



جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tébessi - Tébessa

République algérienne populaire et démocratique
Ministère de l'enseignement supérieur et la
recherche scientifique

Université Larbi Tébessi - Tébessa

Faculté des sciences exactes et des sciences de la
nature et de la vie

Département des sciences de la terre et de l'univers



Laboratoire Eau et Environnement

Mémoire de master :
Domaine : Sciences de la terre et de l'univers.
Filière : Géologie
Spécialité : : hydrogéologie

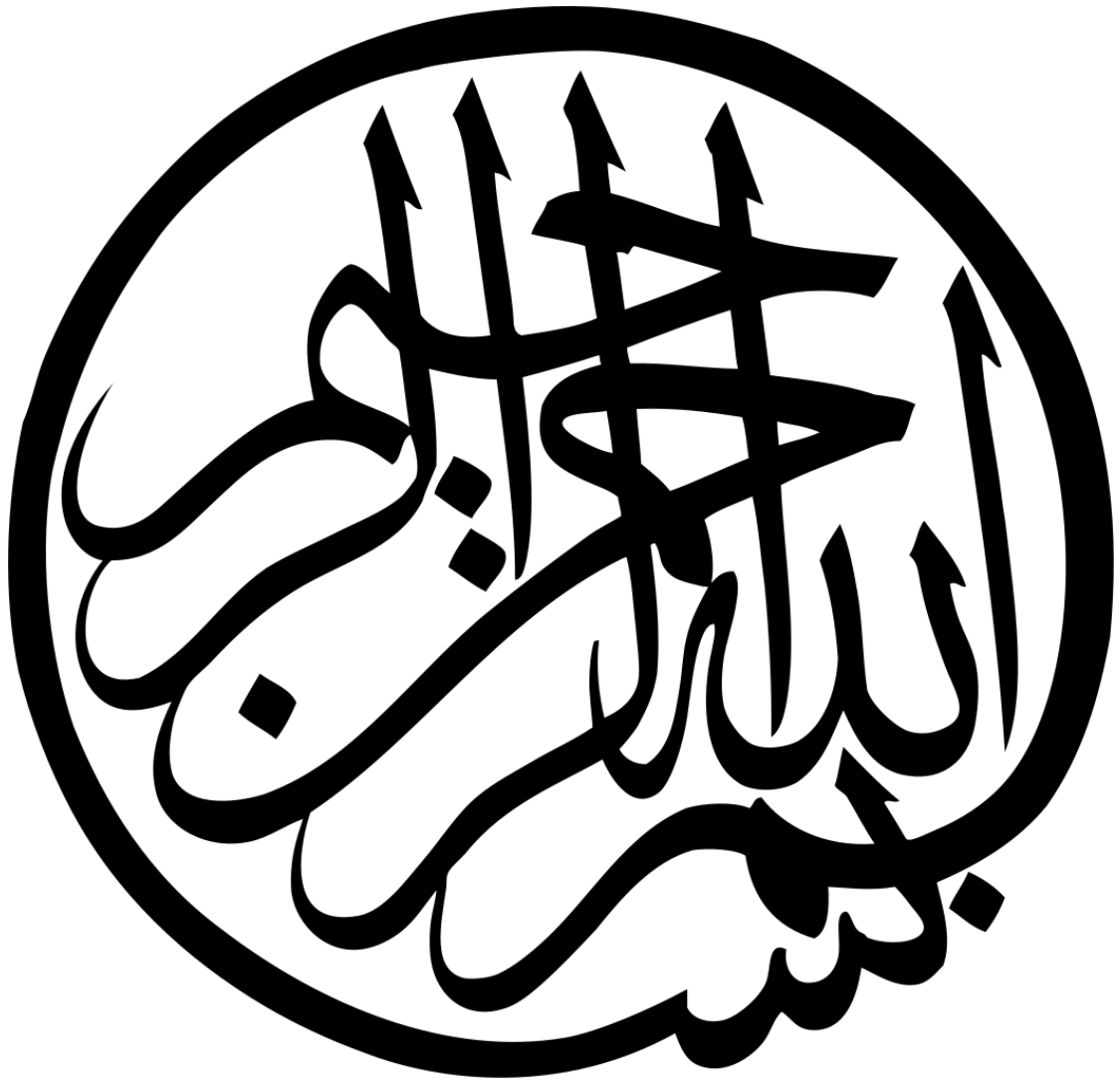
Présentée par :
Benarfa Idriss
Mechri Mohamed El haddi

Thème :

**Conditions d'émergence de la source Thermominérales de la
région de Hammamet (W Tébessa)**

Date de soutenance
06/07/2020
Devant le jury

Président	Baali Fathi	Pr
Examineur	Guefaifia Omar	M.C.A
Encadreur	Seghir Karima	M.C.A





Déclaration sur l'honneur de non-plagiat

(à joindre obligatoirement au mémoire, remplie et signée)

Je soussigné(e),

Nom, Prénom : Ben Arfaan idriss

Régulièrement inscrit(e) en Master au département : géologie

N° de carte d'étudiant : 34 01 9967

Année universitaire : 2020

Domaine: géologie

Filière: géologie

Spécialité: Hydrogéologie

Intitulé du mémoire :

..... Condition d'émergence de la source thermominérale
de la région de Hammamette (west tebessa)

Atteste que mon mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie également que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

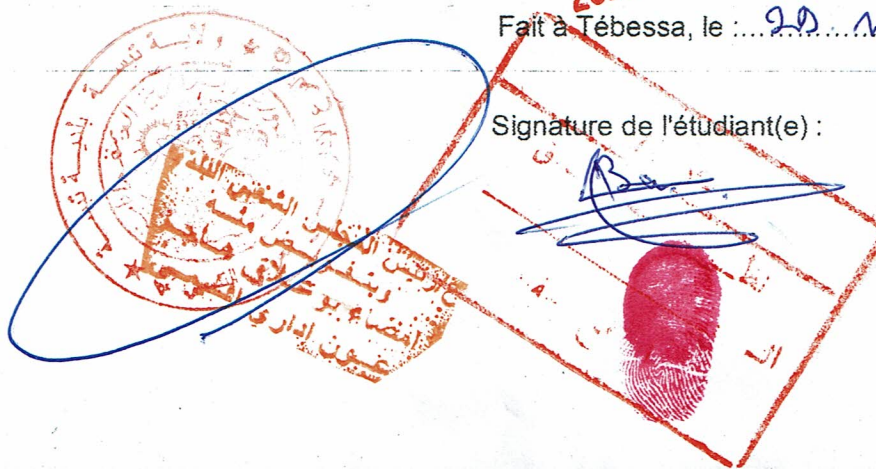
Sanctions en cas de plagiat prouvé :

L'étudiant sera convoqué devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont :

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent ;
- L'exclusion d'une année du master ;
- L'exclusion définitive.

Fait à Tébessa, le 20 11 2020
2020 0.11

Signature de l'étudiant(e) :





Déclaration sur l'honneur de non-plagiat

(à joindre obligatoirement au mémoire, remplie et signée)

Je soussigné(e),
 Nom, Prénom : Mechri Mohamed el haeddi
 Régulièrement inscrit(e) en **Master** au département :
 N° de carte d'étudiant : 15/34024023
 Année universitaire : 2020
 Domaine: Géologie
 Filière: Géologie
 Spécialité: Hydrogéologie

Intitulé du mémoire :
Conditions d'émergence de la source thermominérale de la région de Hammamet (w Tébessa)

Atteste que mon mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie également que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

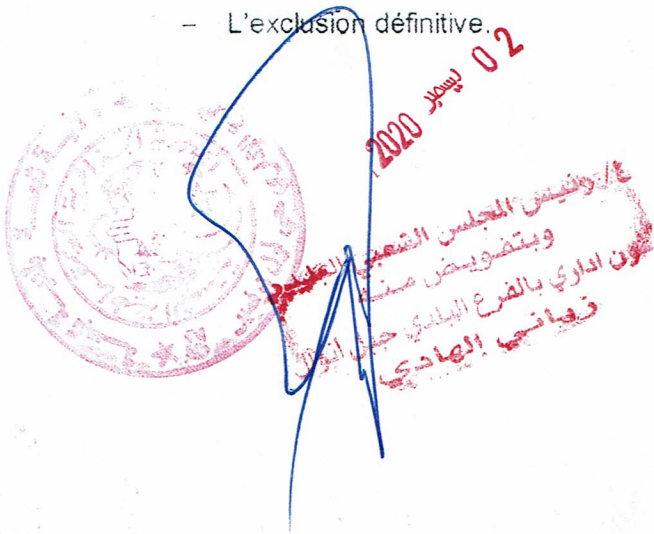
Sanctions en cas de plagiat prouvé

L'étudiant sera convoqué devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont :

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent ;
- L'exclusion d'une année du master ;
- L'exclusion définitive.

Fait à Tébessa, le 20.11.2020

Signature de l'étudiant(e) :





Département

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Année universitaire 2019/2020

Formulaire de levée de réserves après soutenance d'un Mémoire de Master

Données d'identification du candidats(es) :

Nom et prénom du candidat : Benarfa idriss
Mednie M^{me} elhadre

Intitulé du Sujet : conditions d'émergence de la source thermominérale de la région de Hammamette (West tebessa)

Données d'identification du membre de jury :

Nom et prénom : BAALI FETHI

Grade : Prof.

Lieu d'exercice : Université Larbi Tébessi- Tébessa

Vu le procès-verbal de soutenance de la thèse sus citée comportant les réserves suivantes :

.....
RAS
.....

Et après constatation des modifications et corrections suivantes :

.....
RAS
.....

Je déclare en ma qualité de président de jury de soutenance que le mémoire cité remplit toutes les conditions exigées et permet au candidat de déposer son mémoire en vue de l'obtention de l'attestation de succès.

Le 30/11/2020

Président de jury de soutenance : (Nom/Prénom et signature)

Baali Fethi

REMERCIEMENT

Avant tout je remercie le bon dieu qui m'a aidé à l'élaboration de ce travail.

A l'issu de cette étude, je tiens à remercier tout particulièrement:

Mon directeur de mémoire, Monsieur Guefaifia Omar, Maître de conférences à l'université de Tébessa, que va toute ma respectueuse gratitude pour l'encadrement et les conseils qu'il a toujours su me prodiguer tout au long de ce travail. Il a su manifester une grande patience à mon égard et un vif intérêt pour ce travail, qu'il a ponctué par ses remarques empreintes de toute son expérience scientifique et de ses parfaites connaissances sur le karst.

Je tiens aussi à remercier Madame SEGHIR KARIMA, pour avoir accepté de suivre ce mémoire. Tous ses conseils, ses orientations et ses contacts ont été essentiels à la réussite de ce travail.

Je tiens à remercier Mr BAALI .F professeur à l'université de Tébessa, pour avoir accepté d'honorer la présidence du jury.

Mes vives gratitudes vont également à Dr .BENHAMADI.H qui a bien voulu examiner ce travail.

J'adresse mes remerciements à Mr.SAMOUN FATEH pour leurs conseils et leurs orientations et d'avoir assisté au jury.

Mes remerciements s'adressent HEMAIDIA HASSEN, Chef laboratoire de l'université du tebessa de m'avoir accueillie au laboratoire

Dédicace

Avant tout je remercie ALLAH le tout puissant pour toute bonne chose dans ma vie.....



Je dédie ce travail à.....



A ma très chère mère Sabiha**

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.....

*A mon père *Outhmen **

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.....

*A Mon Chèr frère, le bijou de la famille * Zine eddine **

Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de Réussite et de sérénité.

A mes chers amis

**Rami, Ali, Hamid, Cherif, Soufien, Ilyes, Salah, Saif, **

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous Exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères et seours et des amis sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de

A mon binôme Mechrí Mouhamed El hadí

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, santé et de réussite.

Que Allah te protège



Idriss

Dédicace

*Avant tout je remercie ALLAH le tout puissant
pour toute bonne chose dans ma vie.....*

Pour maman

*Oui, je suis arrivée ma merveille, mon soleil, ma
splendeur des splendeurs. Là, quand je viens sur le
point d'obtenir mon M2, je sais que tu es là
maman, c'est le tous pour toiqu'Allah ait pitié
de ta belle âme*

الملخص

تعد منطقة شمال شرق الجزائر مقراً للعديد من الينابيع الحرارية نظراً لتعقيدها الجيولوجية والهيكلية. يتطلب وجود مثل هذا التراث المهم اتخاذ إجراءات مرتبة ومناسبة بين القطاعات الرئيسية للدولة.

في ولاية تبسة ، يوجد ينابيع معدنية حرارية مشهورة منذ العصر الروماني:

•الينبوع الحراري المعدني في سيدي يحيى الواقع في منطقة المريج - وينزة (شمال شرق ولاية تبسة) ؛

•الينبوع الحراري المعدني للحمام يوكوس في منطقة الحمامات (شمال غرب ولاية تبسة).

أظهر تحليل وتفسير البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية والهيدروجيولوجية والهيدروكيميائية المتوفرة أن ظروف ظهور الينبوع الحراري في حمام يوكوس بسبب التصدعات. المياه الحرارية المعدنية ليوكوس ذات حرارة منخفضة (35.2 درجة مئوية) تصنف تحت فئة، تتميز بوجود كبريتات الهيدروجين H_2S وكمية كبيرة من ثاني أكسيد الكربون CO_2 ، وتمعدنه الكلي يساوي 591 ملغم / لتر، الماء به كمية كبيرة من بيكربونات الكالسيوم. بالإضافة إلى استخدامها للأغراض العلاجية (اضطرابات الكلى والأمراض الجلدية والأمراض الروماتيزمية وحتى الزهري)، تستخدم المياه الحرارية في يوكوس حاليًا لتزويد المدن المجاورة بمياه الشرب.

