmes ainsi que leur productivité primaire. Elle est l'un des facteurs conditionnant le développement des sociétés humaines et donc un enjeu géopolitique. [22].

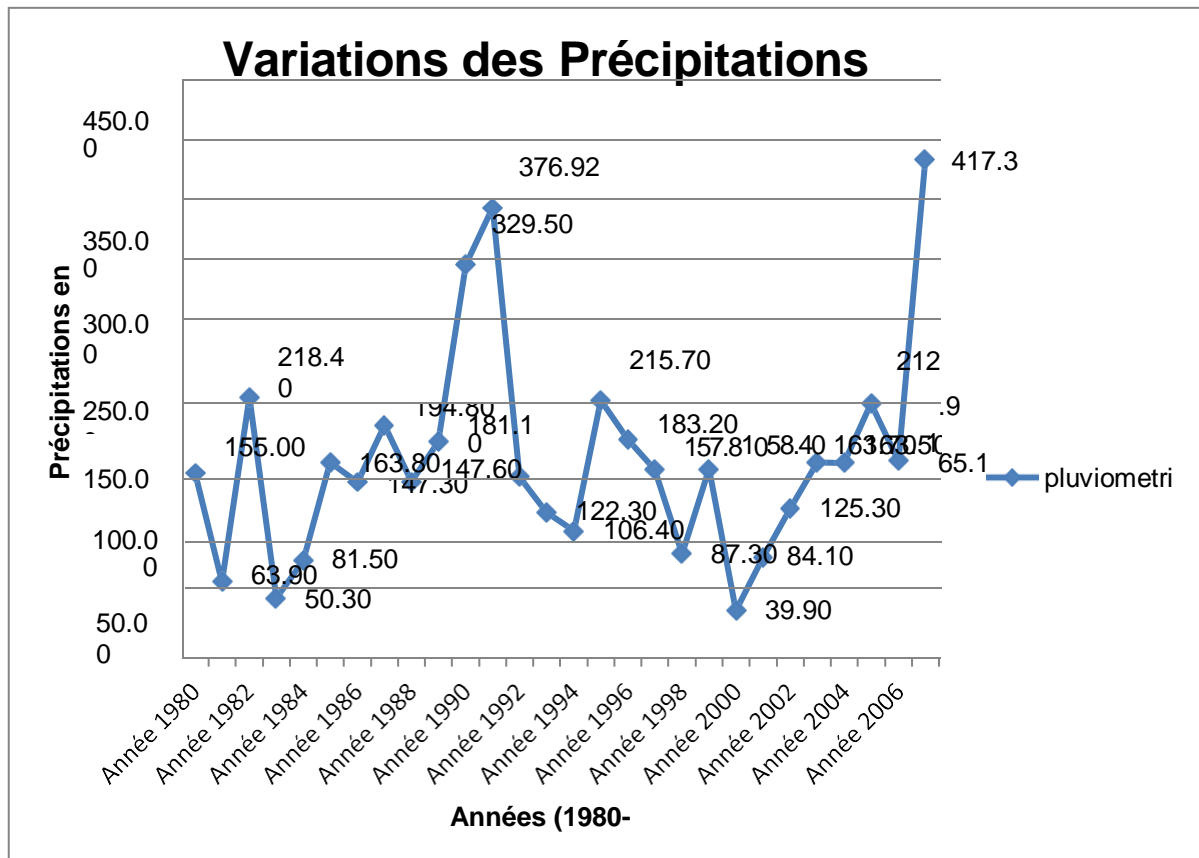


Figure 16: Variations des Précipitations Annuelles à la Station d'Ain-Séfra [20]

**Précipitations Mensuelles :**

Tableau 3: Précipitations Mensuelles [20]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT	Total Annuel
P(mm)	9.3	19.4	16.1	8.4	15.1	14.2	24	17.5	23.1	9.7	4	7.4	168

Les précipitations désignent tous les météores qui tombent dans une atmosphère et il peut s'agir de solides ou de liquides selon la composition et la température de cette dernière<sup>1</sup>. Ce terme météorologique est le plus souvent utilisé. La Terre les hydrométéores (cristaux de glace ou gouttelettes d'eau) qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol ou s'évaporent en virga avant de l'atteindre<sup>1,5</sup>. Par extension, le terme peut également être utilisé pour des phénomènes similaires sur d'autres planètes ou lunes ayant une atmosphère. Le tableau 3 et la figure 17 ci-dessous montrent la répartition des précipitations moyennes mensuelles.[22]

- La pluviométrie moyenne annuelle de la période est de 168mm.

- Le mois le plus pluvieux Mars, avec une valeur de 24 mm, tandis que le plus sec est le mois de Juillet avec une valeur de 04mm.

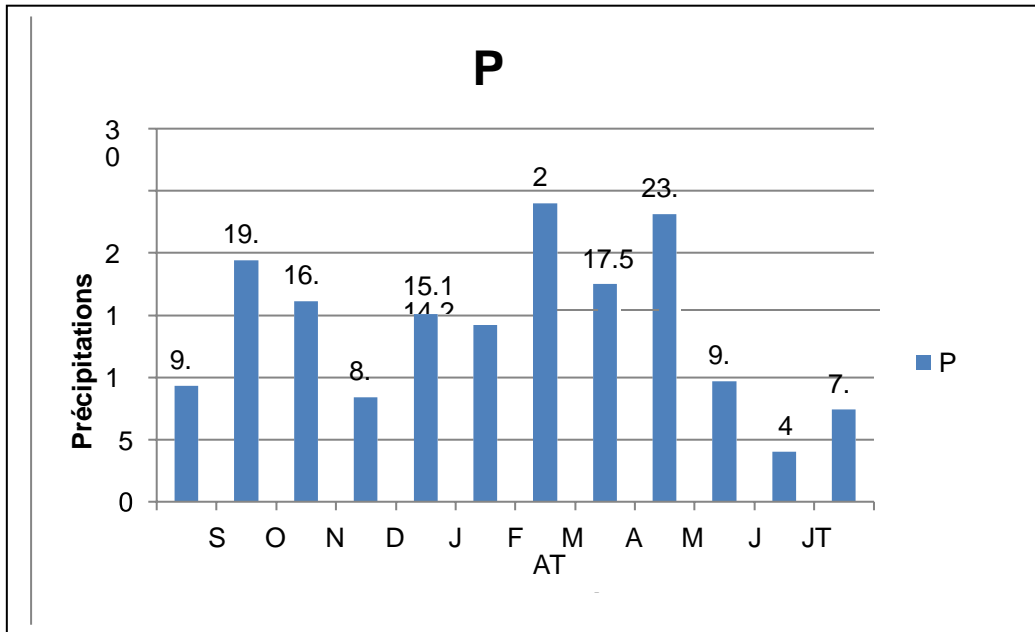


Figure 17: Précipitations Moyennes Mensuelles [20]

### 3 Etude des Températures :

#### 3.1 Définitions :

La température étant étroitement liée au taux de radiation, lui-même directement corrélé à l'évaporation, il s'ensuit qu'une certaine relation existe entre l'évaporation et la température de la surface évaporant [23]. La température est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre et étudiée en thermométrie. Dans la vie courante, elle est reliée aux sensations de froid et de chaud, provenant du transfert thermique entre le corps humain et son environnement. En physique, elle se définit de plusieurs manières : comme fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules (en théorie cinétique des gaz), par l'équilibre des transferts thermiques entre plusieurs systèmes ou à partir de l'entropie (en thermodynamique et en physique statistique). La température est une variable importante dans d'autres disciplines : météorologie et climatologie, médecine, et chimie, [23].

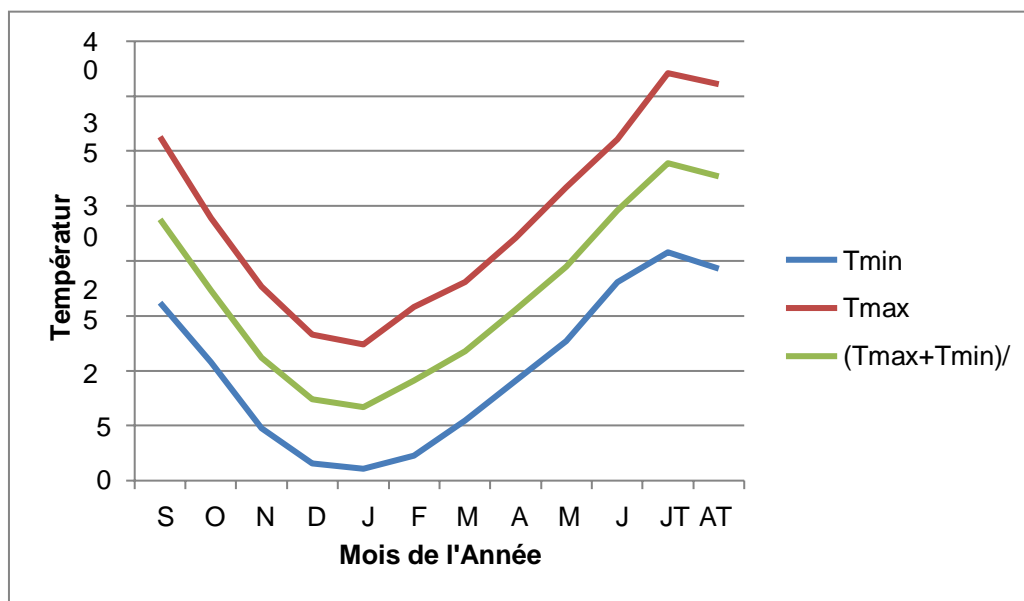
**32 Les moyennes mensuelles :**

- Les minima (Tmin) : sont comprises entre 1.1°C en janvier et 20.8 °C en Juillet.
- Les maxima (Tmax) : sont comprises entre 12.4 oc en janvier et 37.1 °C en Juillet.
- Les moyennes  $T_M = (T_{max} + T_{min}) / 2$ .

La répartition de la température moyenne mensuelle permet de considérer le mois de Janvier comme le plus froid (6,7°C) et le mois de Juillet comme le plus chaud de l'année (28.9 °C). La moyenne annuelle de la tempe.

**Tableau 4 :** Températures mensuelles (Minimum, Maximum et Moyenne) [20]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT	Année
Tmin(°C)	16.2	10.8	4.8	1.6	1.1	2.3	5.5	9.1	12.7	18.1	20.8	19.3	10.1
Tmax(°C)	31.3	23.9	17.7	13.3	12.4	15.8	18.1	22.1	26.7	31.1	37.1	36.1	23.8
(Tmax+Tmin)/2	23.8	17.3	11.2	7.2	6.7	9.1	11.8	15.6	19.5	24.6	28.9	27.7	17.0



**Figure 18 :** Températures mensuelles (Minimum, Maximum et Moyenne) [20]

**33 Amplitude Thermique :**

L'amplitude thermique est l'écart entre la température minimale et maximale en un même lieu pendant une durée de temps déterminée. Cette période peut être quotidienne, mensuelle, saisonnière ou annuelle. L'Amplitude Thermique mensuelle se calcule par différence entre le maximum et le minimum du mois considéré. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure ci-dessous.[23]

Tableau 5: Amplitude Thermique (1980-2008) Station Ain-Sefra [20]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT	Année
Tmin(°C)	16.2	10.8	4.8	1.6	1.1	2.3	5.5	9.1	12.7	18.1	20.8	19.3	10.1
Tmax(°C)	31.3	23.9	17.7	13.3	12.4	15.8	18.1	22.1	26.7	31.1	37.1	36.1	23.8
(Tmax-Tmin)	15.1	13.1	12.9	11.7	11.3	13.5	12.5	13	14	13	16.3	16.8	13.60

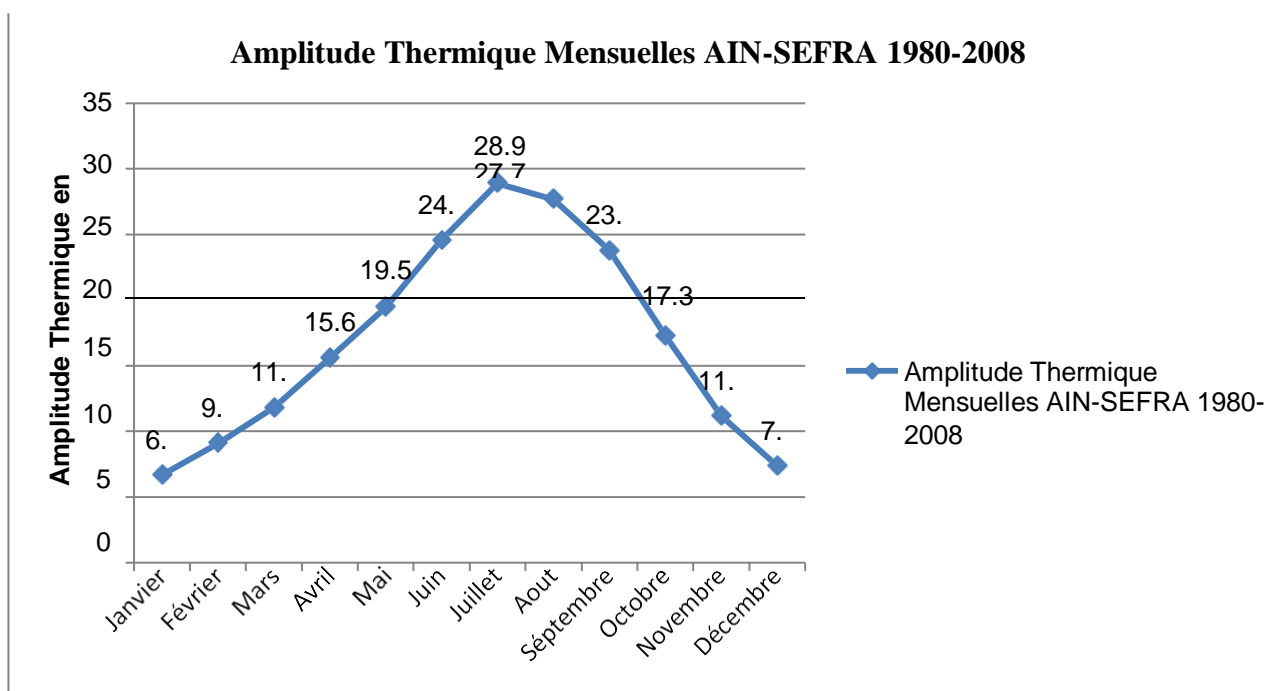


Figure 19: Amplitude Thermique Mensuelles Ain-Sefra 1980-2008 [20]

**34 Interprétations :**

Ce grand écart entre la minimale et la maximale est appelée : **amplitude thermique** diurne. Lorsque le ciel est dégagé au cours de la nuit, les températures chutent

**4 Etude du Climat :**

**41 Définition :**

Le climat est la météorologie moyenne sur une période d'environ 30 ans. C'est donc le « temps moyen » qu'il fait à un endroit donné du globe. Les différences de climat sur le globe terrestre sont dues aux variations de la quantité d'énergie solaire que reçoit la Terre. Cela est directement lié à l'inclinaison des rayons solaires qui arrivent à la surface terrestre [25]. L'étude du climat et des indices climatiques se fera à partir des données des températures et des précipitations moyennes mensuelles [25].

Tableau 6 : Températures et Précipitations Moyennes Mensuelles [20]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT	Année
T moyennes (°C)	23.8	17.3	11.2	7.4	6.7	9.1	11.8	15.6	19.5	24.6	28.9	27.7	17
P mm	9.3	11.4	16.1	8.4	15.1	14.1	24	17.5	23.1	9.7	4	7.4	168

**42 Courbe pluviothermique (P = 2T) (Fig. 20) : (méthode de GAUSSEN et BAGNOULS).[26]**

Pour GAUSSEN ET Bagnouls, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations exprimée en degré centigrades. Cette relation permet d'établir des diagrammes pluviométriques sur lesquels les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations.

La courbe des températures passe au-dessous de celle des précipitations pendant les mois secs. Pour les mois humides, la courbe des précipitations passe au-dessus de la courbe des températures.

Pour la station d'Ain-Sefra, nous constatons que nous avons une période humide allant du mois d'Octobre jusqu'au fin Mars, une période sèche allant du mois d'Avril jusqu'au la fin du mois de septembre. Pour notre cas la méthode de GAUSSEN et BAGNOULS a montré une période sèche allant du début du mois de Mai jusqu'à la fin du mois de Septembre, une période humide allant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai.