Résumé

La région du Nord Est Algérien constitue le siège de plusieurs sources thermales vue sa complexité géologique et structurale. L'existence d'un tel patrimoine important exige une action arrangée et appropriée entre les principaux secteurs de l'état.

Dans la Wilaya de Tébessa, il existe deux sources thermo-minérales très fameuses depuis l'époque romaine ce sont :

- La source thermo-minérale de Sidi yahia situé dans la région El Meridj-Ouenza (NE de la Wilaya de Tébessa) ;
- La source thermo-minérale de Hammam Youkous Les Bains situé dans la région de Hammamet (NW de la Wilaya de Tébessa)

L'analyse et l'interprétation des données géologiques, géophysiques et hydrogéologique, et hydrochimiques disponible, ont montré que les conditions d'émergence de la source thermique de Hammam Youkous Les Bains revient à une faille de décrochement indiquant ainsi son origine. Les eaux thermo-minérales de la source Youkous Les Bains sont de faible thermalité (35,2°C) classées dans la catégorie hypothermie, caractérisées par la présence de l'hydrogène sulfuré H₂S et une quantité notable de CO₂, sa minéralisation globale égale 591 mg/l, l'eau est de faciès chimique dominant Bicarbonaté calcique. En plus de leurs utilisations pour des fins thérapeutiques (Affections des reins, maladies cutanées, Rhumatismales et meme la syphilis), les eaux thermales de Youkous Les Bains sont utilisées, actuellement, pour alimenter les agglomérations voisines en eau potable (AEP) par un Forage (YK2)

Abstract

The region of North East Algeria is the seat of several thermal springs given its geological and structural complexity. The existence of such an important heritage requires arranged and appropriate action between the main sectors of the state. In the Wilaya of Tébessa, there are two very famous thermo-mineral springs since Roman times:

- The thermo-mineral spring of Sidi yahia located in the El Meridj-Ouenza region (NE of the Tébessa Wilaya);
- The thermo-mineral spring of Hammam Youkous Les Bains located in the region of Hammamet (NW of the Wilaya of Tébessa)

The analysis and interpretation of the geological, geophysical and hydrogeological, and hydrochemical data available, have shown that the conditions for the emergence of the thermal spring of Hammam Youkous Les Bains amounts to a fault in the hook indicating its origin. The thermo-mineral waters of the Youkous Les Bains spring are of low thermality (35.2 ° C) classified in the hypothermia category, characterized by the presence of hydrogen sulfide H₂S and a significant amount of CO₂, its overall mineralization equals 591 mg / l, the water is chemically dominant, calcium bicarbonate. In addition to their uses for therapeutic purposes (Kidney disorders, skin diseases, Rheumatic diseases and even syphilis), the thermal waters of Youkous Les Bains are currently used to supply neighboring towns with drinking water.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Partie 1

Introduction générale.....	2
Objectifs d'étude	3
Conditions Hydrogéologiques d'émergence des sources thermo-minérales	6
1/ Définition	6
2/ L'aire d'émergences hydrominérales :	6
3/ Localisation des émergences d'eaux thermo-minérales.	12
4/Mécanisme des émergences d'eaux thermo-minérales	12
Conditions Hydrogéochimique d'émergence des sources thermo-minérales.....	15
I-Caractéristiques physico-chimiques des eaux thermo-minérales	15
I-1/ Géochimie des eaux thermo minérales :.....	15
I-2/Représentation et interprétation des résultats d'analyses	17
A/Présentation graphique des analyses chimiques	18
II/Origine des sels dissous dans les eaux thermo-minérales :.....	18
A/Origine Exogène :	18
B/Origine endogène :	19
III/Gaz des eaux thermo-minérales	20
A/Rôle des gaz :.....	20
B/Origine des gaz :.....	20
IV/Température des eaux thermo minérales.....	21
A/Origine de la température des eaux thermo minérales :.....	21
V/Radioactivité des eaux thermo minérales	22
V-1/Origine de la radioactivité des eaux thermo minérales :.....	23
VI/Paramètres physico-chimiques des eaux thermo-minérales	23
A/Substances mal connues :	23

B/Dépôts formés par les eaux thermo-minérales :.....	23
VII/Classification des eaux thermo minérales	24
A/Description des principaux types :.....	26
B/Classification des eaux thermo-minérales d’après la température :.....	28
C/ORIGINÈ DES EAUX THERMOMINÉRALES.....	29

Partie 2

Situation géographique.....	35
1\ Introduction	35
2/Historique de la région d’étude	38
3/Réseau hydrographique.....	38
4/Couverture végétale	38
5/Géomorphologie de la région de Hammamet.....	38
5-1-Les montagnes :.....	38
5-2 -Les collines	39
5-3 -les plaines.....	39
5-3-1-Les plaines d’érosion.....	39
5-3 -2-Les plaines d’accumulation	39
CADRE GEOLOGIQUE.....	40
1/Introduction.....	40
2/ La stratigraphie.....	41
2.1. Le secondaire:	41
2.3- Le Tertiaire:.....	43
2-3-Quaternaire :.....	43
2.4-La colonne stratigraphique	43
2.5-L’anticlinal effondré de Hammamet.....	45
3\ La tectonique de la région.....	47
1-La phase atlasique compressive fini-Lutetienne	48
2-La phase distensive du Miocène.....	48
3-La phase compressive de Miocène	49

4- La phase compressive du Pliocène inférieur.....	49
5-La phase compressive du Pliocène supérieur (Villafranchien inférieur).....	49
4-LES DONNEE STRUCTURALES	50
4.1 Les déformations plicatives	50
4.2 Le synclinal de Guerigueur.....	50
4-3 L'anticlinal de Serdies	50
4-4 Le Synclinal de Troubia.....	50
4-5 L'anticlinal d'El Hammamet	50
4-6 Le Synclinal de Tazbent.....	50
5/ Les déformations disjonctives.....	51
5.1 Les failles.....	51
5.2 Les diaclases	51
II- Hydrologie/climatologie :	53
2- Étude de sous bassin versant de Bouakous.....	53
2-1-Les paramètres géométriques	53
2- Etude des paramètres climatologiques	59
2-1- Les précipitations	59
2-2- La neige	61
2-3- Les températures	61
2-4- Le vent.....	62
3- l'indice d'aridité	62
4- Le bilan hydrique	63
4-1- Calcul des paramètres du bilan hydrique.....	63
4-2- Estimation du bilan hydrique	64
5-Conclusion	68
Etude géophysique	70
1/ Introduction.....	70
2/ Principaux résultats géophysiques.....	70
2.1/ Etudes géophysiques précédentes de la zone d'étude :.....	70

3 /Conclusion	75
Hydrogéologie de Hammamet et conditions d'alimentation de la source thermale de Youkous	77
1/ Introduction.....	77
2/ L'étude des cartes piézométriques	77
3/ Conditions aux limites du champ captant Ain chabro :.....	78
4/ Identification hydrogéologiques des sources étudiées :	78
5/ Conditions hydrogéologiques d'émergence de la source thermale de Youkous les bains-Hammamet :	79
6/ Conclusion	86
Qualité chimique des eaux thermominérales	88
1/Introduction.....	88
1/ Ancienne étude hydrochimique	88
2/ La représentation graphique.....	89
3/ Comparaison des données chimiques de la source thermale avec les eaux des nappes d'eau semi profonde/Profonde.....	91
3-1 / Comparaison entre les eaux de la source chaude et les eaux du forage récemment foré (FYK2) :.....	93
4/ L'origine des gaz libres CO ₂ et H ₂ S.....	94
5/ Actions thérapeutiques de la source thermale Youkous Les Bains :	96
6/ Conclusion	96
Conclusion générale	98

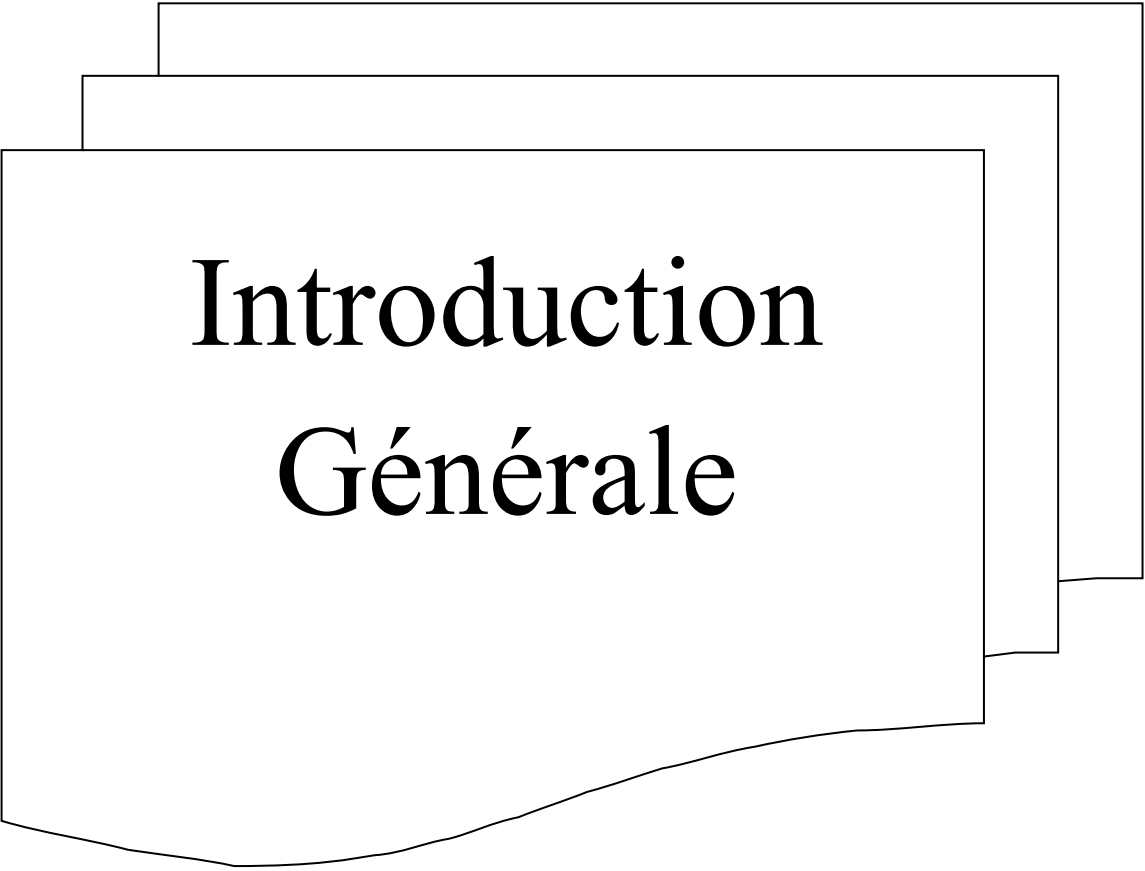
List des figures

Figure 1: Source de la motte-les-Bains [SEGHIR Karima, 2008].	7
Figure 2: Les thermominérales de la bourboule, [SEGHIR Karima, 2008].	8
Figure 3: Schéma géologique de l'aire d'émergence hydro-ménerale de chatelguyon [SEGHIR Karima, 2008].	9
Figure 4: esquisse géologique de l'aire d'émergence hydrominérale de vals les bains d'après J.P destombes source hydrominérale ; 2 filons de quartz ; 3 granulies grannuilles ; 4 failles , 5 couverture secondaire ; 6, direction couches)- [SEGHIR Karima, 2008]	11
Figure 5: Alimentation et circulation souterraines des sources d'aix les bains[SEGHIR Karima, 2008].	12
Figure 6: Variation compare de la charge avec profondeur de l'eau pure et de l'eau minérale.	13
Figure 7: Coupe pour l'action de la viscosité-débit[SEGHIR Karima, 2008].	14
Figure 8: schéma de l'origine météorique des eaux thermoménirales, [SEGHIR Karima, 2008]	29
Figure 9: Origine volcanique (magatique) des eaux thermominérales, [SEGHIR Karima, 2008]	31
Figure 10: schéma de l'origine magmatique des eaux thermominérales [SEGHIR Karima, 2008].	32
Figure 11: Situation géographique de la région de Hammamet (google earth).	36
Figure 12: Photo satellite présentant la région d'étude (Google map).	37
Figure 13: Position de la source thermo minérale sur la carte topographique de youks les bains).	37
Figure 14: extrait de la carte géologique d'Algérie au 1/500.000e.	40
Figure 15: Légendre de la figure 11.	41
Figure 16: Empreinte d'ammonites au niveau des calcaires marneux en plaque du Vraconien [SAMOUNE F.2011].	42
Figure 17: le Cénomaniens marneux avec ses passées carbonatées et des failles synsédimentaires qui en coupent quelques-unes [SAMOUNE F.2011]	42
Figure 18: Colonne stratigraphique da la région de Hammamet. In Benmensour 2010.	44
Figure 19: le synclinal de Gueriguer.	45
Figure 20: anticlinale effondré de Serdies.	45
Figure 21: le synclinal de Tazbent Coupes géologiques Nouri (1992)- in Hibi 2010 [SAMOUNE F.2011].	45
Figure 22: failles listriques (extrait d'une étude du Dyr) [SAMOUNE F.2011].	46
Figure 23: La carte de substratum du fossé de Hammamet in Kowalski et al (2002) [SAMOUNE F.2011].	46
Figure 24: Esquisse géologique et structurale du fossé de Hammamet par Kowalski et al (2000) [in ZAROUKI H, 2013]	47
Figure 25: Résultats des phases tectoniques sur la zone d'étude. Photo satellite in Zereg Salah (2010).	48
Figure 26: Esquisse tectonique des environs de Tébessa et Hammamet avec l'emplacement des directions des contraintes maximales Kowalski et al (2000).	49
Figure 27: Développement de diacalse dans Dj. Essenn.	51
Figure 28: Bassin versant 'Youkous [Geufaifia Omar 2007].	54
Figure 29: Rectangle équivalent du sous bassin versant de Bouakous.	56
Figure 30: Variation moyennes mensuelles interannuelle des précipitations (2000-2017).(d'après le tableau précédent).	60
Figure 31: Variation mensuelle des températures maximales à la station de Tébessa.(d'après le tableau précédent).	62

Figure 32: Bilan hydrique avec ETP de Thornthwaite.(D'après le tableau précédent).....	68
Figure 33: Position des sondages géo-électriques dans la plaine de Hammamet [SAMOUN, F., 2011]......	70
Figure 34: coupe géoélectrique selon la ligne de sondages électriques verticaux « R ». [SAMOUN, F., 2011]......	71
Figure 35: coupe tomographique N-S à 50cm à l'Est de la bâtisse romaine.	72
Figure 36: coupe tomographique N-S à 8.50cm à l'Est de la bâtisse romaine.	72
Figure 37: Localisation des profils de tomographie électriques. (Coté de la source thermique de Youkous)[ZAROUKKI, H. 2013]......	73
Figure 38: carte piézométrique de la zone d'étude mai 2008. In Beriani 2008 [in SAMOUN F 2011]......	77
Figure 39: Localisation du champ captant d'Ain chabro par rapport à la source thermique [in ZAROUKKI H 2013].	78
Figure 40: coupe présentant les sources froides et la source thermique de la région de Youkous-Hammamet [in ZAROUKKI H 2013]......	79
Figure 41: Position de la source thermo minérale sur la carte topographique de youks les bains)[SAMOUN F 2011]......	79
Figure 42: environnement restreint du hammam (des thermes) le point bleu positionne l'émergence chaude. Photo satellite [SAMOUN F 2011].	80
Figure 43:Le point d'émergence de la source thermique de Hammamet se situe au nord ouest de la terminaison de dj. Stah. [SAMOUN F 2011]	80
Figure 44: le fond et les parois du premier réservoir de la source thermique de Youks les bains [SAMOUN F 2011]......	81
Figure 45: photo prise du haut de la colline (958) nord montre les alentours immédiats de l'émergence chaude de Hammamet. [SAMOUN F 2011]......	82
Figure 46: Extrait de carte structurale de la zone d'émergence[SAMOUN F 2011]	82
Figure 47: Bloc diagramme de la vallée de Bouakous[SAMOUN F 2011].	83
Figure 48: L'apport de gaz des profondeurs compenserait la température acquise par effet du gradient géothermique [SAMOUN F 2011].	84
Figure 49: Faille flexure par laquelle pourrait se faire le mélange des eaux profondes avec les eaux superficielles dans les formations carbonatées (Alban Duriez thèse 2006) [SAMOUN F 2011]......	84
Figure 50: Colonne stratigraphique du forage F YK2 (DHW, Tébessa, 2016).	86
Figure 51: Confrontation des trois analyses entre elles sur le diagramme de Piper.....	89
Figure 52: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les trois échantillons.	89
Figure 53: Confrontation des trois analyses avec les aux du Maestrichtien sur le diagramme de Piper.....	90
Figure 54: confrontation des trois analyses avec les aux du Maestrichtien sur le diagramme de Schoeller Berkaloff.....	91
Figure 55: Diagramme Piper représentant les eaux de la source thermique et les eaux du Forage (FYK2)	93
Figure 56: Diagramme Scholler-Berkalof représentant les eaux de la source thermique et les eaux du Forage (FYK2)	94
Figure 57: Bain de romain (Dheraa elhammam-hammamet).	102
Figure 58: Forage	103
Figure 59: Bain (Hammam) en face de Centre de repos El moudjahidine.....	103

List des Tableaux

Tableau 1: Dosage des anions[Castany, 1967]	16
Tableau 2: Classification des eaux thermo minérales d'après leur composition chimiques.	25
Tableau 3: Composition chimiques de quelques sources thermo minérales de France et d'Algérie, exprimée en quantité en réaction pour cent.....	26
Tableau 4: Classification du relief selon l'ORSTOM (Douichine F, 2018).....	55
Tableau 5: Répartition des surfaces en fonction des altitudes du sous bassin versant de Bouakous. (Douichine F, 2018)	57
Tableau 6: récapitulatif des différents paramètres du sous bassin versant de Bouakous. (Douichine F, 2018).....	58
Tableau 7: caractéristique de la station météorologique de Tébessa (Douichine F).....	59
Tableau 8: Distribution mensuelle des précipitations interannuelles (Douichine F).	59
Tableau 9: Bilan de coefficient pluviométrique (2000-2017) (Douichine F, 2018)	61
Tableau 10: Les températures maximales mensuelles à la station de Tébessa (2000-2017) (Douichine F, 2018).....	61
Tableau 11: Tableau 07 : La température moyenne annuelle. La précipitation moyenne annuelle, et l'indice d'aridité(2000-2017) (Douichine F, 2018)	63
Tableau 12: Résultats de calcul de l'ETP par les formules de Thornthwaite (Douichine F, 2018).....	65
Tableau 13: Bilan hydrologique pour ETP de Thornthwaite de la station de Tébessa de la période (Douichine F, 2018).....	67
Tableau 14: analyses chimiques de l'eau de la source thermo minérale de Youks les bains. ..	88
Tableau 15: données sur les eaux de surface (sources du maestrichtien de Hammamet)[SAMOUN F 2011].....	90
Tableau 16: Données sur les eaux d'une profondeur allant jusqu'à 200m.....	91
Tableau 17: Diagramme de Piper. (Légende :Orange – eaux thermales, Bleu - forage turonien Dj. Essen, Rose – forage F1 Maestrichtien effondré, Rouge – Forage dans les alluvions (marnes - graviers –galets) 200m à l'Ouest de l'émergence chaude.....	92
Tableau 18: Diagramme de Schoeller Berkaloff.....	92
Tableau 19: Caractéristique physico-chimique (Centre de repos El-moudjahidine- El Hammamet- Tébessa).	93



Introduction Générale

Introduction générale

L'hydrogéologie se préoccupe de la prospection, de l'exploitation, de la gestion et de la protection des eaux souterraines. C'est à l'hydrogéologue qu'incombe à la compréhension du comportement hydraulique des bassins hydrologiques, la gestion des ressources en eau, l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle et le maintien ou la réhabilitation de la qualité de notre environnement.

La dénomination d'eau minérale est réservée très souvent aux eaux douées de propriétés thérapeutiques et utilisées conformément à des règles qui garantissent leur pureté bactériologique et la stabilité de leur composition chimique. Ce patrimoine naturel le plus précieux de l'humanité, est très inégalement réparti dans le monde pour des raisons climatiques, et structurales. Le traitement thermal combine la boisson et le bain employant les eaux auxquelles on prête des vertus curatives. Les eaux minérales renferment des quantités notables de sels en solution (carbonate ou sulfate de calcium, chlorure de sodium, fer, magnésium, sulfures, traces d'oligo-éléments, dont le lithium). Certaines sont gazeuses : le taux d'hydrogène sulfuré est la plupart du temps faible, alors que le gaz carbonique est souvent abondant (eaux effervescentes). Ces eaux peuvent avoir pour origine la remontée en surface, par le jeu de failles dans les structures géologiques, d'eaux de pluie infiltrées à très grande profondeur ou la condensation de vapeurs émises par le volcanisme, alimentant sources chaudes ou geysers [EncyclopaediaUniversalis2015]

L'existence d'un patrimoine important deux cent (200) sources thermo-minérales sont dénombrées sur l'ensemble du territoire nationale exige une action concertée et intégrée entre les principaux secteurs que sont les collectivités locales, les structures de la santé, du tourisme, l'Energie et des Mines ainsi que celles des Ressources en Eaux. L'assistance du ministère de Culture serait également d'une grande utilité pour la protection des sites archéologiques et ce qui reste des thermes romains [Dib,H, 2008]

La région du Nord Est Algérien est connue par sa complexité géologique et structurale constitue le siège de plusieurs sources thermales, leur apparition datant de l'époque romaine probablement en 1838 par le pharmacien Tripier, aide-major de l'armée française comme le mentionne le site de El-watane.com et exploité sous forme de hammam populaire.

Les sources thermales dans la région de Guelma (comme hammam Debagh, Ouled Ali, bradaa...) prennent naissance sur des structures tronquées, par des réseaux de faille directionnelles donnant naissance à des couloirs tectoniques.

La Wilaya de Tébessa de son côté est dotée de deux sources thermo-minérales très connues depuis l'époque romaine ce sont :

- La source thermo-minérale de Sidi yahia situé dans la région El Meridj-Ouenza (NE de la Wilaya de Tébessa) ;
- La source thermo-minérale de Youkous Les Bains situé dans la région de Hammamet (NW de la Wilaya de Tébessa)

Objectifs d'étude

Comme dans toutes les régions de l'Afrique du Nord, notamment du Maghreb, la région du grand bassin de Mellègue a connu au cours des dernières années une sécheresse très intense et persistante. Cette sécheresse est caractérisée par un déficit pluviométrique considérable, a eu un impact négatif sur les régimes d'écoulement des oueds et des sources minérales et même thermales et sur l'alimentation des nappes aquifères. Ce déficit hydro-pluviométrique s'est répercuté sur l'ensemble des activités socio-économiques de cette région.

Devant la gravité de cette situation qui intervient à une période où les besoins en eau pour les différents secteurs sont considérablement accrues, et dans le cadre de la nouvelle politique nationale de gestion des ressources hydriques, les autorités locales ont interpellé les gestionnaires afin d'étudier l'ampleur et l'extension du phénomène, ses conséquences et les stratégies à mettre en œuvre pour atténuer ses effets.

- A cet effet et dans le cadre de la stratégie globale de maîtrise et de mobilisation des ressources hydriques dont les eaux des sources minérales et thermo-minérales, il nous a été confié ce projet d'étude afin de définir les conditions géologiques, structurales et physico-chimiques de l'émergence de la source thermo-minérale de Youkous Les Bains situé dans la région de Hammamet (NW de la Wilaya de Tébessa)

Ce travail fait partie d'un projet de recherche en cours, Intitulé : Caractérisation géologique, hydrogéochimique, vulnérabilité à la pollution, protection et gestion active des systèmes aquifères des régions semi-arides (Nord-Est Algérien) (PRFU agréée le 01/01/2018 sous code : E04N01UN120120180002

La tâche principale qui nous a été limitée par notre encadreur, est de trouver, à partir d'un suivi continu durant trois mois de la période Hautes Eaux du cycle hydrologique 2019-2020, une synthèse préliminaire sur la variabilité d'écoulement et du chimisme de l'eau de cette source. Malheureusement, vu les conditions défavorables de confinement générale du pays à cause de la pandémie de COVID-19, qui a été appliqué depuis le 12 Mars 2020 jusqu'au 13 Juin 2020 nous n'avons pas pu réaliser cette tâche comme prévu. D'un autre côté, nous avons pu faire une synthèse bibliographique et nous avons pu récolter quelques informations et quelques échantillons d'eau et essayer d'avoir une réponse logique sur les conditions d'émergence de la source thermo-minérale de Youkous Les Bains.

La méthodologie d'étude adoptée se présente en deux grandes parties :

Dans la première partie, nous présenterons une synthèse bibliographique sur le thermalisme dans le monde et ses caractéristiques hydrogéologiques et physico-chimiques ; et le développement des sources thermo-minérales en Algérie.

Dans la deuxième partie, nous présenterons dans un contexte générale des aperçus géologiques, hydro-climatologiques, hydrogéologiques, géophysiques et hydrochimiques de l'ensemble de la région et les conditions d'émergence de la source thermo-minérale de Youkous Les Bains ;

Finalement, nous donnerons une conclusion générale dans laquelle, nous remettrons en évidence les synthèses trouvées d'une part, et nous soulèverons les difficultés rencontrées en suggérant, dans le cas d'une étude approfondie, un plan de travail complémentaire, d'une autre part.



Partie I

Cadre général

Conditions Hydrogéologiques d'émergence des sources thermo-minérales

1/ Définition

- **Eau thermale:** Il s'agit d'une eau dont la température est supérieure à la température moyenne des eaux de nappe de la région. (Vincent Vales 2004 cours)

Pour Castany (1967) une source est dite thermale si elle est de 5°C plus élevée que celle de l'air ambiant au point d'émergence tandis que le système européen considère une source thermale si sa température est supérieure à 20°C.

Mr verdeil P. a défini une caractérisation spécifique aux eaux thermales du nord de l'Algérie au vu de la température atmosphérique et selon « le concept que toute source qui émerge avec une température supérieure ou égale à 22°C est considérée comme thermale » Verdeil (1982)[SAMOUNE F,2011]

- **Eau minérale:** Eau dont la composition chimique est recommandée pour une bonne santé. (Académie de Médecine française).

- **Eau thermo minérale:**

Eau naturelle douée de propriétés thérapeutiques particulières (Castany G.1963).

Alors que pour Vincent Vallès (cours 2004), cette dénomination est parmi les terminologies qui ne sont pas reconnues.