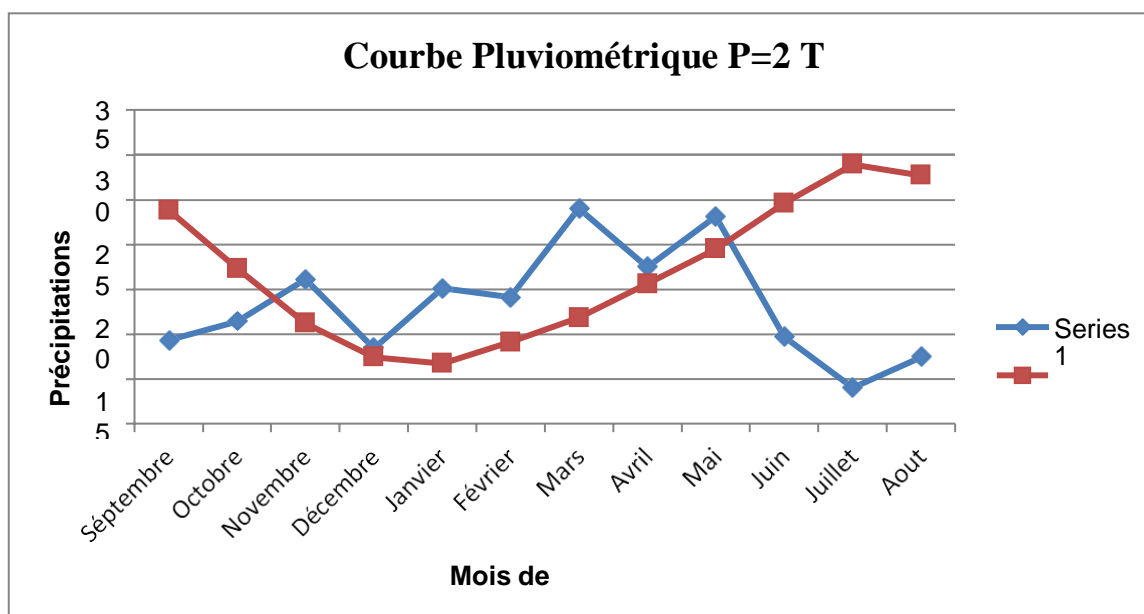


Figure N° 20 : Courbe Pluviométrique (P=2T) [20]

**43 Courbe ombrothermique (Méthode d'EUVERTE) :**

Un diagramme ombrothermique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures  $(P = 2T)^2$ .

Il a été développé par Henri Gaussen et F. Bagnouls, botanistes célèbres, pour mettre en évidence les périodes de. Ces diagrammes permettent de comparer facilement les climats de différents endroits d'un coup d'œil du point de vue pluviosité.

Les températures sont indiquées à gauche et les précipitations sont indiquées à droite. La norme de deux pour un utilisée dans ce diagramme tient au fait qu'il a été développé en milieu méditerranéen et que la sécheresse pour les plantes de ce milieu correspond à un rapport entre le nombre de mois secs et humides de plus de 1 sur le diagramme.[26]

Il compare donc bien des climats des latitudes moyennes. Il est moins utile dans les régions tropicales où la pluviosité est assez constante et toujours au-dessus de celle de la température ainsi que dans les climats arctiques/antarctiques où la pluviosité est toujours sous la courbe de température et sous forme solide la plupart du temps<sup>2</sup>. Sur notre diagramme, on remarque l'existence de deux périodes

- Période déficitaire qui s'étale du début Mai à Septembre.
- Période excédentaire qui s'étale de Septembre à la fin Avril.

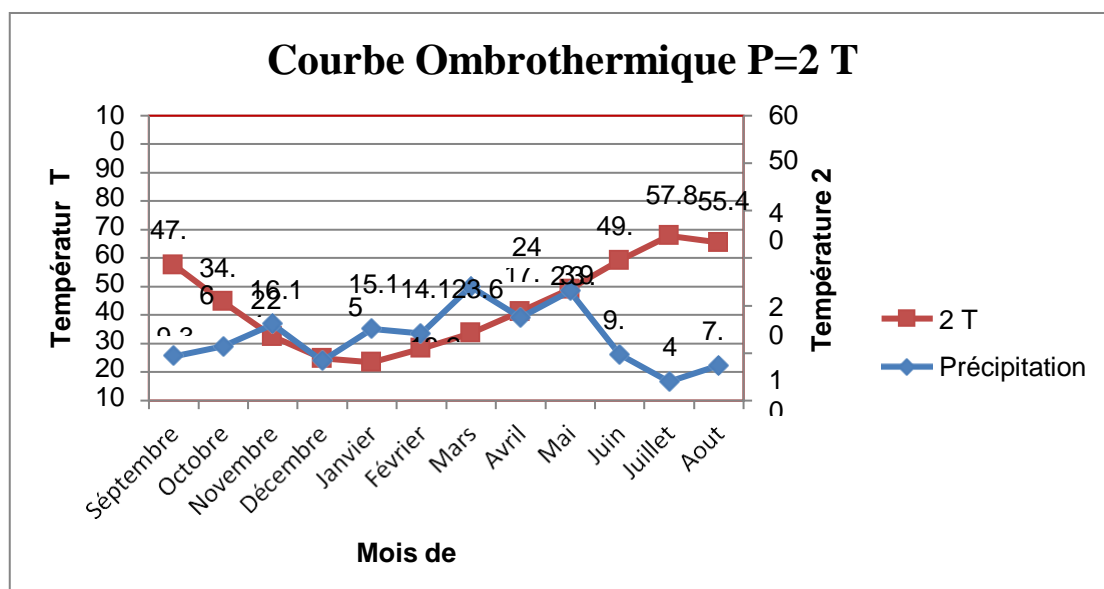


Figure 21 : Courbe Ombrothermique P= 2T [20]

Celle-ci est appréciée à travers un indice de sécheresse  $S$  (= indice ombrothermique) calculé en faisant la différence entre les courbes  $P$  et  $T$  pour le ou les mois les plus secs.

**Un mois donné est considéré comme sec quand  $P < 2T$  c'est-à-dire quand l'évapotranspiration potentielle (ETP) est supérieure aux précipitations.**

**Inversement, quand  $P > 2T$ , le mois est considéré comme humide [27]**

Pour repérer les mois "sec" et "humide" et mettre en évidence les périodes de sécheresse d'une localité, on trace généralement les diagrammes ombrothermiques. Ces diagrammes superposent les deux courbes de températures et de précipitations pour les 12 mois de l'année ce qui permet de définir une aire ombrothermique. Plus l'aire est importante et plus la saison est sèche sur notre diagramme, on remarque l'existence de deux périodes

- Période déficitaire qui s'étale du début Mai à Septembre.
- Période excédentaire qui s'étale de Septembre à la fin Avril

### 5 Le rapport entre précipitations et températures : Le rapport $P/T$ représenté :

Par le tableau N°8 permet de mieux appréhender l'évolution des climats.

**Tableau 7** : Evolution du Climat [20]

Année	P / T	Type de la Station
Septembre	0.39	} $P/T < 1$ Station très sèche Subméditerranéenne
Octobre	1.12	
Novembre	1.44	
Décembre	1.14	
Janvier	2.25	} $1 < P/T < 3$ Station sèche Subméditerranéenne
Février	1.56	
mars	2.03	
Avril	1.12	
Mai	1.18	
Juin	0.39	} $P/T < 1$ Station très sèche Subméditerranéenne
Juillet	0.14	
Août	0.27	

Deux (02) types de sous climats se présenteraient dans l'année.

- Très sec subméditerranéen qui concerne la période de Juin à Septembre.
- Sec subméditerranéen concernant la période allant de Octobre à Mai. D'après la classification d'EUVERTE, la région d'Ain-Sefra appartiendrait à une zone sèche subméditerranéenne.

## 6 Indices Climatiques Généraux :

### 6.1 Indice d'aridité de De Martonne (1926) :

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, De Martonne a défini comme fonction climatologique nouvelle l'indice d'aridité du climat par le quotient I ou IDM équivalant à  $P/(T+10)$ . Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température ; l'évaporation étant considérée comme une fonction linéaire de la température. Il a été ajouté 10 aux moyennes thermométriques pour éviter les valeurs négatives de l'indice. De fait de sa simplicité, il a été beaucoup utilisé par les géographes [28].

**L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Une faible aridité correspondant à des pluies abondantes et/ou des températures basses. De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel (Tab.2).[28]**

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (1)$$

P : précipitations annuelles (mm) et T : température moyenne annuelle (°C)

P : précipitation moyenne annuelle : 168 mm

T : température moyenne annuelle : 17°C

I = 6.22

L'indice I est égal à 6.22, donc la région présente un climat désertique.

**Tableau 8:** Indice de DEMARTON [28]

Valeurs de Icm		
< 5	<b>Aridité Absolue</b>	Désert sans culture
5 à 10	<b>Désert (Aride)</b>	Désert et Steppe ; aucune Culture sans irrigation
10 à 20	<b>Semi-Aride</b>	Formations Herbacées, steppes ou savane. Irrigation nécessaire pour les cultures exigeant de L'humidité
20 à 30	<b>Semi-Humide</b>	Prairie Naturelle, irrigation Généralement non nécessaire
30 à 40	<b>Humide</b>	Les arbres jouent un rôle de Plus en plus grand dans le

		Paysage
>40	Humide	La forêt est partout, la formation climatique, les cultures de céréales tendent à être remplacées par les Herbages

D'après la classification de De Martonne (Fig. 22), la région présente un climat désertique à écoulement temporaire, drainage intérieur endoréique.

**6.1.1 Indice Annuel (Ia) de DEMARTON :**

Cet auteur prenait en compte deux paramètres : Précipitations annuelles P en (mm).

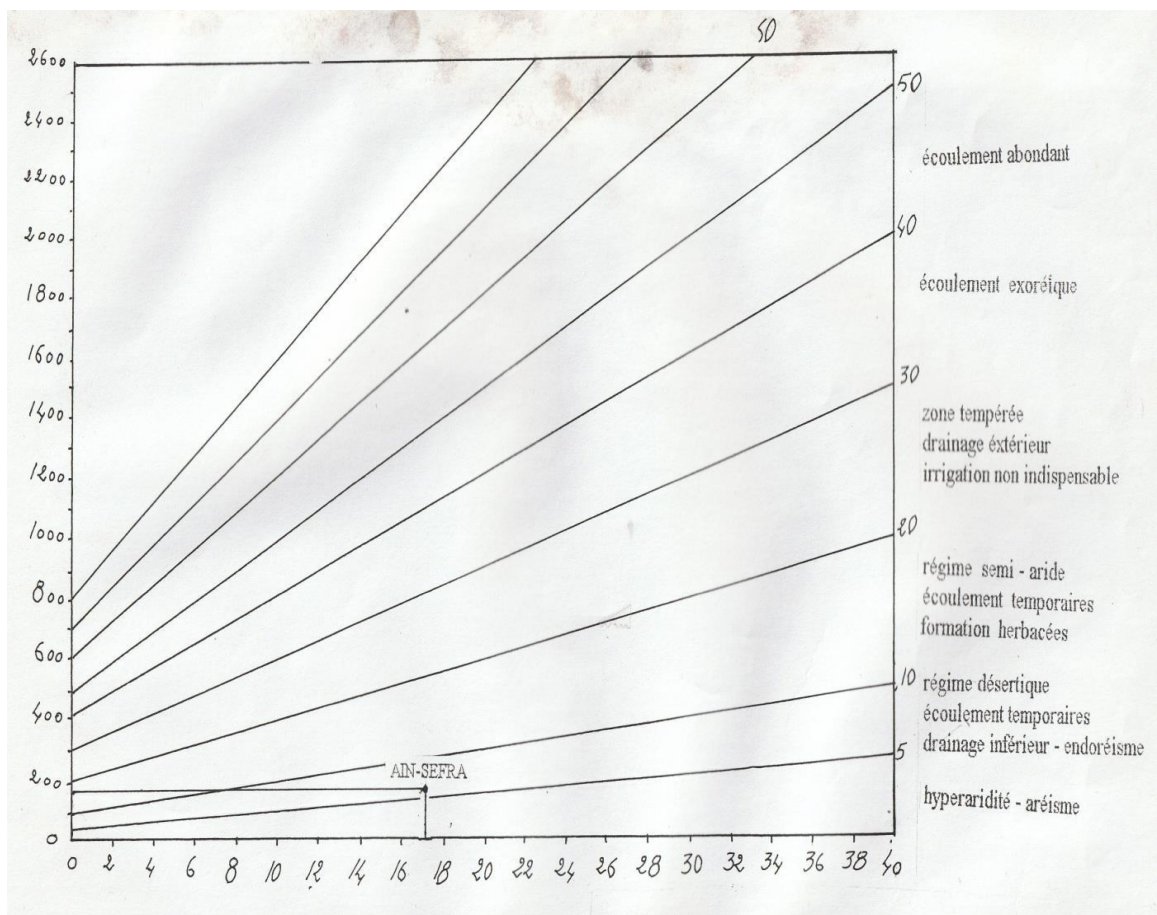


Figure 22 : Abaque d'Indice d'Aridité [29]

Températures moyennes annuelles T en (°C).

$$I_a = \frac{P}{T + 10} \quad (2)$$

$I_a = 160.1 / 26.9 = 5.95 I_a$  : compris entre 5 et 10 d'où un climat désertique caractérisé par des écoulements temporaires à drainage inférieur.

### 6.1.2 Indice Mensuel (Im) de DEMARTON : Il est obtenu par la relation

$$I_m = 12P / (T + 10) \quad (3)$$

P : Précipitations Moyennes Mensuelles en (mm).

T ; Températures Moyennes Mensuelles en (°C).

Les valeurs de Im seront reportées sur le tableau ci-dessous N°9 :

**Tableau 9:** Indice Mensuel de DEMARTON [28]

Mois	Im	Mois	Im
Janvier	10.85	Juillet	1.23
Février	8.86	Août	2.36
Mars	13.21	Septembre	3.30
Avril	8.20	Octobre	5.01
Mai	9.40	Novembre	9.11
Juin	3.36	Décembre	5.79

## 6.2 Le quotient pluviométrique :

En termes mathématiques simples, le quotient pluviométrique est le rapport de la hauteur de précipitations recueillies en un lieu et un mois donné à la hauteur qu'on y aurait recueillie si la hauteur moyenne annuelle avait été également répartie sur tous les jours de l'année.

Mais l'expression "quotient pluviométrique" la plus utilisée est celle qui désigne l'indice climatique d'Emberger, développé par le botaniste Louis Emberger en 1930, puis modifié en 1955 pour définir les cinq différents types de climats méditerranéens, depuis le plus aride, jusqu'à celui de haute montagne, climats que seul le Maroc dans la région méditerranéenne, possède en totalité. Stewart l'a simplifié en 1969.[30]

## 6.3 Indice climatique d'Emberger :

Louis Emberger est un botaniste phytogéographe français connu pour sa classification des bioclimats méditerranéens selon l'indice climatique d'Emberger.

Pour définir son indice d'aridité, Emberger s'est basé sur les limites des zones occupées par les différentes associations végétales. Il propose d'utiliser la relation suivante :[31]

$$I^2 = \left( \frac{P}{M + m} \right) \times 2 (M - m) * 100 \quad (4)$$

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des maxima de température en (°K) du mois le plus chaud (M=37.1+273=310.1)

m : moyenne des minima de température en (°K) du mois le plus froid (m=1.1 +273=274.1)

Q2= quotient pluviothermique d'Emberger.

Q2= 16

En rapportant cette valeur sur le diagramme d'Emberger (Figure 29) qui comporte en ordonnées les valeurs de Q2 et en abscisses la moyenne des minima du mois le plus froid (°C), nous pouvons constater que la région présente un climat saharien avec un hiver frais.