2/ L'aire d'émergences hydrominérales :

les eaux thermo-minérales remontent en surface, le plus souvent, par des fractures et des fissures ouvertes, localisées dans une zone tectonique. Nous observons alors une aire d'émergences hydrominérales. « Souvent les auteurs ont utilisé, à tort, le terme impropre de bassin hydrominéral pour ce mode de gisement. Ce vocable doit être réservé exclusivement à une véritable nappe souterraine d'eaux thermo-minérales » [Castany, 1976] souvent les eaux des griffons du substratum se déversent et s'accumulent dans les couches superficielles de recouvrement forment alors une nappe phréatique. Mais il ne s'agit, dans ce cas que, d'une structure secondaire qui masque les couches du substratum de l'aire d'émergences. G. Castany, 1976 a insisté sur le fait qu'une, source d'eau thermo-minérale était liée essentiellement à une ascension rapide des eaux profondes. Cette condition impérative, mettant en évidence le rôle des fractures ouvertes, limite les types d'émergences à des structures bien particulières, moins variées que celles des eaux ordinaires.

Les types d'émergences des eaux thermo-minérales sont en relation étroite avec le mode de gisement. Dans les bassins hydrominéraux on observe des sources artésiennes. Les captages sont effectués par forages profonds (exemple le cas de la source thermale de Hammamet, Tébessa, Algérie). Il s'agit donc d'une perméabilité de fissures. Les accidents favorables sont [Castany, 1976]:

- Les diaclases et fissures fines ;
- Les failles et les zones de broyage ;
- Les contacts géologiques ;
- Les filons et dykes éruptifs ;
- Les filons métallifères.

La présence de fissures et de fractures ne suffit pas. Encore faut-il que ces accidents soient ouverts. D'où la notion de fissuration active. Les études en géologie structurale ont montré que les accidents primitivement ouverts, Ou dégagés et élargis par la circulation des eaux souterraines, sont évidemment des lieux privilégiés d'échanges et qui peuvent s'obstruer par des dépôts minéraux C'est d'ailleurs sur ce principe qu'est basée l'hypothèse de l'origine hydrothermale des gîtes minéraux où les fissurations anciennes peuvent être généralement

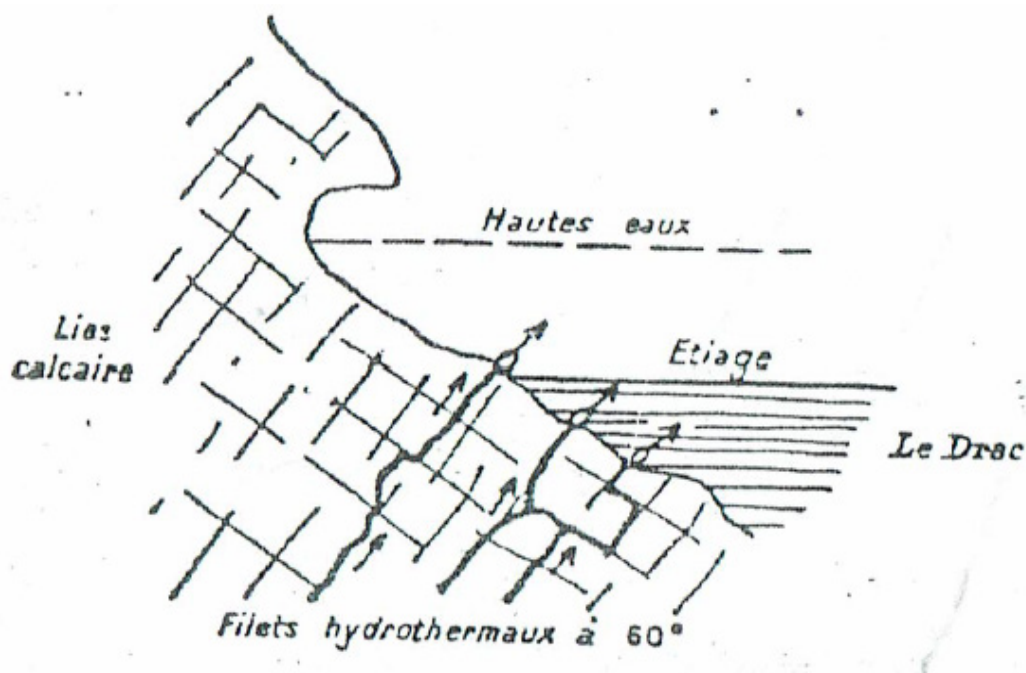


Figure 1: Source de la motte-les-Bains [SEGHIR Karima, 2008].

colmatées, mais aussi réactivées par des phases tectoniques postérieures. C'est pourquoi les émergences d'eaux thermo-minérales se situent à l'intersection des différentes directions orogéniques et surtout dans les zones de mouvements récents. Nous ne manquerons pas de souligner ici l'analogie avec la localisation des secteurs minéralisés.

Diaclases et fissures fines : Elles sont rarement à l'origine de la circulation des eaux thermo-minérales.

Failles et zones de broyage : Les failles et les zones de broyage qui les accompagnent ou isolées, lorsqu'elles sont ouvertes, sont des voies de circulations naturelles pour les eaux thermo-minérales. C'est pourquoi les émergences sont souvent localisées et s'alignent sur les grandes fractures du socle. Nous citerons comme exemple le grand fossé subméridien de la Limagne dans le Massif Central avec, sur sa bordure occidentale, Royat, Châtelguyon et à l'Est, Châteldon. St-Yone, Vichy. Cusset. La Bourbon le, dans le Puy-de-Dôme (Fig. 23-38), Bourbon-Lancy, St-Honoré-les-Bains.

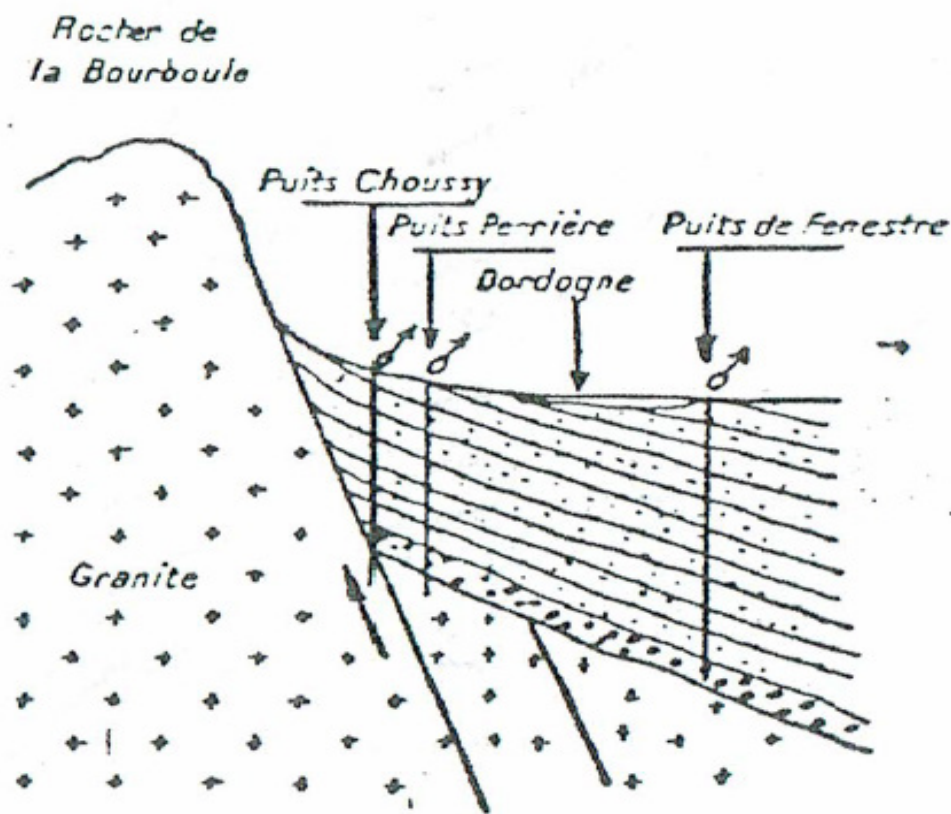


Figure 2: Les thermominérales de la bourboule, [SEGHIR Karima, 2008].

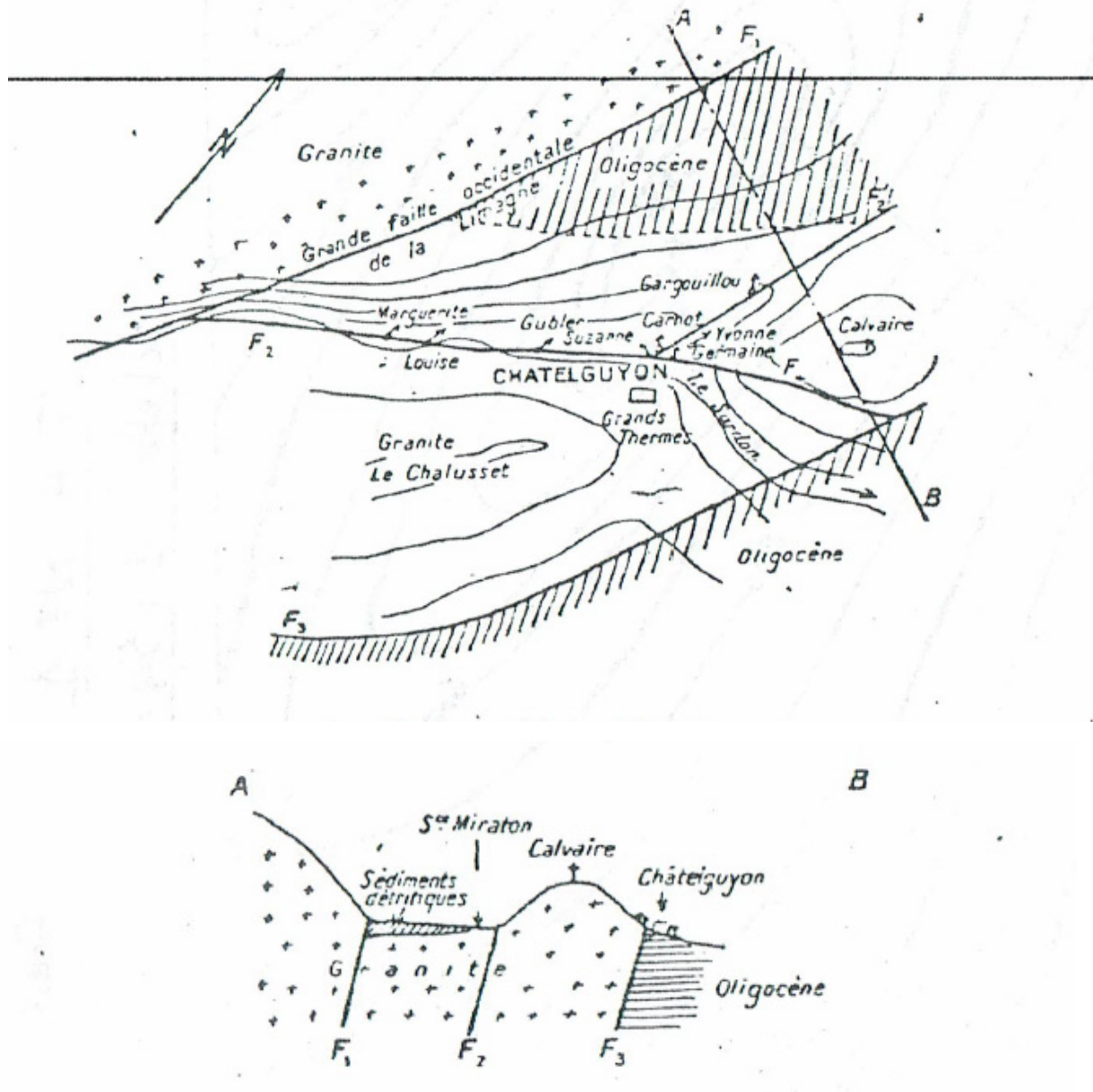


Figure 3: Schéma géologique de l'aire d'émergence hydro-minérale de chatelguyon [SEGHIR Karima, 2008].

Elle est localisée dans un champ de fractures avec failles satellite plus récentes, dont la principale est F₂ (3-4). Le point de digitation de F₂ et d'un petit accident F₄, correspond à de nombreuses émergences d'eaux chaudes et gazeuses. Nous noterons que toutes se situent, à l'intersection des fractures avec la dépression topographique de la vallée du Sardon. Le gisement hydrominéral est situé dans le socle granitique, masqué par un recouvrement de 10 à 40 m que percent les puits et forages de captage. La température oscille de 18 à 35 °C. Le débit d'ensemble est relativement stable, mais celui de chaque émergence varie, dans les conditions naturelles, de 0 à 375 l/mn, réglé par des conditions particulières d'écoulement et par les dégagements gazeux importants. Les eaux sont bicarbonatées magnésiennes avec CO₂

libre. L'importance des fractures a été reconnue dans de nombreux gîtes en France. De même, en Bulgarie, B. Spiriev (1960) a souligné le rôle des failles de distension et des grandes cassures. C'est également aux points de croisement d'accidents jeunes, quaternaires, pliocènes, oligocènes ou éocènes que se situent les griffons importants. Les émergences seraient d'autant plus abondantes que la fracture est plus jeune.

Contact géologiques : Les contacts géologiques, entre les roches granitiques et les roches sédimentaires, sont fréquemment le lieu de circulations et d'émergences des eaux thermo-minérales. A Beaumont (sud-est du Massif Central), les sources minérales naissent au contact mécanique quartzifié entre les granites au nord et les micaschistes au sud (J. P. Destombes).

Enfin, signalons les griffons situés dans des grottes naturelles (E. A. Martel). Les plus typiques s'observent à Aix-les-Bains, San Stefano (Trieste), Monsummano (Toscane), Ganes (Styrie), Aldour (Algérie), Heriopolis (Asie Mineure). Mais ces gisements ont presque toujours des fissures ou fractures pour origine.