**64 indice de Stewart: Cet indice est donné par la relation**

$$Q^2 = 3.43 \frac{P}{M - m} \quad (5)$$

P : précipitation moyenne annuelle (mm) : 168 mm

M : moyenne des maxima de température du mois le plus chaud en °C :

37.1 m : moyenne des minima de température du mois le plus froid en °C :

1.1 On a Q2 = 15

Pour :

10 < Q2 < 50 ----- Climat Semi Aride

2 < Q2 < 10 ----- Climat Désertique

Q2 < 2 ----- Climat Insaturé

Q2 étant compris entre 10 et 50, cette valeur caractérise selon Stewart **un climat semi-aride.**

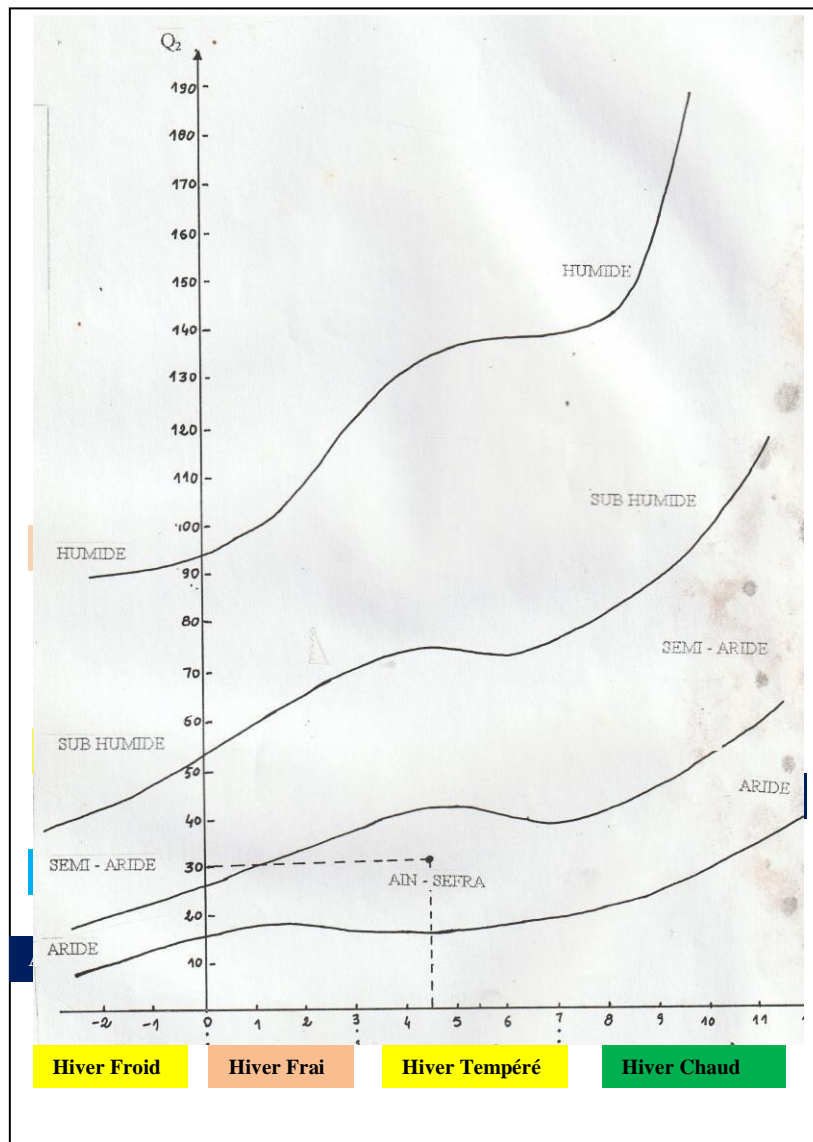


Figure 23: Climagramme L.EMBERGER [29]

**7 Conclusion :**

Ain-Ouarka est une zone humide classée dans la catégorie de RAMSAR avec la présence d'une flore et une faune remarquable. Les différentes méthodes d'étude du climat indiquent que la région d'Ain-Ouarka jouit d'un climat semi-aride à aride avec des étés chauds et des hivers froids, conditionné par les facteurs suivants : Eloignement de la mer ; Altitude assez élevée (1100 m), région montagneuse à sommets élevés et Proximité du Sahara et des Hautes plaines Oranaises.

Les variations de la température entre l'été et l'hiver sont très importantes. Les précipitations sont peu abondantes (168 mm/an), mais arrivent souvent avec des orages violents. Tous ces facteurs, très favorables à une évaporation intense, jouent un rôle fondamental dans le cycle des eaux de la région.

**CHAPITRE III**  
**HYDROCHIMIE**

## 1 Introduction :

Les eaux thermales constituent une mémoire qui apporte en surface des indications sur le réservoir profond. Leur étude géochimique représente un outil de reconnaissance qui, de manière complémentaire aux autres approches (géologiques, géophysiques, hydrodynamiques, etc.), permet de mieux déterminer leur origine, le circuit souterrain emprunté et les mélanges éventuels avec les eaux froides superficielles. La chimie des eaux naturelles est une science relativement neuve : longtemps le chimiste s'est limité au laboratoire et l'hydrogéologue contenté de localiser et d'évaluer les ressources en eau. [32]

L'objet de l'hydrogéochimie est donc de transposer au milieu naturel ce qu'étudie la chimie des solutions au laboratoire ; en d'autres termes de définir les processus affectant la répartition et la circulation des composés chimiques dans les eaux naturelles [32] Ce passage du laboratoire à la nature implique cependant la prise en compte de dimensions géologiques et biologiques [33].

Ainsi les temps mis en jeu dans le milieu naturel sont généralement beaucoup plus longs et conduisent plus souvent qu'au laboratoire à des équilibres stables. L'approximation d'équilibre thermodynamique permettra donc de simplifier la modélisation des processus. Par contre les eaux naturelles, et en particulier les eaux minérales, renferment d'innombrables composés compliquant la tâche du géochimiste ; celui-ci va donc devoir tout d'abord définir les variables maîtresses et les variables secondaires.

La minéralisation, quant à elle, constitue la caractéristique majeure d'une eau minérale. Elle définit à la fois la quantité d'éléments solubilisés dans cette eau et la nature de ces éléments; elle confère à cette eau ses propriétés organoleptiques et thérapeutiques; à ce titre elle constitue une contrainte juridique pour le label « d'eau minérale ». Mais la minéralisation peut-elle s'identifier à n'importe quelle analyse de source d'un système hydrominéral ?

En réalité, seule la minéralisation de la ressource profonde est effectivement constante et donc représentative ; elle subit presque toujours des transformations plus ou moins importantes avant le captage ou l'émergence de l'eau en surface. La question qui nous préoccupe ici est de savoir comment, au moyen de l'hydrogéochimie, retrouver cette minéralisation d'origine de la ressource et retracer son évolution jusqu'à l'utilisation de l'eau minérale.

Une eau minéralisée est une eau ayant une concentration importante en sels minéraux : Calcium – Magnesium – Sodium – Potassium – Chlorures - carbonates – Bicarbonates et Sulfates.

Une eau minérale naturelle est une eau de source naturelle, douée de propriétés thérapeutiques et ce quel que soit son degré de minéralisation. Elle provient des grandes profondeurs terrestres (gisement souterrain) se caractérisant par la stabilité de ses caractéristiques physico – chimiques dans le temps, par sa pureté originelle et à l’abri de tout risque de pollution.

Elle ne répond pas aux normes de potabilité, ce qui la différencie des eaux de boisson, et ne subit aucun traitement. L’eau minérale peut être froide ou chaude. Le but de ce chapitre est de décrire les propriétés physico-chimiques de l’eau et les principes qui contrôlent le comportement des constituants dissous dans les eaux souterraines.

## **2 Définition des eaux Thermales ou Minérales :**

Sur le plan réglementaire, l’article 2 du décret exécutif N°94-41 du 21 Janvier 1999, portant définition des eaux thermales et réglementant leur protection, leur utilisation et leur exploitation, stipule : Les eaux thermales sont des eaux captées à partir d’une émergence naturelle ou d’un forage et qui, en raison de leurs principes, de la stabilité de leurs caractères physiques et de leur composition chimique peuvent avoir des propriétés thérapeutiques". L’article 18 du même texte, précise que "sur l’ensemble du territoire national, les eaux reconnues conformément aux dispositions du présent décret, comme des eaux thermales, sont interdites à toutes utilisations agricole, industrielle ou autres que thérapeutiques [33]

## **3 Acquisition de la Minéralisation :**

L’idée selon laquelle les eaux minérales (ou en tout cas certaines) seraient d’origine purement profonde (eaux « juvéniles ») a longtemps prévalu. Elle a été écartée notamment grâce au développement de la géochimie isotopique. On peut montrer actuellement que les eaux minérales sont initialement des eaux météoriques infiltrées plus ou moins profondément dans le sous-sol où elles ont acquis leur caractère « minéral » [34].

A la différence des eaux de nappe phréatique, cette circulation (généralement aussi plus lente), de l’infiltration à l’émergence, s’effectue soit à des profondeurs plus importantes grâce à des accidents géologiques, soit dans des zones actives au niveau magmatique, soit, enfin, dans des formations géologiques riches en minéraux solubles (évaporites par exemple) [33]. Ces trois aspects ne sont pas exclusifs les uns des autres. Dans les deux premiers cas, à l’acquisition de la minéralisation par lessivage des roches et minéraux rencontrés s’ajoute souvent une minéralisation acquise par absorption d’éléments volatiles (gaz, soufre...) d’origine profonde. Finalement l’eau météorique se transforme peu à peu au cours de sa circulation : elle perd certains de ses constituants initiaux comme l’oxygène dissous (RAMBAUD, 1982) mais en gagne d’autres, le tout produisant une solution originale dont la minéralisation reflète les contextes géologiques traversés par l’eau.

#### 4 Phénomènes Ecrans:

Au cours de sa remontée naturelle ou artificielle (forage), l'eau minérale est le siège de plusieurs phénomènes physico-chimiques qui altèrent son état initial.

##### 41 Baisse de pression :

Si la diminution de la pression absolue accompagnant la remontée du fluide n'a que peu d'incidence en elle-même, sur le chimisme de l'eau, la détente ainsi provoquée implique, la plupart du temps, la libération d'une phase gazeuse jusque-là dissoute. Certains gaz sont inertes du point de vue chimique

Les gaz rares (hélium, argon, radon...), l'azote N<sub>2</sub>... ; d'autres, en revanche, font partie intégrante d'équilibres acido-basiques et/ou redox comme CO<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>S : leur départ déplace les équilibres et modifie donc le chimisme de l'eau. Il convient de noter que ces phénomènes sont rapides, que ce soit le dégazage ou les réactions acide-base associées.

##### 42 Oxydation :

L'eau minérale acquiert sa minéralisation en grande partie par lessivage des roches et minéraux profonds ; ces solides, à l'abri de l'air, imposent un régime plus ou moins réducteur à l'eau. Le contact avec l'atmosphère et ses 20 % d'oxygène va déstabiliser l'équilibre précédent. L'oxydation peut se produire en outre lors du mélange avec une nappe superficielle ou par lessivage d'autres minéraux (oxydes...). La cinétique réactionnelle est néanmoins plus lente que dans les phénomènes de dégazage et réactions acido-basiques.

##### 43 Variations de température :

Le cas général est celui du refroidissement au cours de la remontée de l'eau minérale en surface, les niveaux producteurs profonds étant réchauffés au moins par conduction sinon aussi par convection. Ce refroidissement peut marginalement atténuer le dégazage, mais de toute façon il affectera tous les équilibres chimiques contrôlant l'eau minérale.

#### 5 Dissolution/précipitation de phases minérales :

Le phénomène de dissolution/précipitation peut avoir plusieurs origines ; l'eau profonde peut rencontrer lors de son ascension des associations minérales nouvelles vis-à-vis desquelles elle se trouvera sur- ou sous-saturée ; il peut alors se produire respectivement précipitation ou dissolution. Ce même phénomène peut être dû également aux réactions précédemment citées : le dégazage de CO<sub>2</sub> entraîne généralement une précipitation de carbonate, la baisse de température favorise les dépôts de silice pour ne prendre que ces deux exemples.

Ces préoccupations nous en conduit à entreprendre une étude hydro chimique qui permettra de définir les limites dans lesquelles les eaux de la zone étudiée peuvent être utilisable pour les soins du corps humains et peuvent être sans danger, en date du : 14/03/2021 à la station de Ain-Ouarka. L'Etude a été faite sur la source de la station thermale de Ain-Ouarka captée dans un réservoir cimenté, ou l'e est pompée par une pompe immergée.

Cette source est le seul point d'eau pour cette station thermale. L'Etude a pu être accomplie en trois (3) phases : Sur le terrain : prospection et échantillonnage en date du 14/03/2021

Au laboratoire ADE Naama : Analyses

Au Bureau : Interprétations

Les analyses confiées au laboratoire de l'ADE de la wilaya de Naâma ont porté sur le dosage des ions :  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$  ; la conductivité électrique à 250°C ; le résidu Sec à 110°C ; le PH ; la Minéralisation. Les résultats fournis par le laboratoire sont présentés sur le tableau N°10.

L'Etude a été faite sur la source de la station thermale de Ain-Ouarka.

### 5.1 La Minéralisation :

**Tableau 10:** Résultats des Analyses Hydro-chimiques (Laboratoire de l'ADE Naâma)

Paramètres Orgleptiques	Unité	Résultat	Minéralisation Globale	Unité	Résultat
Couleur	mg/l platine	/	Calcium ( $\text{Ca}^{++}$ )	mg/l	436.8
Odeur à 25 °C	Taux dilution	/	Magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ )	mg/l	114.2
Saveur à 25 °C	Taux dilution	/	Dureté totale (TH)	mg/l $\text{CaCO}_3$	1560
Chlore résiduel Libre	mg /l	<b>Nul</b>	Sodium ( $\text{Na}^+$ )	mg/l	88.6
<b>Paramètres Physico- Chimiques</b>	<b>Unité</b>	<b>Résultat</b>	Potassium ( $\text{K}^+$ )	mg/l	11.5
Concentration en ions hydrogène	Unité Ph	7.12	Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )	mg/l	2200.3
Conductivité à	$\mu\text{S}/\text{cm}$	8240	Sulfates ( $\text{SO}_4^{--}$ )	mg/l	1645

25°C					
Température	°C	46	Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	8.6
Turbidité	NTU	1.49	Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	129.3
Oxygène dissous	mg/l	/	Titre Alcalimétrique Complet (TAC)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	106
T D S	mg/l	4260	soufre S <sup>-</sup>		548.6
<b>Paramètres de Pollution</b>	<b>Unité</b>	<b>Résultat</b>	<b>Paramètres Indésirables</b>	<b>Unité</b>	<b>Résultat</b>
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/l	0.01	5.1.1.1.1 Fer	mg/l	0.101
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	0.018	Manganese	mg/l	0.004
Phosphore (P)	mg/l	0.054	Résidu sec à 105°C	mg/l	5399

D'après ces résultats on peut conclure les résultats suivants :

D'après le résidu Sec on conclue que cette eaux est très minéralisée (5399 mg/l). Le taux du soufre est très élevé dans cette eaux (548.6 mg/l).

## 52 Paramètres physico-chimiques :

Les températures de l'eau à l'émergence Selon [40] ; les eaux thermales sont des eaux dont la température à l'émergence est supérieure à la température moyenne annuelle de l'air plus de 4-5 °C au lieu de l'émergence. Les mesures de la température ont été effectuées au niveau de la station Thermale Ain-Ouarka (Hamam) [34].

Il est important de rappeler que les températures mesurées aux émergences ne sont pas représentatives de la température réelle du réservoir, car un éventuel refroidissement des eaux thermales peut se produire le long du circuit des eaux thermales lors de l'ascension vers la surface par plusieurs voies ; soit par dégazage, ou bien un échange thermique avec les parois du drain hydrothermal et le plus souvent par un mélange avec des eaux froides en profondeur comme en surface.

Les températures mesurées aux émergences oscillent entre 46 et 50°C, la valeur maximale relevée (50°C) correspond à la source de Hammam Ain-Ouarka (Naâma). Selon les classifications des eaux thermales (P. Verdeil, 1986), les eaux hydrothermales de la région de Ain-Ouarka se classe dans la catégorie des eaux méso thermales (les températures comprises entre 30 et 50°C).

### 5.2.1 La conductivité :

La conductivité électrique d'une eau, est la conductance du courant électrique, cette propriété est étroitement liée à la température, elle dépend de la quantité d'ions que renferme cette eau, donc elle aide à mesurer la minéralisation globale. Il est nécessaire de transférer les mesures à une température standard de 20°C, pour que toutes les valeurs soient comparables. Les sources minérales et thermales de l'Algérie son classées en 4 groupes [32] :

- Groupe 1 : la conductivité < 2000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
- Groupe 2 : la conductivité comprise entre 2000 et 7000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
- Groupe 3 : la conductivité comprise entre 7500 et 15000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
- Groupe 4 : la conductivité supérieure à 15000  $\mu\text{s}/\text{cm}$

Dans notre cas la conductivité de la source thermale de Ain-Ouarka est tr-s importante avec une valeur de :

- Ain-Ouarka : la conductivité < 8240  $\mu\text{s}/\text{cm}$  voir Tableau N°10 : [33].

### 5.2.2 Le potentiel hydrogène de l'eau (pH):

***PH*** : Le  $\text{pH}$  d'une eau représente son acidité ou son alcalinité ; à  $\text{pH}$  7 une eau est dite neutre, à un  $\text{pH}$  inférieur à 7 une eau dite acide et à un  $\text{pH}$  supérieur à 7, elle est dite basique. Il est rare que le  $\text{pH}$  soit une contre-indication à la potabilité. C'est cependant l'un des paramètres parmi les plus importants de la qualité de l'eau. Il doit étroitement surveiller au cours de toutes opérations de traitement. Plusieurs facteurs influencent sur le pH comme la température, le CO<sub>2</sub> et la vitesse de circulation des eaux dans les conduits. La valeur du pH mesurée montre que la source hydrothermale Ain-Ouarka a une valeur 6.7 donc c'est une eau acide [33].

## 53 Caractéristiques chimiques :

La circulation des eaux dans les fissurations des roches en dissout certains éléments chimiques, la dissolution est accélérée par la température et la durée d'interaction eau-roche. Les eaux thermales

Proviennent des précipitations infiltrées dans le sol, le trajet souterrain des eaux est très long et profond a permis d'acquérir la composition chimique et la température pour ces eaux.