Filons et dykes éruptifs : Les filons et dykes éruptifs, qui recoupent les assises sédimentaires, favorisent la remontée rapide des eaux thermo-minérales. A Vais, par exemple, J. P. Destombes a observé la concordance des directions de filons de basaltes miocènes et quaternaires et des diaclases- à moffettes à CO₂. Souvent dans les Pyrénées les eaux minérales émergent le long des dykes ou filons basaltiques.

Filons métallifères : Les filons métallifères sont fréquemment une voie privilégiée de venues des eaux thermo-minérales. C'est là, en somme, une survivance, de la circulation hydrothermale qui leur a souvent donné naissance, laquelle est remise en jeu par des accidents postérieurs. Nous noterons d'ailleurs que les filons correspondent souvent avec les grandes fractures du socle continuellement actives. Ils jouent un double rôle, d'une part hydraulique en favorisant l'ascension des eaux profondes vers la surface, chimique, d'autre part, par enrichissement dû à la dissolution de leurs substances minérales. Nous citerons comme exemple les filons de quartz de Vais (J. P. Destombes), de fluorine de St-Laurent-les-Bains (J. Avias). A Bourbon-l'Archambault les filons de quartz, fluorine et barytine dans les-

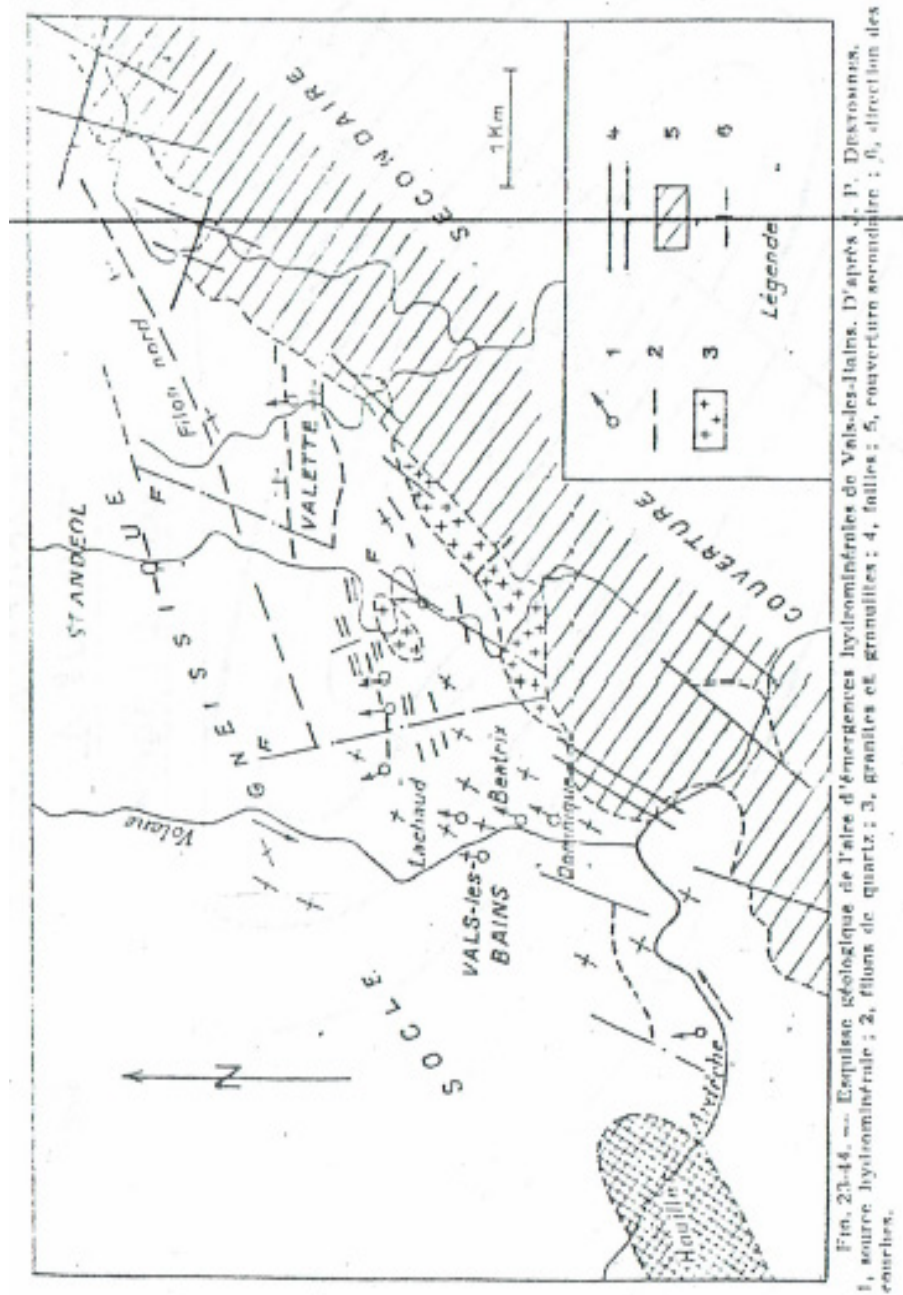


Figure 4: esquisse géologique de l'aire d'émergence hydrominérale de Vals-les-Bains d'après J.P. Destombes
 source hydrominérale ; 2 filons de quartz ; 3 granules et granules ; 4 failles, 5 couverture secondaire ; 6, direction couches)- [SEGHIR Karima, 2008] .

-gneiss, donnent des eaux thermales à 53 °C. Les griffons de Plombières sont localisés sur des filons de quartz et de fluorine recoupant le granité.

Les eaux minérales sont d'origine profonde et vivifiées par le gaz carbonique d'origine volcanique. Elles sont du type bicarbonaté sodique. La variabilité dans le temps de leur concentration et de leur température est due à des pollutions par infiltration d'eaux de surface.

3/ Localisation des émergences d'eaux thermo-minérales.

L'émergence type de venues d'eaux thermo-minérales est le griffon. Le griffon est situé à l'intersection d'une fissuration profonde et d'une surface topographique déprimée par laquelle l'eau ascendante monte au jour.

Les aires des émergences hydrominérales sont donc déterminées par deux conditions majeures :

- Une fracturation intense avec une ou plusieurs phases tectoniques dont la dernière, due à des mouvements récents, est souvent soulignée par une activité volcanique;
- La présence de vallées ou de dépressions. Ce fait explique, entre autres, que les sources thermo-minérales sont presque exclusivement l'apanage des zones montagneuses.

Fréquemment les roches fissurées du substratum d'où émergent les eaux thermo-minérales sont recouvertes par des formations sédimentaires plus récentes qui masquent les véritables griffons. Si ces couches sont perméables les eaux s'y accumulent formant une nappe d'eaux minérales (exemple: Châtelguyon, Ax-les-Thermes). Ces assises peuvent être constituées par des dépôts d'origine externe : éluvions, collutions, alluvions, arènes, etc., ou par des concrétions et encroûtements provenant de la précipitation des Sels dissous.

Très souvent d'ailleurs les précipités cimentent et colmatent les terrains perméables recouvrant le substratum, formant une véritable carapace protectrice qu'il faut percer pour l'exécution des captages [Castany, 1976]

4/Mécanisme des émergences d'eaux thermo-minérales

Les gisements d'eaux thermo-minérales donnent naissance à des sources sous

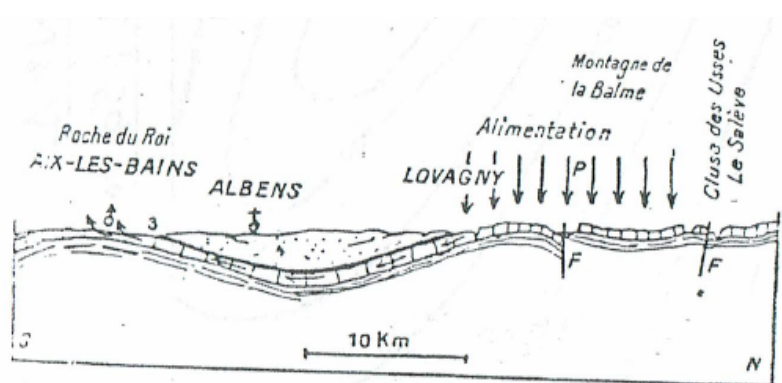


FIG. 23-45. — Alimentation et circulations souterraines des sources d'Aix-les-Bains.
D'après L. MORET et G. SCHNEIDER.
1, marno-calcaires hauteriviens pyriteux ; 2, calcaire urgonien fracturé ;
3, marnes aquitaniennes ; 4, molasse.

Figure 5: Alimentation et circulation souterraines des sources d'aix les bains[SEGHIR Karima, 2008].

l'influence de facteurs hydrologiques et physiques dont les uns, comme la pression piézométrique, sont communs à toute circulation souterraine et les autres particuliers aux eaux profondes. Les plus importants parmi ces derniers sont :

- L'expansion de la vapeur d'eau ;
- L'action des gaz occlus et dissous ;
- L'action de la température.

Pression piézométrique : C'est la cause principale de la circulation des eaux souterraines thermo-minérales. Son action implique des zones d'alimentation plus élevées que les aires d'émergences ou d'accumulation (Fig. 1). Elle intervient donc surtout pour les sources d'origine météorique.

Expansion de la vapeur d'eau : Ce facteur physique, bien connu, joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des geysers, soffioni et l'émergence des sources hyperthermales. Au contact des roches à haute température deux actions physiques s'ajoutent, celle de la vaporisation de l'eau et celle de sa dissociation avec fixation d'oxygène.

Action des gaz occlus et dissous : Les gaz occlus et dissous ont une double action physique et dynamique. D'une part, ils abaissent le poids spécifique de l'eau, qui par exemple, n'est que de 0,5 à Vichy-Célestins (A. Armand). La pression du gaz émulsionne l'eau et provoque son ascension comme dans un pompage à l'émulseur à air comprimé.

Les gaz dissous et occlus agissent sur la densité qui est alors fonction de la vitesse d'écoulement et du rapport des débits gazeux et liquide. Ils modifient donc la charge. A. Aubignat a étudié ce phénomène à Châtelguyon où il a montré que la densité de l'émulsion diminue progressivement au fur et à mesure de son ascension dans le forage (Fig. 1)

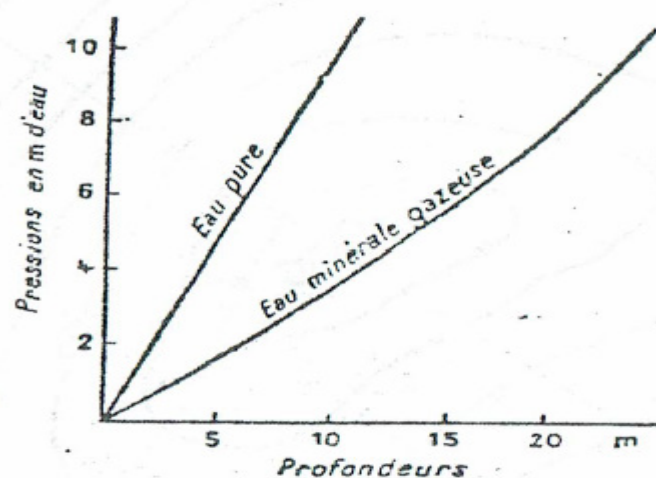


Figure 6: Variation compare de la charge avec profondeur de l'eau pure et de l'eau minérale.

Le rôle principal revient à deux gaz : le gaz carbonique et la vapeur d'eau, celui du premier étant prépondérant. Les carbures d'hydrogène interviennent parfois dans la zone particulière : zone pétrolifère (source de Sainte-Suzanne et de Gabian). Les caractéristiques hydrologiques de l'action des gaz dissous sont :

- L'irrégularité des débits ;
- La diminution des débits en général par diffusion et détente artificielle avec la multiplication des captages. Les débits totaux demeurant souvent relativement constants ;
- L'influence des fluctuations de la pression atmosphérique. Ainsi à Pougues-les-Eaux le niveau piézométrique de la source s'élève de 13 à 14 cm pour une baisse de la pression barométrique de 1 cm de mercure.

Action de la température : La température agit par les variations de la masse spécifique de l'eau. La différence de densité entre l'eau froide et chaude provoque un phénomène bien connu de thermosiphon (Fig. 7).

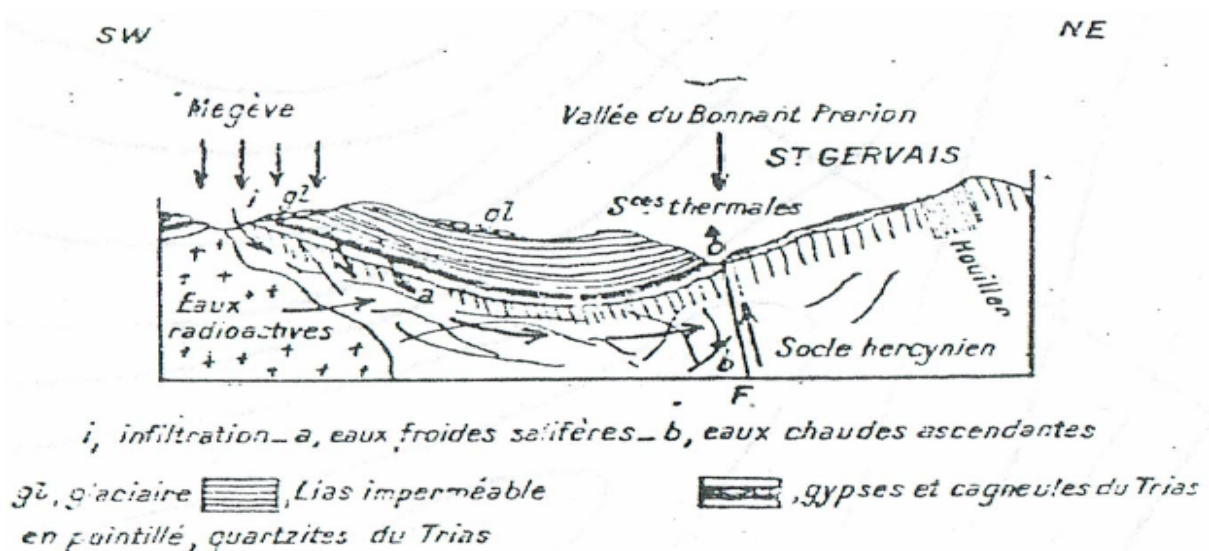


Figure 7: Coupe pour l'action de la viscosité-débit [SEGHIR Karima, 2008].

Comme le refroidissement est d'autant plus faible, que le débit est plus élevé, l'effet de thermosiphon croît avec le débit. Ainsi, à A Vichy, des fluctuations de débit de 5 à 28 l/mn correspondent respectivement à des variations de 57,5 à 66 °C. Mais il semble que ce phénomène ne soit pas fréquent. L'action de la viscosité pourrait être plus générale, agissant sur la vitesse d'écoulement de l'eau. Nous avons montré antérieurement que la viscosité de l'eau diminuant lorsque la température s'élève, le coefficient de perméabilité augmente ainsi que la vitesse d'écoulement.

Conditions Hydrogéochimique d'émergence des sources thermo-minérales

I- Caractéristiques physico-chimiques des eaux thermo-minérales

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux thermo-minérales portera sur [Castany, 1967] :

- La géochimie ;
- Les gaz ;
- La température ;
- La radioactivité ;
- Les paramètres physico-chimiques ;
- Les substances mal connues ;
- Les dépôts.

I-1/ Géochimie des eaux thermo minérales :

Les eaux thermo-minérales, comme d'ailleurs les eaux ordinaires renferment des sels dissous dissociés, étant donné leur faible concentration sous forme d'ions, ions électropositifs ou cations et ions électronégatifs ou anions.

a/Principaux anions : parmi les anions nous noterons dans l'ordre d'importance Cl⁻, Br⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, I⁻ et F⁻ :

- ✓ L'anion(Cl⁻) est le plus commun et provient de la dissociation des chlorures, NaCl et K Cl ;
- ✓ Le brome (Br⁻) est fréquent et souvent associé au potassium, au sodium et au magnésium. Il atteint quelques centigrammes par litre,
- ✓ Les sulfates (SO₄) sont fréquents dans de nombreuses eaux thermo minérales ;
 - ✓ HCO₃⁻ est L'anion le plus répandu dans les eaux souterraines où il est rarement absent, souvent son excès donne des sources incrustantes ;
 - ✓ L'iode (I⁻) est très répandu : Vichy, Plombières, Luchon, Bonbon-l Archambault.
 - ✓ Le fluor (F⁻) joue un rôle important dans les sources fluorées.
 - ✓ L'arsenic (As) est fréquent à l'état d'ion AsO₄H à la bouboule, Saint-Nectaire et le Mont-dore.

Schlquelle (bentlage)	243 mg/l
Challes-les-Eaux (savoie).....	96mg/l
Hammam et tellamerzoug (Tunisie)	68mg/l
Source de gavora (Roumanie)	44mg/l
Heilbrunn (bavière).....	25mg/l
Marienquelle (bavière).....	16mg/l
Korbous (Tunisie).....	14mg/l

Tableau 1: Dosage des anions[Castany, 1967]

b/Principaux cations :

- ✓ Le cation sodium (Na^+) est le plus répandu et rarement absent sa teneur est variable il est combiné à l'état de chlorures, bicarbonates, sulfure. Les chlorures dominant.
- ✓ Le potassium (K^+) est également fréquent à l'état de sulfates, carbonates ou chlorures. Il est subordonné au sodium mais en plus faible quantité.
- ✓ Le lithium (Li^+) toujours en petits quantités présente des caractères médicaux particuliers ; la source la plus riche en France est celle de Royat.
- ✓ Le calcium (Ca^{+2}) est le cation le plus fréquent car il est très courant dans les roches sédimentaires.
- ✓ Le magnésium (Mg^{+2}) accompagne très souvent le calcium à l'état des carbonates, chlorures.
- ✓ Le fer (Fe^{+2}) est fréquent dans toute la source, combinée en carbonate sulfates ou complexes organique.
- ✓ Le barium (Ba^{+2}) le strontium (St^{+2}) et l'aluminium (Al^{+3}) sont plus rare.
- ✓ La présence de l'ammonium Nh_4^+ est assez rare.
- ✓ L'acide silicique H_2SiO_2 est fréquent dans les sources thermales chaudes carbonatées.
- ✓ Substance non électrolytes _des substances non dissociables s'ajoutent aux ions.
- ✓ L'acide borique HBo_2 est abondant dans les siffioni de l'oscane et les geysers. Les eaux chlorurées sodique et sulfurées en renferment en petite quantité.
- ✓ Ces substances : silice, soufre, hydroxyde ferrique sont souvent à l'état colloïdal.

I-2/Représentation et interprétation des résultats d'analyses

Les représentations et l'interprétation des résultats des analyses chimiques des eaux thermo minérales sont communes avec ceux des eaux souterraines habituelles. Les résultats d'analyses sont en général donnés pour les principaux ions en milligrammes par litre. Le résidu sec exprimé le poids total des sels dissous.

Présentation des résultats d'analyses : ils peuvent être représentés sous trois formes :

- Reconstitution des sels dissous ;
- Formé ionique ;
- Milliéquivalent.

La reconstitution des sels dissous à partir des ions est un travail hypothétique on s'attache à reconstituer les sels les plus fréquents : K Cl, NaCl, So_4Na_2 , So_4Mg , Ca $(\text{HCO}_3)_2$, Mg $(\text{HCO}_3)_2$. Pour réaliser cette opération on commence par le chlore que l'on unit en premier lieu au potassium (K Cl), puis au sodium (Na Cl) et éventuellement au magnésium et au calcium. Ensuite on associe le So_4 avec le sodium qui n'a pas été utilisé par le chlore puis au calcium et au magnésium. Les reliquats de Ca et de Mg sont unis à Co_3 pour donner des bicarbonates Ca $(\text{HCO}_3)_2$ et Mg $(\text{HCO}_3)_2$. Ces reconstitutions de sels dissous ne sont pas favorables à des interprétations précises.

La forme ionique présente simplement les ions groupés en anions et cations et le résidu sec, exprimé en mg/l, le pH et le degré hydrométrique.

Milliéquivalent : les études chimiques ont montré que la capacité chimique de réaction d'un élément en solution ne dépend pas de sa teneur en poids de sel dissous mais plutôt du nombre d'équivalents entrant en réaction. C'est pourquoi on exprime les résultats d'analyses en valence milligrammes par litres. Cette quantité est désignée par le terme de Milliéquivalent ou de millivalence. Le Milliéquivalent est obtenu en divisant le poids des éléments exprimés en milligrammes par litre par leur équivalent chimique lequel est égal à :
Équivalent = poids atomique ou poids moléculaire en mg/ valence

Les nombres ainsi obtenus sont les quantités en réaction que l'on désigne depuis Stabler par la lettre r. Elles sont exprimées en me/l.

A/Présentation graphique des analyses chimiques

Les résultats des analyses exprimés sous la forme ionique, peuvent être portés sur des diagrammes qui permettent de comparer les eaux entre elles et de les classer en familles chimiques. Les représentations les plus couramment utilisées sont :

- Les graphiques en colonnes.
- Les diagrammes triangulaires.
- Les diagrammes Carrés.
- Les digrammes Rayonnants.
- Les diagrammes logarithmiques verticaux.

II/Origine des sels dissous dans les eaux thermo-minérales :

Les sels dissous dans les eaux thermo-minérales ont plusieurs origines : oxygène et endogène.

A/Origine Exogène :

La principale source de sels dissous provient du lessivage des terrains dans lesquels circulent les eaux souterraines. En effet, le sol et le sous-sol renferment des roches solubles (calcaires, dolomies) et des sels minéraux : sel gemme, sels de potasse, sulfates de calcium et magnésium, arséniates, carbonates...etc. Les réactions chimiques, l'action de micro-organisme et des échanges de bases modifient la composition ionique et les proportions initiales.

A1/Lessivage des terrains :

Les chlorures proviennent de la dissolution de sels naturels : sel gemme, sel de potasse. C'est pourquoi le trias donne naissance de nombreuses sources thermo-minérales.

Les eaux fossiles ou eaux connées, emprisonnées lors du dépôt des sédiments, enrichissent les eaux souterraines.

Les carbonates et bicarbonates sont fréquents dans les roches : carbonates de calcium, de magnésium. Le bicarbonate de calcium joue un rôle primordial, il est à l'origine des sources dites incrustantes dont les plus célèbres sont celles de saint-nectaire et de Ste-Ayre dans le massif central avec des teneurs respectives de 700 et de 1370 mg/l de Ca Co₃.

Les sulfates, sulfures, hyposulfates, l'hydrogène sulfuré et le soufre proviennent essentiellement de la dissolution du gypse suivie éventuellement d'une réduction et de la décomposition des sulfures métallique FeS₂, FeAsS, CuFeS₂ ou des pyrites de fer. Cette origine à partir du gypse explique la liaison fréquente des eaux sulfatées et moins fréquemment sulfurées avec le trias.

L'iode provient de la circulation dans les terrains riches en substance organiques végétales fossiles. Le brome et l'iode sont abondants dans les eaux connées, les eaux des gisements de pétrole et des dépôts littéraux. Leur origine est d'ordre biochimique sous l'action des algues.

Le lithium peut provenir des minéraux des roches silicatés acides du type des granulites : triphane, lipidotite. Leur altération donnant des micas à base de lithium, il doit également exister dans les eaux connées il est connu dans l'eau de mer.

Le fer est fourni par la décomposition des pyrites ou par la dissolution des bicarbonates. L'arsenic provient de la dissolution des sels arsenicaux des filons métallique.

NH₄ est produit par la décomposition des matières organique ou par l'action de la vapeur d'eau à haute température sur les nitrures métallique et le nitrate de silicium. Cette dernière origine est seule à retenir pour les geysers, soffioni...etc.

Le sodium peut être issu également de la séricitisation des plagioclases par la transformation de leur feldspath sodique en un mica potassique avec libération de Na.

L'origine exogène des substances minérale des eaux montre l'importance de la nature pétrographique des terrains encaissants. Toute travail sur l'hydrogéologie devrait être accompagné d'une pétrographique détaillée.

B/Origine endogène :

La vapeur d'eau produite dans la profondeur de l'écorce terrestre par les phénomènes magmatique et volcanique entraine des éléments endogènes. Son rôle a été mis en lumière par l'étude des gites métallifères hydrothermaux. Ainsi le fluor semble avoir une origine presque exclusivement interne. Sa présence caractériserait les eaux Juvéniles.

Les chlorures, le brome, l'iode, les sulfates ; l'hydrogéné sulfurés peuvent également avoir une telle origine. Souvent les auteurs ont attribué l'origine exclusive de certain sels a

des actions endogènes c'est par exemple le cas du lithium mais dans l'eau de mer et les eaux connées.

III/Gaz des eaux thermo-minérales

Les eaux thermo-minérales renferment, en dehors la vapeur d'eau, des gaz dites libres, sous deux étapes physiques : dissous et occlus. Ils peuvent se dégager spontanément aux griffons, par suite de la baisse de pression donnant des gaz spontanés comme dans les mofettes. Ceux qui viennent en première ligne sont les gaz carboniques et l'azote. Le gaz carbonique est le plus fréquent et le plus abondant. Pouvant atteindre 3000mg/l dans les eaux très minéralisées, il donne alors des sources carbo-gazeuse. Celle si sont nombreuse en France.

A/Rôle des gaz :

En plus de leur rôle thérapeutique, les gaz ont une grande importance dans la dynamique des eaux thermo-minérales par leur influence sur la charge et sur la densité. C'est habituellement les gaz émergent avec l'eau, parfois ils s'échappent indépendamment par des fissures comme Vergèze ou avals.

Il est intéressant de noter que le transport du gaz par l'eau nécessite seulement à un contact à une profondeur relativement faible. Ainsi pour les sources froides, il suffit d'une pression de 4 atmosphères. Cette observation est importante, car il montre que la vitalisation des eaux d'infiltration par des venus juvéniles des SO₂ n'exige pas un grand enfouissement.

B/Origine des gaz :

Les gaz, comme les sels, peuvent avoir une origine exogène ou endogène, la seconde étant la plus fréquente :

- ✓ **Origine exogène :** L'air est à l'origine des gaz rares, de l'azote et de faibles quantités de CO₂. Les réactions chimiques et biochimiques libèrent du CO₂ et de l'hydrogène sulfureux.
- ✓ **Origine endogène :** Les sources essentielles de gaz des eaux thermo-minérales sont des actions volcaniques et magmatiques. Le gaz carbonique est surtout d'origine juvénile. Il s'accumule dans les vides du sol qui constituent de véritables gazomètres souterrains sensibles aux variations de la pression atmosphérique. L'expulsion du gaz donne des mofettes, comme à SPA et à chevron en Belgique. C'est pourquoi la plupart des sources riches en gaz carbonique sont localisées dans les régions de dislocations

récentes : massif centrale auvergne. L'hydrogène sulfureux, le SO₂ et les gaz rares peuvent avoir également une origine interne.

IV/Température des eaux thermo minérales

La température est la caractéristique la plus importante des eaux thermo minérales. Importante en elle-même par ses effets physiologiques et hydrodynamique et aussi par le fait généralement admis que la concentration en sels dissous augmente avec elle.