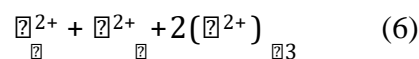
### 5.3.1 Les éléments majeurs :

Les éléments chimiques correspondent aux cations et anions de ou la minéralisation des eaux. Les analyses chimiques ont été effectuées sur les échantillons prélevés dans la source thermale de la zone d'étude (Ain-Ouarka), montrent des teneurs des différents éléments chimiques l'examen de l'analyse montre que l'ion SO<sub>4</sub> est prédominant sur les ions HCO<sub>3</sub> Tab 10 [34].

Dans notre terrain d'étude les valeurs de Ca ont donné une valeur de 436.8 mg/L comme valeur maximale (Laboratoire ADE NAAMA). Les teneurs faibles de Ca, est dues à l'échange entre les roches calcaires et/ou les dolomies avec l'eau, ou bien à un échange de base avec le sodium, provient du contact eaux-formations argileuses.[34]

#### 5.3.1.1 Le magnésium :

C'est un élément aussi de la dureté totale, résultant principalement de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des marnes dolomitiques soit des roches cristallines ou métamorphique par hydrolyse des minéraux silicatés ferromagnésiens (olivines, micas...) toujours exacerbée dans les eaux carbogazeuses. La mise en solution du Magnésium dans l'eau nécessite un temps de séjour important. Le géo thermalisme dans la région de Ain-Ouarka : La présence du magnésium, provient de la dissolution des carbonates riches en magnésium suivant la formule suivante :



Les valeurs de Mg est de 114.2 mg/l, on pense que les teneurs élevées de Mg peuvent provenir aussi des formations évaporitiques.[33]

#### 5.3.1.2 Le Sodium et le Potassium (Na<sup>+</sup> + ; K<sup>+</sup>) :

Le sodium est toujours présent dans les eaux naturelles en proportions très variables, il provient essentiellement du lessivage des formations géologiques riches en NaCl et des minéraux silicatés tels que les plagioclases et peut être abondant dans les eaux carbogazeuses. L'eau de la pluie peut fournir également des quantités non négligeables. Le Potassium K<sup>+</sup>, beaucoup moins abondant que le Sodium, est rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l où on le considère comme négligeable par rapport au Sodium. Dans notre secteur d'étude on remarque que :[34]

**5.3.1.3 Le sodium :**

Les teneurs élevées en sodium, sont principalement liées à la dissolution rapide des formations évaporitiques (Halite), remarquée dans la partie Est de la zone d'étude. Les teneurs en sodium dans notre secteur d'étude sont de l'ordre de : 88.6 mg/l.[34]

**5.3.1.4 Le potassium :**

Le potassium provient de l'altération des argiles potassiques. Dans notre secteur d'étude, la teneur est de 11.5mg/l Les apports en K proviennent principalement de la dissolution des formations évaporitiques.

**5.3.1.5 Le Calcium (Ca<sup>++</sup>) :**

Le calcium est élément de la dureté, il est généralement l'élément dominant dans les eaux naturelles. Sa dissolution résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations carbonatées et même lors de leur séjour à l'intérieur de ces formations.

Cette dissolution est due à la présence du gaz carbonique dans l'eau, le gaz provient de l'atmosphère, et des couches superficielles du sol. Le calcium peut provenir aussi des formations gypsifères (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O), il est aussi prédominant dans les eaux thermo minérales circulant en milieu calcaire.

Il peut exceptionnellement atteindre des teneurs élevées dans des eaux thermo minérales carbogazeuses au contact des roches cristallins basiques. Dans notre zone d'étude à Ain-Ouarka on a trouvé le teneur en calcium suivante : 436.8mg/l.[34]

**5.3.1.6 Les chlorures :**

Les teneurs en Chlorures des eaux naturelles sont extrêmement variées, elles peuvent provenir du lessivage d'anciens dépôts évaporitiques contenant du sel- gemme et sont alors associés au sodium.

Les Chlorures en concentrations plus modestes peuvent avoir une origine magmatique. Ils sont présents dans les eaux minérales des régions à volcanisme récent mais aussi dans les eaux très profondes du socle cristallin. Dans le secteur d'étude les évaporites sont la source principale des chlorures, dans les eaux naturelles avec de faibles quantités.

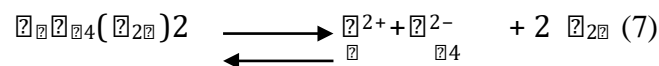
Liées principalement à la nature lithologique de différentes formations géologiques, généralement les eaux riches en chlorures sont riches en sodium. Les teneurs en Cl dans les eaux des pluies sont de l'ordre de 4 mg/L. Dans notre région d'étude la valeur est de l'ordre de 2200 mg/l On remarque que les valeurs des chlorures sont plus importantes que celles du sodium, car cet élément chimique est caractérisé par sa mobilité importante ne rentre pas dans le phénomène de précipitation et n'est pas adsorbé par les formations géologiques.[34]

### 5.3.1.7 Les sulfates :

L'eau contient toujours des sulfates en proportion très variables, leur présence dans l'eau résulte :

- De la légère solubilité du Sulfate de Calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) des roches gypseuses ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ;
- De l'oxydation des Sulfates (pyrites...) ;
- De l'oxydation des sulfures d'hydrogène et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère puis entraînés lors des précipitations.

Les concentrations en Sulfates peuvent être très élevées, les Sulfates présent dans les eaux sulfurés sont le résultat d'une réaction biochimique des sulfates dissous. C'est l'élément prédominant des eaux thermales de la région de Ain-Ouarka, les sulfates peuvent provenir des différentes origines ; géologique due à la dissolution des gypses, la dégradation de la matière organique. La valeur des sulfates dans la région d'étude est de 1645 mg/L (Hammam Ain-Ouarka) Dans notre cas l'origine des sulfates provient de la dissolution du gypse, comme l'indique la formule suivante :[34]



### 5.3.1.8 Les bicarbonates :

S'acquièrent communément par la dissolution, d'une part du  $\text{CO}_2$  du sol produit par la minéralisation de la matière organique, d'autre part des carbonates du sol et des roches (calcaire, dolomie,...). Dans ces conditions, les Hydrogènes carbonatés ne peuvent guère dépasser des concentrations de 10 milli moles d'ions. Au-delà de ces valeurs, on doit envisager la production de  $\text{CO}_2$  profond in situ par fermentation ou l'arrivée de  $\text{CO}_2$  profond magnétique ou métamorphique qui rend l'eau à un niveau agressive vis-à-vis de son encaissant. La concentration des Bicarbonates dans l'eau est fonction des paramètres suivants :

Le pH de l'eau ;

La concentration du  $\text{CO}_2$  dissous ;

La température de l'air.

La concentration de l'eau en sels et la nature lithologique des terrains traversés.

Notons que les teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  sont négligeable dans le secteur étudié, par contre celles des  $\text{Ca}^{2+}$  est de l'ordre de 129.3 mg/l. Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches calcaires qui représentent l'essentiel du réservoir géothermal dans la région de Ain-Ouarka.[34]

**5.3.1.9 Le Fer :**

(Fe) Présent dans la totalité des eaux hydrothermales de la région, la valeur est très faible, de l'ordre de 0.101 mg/L. Le Fer est un composant de l'hémoglobine, une protéine présente dans les globules rouges du sang. Cette protéine permet de transporter l'oxygène des poumons vers tous les autres organes. Sans fer, le corps humain ne peut plus former d'hémoglobine et n'est donc plus capable d'assurer cette fonction de transport vitale.

**5.3.1.10 Le Souffre :**

On a trouvé un taux très élevé de soufre avec une concentration de (548.6). Une eau sulfureuse, parfois eau sulfurée, est une eau contenant un composé du soufre, le sulfure d'hydrogène, qui lui confère une odeur caractéristique d'œuf pourri.

Elle compte en raison de sa composition parmi les eaux utilisées dans le thermalisme notamment pour ses effets bénéfiques dans les maladies de la peau et des poumons. À faibles dosages. Comme il exerce une action curative sur les muqueuses, lieu de développement des infections chroniques. Elles sont utilisées pour lutter contre les maladies des voies respiratoires (rhinites, otites, asthme, bronchites).[34]

**5.4 Etude des Rapports caractéristiques :**

Le rapport caractéristique est défini comme étant le rapport de certains éléments chimiques exprimés en milli-équivalents par litre (méq/l). Les rapports étudiés sont :  $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$  (8)

$$\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}} \text{ (8)}$$

$$\frac{SO_4^{2-}}{Cl^-} \text{ (9)} \quad \frac{SO_4^{2-}}{HCO_3^-} \text{ (10)}$$

L'étude des variations de ces rapports donne de précieuses indications sur l'alimentation des nappes et la circulation des eaux souterraines et permet par fois de détecter d'autre formation en profondeur non affleurante. [34]

**5.4.1 Rapport  $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$  :**

Les valeurs du rapport caractéristique  $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$  comprises entre un minimum de l'ordre de 0.261mg/l. Lorsque ce rapport est supérieur à 1, il traduit la prédominance du Magnésium et ce cas est introuvable dans nos analyses (tous les rapports sont inférieurs à 1). Lorsque il est inférieur à 1 le Calcium prédomine et c'est le cas de notre analyse avec un résultat de 0.43 meq/l, ceci peut être expliqué par la solubilité des calcaires plus riches en Calcium qu'en Magnésium.

**5.4.2 Rapport  $\frac{SO_4^{2-}}{Cl^-}$  :**

Lorsque ce rapport est supérieur à 1 il y a prédominance de Sulfates, ceci apparaît dans tous les points de prélèvement, qui sont liés essentiellement au lessivage des terrains gypsifères et des

L'oxydation des sulfures (pyrites). Lorsque le rapport  $\frac{r_{SO_4^{2-}}}{r_{Cl^-}}$  est inférieur à 1 il y a Prédominance de Chlorures dans les eaux. C'est notre cas, on a trouvé un résultat de : 1.51 meq/l

#### 5.4.3 Rapport $\frac{r_{Cl^-}}{r_{SO_4^{2-}}}$ :

On a trouvé un résultat de 10.64 meq/l. Le rapport est supérieur à 1, donc le Cl<sup>-</sup> prédomine à cause de la présence des pointements triasiques au Djebel Chemarikh.

### 55 Classification d'ALEKINE des eaux thermales de Ain-Ouarka:

Elle tient compte de l'importance séparément des anions et des cations dans l'eau. Ainsi cette classification nous a permis de distinguer le faciès chimique de ces eaux thermales.

#### 5.5.1 Faciès Chimique :

La détermination des faciès chimiques a pour but de rassembler les sources thermales en familles représentées par un même couple anion et cation dominant, pour comparer les eaux entre elles

Les eaux chlorurées sodiques : captées dans la station thermale (Ain-Ouarka), elles sont en contact intime avec le sel gemme au cours de leur circuit profond et se rencontrent dans la zone nord à la faveur des diapirs de Trias salifère. Comme on tient à signaler qu'il Ya des gisements de sel gemme exploités à Ain-Ouarka.

Les eaux thermales de la station de Ain-Ouarka présentent des eaux de Faciès chimique (Chloruré Sodique) ce qui leur donne une forte teneur en chlorure de sodium qui leur attribue un effet stimulant sur la croissance. Elles sont donc tout indiquées dans le traitement des troubles du développement, mais également en cas d'énurésie.

$$r_{Cl^-} > r_{SO_4^{2-}} > r_{HCO_3^-} \quad (11)$$

A titre d'informations on dresse ici un **tableau N°11** comparatifs de quelques stations thermales en Algérie pour voir la concentration en Résidu Sec et le degré de températures de chacune d'elles.

**Tableau 11:** Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [13]

Source Thermale	Région	Faciès Chimique	Résidu Sec (mg/l)	Température (°C)	Débit (L/S)
H-Chellala	Guelma	Sulfaté - Magnésien	1600	98	100
H-Bouhadjar	Ain-Témouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	
H-Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté Sodique	1400	66	
H-Boutaleb	Sétif	Chloruré sodique	3416	52	
H-Essalhine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	
H-Salhine	Skikda	Sulfaté - Magnésien	2046	55	

H-Sidi Bou Abdellah	Rélizane	Chloruré sodique	1194	51	
H-Delaa	M'Silla	Sulfaté sodique	1980	42	
H-Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	
H-Sillal	Béjaia	Chloruré sodique	2221	46	
H-Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10
H-Ain-Ouarka	Nâama	Chloruré sodique	5399	46	4

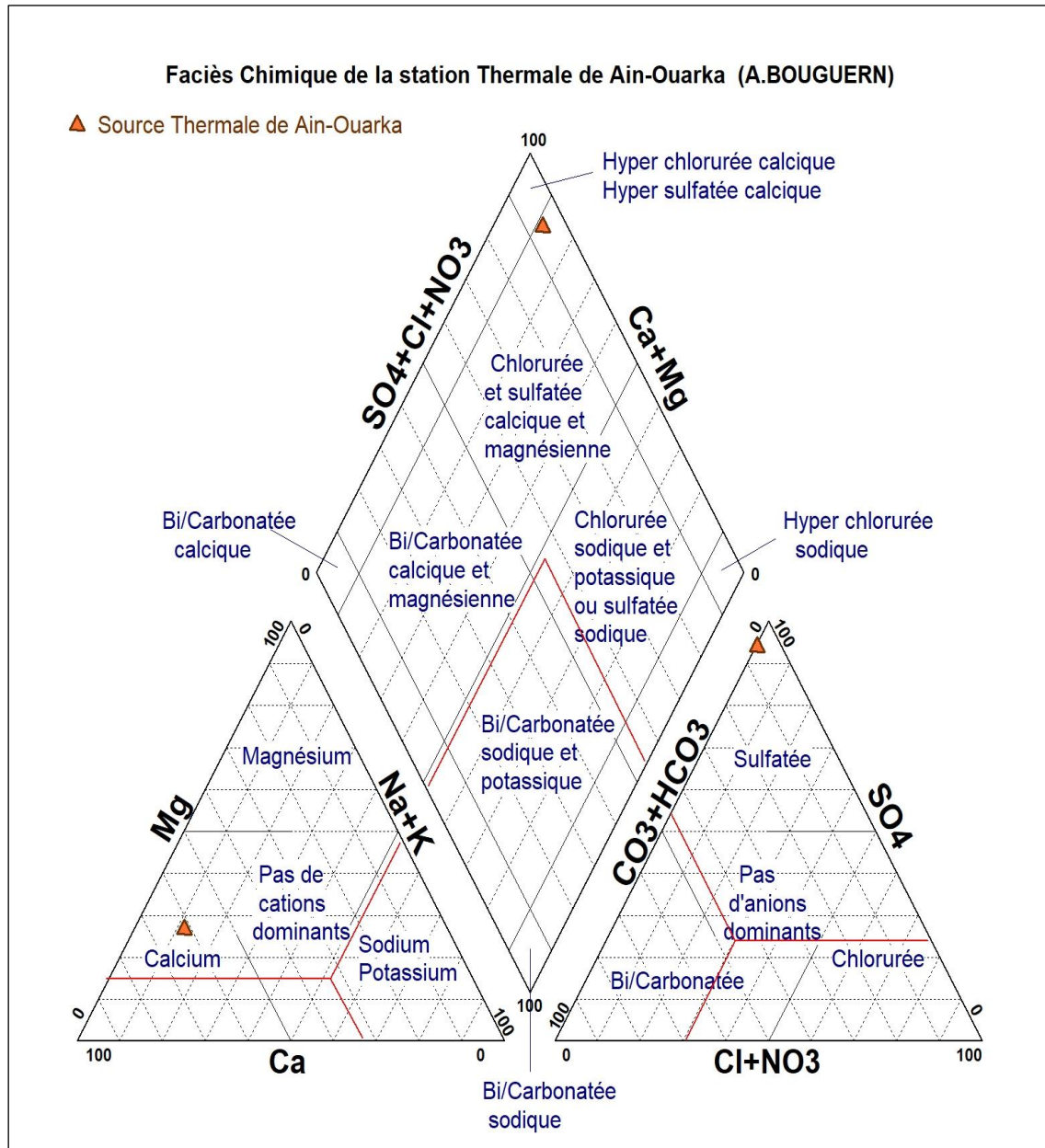


Figure 24 : Diagramme de Piper

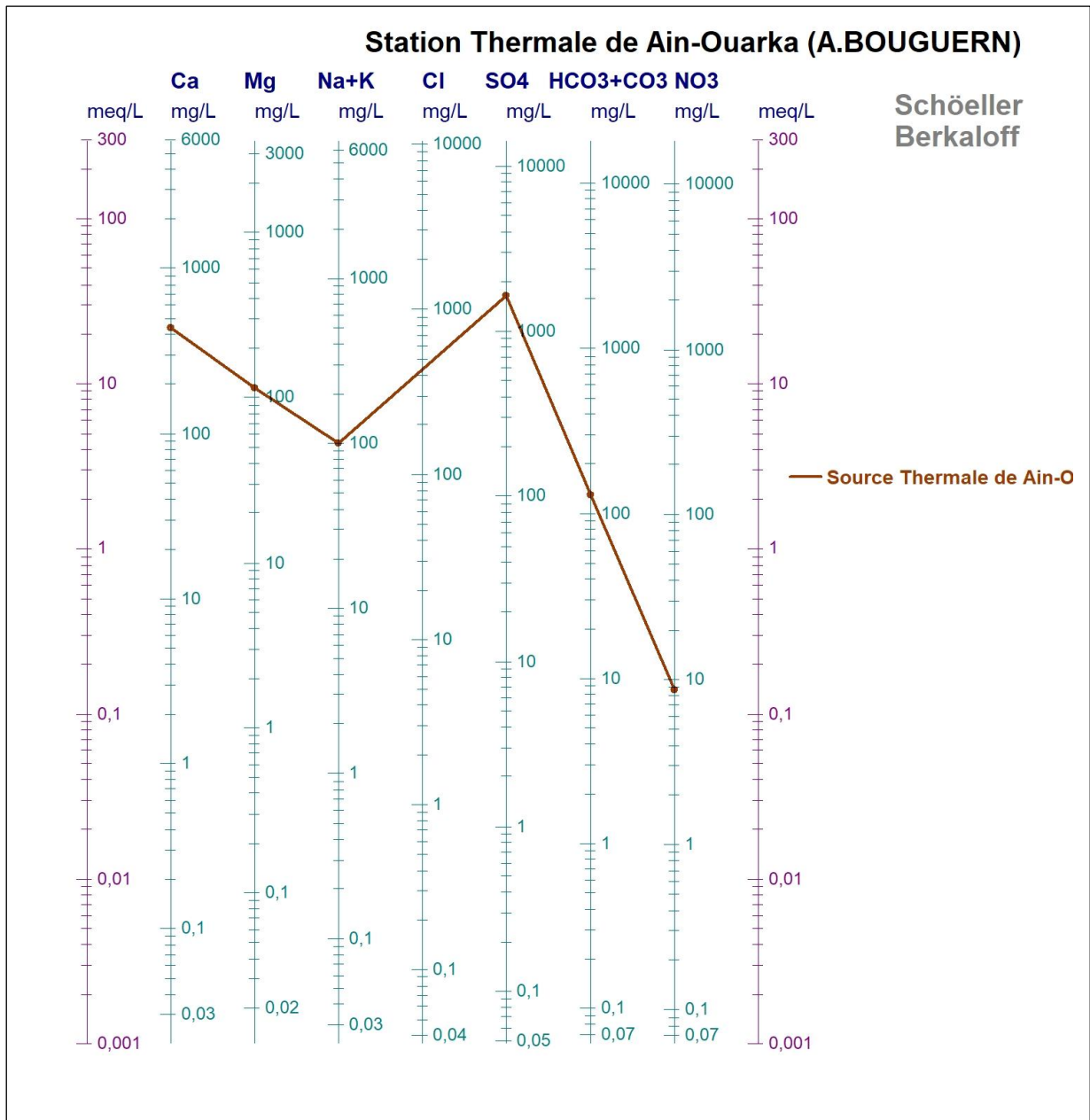


Figure 25: Diagramme de Sholler et Berkaloff

5.6 Le Résidu Sec :

Plus une eau est minérale, plus son résidu sec est élevé. Si le taux de minéraux est supérieur à 1500 mg / L, l'eau est "riche en minéraux" (calcium, magnésium et/ou sodium). S'il est compris entre 500 et 1 500 mg / L, l'eau est moyennement minéralisée

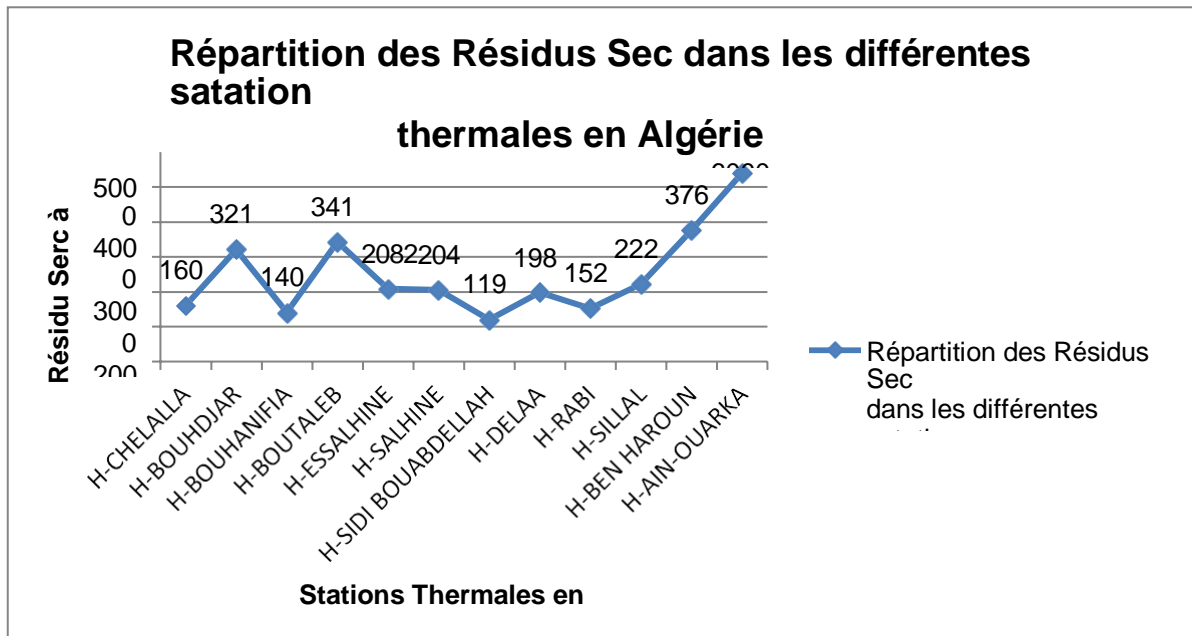


Figure 26 : Répartition des Résidus Sec dans les différentes stations thermales en Algérie [13]

D’après le tableau ci-dessus on constate que ces eaux sont riches en minéraux et leur température est très élevée ce qui leurs confèrent des biens faits pour la santé humaine. En effet, même si la composition des eaux thermale varie en fonction de leur localisation, ces eaux chaudes ont toutes comme point commun d’être particulièrement chargées en calcium, magnésium, lithium, chlore, sulfates. Cette richesse en minéraux combinée à la haute température de l'eau confère aux sources d'eau chaude de nombreuses vertus thérapeutiques.

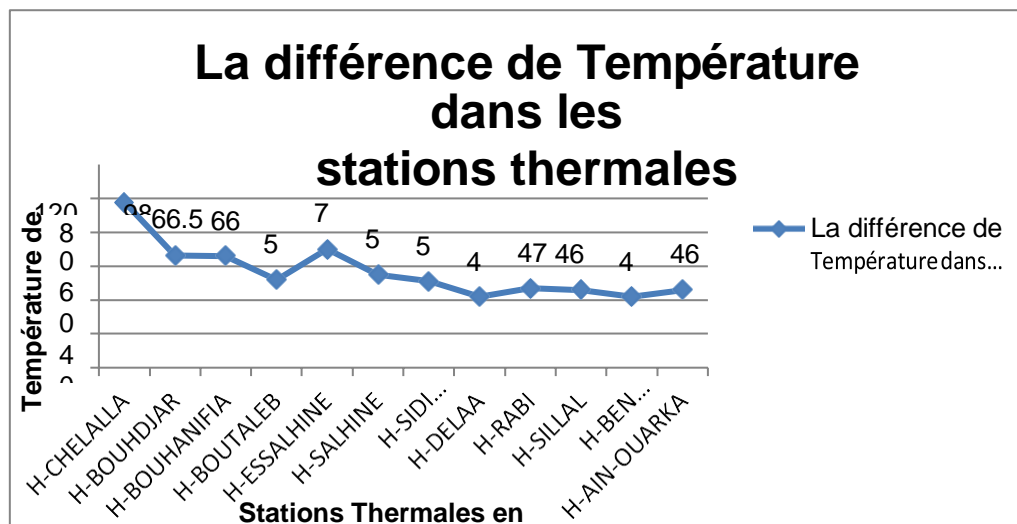


Figure 27 : Différence de Températures dans les stations thermales [13]

## 6 Conclusion :

L'étude hydro chimique des eaux de la station thermale de Ain-Ouarka a révélé une eau très minéralisée de faciès chimique (Chloruré Sodique), avec des taux de nitrates moyenne et peu dangereuse pour la santé des usagers, une eau soufrée eaux utilisées dans le thermalisme notamment pour ses effets bénéfiques dans les maladies de la peau et des poumons. À faibles dosages.

### ✓ Origine des eaux thermales de Ain-Ouarka :

Afin d'identifier le système hydrothermal de la région de Hammam Ain-Ouarka (Naâma), une étude hydrogéochimique et géo thermométrique a été effectuée. Un tableau détaillé de l'hydrogéochimie des eaux a été dressé à partir des analyses en éléments majeurs. Nous avons eu un seul faciès hydrogéologique ont été ainsi identifiés :  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$

Ceci est contrôlé par, respectivement, les interactions avec les calcaires jurassiques conduisant à la dissolution des carbonates et la présence d'évaporites (Trias) le long du circuit de remontée des eaux. Les eaux émergent à travers un système de fractures profondes et récentes. La température de la source varie de 42 à 50°C, caractérisant ainsi un thermalisme de basse enthalpie.

**CHAPITRE IV**  
**GEO THERMIE**

## **1 Introduction :**

Les énergies renouvelables sont en plein développement dans plusieurs pays à travers le monde, avec le lancement de plus en plus de projets qui permettent l'exploitation des ressources naturelles. Ce développement permettra de diminuer la consommation des énergies fossiles et, par conséquent, de limiter la pollution atmosphérique et le changement climatique. Comme les autres énergies renouvelables, la géothermie a, elle aussi, réalisé un progrès considérable dans le monde à travers le développement de diverses technologies permettant l'exploitation des ressources géothermales dans les secteurs agroalimentaires et industriels.

Dans certains pays, les réservoirs géothermiques profonds sont aussi bien utilisés pour la production d'électricité que de chaleur. Dans ce domaine, certains pays sont déjà très avancés ; c'est le cas de l'Islande, la Nouvelle Zélande, le Japon et les Etats Unies. L'Algérie, étant un pays dépendant fortement des énergies fossiles pour le chauffage et la consommation électrique, se voit dans l'obligation de promouvoir les énergies renouvelables. Le Centre de Développement des Energies Renouvelables dans sa quête à trouver des solutions qui pourraient aider au développement des énergies renouvelables (CDER), en Algérie, veut encourager la géothermie, sachant que le pays dispose d'un potentiel géothermique important qui reste inexploité. [13]

Les ressources géothermiques, qui sont classées de moyenne et de basse enthalpie (température inférieure à 100°C), peuvent non seulement servir au développement de nombreuses applications directes comme le chauffage d'habitations, le séchage, la pisciculture, etc., mais aussi à la production d'énergie électrique. [13]

## **2 Les Utilisations des Energies Renouvelables :**

Une énergie renouvelable est une énergie que nous ne pouvons utiliser à l'infini. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels : vent, soleil (Tab 14) Les différentes sortes d'exploitation :

Le vent (les éoliennes)

Le soleil (les panneaux photovoltaïques et les panneaux solaires)

L'eau (l'hydraulique)

La géothermie : Chaleur de la terre ou vapeur des eaux chaudes.

La végétation (la biomasse)

Tableau 12 : Les utilisations des Energies Renouvelables [41]

Notion sur les utilisations des énergies renouvelables :



Vent	Eolienne sur terre et en mer Eolienne de pompage	Electricité Travail
Cours d'eau Marée Vague Courant marin	Centrale hydroélectricité Centrale marémotrice Centrale marine	Electricité
Soleil	Chauffe-eau soleil, (Séchoir et four solaire) Système photovoltaïque, Centrale thermodynamique Réfrigération solaire	Chaleur Electricité Froid
Biomasse sèche Biomasse humide	Préparation du combustible Equipement de combustion Unité de bio méthanisation combustion Equipement d'extraction Biocarburant	Combustible Chaleur (électricité) chaleur (électricité) Carburant
Chaleur « naturelle » « géothermique, Océanique ou solaire indirect »	Bat énergie perf (Arch climatique) pompe à chaleur puits géothermique	Réduction consommation Chaleur Chaleur (électricité)

21 Principe 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 [39]. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être :

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 [60].

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 ;

## **22 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. Les sources thermales du Nord de l'Algérie. L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique [41].

## **23 Types de gisements géothermiques A travers le monde : Il existe trois catégories de gisements géothermiques :**

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) [40], 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.

### **✓ 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 parisiens et aquitains) et en Algérie (le bassin du Sahara septentrional.)

### **✓ Les gisements géothermiques des zones continentales actives :**

Dans ce troisième cas, les eaux résultent de la circulation d'eau thermique 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. Suivant leurs thermalismes, ces gisements géothermiques sont classés en deux types de champs géothermiques :

**\*Les champs hyperthermiques :** Concernant 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. Cas de HAMAM AIN-OUARKA.

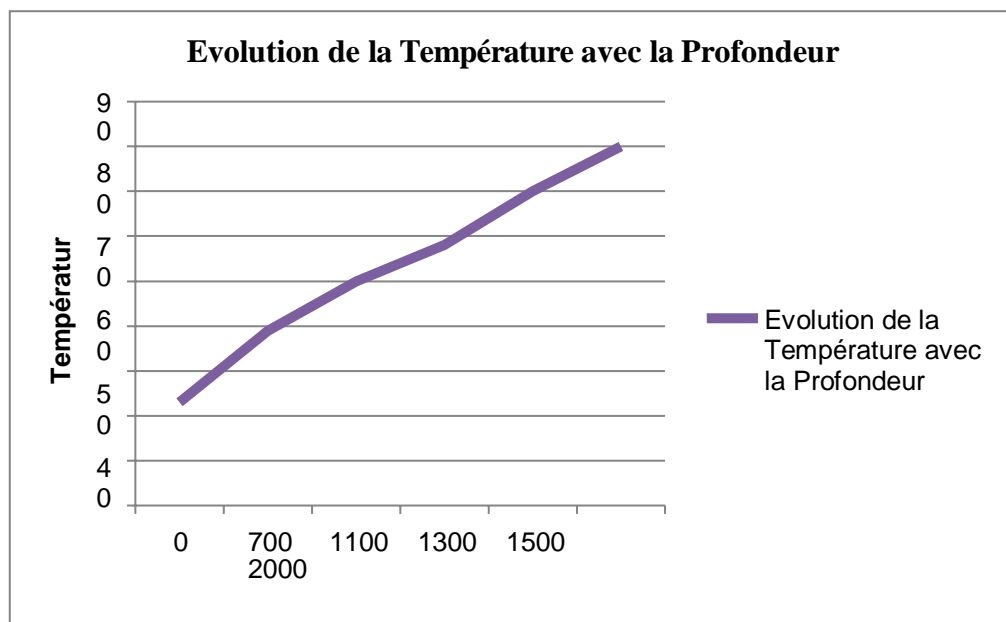
### 3 Types de géothermie :

On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

#### 3.1 Géothermie haute énergie :

La géothermie haute énergie, ou géothermie profonde, appelée plus rarement géothermie haute température, ou géothermie haute enthalpie, est une source d'énergie provient de la croûte terrestre, où la profondeur est généralement plus de 1500 mètres, dans des zones où une activité volcanique a existé et dont la température est supérieure à 80°C.

Grâce aux températures élevées, il est possible de produire de l'électricité et de faire de la cogénération (production conjointe d'électricité grâce à des turbines à vapeur et de chaleur avec la récupération des condensats de la vapeur).



**Figure 28** : Evolution de la Température avec la Profondeur Forage Pétrolier ER-1 [13]

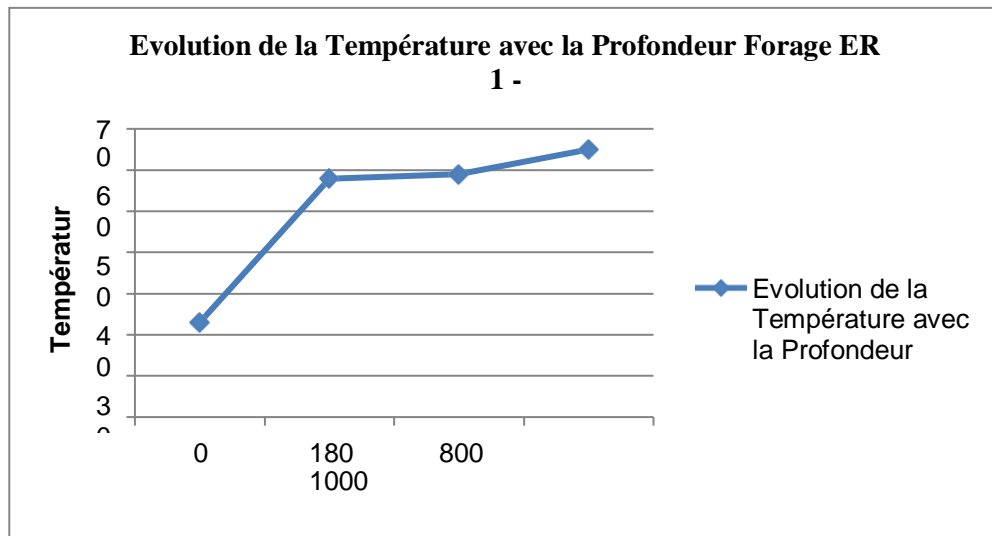


Figure 29 : Evolution de la Température avec la Profondeur Forage Pétrolier AM-1 [13]

### 32 Géothermie basse énergie :

On parle de « géothermie basse énergie » lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30 et 100 °C dans des gisements situés entre 1000 et 3000 m de profondeur (bassin parisien, bassin aquitain...).