Le débit est également souvent lié à la température ; lorsqu'elle est peu élevée, il est faible et variable. Par contre, la minéralisation, c'est-à-dire la nature la teneur relative des éléments en solutions, est sans rapport avec les variations de température. Une source est dite thermale lorsque ses eaux ont une température supérieure de 5 °C à la température moyenne de la zone d'émergence.

A/Origine de la température des eaux thermo minérales :

L'origine primordiale de la température des eaux thermo-minérales est le gradient géothermique. Des facteurs secondaires Viennent ajouter leur action, comme le volcanisme, le refroidissement des magmas et les réactions physico-chimiques.

a/Gradient géothermique : Le Gradient géothermique, est proprement appelé degré géothermique, est la profondeur de pénétration dans le sol exprimée en mètres, nécessaire pour que la température augmente de 1 °C. Sa valeur, variable suivant les localités et la profondeur, est en moyenne de 30-35 m. Elle diminue dans les régions volcaniques (10-15 m) et augmente dans les massifs granitiques (60-80 m).

Ainsi la température de l'eau est fonction de sa profondeur. A 3000 m, elle atteint environ 100°C. Mais on conçoit que l'eau se refroidisse en remontant vers la surface, le gradient géothermique agissant en sens inverse l'émergence de sources thermales exige donc une ascension très rapide des eaux chaudes souterraines.

La profondeur minimum P d'origine de l'eau et donnée par la formule :

$$P = (T_s - T) gT$$

T_s : est la température moyenne du griffon en degrés C ;

T : la température moyenne de la zone d'émergence en degrés C ;

gT : le gradient géothermique en mètres.

b/Volcanisme : L'activité volcanique produit de la Chaleur par les émissions de magma et d'eaux juvéniles hyperthermales. Ainsi les eaux du Grand Geyser d'Islande atteignent, en profondeur, une température de 127°C. La chaleur de condensation de la vapeur d'eau est importante, 20 cal/Kg pour 1 atmosphère. Ainsi 1 kg de vapeur d'eau qui se condense à 200m de profondeur, sous une pression de 20 atmosphères, libère 457,9 calories est produit de l'eau de condensation une température de 211°C. Cette dernière se mélange souvent aux eaux d'infiltration pour donner les sources thermales.

Le refroidissement des magmas après leur mise en place dans les couches supérieures de l'écorce terrestre serait parfois à l'origine des eaux thermo minérales. Ainsi W.D Keller et Ad Valduga expliquent les soffioni de Larderello par l'existence en profondeur d'un batholithe de granite en phase de refroidissement lent et de cristallisation.

c/Réactions physico-chimiques : Les réactions physico-chimiques dégagent de la chaleur mais, en quantité peu importante. Non distinguerons :

-les réactions physico-chimiques exothermiques ;

-Les désintégrations des minéraux radioactifs.

Les réactions physico-chimiques exothermiques (oxydation et réduction), dégagent de la chaleur. Mais sans divergents quant à leur rôle dans la température des eaux thermales.

V/Radioactivité des eaux thermo minérales

La plupart des eaux thermo-minérales sont radioactives. Cette radioactivité, qui joue un rôle dans leurs propriétés thérapeutiques, peut-être permanente ou temporaire. La radioactivité permanente est due à des sels de radium dissous ; radioactivité temporaire doit son existence aux émanations gazeuses des corps radioactifs dont le principal est le radon à durée de vie courte (4 jours). La radioactivité se mesure en curies. Une curie est la quantité d'émanation en équilibre avec 1 g de radium-élément. La millicurie (mCi) est la millième partie de la curie, le microcurie, la millionième et la nano curie (nCi) la milliardième. L'hororadioactivité, ou puissance radioactive horaire, est la quantité d'émanation par heure. Or, nous savons qu'un mg de radium émet 125 nano-curies par minute. L'hororadioactivité (rh), d'une source, exprimée en mg de radium sera :

$$rh = Qr.60/125$$

Q : est le débit de la source par minute ;

r : la radioactivité de la source.

V-1/Origine de la radioactivité des eaux thermo minérales :

Radioactivité des eaux peut provenir soit de la radioactivité naturelle des roches, soit du bombardement des particules X sur les corps dissous.

A/Radioactivité naturelle des roches : La plupart des roches de l'écorce terrestre sont radioactives.

B/Bombardement de particules x sur le corps dissous : Le bombardement des particules x sur les corps dissous des eaux radioactivité engendrent des radioéléments. (Muguel et Witkm, 1935)

VI/Paramètres physico-chimiques des eaux thermo-minérales

Les principaux paramètres physico-chimiques étudiés pour les eaux thermo minérales sont, comme, pour l'ensemble des eaux souterrains, les degrés hydrotimétriques °dH, le pH et la résistivité électrique.

A/Substances mal connues :

Les eaux thermo-minérales renferment souvent à l'état de traces des substances encore mal connues. Les unes relèvent des corps minéraux comme les métaux catalyseurs, les oligo-éléments, les autres des substances organiques parmi lesquels les hormones et les antibiotiques.

B/Dépôts formés par les eaux thermo-minérales :

Les eaux thermo-minérales, en parvenant une surface subissent d'importance modifications de leurs propriétés physico-chimiques ; la substance dissoute ou en suspension précipitent et constituent des dépôts dans leur zone d'émergence (dépôts travertineux comme dans le cas de la source de Sidi yahia). Les principales causes de formation de ces dépôts sont le refroidissement, la décompression des gaz, l'oxydation des sels dissous, l'action réductrice des micro-organismes et phénomènes biologiques. Ces formations sont de deux types, des dépôts solides et des boues.

✓ **Dépôts solides :** Ce sont des incrustations et des concrétions. Les plus fréquentes sont dues au carbonate de calcium sous forme d'aragonite (Vichy-Celestins,

Chatelguyon) et plus rarement de calcite. Ce sont des tufs, encroûtements et travertins avec parfois pisolithes en aragonite .A Hammam Meskoutine, Hammam Sidi yahia, Hammam salhine (Algérie), l'argonite fibreuse donne naissance à la klypéite (A. Lacroix) :

✓ **La Limonite est assez fréquente** : tufs ferrugineux du Monitier (Briançon), de Loèche (Suisse). Le gypse est plus rare. La silice peut former de l'opale dont le type est la gastrite, de la Calcédoine et même du quartz (sources de Yellowstone aux U.S.A). D'autres minéraux se forment en quantité plus faible mais décelable par l'analyse chimique et pétrographique : sulfure de plomb, de cuivre, de mercure et d'antimoine ; barytine, sidérose, célestine, strontianité, fluorine, zéolithes. Signalés pour la première fois par Daubrée à Plombières, ils ont été reconnus par la suite dans de nombreuses sources : luxeuil, Bourbonnelles-Bains, etc. Ainsi, comme le souligne E. Raguine, les eaux thermo minérales déposent à leurs griffons presque tous les minéraux usuels aux filons métallifères et des traces de la plupart des métaux connus. Cette observation et d'ailleurs l'argument le plus décisif à l'appui de l'hypothèse de l'origine hydrothermale des filons métallifères. Souvent ces dépôts colmatent et obstruent partiellement ou totalement les griffons et diminuent ou tarissent le débit. Ainsi se forment des dépôts en cônes comme à Hammam Meskoutine, Grande Grille à Vichy, sources de Pratigorsk au Caucase (37 m de haut). La précipitation de la silice est due principalement à l'accroissement du pH au contact des eaux de surface.

✓ **Boues**: Des boues se déposent aux émergences des sources thermo-minérales. Elles sont formées par des sédiments ou des microorganismes. Des particules de roches, entraînées mécaniquement par l'écoulement des eaux, provenant de différentes profondeurs, fréquemment colorées en rouge par de l'oxyde de fer se déposent aux griffons. Cette précipitation est souvent favorisée par la défloculation des argiles en suspensions colloïdales. Souvent des dépôts organiques résultant de la précipitation à l'air de sels dissous et d'une végétation algologique associée à une flore bactérienne s'accumulent aux émergences. Ces corps complexes de substances minérales, de dérivés organo-minéraux et de composés organiques sont les binglies. Nous citerons la barégine de Barèges, la daxine de Dax, l'aixine d'Aix-lesBains et la spadacrène de Spa (Castany, 1976)

VII/Classification des eaux thermo minérales

Les classifications proposées pour les eaux thermo-minérales sont nombreuses et diverses (A.de Launay, L. Morel, E. Duhot, etc.). Nous retiendrons ici celles qui, concernant

l'hydrogéologue, sont basées sur la composition chimique et la température. Il existe évidemment une relation entre la température et la concentration en sels dissous.

La classification des eaux thermo-minérales d'après leur composition chimiques est donnée par le tableau suivant (**Tab.1**) :

Groupe	Type principale	Types mixtes	Exemples
Bicarbonatées.	Sodiques	Mixtes chlorurées. Magnésiennes.	Le Mont-Dore
	Calciques		Vals, Vichy. Saint-Galmier. Royat. Châtelguyon.
Chlorurées Sodiques	Sodiques	Mixtes chlorurées. Mixtes carbonatées.	Dax, Bourbonne, Bourbon-Lancy.
	Calciques.		Luxeuil. Nittel. Contrexéville. Brides.
Sulfatées	Sodiques.	Nitratées.	Luchon, Ax-les Thermes Allevard. Enghien
Sulfurées.	Calciques. Chlorosulfurées.		Manganeuses.
	Radioactives.	Ferrugineuses. Cuivreuses. Arsenicales. Séléniteuses. Oligomagnésiennes. Iodées. Borées.	Plombières.
Faible Minéralisation.			

Tableau 2: Classification des eaux thermo minérales d'après leur composition chimiques.

A/Description des principaux types :

La description de quelques types d'eaux thermo minérales, basée sur l'interprétation des analyses, nous permettra de mieux définir leurs caractéristiques chimiques (tableau 2). Nous avons choisi nos exemples dans l'étude de Mlle S. Guigue et dans les Annales de l'Institut d'Hygiène et de climatologie (Castany G. 1970). Il est regrettable que la présentation des résultats d'analyses sous la forme ionique, qui seule permet des interprétations complètes et correctes, ne soit pas utilisée plus couramment.

Sources	Cations			Anions		
	r% Ca	r% Mg	r% Na+K	r% SO4	r% Cl	r% CO2
Hamam Bou Hanifia.....	18.20	6.42	25.47	3.64	22.7	23.55
Hamam Gurgour.....	27.92	7.51	14.19	32.19	12.61	5.65
Hamam Melouane.....	4.18	0.66	45.18	4.02	44.91	1.08
Vittel (Hépar).....	35.71	13.27	1.28	42.22	0.37	7.12
Vittel (Magic).....	38.83	11.18	0.99	25.9	0.27	22.8
Contrexéville.....	43.6	6	0.7	39.5	0.2	10
HamamN'Bails.....	11.11	3.32	35.06	3.66	30.4	16.09
Hamam Bou-Hadjar.....	13.77	3.44	31.98	1	36.77	13.01
Hamam Salhine.....	5.81	1.66	42.63	9.66	29.76	10.45
Hamam Meskoutine.....	21.05	6.05	22.18	17.96	20.84	11.30
HamamTassa	19.86	4.19	25.73	0.69	28.53	20.97

Tableau 3: Composition chimiques de quelques sources thermo minérales de France et d'Algérie, exprimée en quantité en réaction pour cent..

A1/Eaux bicarbonatées : Les eaux bicarbonatées sont riches en gaz carbonique libre et généralement pauvres en SO4 (tableau 2). Elles renferment une forte proportion de bicarbonates. Ce type est fréquent dans les régions de volcanisme tertiaire et quaternaire, ce qui explique l'abondance du CO2. Nous pouvons distinguer suivant la proportion relative en Na+K et Ca Mg ;

- Les eaux bicarbonatées sodiques ;

- Les eaux bicarbonatées calciques.
- Les eaux bicarbonatées sodiques renferment une forte proportion de Na et K par rapport à celle du Ca,

A2/Eaux chlorurées sodiques : Ce sont, en général, des eaux à forte concentration de sels dissous. Les chlorures prédominent. Elles sont riches en Na et Cl. La teneur en carbonates par contre est normale avec absence de carbonates alcalins. En fait, elles sont souvent de simples dissolutions des sels sodiques. Nous y noterons la présence simultanée de chlorures alcalins et alcalino-terreux; avec prédominance des premiers. Dans les terrains sédimentaires, elles sont associées au Trias (sel gemme) et aux zones pétrolifères (eaux connées). Ces dernières renferment souvent du brome, de l'iode et du bore, nous citerons Bourbonne-les-Bains, Bourbon-Lancy, Dax et bon Hadjar (Algérie). Les terrains de volcanisme récent, donnent naissance à des sources thermominérales chlorurées sodiques, riches en bore, en silice, en CO₂ et par contre, la teneur en brome est très faible. Ce sont généralement des eaux hyperthermales : (La Bourboule, Aix-la-Chapelle).

A3/ Eaux sulfatées : elles sont caractérisées par leur forte teneur en ions SO₄. Elles sont généralement riches en cations Na et K. Elles se répartissent' suivant les proportions relatives de Na + K et de Ca + Mg en :

- Eaux sulfatées calciques ;
- Eaux sulfatées sodiques.

Les eaux sulfatées sodiques ont une teneur en Na + K élevée qui est voisine de celle en Ca + Mg. Elles sont en silice est relativement forte. Nous citerons dans ce type : Luxeuil, Ben Haroun, en Algérie.

Les eaux sulfatées calciques voient leur teneur en Ca + Mg augmenter par rapport à celle du Na+K. Elles sont en général très riches en SO₄. Les eaux thermo-minérales de Vittel, Contrexéville, St-Gervais, Brides Ussat, Bagnères-de-Bigorre, Hammam Guergour, Hammam Righa .appartiennent à cette catégorie. Elles sont d'origine triasique.