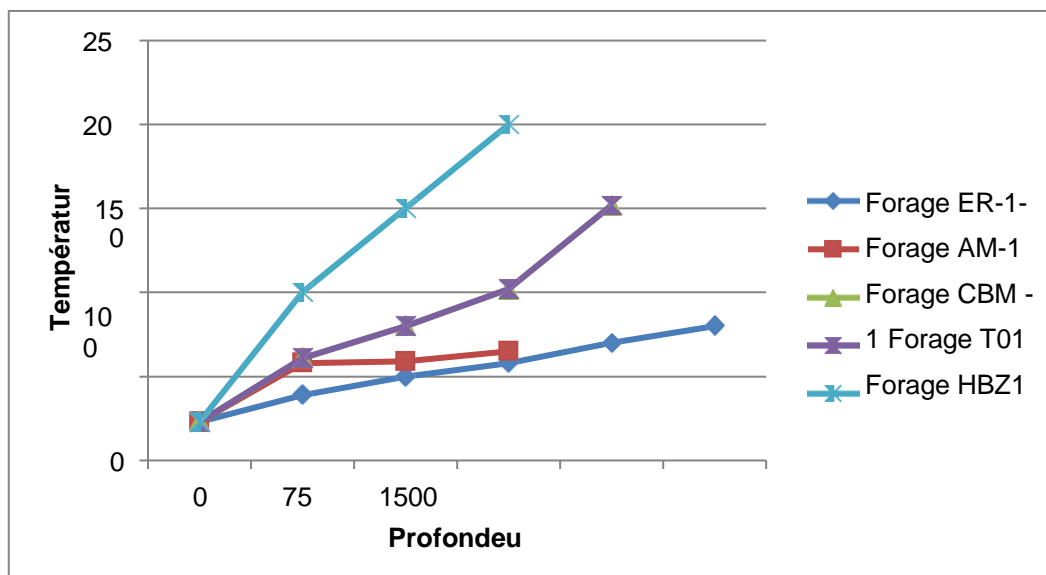


Figure 30 : Evolution de la Température avec la Profondeur (5Forages Pétroliers) [13]

On remarque que la température augmente avec la profondeur. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles. La géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 50 ans en moyenne).

### **33 Géothermie très basse énergie :**

La géothermie très basse énergie est une géothermie des faibles profondeurs dans lesquelles la température comprise entre 10 et 30 °C. Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique. Cette technologie est appliquée à :

- La climatisation (échangeur air-sol)
- Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

## **4 Les avantages et les inconvénients de la géothermie :**

### **41 Les avantages :**

La géothermie, qui consiste à prélever l'énergie contenue dans le sol pour produire de l'électricité ou de la chaleur, présente des avantages spécifiques appréciables

Les ressources géothermiques, qui sont classées de moyenne et de basse enthalpie (température inférieure à 100°C), peuvent non seulement servir au développement de ces régions, mais offrir de l'énergie à d'autres régions avoisinantes, on peut citer ici les avantages qui sont :

Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport ;

Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement ;

Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables ;

Énergie de base, généralement, indépendante des conditions climatiques.

Les économies de chauffage peuvent atteindre 70 %.

Ils constituent une source d'énergie propre et renouvelable ne nécessitant pas de combustion ;

Ils se rentabilisent généralement plus rapidement que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) traditionnels ;

Ils occupent moins de place que les systèmes de CVC traditionnels ;

Le système géothermique peut servir à climatiser le bâtiment en période estivale, ce qui permet d'augmenter le confort des animaux et leur performance ;

En période de canicule, la géothermie peut permettre de sauver des animaux qui auraient suffoqué par la chaleur ;

Il s'agit du système de chauffage/climatisation dont les coûts d'opérations sont les plus faibles et les plus stables dans le temps.[41]

#### **42 Les inconvénients :**

Par ailleurs, cette géothermie ne présente pas toujours des avantages, elle a des inconvénients qui sont :

Coûts d'investissement et de maintenance très élevés ;

L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques ;

Risque de glissement de terrain [60].

### **5 La géothermie dans le monde :**

On dénombre aujourd'hui un peu plus de 350 installations géothermiques haute et moyenne énergie dans le monde. La puissance mondiale de ces centrales électriques est d'environ 8 GW, ce qui ne représente que 0,2% de la puissance mondiale électrique installée sur la planète.

#### **5.1 Les 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 Etats Unis en Californie notamment et à San Francisco en particulier. 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. Les utilisations de la géothermie dans le monde sont nombreuses [41].

Tableau 13 : Carte d'Identité de la Géothermie [41]

<b>Carte d'Identité de la Géothermie</b>	
<b>Source :</b> La chaleur du sous-sol	<b>Production :</b> Très constante : disponible 24h/24 et indépendante de la météo
<b>Utilisation :</b> Chauffage et climatisation, production d'électricité	<b>Rendement :</b> Rendement électrique faible (5-15%)
<b>Installations :</b> – Pompes à chaleur – Installations hydrothermales – Installations pétrothermales	<b>Espérance de vie :</b> 40-60 ans
<b>Catégorie :</b> Énergie renouvelable	<b>En Suisse :</b> Environ 10 centrales de géothermie de moyenne profondeur
<b>Impact sur l'environnement :</b> Risque de séismes pour la géothermie profonde; possibles participation aux émissions de gaz à effet de serre emprisonnés sous terre	<b>Signe distinctif :</b> Les centrales électriques ne peuvent être construites que dans des lieux spécialement propices

## 52 La capacité énergétique :

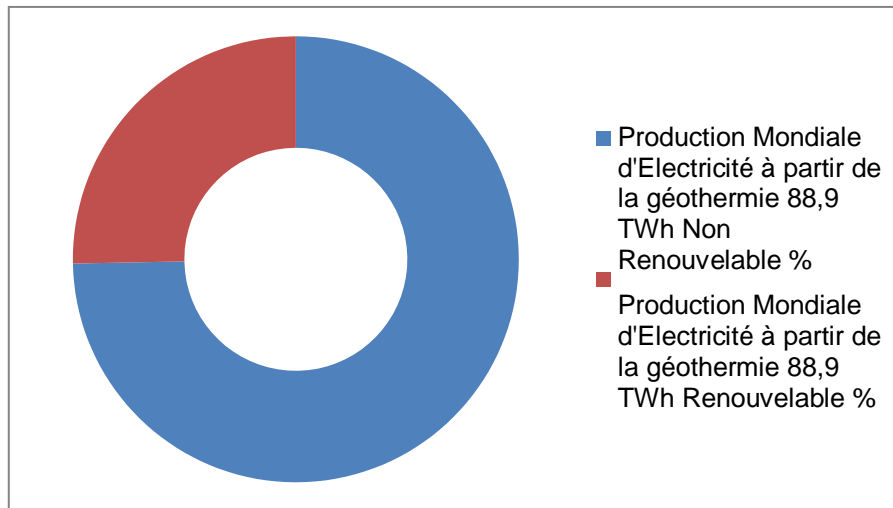
La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui produit deux types d'énergies, l'énergie électrique et l'énergie calorifique. Sur le plan exploitation, elle est classée troisième dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. Aujourd'hui, elle représente 3 % de la production énergétique mondiale 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 Etats-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. Aujourd'hui ce pays satisfait pratiquement la totalité de ces besoins en chaleur et en électricité à partir de l'énergie géothermique (Tab 13), Un très bon

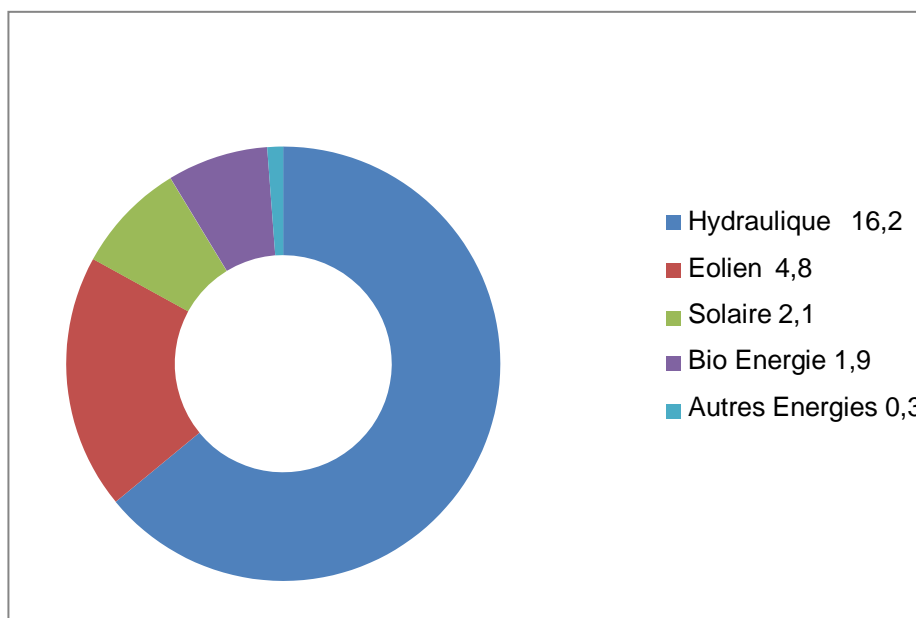
exemple est donné aussi par les philippines qui produisent 21.5% de son énergie électrique à partir de la géothermie. Afin de rentabiliser ce type de gisements il faut surtout une bonne étude d'intérêt économique qui concerne tous les aspects, tels que, le coût des installations géothermiques, quantité de calorie fournie, transformation des calories en énergie...etc [41].

**5.3 La Production Mondiale de la Géothermie en 2018 :**

En 2018, la production mondiale d'électricité à partir de la géothermie a représenté 88,9 TWh.



**Figure 31 :** Production Mondiale d'Electricité à partir de la géothermie à représenter 88.9 TWh [42]



**Figure 32 :** Production Mondial d'Electricité à partir de l'Energie Renouvelable 25.3% [42]

## 6 Forage géothermique :

L'exploitation de la géothermie nécessite l'existence en profondeur de la terre de deux paramètres importants la chaleur et l'eau. En effet c'est l'eau qui permet de véhiculer cette chaleur profonde en surface. L'eau contenue dans les réservoirs géothermiques est remontée à la surface grâce à un forage ; le plus fréquent est le forage Rotary (BRGM, 1978) Si la pression dans le gisement est insuffisante pour que le forage soit artésien, la production peut s'établir par l'intermédiaire d'une pompe.

Une fois l'eau géothermale utilisée, elle est soit rejetée dans l'environnement si l'eau n'est pas salée. Dans le cas contraire, elle est réinjectée dans la nappe d'origine à l'aide d'un puits de réinjection. Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outil et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou) [41].

### ✓ Les Avantages :

- La profondeur du forage peut être très importante, pendant l'exécution de celui-ci, il n'y a pas de perturbation par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté.
- Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.
- Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake.

## 6.1 La géothermie en Algérie :

La géothermie ou 'chaleur de la terre' est un potentiel énergétique non exploité par l'Algérie, elle a l'intention d'y remédier. La géothermie se présente sous forme de réservoirs de vapeur, d'eaux chaudes ou de roches chaudes, destinée à différents emplois.

L'Algérie étant le plus grand pays d'Afrique en superficie, elle dispose forcément d'un important potentiel en nappes albiennes (80 % du territoire algérien). La géothermie reste néanmoins sous exploitée en Algérie. Conscient de ce potentiel non négligeable, une entreprise tunisienne compte investir dans cette 'mine d'or' [41].

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH.

## **62 Les ressources géothermiques en Algérie :**

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90 °C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C.

Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelmen et 119 °C à Biskra (Tab On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni'a à 1500 mètres à Touggourt, présentant une température de 40 à 60°C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres [60].

## **63 L'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 [60].

## **64 Les Forages Pétroliers en Algérie :**

Les forages pétroliers étant les plus profonds, ils rendent le mieux compte du gradient géothermique. De nombreux forages pétroliers couvrent le Sahara algérien d'Est en Ouest, comme le montre la carte de gradient (Fig 31) [13]. La majorité de ces forages sont localisés principalement dans la partie septentrionale du Sahara algérien, car cette région saharienne est par contre l'une des



✓ **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 [33].

✓ **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,

✓ **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. Bien que la chaleur d'origine magmatique donne naissance à la surface de la terre à des zones à gradients géothermiques très élevés (au niveau des régions volcaniques et des zones de rifting), ces régions ne représentent qu'une minorité de la surface de la terre qui se caractérise par un gradient thermique moyen de 3°C/100m.

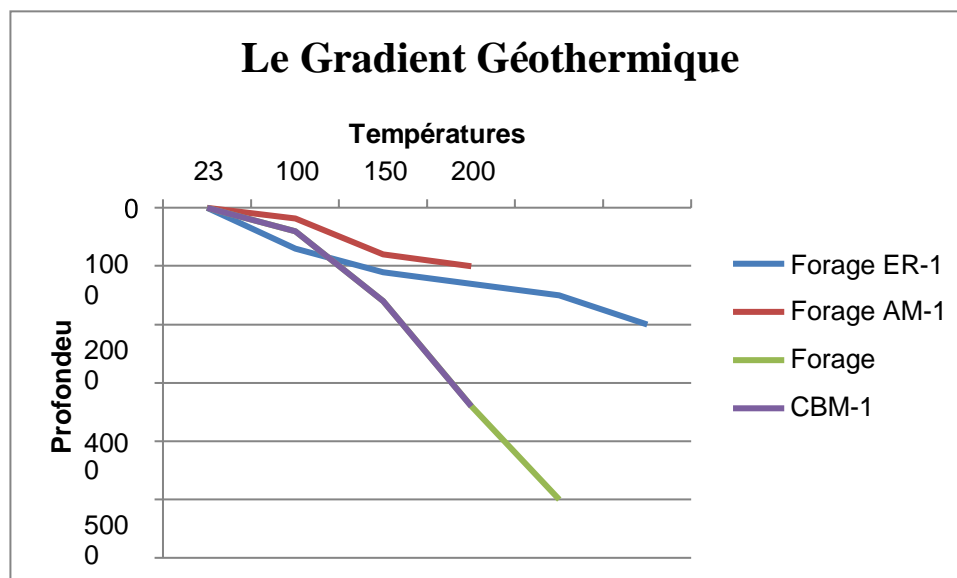


Figure 34 : Le Gradient Géothermique de quelques Forages Pétroliers [13]

D'après la Figure ci-dessus on peut conclure que le gradient géothermique correspond aux variations de températures en fonction de la profondeur. Les mesures de températures dans les mines et les forages profonds montrent que la température augmente de 3°C tous les 100 mètres dans la croûte continentale. Ce gradient n'est pas aussi fort dans toutes les couches terrestres. Le gradient est également plus fort au niveau des zones actives du globe [13].

La chaleur enregistrée à la surface de la terre est essentiellement due à la désintégration des éléments radioactifs : uranium (238U), thorium (232Th) et potassium (40K). Ces éléments, qui ne sont présents qu'en très petites quantités dans les roches (en parties par millions « ppm » pour l'uranium et le thorium, et en pourcentage « % » pour le potassium), contribuent jusqu'à près de la moitié de la chaleur mesurée en surface.

## **72 Calcul du gradient géothermique :**

La méthode de calcul du gradient géothermique utilisée dans l'exploration géothermique implique les mesures de la température de subsurface 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 :

- La topographie : le gradient géothermique mesuré diminue sur les montagnes et augmente dans les vallées et les dépressions.

### **- 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.

- **L'érosion** : la sédimentation rapide réduit le gradient géothermique enregistré en surface alors que l'érosion produit l'effet contraire.

- **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 [13].

### 7.3 Le flux de chaleur :

Le flux géothermique est la quantité d'énergie thermique dissipée par la surface terrestre. Il dépend du gradient géothermique mais aussi de la conductivité thermique des roches. Sa valeur moyenne est de 65 Mw.m<sup>-2</sup> mais il est très variable selon le contexte géodynamique : [13]

- Faible sur les continents (30 km d'épaisseur de croûte) - modéré dans les océans (6 à 8 km de croûte) mais aussi dans des bassins sédimentaires à faible épaisseur de croûte
- Elevé dans les zones volcaniques : dorsales, arcs volcaniques de subduction, points chauds. Globalement, le flux géothermique est plus important au niveau des océans, essentiellement au niveau des dorsales océaniques et en particulier lié à l'hydrothermalisme qui y est associé. [13] 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 Le flux de chaleur est défini comme la quantité de chaleur qui s'écoule par unité de temps, et il traduit la vitesse avec laquelle la terre perd sa chaleur. La densité de flux est le flux de chaleur par unité de surface (Wm<sup>-2</sup>). En général, le flux de chaleur est assimilé à la densité de flux. L'unité de mesure du flux de chaleur est le watt (W). Le flux moyen est de 60 mWm<sup>-2</sup>. Il varie avec : [13]

- L'épaisseur de la plaque : quand la plaque est mince le flux augmente.
- L'âge de la lithosphère : plus la lithosphère est jeune, plus le flux sera élevé.
- La production de chaleur dans la croûte : le flux augmente avec la concentration en radioéléments.
- Lorsqu'il y a un gradient de température, le flux de chaleur se propage par conduction.

C'est le produit du gradient géothermique et de la conductivité thermique selon la loi de Fourier (3)

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad}T \quad (11)$$

$$\vec{q} : \text{Flux de chaleur [mWm}^{-2}\text{]} \quad (12)$$

$\lambda$ : Conductivité thermique du milieu [ $Wm^{-1}C^{-1}$ ] (13)

$\rightarrow$  : Gradient de température [ $^{\circ}Cm^{-1}$ ]. (14)

**8 Détermination de la conductivité thermique :**

La conductivité thermique est l'un des paramètres le plus important à définir pour le calcul du flux de chaleur. Il caractérise l'aptitude d'une roche à conduire de la chaleur. La conductivité thermique d'une roche est variable de 1 à 10  $W/m^{\circ}C$ , et elle est de 100 à 1000 fois plus faible que celle des métaux. D'après les études expérimentales, il apparaît que la conductivité thermique d'une roche dépend essentiellement de la composition minéralogique du fluide constituant la roche, de la porosité de cette dernière et enfin de la température. La minéralogie Au laboratoire, ceci se traduit par un changement dans les proportions minéralogiques, ainsi dans une roche à m éléments, la conductivité de la matrice obéit à la loi suivante : [13].

$$\lambda_{[i]} = \sum_{i=1}^m P_i \lambda_i \quad (15)$$

L'indice i : [1, 2, 3, m] représente le nombre de constituants de la roche.

$\lambda_m$ : Conductivité thermique de la matrice

$\lambda_i$ : Conductivité thermique des constituants de la roche (le ième constituant)

$P_i$  : Proportion volumique des constituants de la roche (le ième constituant).

**Tableau 14:** Conductivités Thermiques des principaux constituants [41]

Constituants	Conductivité Thermique
Quartz	7.7 ± 1.2
Calcaire	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
Eau	0.6
Air	0.03

La porosité : La porosité d'une roche est le rapport entre le volume du vide dans la roche au volume total de celle-ci. Il désigne le pourcentage du vide dans une roche. La porosité d'une roche influe fortement sur la conductivité thermique suivant la relation suivante [13].

$$\lambda_i = \lambda_f^{1-\theta} * \lambda_r^\theta \quad (16)$$

$\lambda_i$  : Conductivité de l'électro faciès (in-situ)

$\lambda_f$  : Conductivité thermique du fluide, (celle de l'eau  $\lambda_{eau} = 0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ )

$\theta$ : Porosité exprimée en %. La porosité est déterminée grâce aux diagraphies (Neutron, Sonic, Densité) suivant les relations suivantes.

$$\theta_{\text{Neutron}} = \frac{\Delta R - \Delta R_{\text{ref}}}{\Delta R_{\text{ref}} - \Delta R_{\text{mat}}} \quad (17)$$

$$\theta_{\text{Sonic}} = \frac{\rho - \rho_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}} - \rho_{\text{mat}}} \quad (18)$$

$$\theta_{\text{Densité}} = \theta_{IH} - \theta_{IHa} * P_a \quad (19)$$

$\Delta t$  : Temps de trajet dans la roche, [ $\mu\text{.ft. s}^{-1}$ ]

$\Delta t_m$  : Temps de trajet dans la matrice, [ $\mu\text{.ft.s}^{-1}$ ]

$\Delta t_f$  : Temps de trajet dans le fluide, [ $\mu\text{.ft.s}^{-1}$ ]

$\theta_{IH}$  : Index d'hydrogène dans la roche, [%]

$P_a$  : Proportion d'argile dans la roche, [%]

$\rho$  : Densité apparente de la roche, [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]

$\rho_m$  : Densité de la matrice, [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]

$\rho_f$  : Densité du fluide, [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]

$\theta_{IHa}$  : Index d'hydrogène dans l'argile, [%]

✓ **La température :**

La conductivité thermique décroît avec l'augmentation de la température. Cette décroissance est rapide, lorsque la température est élevée. Par conséquent, la conductivité croît avec la pression. Sur la base des formules précédentes, la conductivité thermique est estimée pour chaque colonne stratigraphique d'un forage pétrolier. La colonne stratigraphique est d'abord subdivisée en unité lithologique homogène  $d_{zi}$ .

Pour chaque unité lithologique, est déterminée la conductivité d'électro faciès. Au niveau de toute la colonne stratigraphique, la conductivité totale est la moyenne statistique de toutes les conductivités calculées : [13].

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n d_{zi} \lambda_i}{\sum_{i=1}^n d_{zi}} \quad (20)$$

$\lambda$ T: Conductibilité thermique de la formation.

$d_{zi}$  : Epaisseur du ième constituant de la roche (calcaires, grès, argiles) sur l'ensemble de la formation. Traversée par le forage pétrolier. Elle est calculée à partir du log hectométrique du forage.

$\lambda_i$ : Conductivité de l'électro faciès.

#### ✓ **Interprétation de la carte de flux de chaleur :**

La carte de flux de chaleur du Sud algérien montre que les valeurs de flux de chaleur varient entre (60 mWm<sup>-2</sup> et 100 mWm<sup>-2</sup>). Donc le flux de chaleur enregistré au Sud de l'Algérie est élevé par rapport à la moyenne mondiale qui est de 60 mWm<sup>-2</sup>. Le flux de chaleur moyen est de 80 mWm<sup>-2</sup>. L'axe Béchar – Adrar - In Salah - Illizi est caractérisé par un flux élevé de 100 mWm<sup>-2</sup>. De part et d'autre de cet axe, les valeurs décroissent graduellement. On remarque aussi quelques petites anomalies locales positives au Nord-Est. La carte de flux de chaleur met en évidence deux zones d'anomalies distinctes :[13]

- La zone Ouest qui présente un flux élevé de 90 mWm<sup>-2</sup> à 110 mWm<sup>-2</sup>.
- La zone Est qui présente un flux moyen de 60 mWm<sup>-2</sup> à 80 mWm<sup>-2</sup>.

Il est constaté que :

- Une concordance entre la carte de flux et la topographie de la région. En effet, on retrouve les dépressions du grand Erg occidental et oriental bien définies à travers les zones d'anomalies faibles. Les zones hautes comme les chaînes de l'Ougarta et les affleurements du bouclier Touareg au Sud, se retrouvent dans les zones d'anomalies élevées.
- Une concordance entre la structuration et le flux de chaleur, la direction des anomalies suit relativement la direction de la structuration du Sahara algérien. Les directions NW-SE et N-S mises en évidence respectivement dans la partie occidentale et la partie orientale de la carte sont en

Concordance avec la direction de la structuration dans ces régions. La partie orientale est un bassin crétacé récent qui est doté d'aquifères en profondeur, la structure de l'aquifère est en concordance avec l'anomalie mise en évidence dans cette région.

- Une concordance entre la tectonique et le flux de chaleur. En effet la partie occidentale du Sahara algérien était le siège des principales déformations de la phase de compression hercynienne, ceci se manifeste sur la carte de flux de chaleur par un état thermique actuel anormalement chaud par rapport à la partie orientale qui était plus stable sur le plan tectonique et qui présente sur la carte de flux de chaleur un état thermique actuel modéré [13].

En ce qui concerne notre zone d'étude Ain-Ouarka, on a affaire à l'utilisation des puits Canadiens qui ont un principe très facile à réaliser :

Les capteurs verticaux peuvent récupérer la chaleur dans : le sol. Dans ce cas, il sera nécessaire de creuser un trou d'une profondeur allant de 30 à 100 mètres.

La longueur du forage varie en fonction des besoins de chauffage car la chaleur emmagasinée par le sol augmente d'environ 1°C par mètre de profondeur. Les canalisations du puits canadien doivent être implantées entre 1,5 mètres et 2,5 mètres. A cette profondeur la température reste constante : environ 10 °C en hiver et 17 °C en été (selon les régions).

Les systèmes géothermiques sont des technologies utilisant le principe de transfert de chaleur d'un milieu à un autre. Le transfert d'énergie se réalise par l'intermédiaire d'une thermopompe (ou pompe à chaleur). La thermopompe permet d'extraire de l'énergie d'un fluide caloporteur pour la transférer à un autre fluide.

La source d'énergie utilisée pour réchauffer le liquide caloporteur est habituellement le sol. Au Québec, la température moyenne du sous-sol est d'environ 8 °C. À une profondeur supérieure à 2 m, cette température demeure constante tout au long de l'année. Il est donc question de géothermie à très basse température (SPSQ, 2007). Les principales composantes d'un système géothermiques sont les suivantes (Hydro-Québec, 2009a) :

9 Le Puit Canadien :

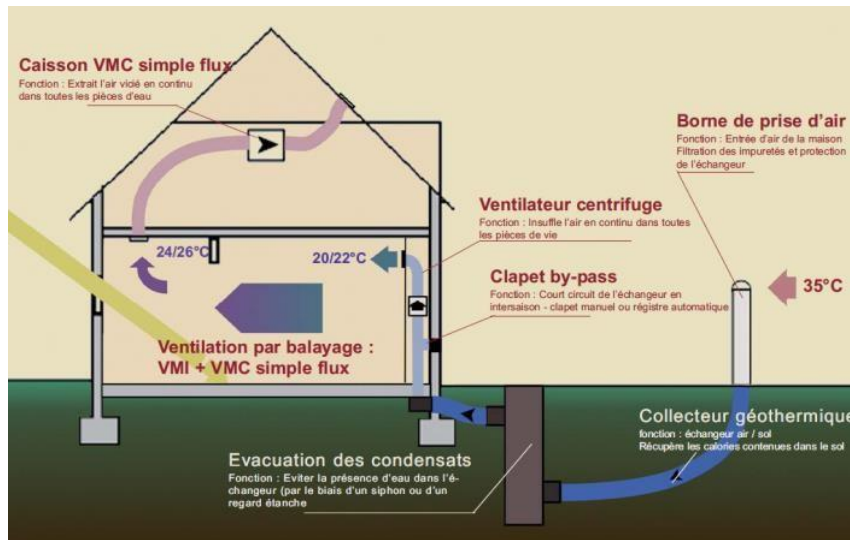


Figure 35 : Puit Canadien [41]

- Le circuit souterrain constitue la source de chaleur – ou de fraîcheur – du système géothermique. Il est composé d'un réseau de conduites souterraines dans lesquelles circule généralement un mélange d'eau et d'antigel servant au transfert de chaleur.

Il existe deux types de circuits. Le premier est dit fermé et est constitué de conduites mises en boucles verticales ou horizontales ou connectées à un lac ou à un étang. Le second type est dit ouvert, c'est-à-dire que l'énergie est tirée de façon continue de l'eau d'un puits classique à l'aide d'un échangeur thermique [41].

- La thermopompe assure le transfert de chaleur entre le circuit souterrain et le bâtiment. Cet appareil permet en été d'évacuer la chaleur du bâtiment dans le sol pour le climatiser, et à l'inverse, en hiver, il tire la chaleur du sol pour en améliorer le chauffage.

- Le réseau de distribution est le système qui permet de distribuer la chaleur (ou la fraîcheur) dans tout le bâtiment à partir de la thermopompe. Ce système est composé de conduites, de radiateurs ou de plinthes adaptés aux appareils de géothermie [44].

**10 Prototype :**

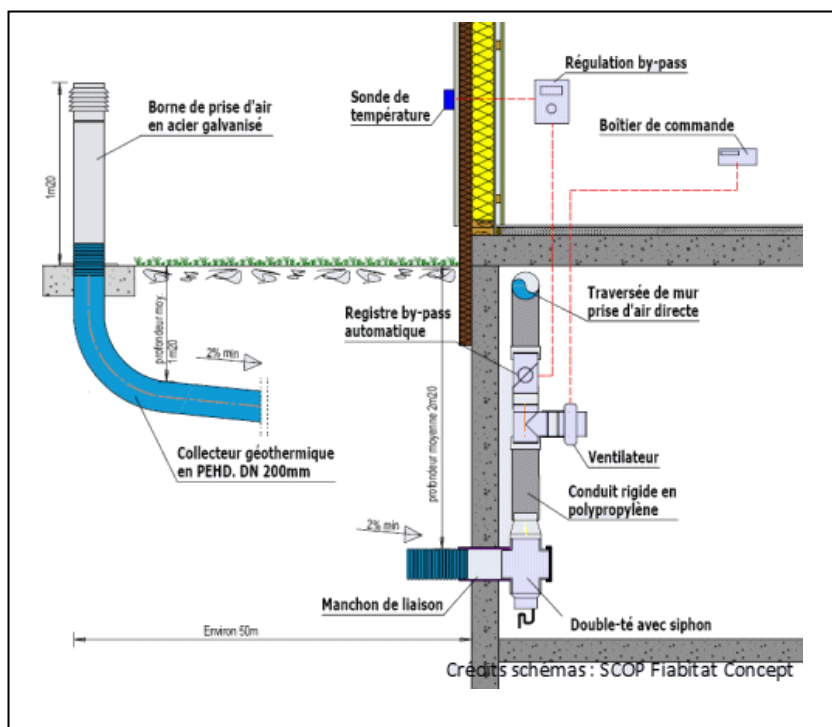
Etablir la nécessité et la faisabilité :

Gardons à l'esprit que tout dimensionnement de puits canadien doit partir des besoins réels liés à la maison, l'environnement extérieur (terrain et nature du sol). Le dimensionnement intègre :

- ✓ L'évaluation des besoins énergétique.
- ✓ L'évaluation du risque sanitaire environnemental,
- ✓ Le diamètre des conduites, le choix du matériau qui compose la conduite et ses caractéristiques propres,
- ✓ Le parcours du puits et les pertes de charges qu'il génère, sa longueur, la capacité thermique du sol,
- ✓ La gestion des condensats,

La ventilation qui est mise en place dans la maison, le calcul des débits d'aération en fonction du potentiel de surchauffe, la régulation du fonctionnement du puits,

La distribution intérieure, la typologie des conduits, le positionnement des bouches [47].



**Figure 36 :** Prototype d'un Puit Canadien [47]

### **101 Le Coût de l'Investissement :**

### **102 Le budget à prévoir pour l'installation d'un puits canadien**

En se basant sur les prix moyens constatés, un puits canadien vous coûtera en moyenne 7000 euros TTC. Le prix peut atteindre 10 000 euros pour un puits canadien avec une ventilation à double flux. À ce tarif, vous disposerez du matériel réglementaire, robuste et sans risque sanitaire. Certaines installations affichent des coûts plus bas, mais évidemment aux dépens de la fiabilité... Globalement, les travaux durent 3 jours à 1 mois selon l'ampleur du chantier. Le budget matériel démarre à 6000 euros et comprend les conduits, le caisson échangeur double flux et le réseau de distribution de l'air. Comptez 1000 euros pour la pose des conduits, de 2000 à 4000 euros pour le caisson double flux avec le réseau de distribution. Aujourd'hui, les puits canadiens se développent, ce qui rend les prix toujours plus attractifs. Notez néanmoins que la configuration des lieux peut considérablement faire varier le coût du terrassement. Et pensez aussi à la maintenance : un filtre coûte entre 40 et 80 euros en fonction du modèle. Il est préférable de faire appel à des professionnels qualifiés, car le moindre défaut peut se répercuter sur la qualité de l'air ambiant, les bactéries telles que la salmonelle pouvant se développer dans toute la maisonnée. N'hésitez pas à demander plusieurs devis pour estimer au plus juste le budget à prévoir pour votre futur puits canadien ![48].

### **103 Bilan Énergétique :**

Le bilan énergétique global est le reflet de la situation énergétique d'un pays ou d'une région. Il décrit les quantités d'énergie importées, produites, transformées et consommées dans la Région au cours d'une année donnée.

Le bilan énergétique est calculé par la consommation **énergétique** d'un logement peut être calculée à partir de la consommation réelle des appareils électriques qui y sont présents. Il vous suffit de multiplier le nombre d'heures d'utilisation sur l'année par la puissance des appareils en kWh, [48].

## **11 Domaines d'Applications :**

En agriculture, la géothermie peut servir à maints usages, et elle constitue une option principalement pour les exploitations très énergivores. Entre autres, elle peut être intéressante pour les productions en serres et le chauffage/climatisation de bâtiments d'élevage avicole ou porcin. Il est toutefois nécessaire de posséder suffisamment de terrain pour pouvoir installer un système de capacité suffisante pour répondre aux besoins de l'entreprise.

À titre d'exemple, pour un système fermé avec boucles souterraines verticales, il faut une superficie d'environ 10 m<sup>2</sup> par 2,9 kW de capacité de production. Dans le cas d'une installation horizontale, il faut considérer une superficie de 100 à 150 m<sup>2</sup> pour produire la même puissance de 2,9 kW

Les importantes réserves d'eau souterraine dont dispose le sud algérien, partiellement mises à profit de l'irrigation, présentent une opportunité quant à son usage pour des besoins de rafraîchissement en milieu saharien. Ainsi, il paraît a priori intéressant de faire profiter l'échangeur air-sol, de la fraîcheur de l'eau d'irrigation, où on se propose ici d'intégrer un tube coaxial transportant de l'eau faisant ainsi profiter à l'air insufflé les qualités thermiques de l'eau et celles du sol en même temps.

Une simulation numérique en différences finies sous Scilab 5.3.0 permet d'avoir la température de sortie de l'air à l'intérieur du bâtiment, s'ensuit alors, une étude énergétique comparative entre un bâtiment alimenté par un échangeur air-sol simple, et un échangeur air-sol-eau à co-courant.

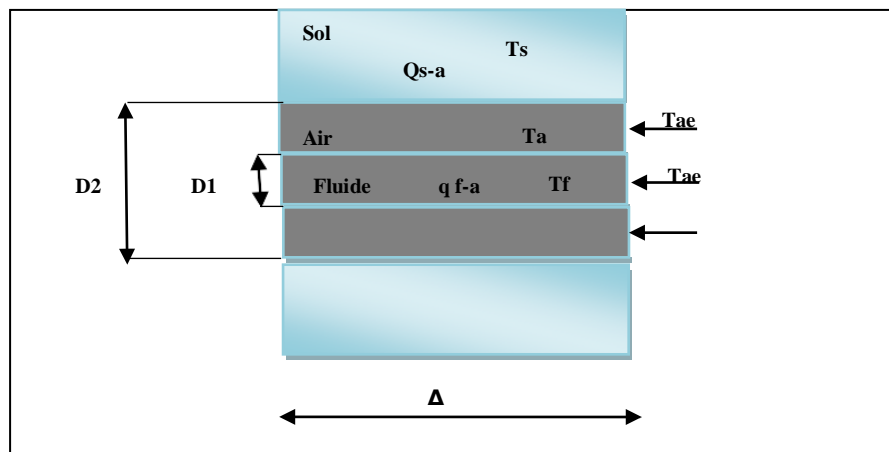
Ce système énergétique pourrait s'avérer assez intéressant dans des applications telles que le rafraîchissement en milieu rural par eau d'irrigation, mais aussi pour le chauffage par eaux thermales ou industrielles et bien d'autres cas [41].

## 12 Modélisation du système :

### 12.1 Transfert Thermique :

Si on exclut l'effet de la conduction longitudinale qui reste marginal, le problème peut se ramener à un cas bidimensionnel, où l'on procède à une discrétisation longitudinale [47].

Par sections verticales équidistantes. La forme circulaire du tube extérieur est assimilée à un carré de section équivalente. Ainsi le bilan thermique par tronçon s'exprime par :



**Figure 37 :** Coupe Longitudinale sur échangeur air-sol-eau [41]

L'équation (a) exprime le flux échangé entre l'air et le fluide alors que l'équation (b) exprime le flux échangé entre l'air et le sol. Cette dernière température est donnée par la fonction numérique  $u_2d(x,z,t)$  qui définit la température de l'air au milieu du segment se déduit ainsi : [44]

$$\frac{2\pi k_f (T_f - T_a)}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)} + \frac{2\pi k_s (T_s - T_a)}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \quad (3) \tag{20}$$

$$\frac{2\pi k_f (T_f - T_a)}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)} + \frac{2\pi k_s (T_s - T_a)}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)} + \frac{2\pi k_s (T_s - T_a)}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)}$$

**Avec**

$$A = \frac{2\pi k_f (T_f - T_a)}{2\pi k_f + 2\pi k_s \ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \quad B = \frac{2\pi k_s (T_s - T_a)}{2\pi k_f + 2\pi k_s \ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \tag{4} \tag{21}$$

Le puits climatique est une solution géothermique de surface pour la région de Ain-Ouarka, ayant pour objectif de réchauffer l'air neuf en hiver et de le rafraîchir en été. Elle s'appuie sur des échanges thermiques air-sol ; elle est dite passive. C'est un réseau de canalisations enterrées qui fonctionne comme un échangeur air-sol.

Utilisé pour le renouvellement d'air des bâtiments, cet échangeur s'appuie sur le différentiel entre la température de l'air capté à l'extérieur du bâtiment (air ambiant) et celle du sol qui tend à devenir constante lorsqu'une profondeur suffisante est atteinte.

L'air qui circule dans ces canalisations va capter des frigories en période chaude et des calories en période froide et ainsi contribuer à rafraîchir ou réchauffer l'air neuf d'un bâtiment. Enterré à une profondeur voisinant 1.5m/2m, le réseau exploite l'inertie thermique de la masse de terre qui entoure les tuyaux, et permet au puits climatique d'agir comme un régulateur naturel de température. Couplé à un équipement de ventilation, il contribuera à diffuser dans le bâtiment un air tempéré et confortable. (8)

Cette géothermie basse énergie sera de mieux en mieux être exploitée en milieu rural en Algérie, elle présente plusieurs caractéristiques :

Cette ressource du sous-sol, de proximité, présente de nombreux avantages, notamment la disponibilité (24h/24, 7j/7) de sa production ce qui la distingue des autres renouvelables.

Les applications peuvent être très diverses, depuis le chauffage des habitations et des locaux ou la climatisation, la pisciculture, l'osiericulture, le séchage des produits alimentaires, et plus généralement les procédés agroalimentaires surtout dans les régions Est de l'Algérie comme EL-Oued et Biskra ou une production alimentaire et agroalimentaire spectaculaire est remarquée en 2020 et 2021, et la demande en énergie ne cesse d'augmenter de jour en jour [45].

### **13 Conclusion :**

La géothermie consiste à utiliser la chaleur interne de la Terre pour produire de la chaleur et de l'électricité. L'utilisation de la géothermie est fondée sur un principe simple : l'eau des aquifères (nappe d'eau souterraine) plus ou moins profonds se réchauffent du fait de l'existence d'un gradient géothermique particulier. On peut alors pomper l'eau et récupérer les kW accumulés. On peut alors réinjecter l'eau dans l'aquifère de façon à ce que la zone soit géologiquement stable et que l'aquifère soit toujours alimenté [13].

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90 °C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelmen et 119 °C à Biskra (Tab II.8.1) On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser.

Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni'a à 1500 mètres à Touggourt, présentant une température de 40 à 60°C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres. L'énergie géothermique est une énergie renouvelable : le gradient géothermique de la Terre réchauffe en permanence les roches et l'eau qui s'y infiltre. Le prélèvement de cette énergie par l'Homme ne représente qu'une infime partie de l'énergie dissipée par la Terre et cette énergie est inépuisable à l'échelle humaine [13].

### **14 Recommandations :**

Dans une optique d'efficacité énergétique, la géothermie constitue une option à envisager pour la réduction des coûts de chauffage et de climatisation des bâtiments agricoles. À long terme, elle permet de faire des économies grâce à une source d'énergie qui est constante sur une base annuelle. Toutefois, compte tenu des investissements requis, une étude de rentabilité doit être faite au cas par cas. [4]. En ce qui concerne notre zone d'étude, elle est caractérisée par une énergie basse température entre (40-50°C), la **géothermie basse** énergie peut être utilisée pour la pisciculture, la

Balnéothérapie, l'alimentation de piscines ou encore le chauffage de serres. Son application principale dans les zones à habitat dense est le chauffage urbain par réseaux de chaleur.

**16- Liste des Références Bibliographiques :**

- [1] ; AMRANE, Mohamed. Analyse Stadiale de la Dolomie du CHEMARIKH Ain-Ouarka; Monts des Ksours. *Diplome de Magistère*. Oran, Algérie; Université d'Oran; 2011.
- [2]. ZINEB, DEFFA et FATIHA, LEMDAK; *Inventaire des Ostracodes du passage Lias-Dogger, Ain Ouarka Monts des Ksour (Atlas Saharien Occidental)*; Diplôme de Master; Univ de Tlemcen; 2016.
- [4] ; SALHI A ; Evolution Paléogéographique et dynamique de la bordure méridionale du sillon atlasique au cours du Lias et du Dogger (Région de Béni-Ounif, Algérie sud-occidental ; Diplôme, Magistère ; Univ Oran ; Algérie ; 2002.
- [5]. MEKAHLI, Larbi; Evolution des Monts des Ksours (Algérie) de l'Hettangien au Bajocien , Biostratigraphie, sédimentologie, évolution paléogéographique et stratigraphique séquentielle; Thèse de Doctorat; Université D'ORAN; 1998.
- [6] ; KAZI TANI ; Evolution Géodynamique de la bordure Nord Africaine. Le domaine ontra plaque Nord Africain. Approche mégaséquentielle ; Thèse d'Etat ; Univ Pau ; 1986
- [7]. MEDDAH, Amar. La province Mgmatique de l'Atlantique Centrale dans le bassin des Ksours. *Atlas saharien occidental; Thèse de Doctorat; Univ d'ORAN; 2010.*
- [8]. KACEMI, Ali. Evolution Lithostratigraphique des Monts des Ksours (Atlas Saharien Occidental) au cours du Trias et du Jurassique. *Géodynamique, typologie du bassin et Télédétection. Univ de Tlemcen; Thèse de Doctorat; 2013*
- [9].BOUGUERN A. Etude hydrogéologique du Synclinal de Asla (Atlas saharien occidental, Algérie); Mém, Ingénieur d'état; univ, Oran2; 1996.
- [10]; MEKEBRET, Imane; Synthèse hydrogéologique et origine de la salinité des eaux thermo-minérales du littoral oranais par les méthodes géochimiques et isotopiques; Magister Sciences de la Terre; Université d'Oran2 Mohamed ben Ahmed; 2017
- [11]. AMAR, R Rouabhi. *Polycopié de cours Bioclimat et changement climatiques*. Sétif : s.n.
- [12] ; FLAMAND G.B.M ; Recherche géologique et géographique sur le haut Pays de l'Oranie et sur le Sahara (Algérie et territoire du Sud) ; Thèse, Univ, Lyon ; France ; 1911.
- [13] ; CORNET A ; L'Atlas saharien Sud Oranais.XIX Congrè géologique interne ; Alger ; Monographie Régionale ; 51 p. 9Fig,1p1.
- [14] ; GALMIER D ; Photogéologie de la région d'Ain-Séfra (Algérie) ; Thèse Doct, Etat.Fac.Sci ; Paris ; 1970

- [15] ; AIT OUALI R ; Le rifting des Monts des Ksours au Lias. Organisation du bassin – Diagenèse des assises carbonatées, phase dans les ouvertures mésozoïques au Maghreb ; Thèse, d'état U.S.T.H.B ; Alger ; 1991.
- [16] ; MEKAOUI A ; Bordure du Sillon Atlasique et Plate forme Saharienne, Jurassique Inférieur et moyen (Grouz, Charef-Fendi, Algérie Sud Occidentale) ; Thèse de Magistère ; Univ d'Oran Algérie ; 2000
- [17] ; ELMI S ; Polarité tectono-sédimentaire pendant l'effritement des marges septentrionales du bâti africain au cours du Mésozoïque (Maghreb) ; Annales.Soc.Géol.Nord,XVII ; 1978.
- [20]. RAHMANI, Abderrahmane; *Apport des SIG dans la Caractérisation Hydrodynamique et Hydrochimique de la Nappe du CRETACE INFÉRIEUR*; Mémoire de Magistère; Université de TLEMCEM; 2010.
- [33]. BEKKOUCHE, Mohamed FOUAZI. Caractéristiques des sources thermales de la région d'AZZABA. ANNABA; Diplôme de Magister; Univ de ANNABA; 2009.
- [34]. BOUAICHA, Fouad. Le géothermalisme de la région de GUELMA . *Thèse de Doctorat (Hydrogéologie)*; Univ de Constantine; 2018.
- [35]; S. Ouali 1 , A. Khellaf 1 et K. Baddari 2; Etude géothermique du Sud de l'Algérie; Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 (2006) 297 - 306
- [36] ; Werner Stumm, James J. Morgan ; Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3rd Edition ; ISBN: 978-0-471-51185-4 October 1995 1040 Pages
- [38] ; Yeny Serrano, Christine Heimlich, Cyrille Bodin, Philippe Chavot, Anne Masseran, Jean Zoungrana ; La géothermie profonde “ n'est pas mature ” : parcours d'une formule-argument à l'Eurométropole de Strasbourg ; ENS Éditions (Lyon), 2019, Les mots de l'écologie, 119, pp.51-67.
- [39]. CHAREF, Abdelatif. Station Thermales écologique à Ain-Ouarka; *Diplôme Master 2 . Univ de Mostaganem*; 2019.
- [40] ; Christopher, H., Armstead, H ; [Geothermal energy: its past, present and future contributions to the energy needs of man](#) ; HCH Armstead - London, 1978 - ui.adsabs.harvard.edu
- [41] ; BENCHEMSSA ISSAM ; L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique, Diplôme de Master ; Univ BORDJ MOKHTAR ; Annaba ; 2017
- [44] ; K. Dehina, A.M. Mokhtari; Simulation numérique d'un échangeur air-sol-eau à co-courant ; Faculté de technologie ; Université Amar Telidji ; Laghouat
- Sites Internet :

- [3] ; <https://www.google.dz/search?q=ain-ouarka>; 14/04/2021 ; 15h
- [18] ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification\\_de\\_K%C3%B6ppen](https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_de_K%C3%B6ppen); 14/04/2021 ; 18h
- [19] ; <https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat>; 14/04/2021 ; 18h30'
- [21] ; <http://wikipedia.org/wiki/pr%C3%A9cipitation>; 24/04/2021 ; 20h40'
- [22] ; <http://wikipedia.org/wiki/pluviom%C3%A9trie>; 24/04/2021 ; 19h15'
- [23] ; <http://wikipedia.org/wiki/temp%C3%A9rature>; 24/04/2021 ; 21h
- [24] ; [http://wikipedia.org/wiki/Amplitude\\_thermique](http://wikipedia.org/wiki/Amplitude_thermique); 25/04/2021 ; 14h
- [25] ; <http://wikipedia.org/wiki/Climat>; 25/04/2021 ; 15h20'
- [26] ; [http://wikipedia.org/wiki/diagramme\\_climatique](http://wikipedia.org/wiki/diagramme_climatique); 25/04/2021 ; 16h20'
- [27] ; [http://wikipedia.org/wiki/indice\\_secheresse](http://wikipedia.org/wiki/indice_secheresse); 25/04/2021 ; 16h50'.
- [28] ; [http://wikipedia.org/wiki/indice\\_d%27aridit%C3%A9](http://wikipedia.org/wiki/indice_d%27aridit%C3%A9); 25/04/2021 ; 17h20'
- [29] ; [http://wikipedia.org/wiki/Quotient\\_pluviom%C3%A9trique](http://wikipedia.org/wiki/Quotient_pluviom%C3%A9trique); 25/04/2021 ; 18h
- [30] ; [http://wikipedia.org/wiki/Louis\\_Emberger](http://wikipedia.org/wiki/Louis_Emberger); 26/04/2021 ; 9h.
- [31] ; <https://fr.wikipedia.org/wiki/Climatologie>; 12/04/2021 ; 16h
- [32] ; <https://www.journals.elsevier.com/geochimica-et-cosmochimica-acta>; 13/04/2021 ; 23h
- [42] ; <https://scholar.google.com/scholar?q=international+energy+agency+statistics>; Agency, International Energy ; 2018
- [43] ; [www.climamaison/lexique/puits-canadien.htm](http://www.climamaison/lexique/puits-canadien.htm); 25/04/2021 ; 17h
- [45] ; [www.info/revue-pour-2013-2\\_pages-151.htm](http://www.info/revue-pour-2013-2_pages-151.htm); Varet, Jacques ; 24/04/2021 ; 22h
- [46] ; <http://www.climamaison/lexique/puits-canadien.htm>; 18/04/2021 ; 14h.
- [47] ; <https://www.google.dz/search?q=prototype+d%27un+puit+canadien>; 12/04/2021 ; 17h
- [48] ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan\\_%C3%A9nerg%C3%A9tique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_%C3%A9nerg%C3%A9tique); 13/04/2021 ; 21h
- [49] ; <https://www.explorateurs-energie.ch/les-9-energies/lenergie-geothermique/>; 11/04/2021 ; 21h