Les eaux mixtes sulfatées chlorurées (Brides) marquent la transition avec les eaux chlorurées sodiques. Les eaux sulfatées des terrains sédimentaires doivent leur composition chimique au lessivage des dépôts salifères ou à l'oxydation des pyrites. Dans les régions volcaniques, elles proviennent souvent de l'oxydation en surface des eaux profondes chargées d'H₂S. Elles renferment alors du brome, du CO₂ et NH₄.

A4/Eaux sulfurées : Les eaux sulfurées sont caractérisées essentiellement par la présence de composés sulfurés et d'H₂S libre ou combiné, car, pour leur composition chimique totale elle diffère peu des autres types Leur température est élevée. La concentration en sels 'dissous est moyenne et même faible. Suivant la teneur en Na⁺ K, nous pouvons distinguer :

- Les eaux sulfurées sodiques ;
- Les eaux sulfurées calciques.

Les eaux sulfurées sodiques renferment du sulfure de sodium. Par la prédominance des cations Na et K sur les cations Ca et Mg, elles peuvent dériver parfois des eaux sulfatées sodiques. Elles renferment de la silice. Le terme de type pyrénéen leur a été souvent appliqué. Les eaux sulfuriques sodiques renferment des traces de bore, d'arsenic et de cuivre. La plupart des sources thermo-minérales des Pyrénées sont de ce type. Nous citerons Luchon, Cauterets, Ax-les-Thermes, Bagnères-de-Luchon, Amélie-les-Bains, Aix-les-Bains, Hammam Salahine (Algérie).

Les eaux sulfurées calciques marquent une baisse de la teneur en Na- K, ce qui conduit à une proportion relativement plus grande de Ca + Mg. Elles renferment de l'H₂S libre provenant de la réduction soit des bi-sulfates calciques, soit des sulfates calciques. Elles ont souvent été qualifiées de type alpin. Elles proviennent souvent du lessivage des terrains gypseux (Enghien). Nous citerons Allevard, Uriage et Hammam Meskouktine (Algérie).

Les eaux chloro-sulfurées proviennent des eaux chlorurées sodiques. Elles sont riches en NaCl et MgCl₂. Leur concentration en sels dissous est en général élevée. Les eaux ferrugineuses sont celles qui renferment plus de 10 mg de fer par litre : Bussang (Vosges), Spa.

B/Classification des eaux thermo-minérales d'après la température :

La température est la principale caractéristique des eaux thermo-minérales. De nombreuses classifications basées sur ce facteur ont été établies. Dans l'ensemble, la température des eaux thermales s'étale entre 20 °C et 100 °C. Les eaux dont la température atteint ou dépasse 100 °C appartiennent à des catégories particulières : geysers, soffioni, etc. Nous pouvons retenir la classification suivante :

- Sources hyper-thermales 50 < T < 100
- Sources méso-thermales 35 < T < 50
- Sources hypo-thermales 20 < T < 35
- Source froide T < 20

C/ORIGINÈ DES EAUX THERMOMINÉRALES

De nombreuses controverses ont opposé les hydrogéologues quant à la formation des eaux thermo-minérales. Certaines hypothèses émises sont d'ailleurs communes avec celles du cycle de l'eau. Après avoir admis avec A. Daubrée (1887) une origine exclusivement volcanique, les auteurs ont vu dans l'infiltration des précipitations la seule source des eaux souterraines.

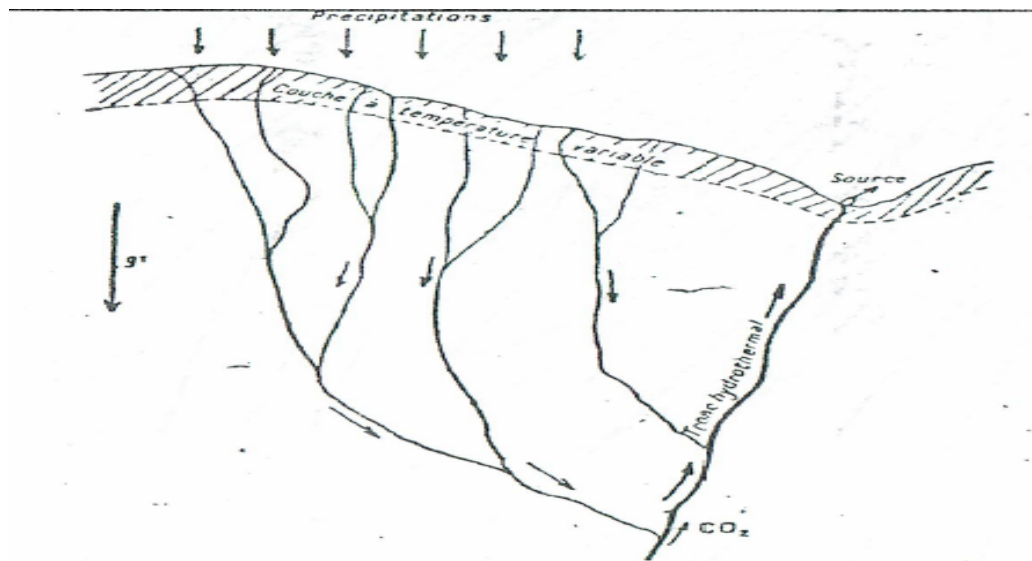


Figure 8: schéma de l'origine météorique des eaux thermominérales, [SEGHIR Karima, 2008]

En outre, A. de Launay (1899) démontre que la minéralisation et la température des eaux thermo-minérales s'expliquent par la circulation des eaux Souterraines à différentes profondeurs. Au cours des dernières années, de nombreux auteurs, à la suite de E. Suess (1903), A. Gautier (1905) admettent une double origine météorique et juvénile (Fig. 9).

La découverte récente, dans les terrains sédimentaires, d'eau fossile ou eau connée vient ajouter une troisième provenance.

C1/Origine météorique des eaux thermo-minérales : Les eaux de surface provenant des précipitations s'infiltrent dans le sol et le sous-sol, puis descendent par gravité dans les couches profondes. Au cours de leur circulation, elles dissolvent des sels minéraux et leur température s'élève sous l'action principale du gradient géothermique. Puis, par remonté rapide dans des fissures et fractures ouvertes (tronc hydrothermal des auteurs), elles émergent à la surface. Cette ascension est souvent accélérée par émulsionnement de gaz et de vapeur

d'eau. Nous avons ainsi une sorte de circuit. Dans le cas de bassins fermes, les eaux thermo-minérales forment des nappes captives (Vittel, Contrexéville)

Cette formation des eaux thermo-minérales est sans doute la plus fréquente, Elle a été dénommée origine vadose, géothermique ou neptunienne. Elle explique que, très souvent les eaux thermo-minérales ont une composition chimique comparable, pour les ions principaux, à celle des eaux ordinaires. Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux sont imposées par les terrains dont elles proviennent. Ainsi la teneur en sels, la température et leurs caractéristiques hydrologiques sont très variables et souvent fonction des éléments hydrométéorologiques locaux ou régionaux. Leur température dépasse rarement 35-40 °C.

C2/Origine juvénile des eaux thermo-minérales : Dans certains cas, la circulation des eaux d'origine météorique ne permet pas d'expliquer les températures élevées et surtout les caractéristiques physico-chimiques des eaux thermo-minérales. Il est alors nécessaire de faire appel à des sources profondes, ce sont les eaux juvéniles ou endogènes. Les eaux juvéniles peuvent avoir trois origines principales : magmatique, volcanique, eau des réactions chimiques.

• **Origine magmatique des eaux thermo-minérales :** La cristallisation des magmas libère des constituants volatils qui souvent s'échappent sous forme de fumerolles. Ils sont composés essentiellement d'hydrogène et de vapeur d'eau accompagnés de fluor, chlore, soufre, carbone, phosphore, bore. Ainsi en fondant 1 km³ de granité on libérerait 26 millions de tonnes d'eau ; 1 kg de granité produit 10 g d'eau. D'après les études de Sosman, reprises par B. Gèze, une intrusion magmatique puissante de 1 000 m renfermerait 5 % en poids d'eau et en se refroidissant lentement pourrait produire pendant un million d'années un débit de 23,8 litres d'eau juvénile par minute et par kilomètre carré. Les eaux thermo-minérales d'origine juvénile ont une composition chimique indépendante de celle de la roche dont elles sont issues. En particulier, elles renferment des substances minérales propres, dues à leur provenance magmatique. Leurs teneurs en sels, leur température et leurs caractéristiques hydrologiques sont relativement constantes. Elles sont souvent de type hyperthermal.

• **Origine volcanique des eaux thermo-minérales :** Les eaux juvéniles peuvent

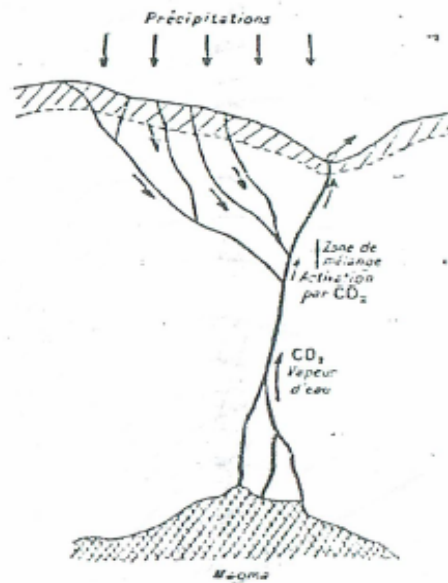


Figure 9: Origine volcanique (magmatique) des eaux thermominérales, [SEGHIR Karima, 2008]

- provenir de la consolidation des laves et de la vapeur d'eau d'origine volcanique : distillation de l'humidité des roches, expulsion de la vapeur d'eau des couches profondes. Cette émission de vapeur d'eau est accompagnée de gaz carbonique, d'azote, H_2S , HCl , HF et SO_2 . Cette hypothèse a été controversée pendant de nombreuses années. En effet pour certains volcanologues les volcans ne produiraient pas d'eau. Mais actuellement, elle est admise. Fouque en particulier a calculé que l'éruption de l'Etna de 1865 a émis 11 000 m³ d'eau. P. Fournarier et Legraye ont montré que les eaux thermo-minérales de Chaud fontame en Belgique, de même que celles d'Aix-la-Chapelle sont liées aux manifestations volcaniques de l'Eifel. En Auvergne, les sources sont également en relation étroite avec l'activité volcanique quaternaire et tertiaire.

- **Eau des réactions chimiques** : Signalons enfin que les réactions chimiques, intenses au sein de la croûte terrestre...

- **Les eaux fossiles ou connées** : Les sédiments en se déposant sur les fonds marins ont inclus de l'eau dont une partie est restée emprisonnée dans les roches qui peuvent ainsi libérer des eaux fossiles ou connées. Celles-ci sont particulièrement riches en chlorure de sodium, brome et iode. Le lessivage des assises sédimentaires par les eaux d'infiltration-ou-endogènes-entraîne les eaux connées lesquelles modifient et généralement enrichissent leur composition chimique propre.

C3/Origine mixte des eaux thermo-minérales : Les eaux thermo-minérales ont souvent une origine mixte par mélange des eaux juvéniles, connées et météoriques (Fig.11).

Ainsi, les venues profondes de gaz carbonique peuvent activer les eaux d'infiltration comme par exemple à Vals-les-Bains (J. P. Destombes) où le CO₂ est du à des manifestations volcaniques récentes (Quaternaire).

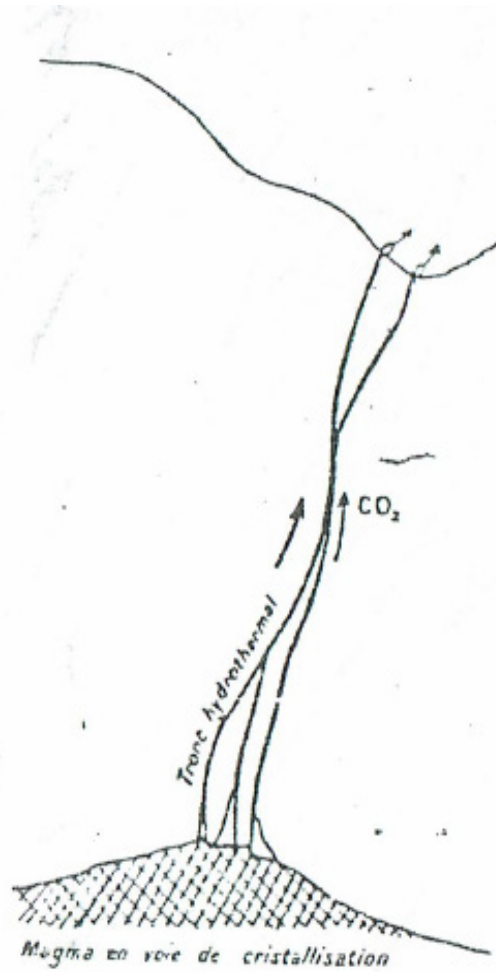


FIG. 23-31. — Schéma de l'origine magmatique des eaux thermominérales.

Figure 10: schéma de l'origine magmatique des eaux thermominérales [SEGHIR Karima, 2008].



Partie II

La géologie

Situation géographique

1\ Introduction

La région d'étude el Hammamet appartient au domaine des hautes plaines de l'est algérien aux confins algéro-tunisien plus précisément aux monts de Tébessa qui constituent la partie orientale des monts Nemmemcha (**Fig.1, 2**) elle est limitée:

- Au nord par la commune de bir ed'hab
- Au nord est par la commune de meskiana
- Au sud est par la commune de Tébessa
- Au sud par la daïra de bir mokaddam

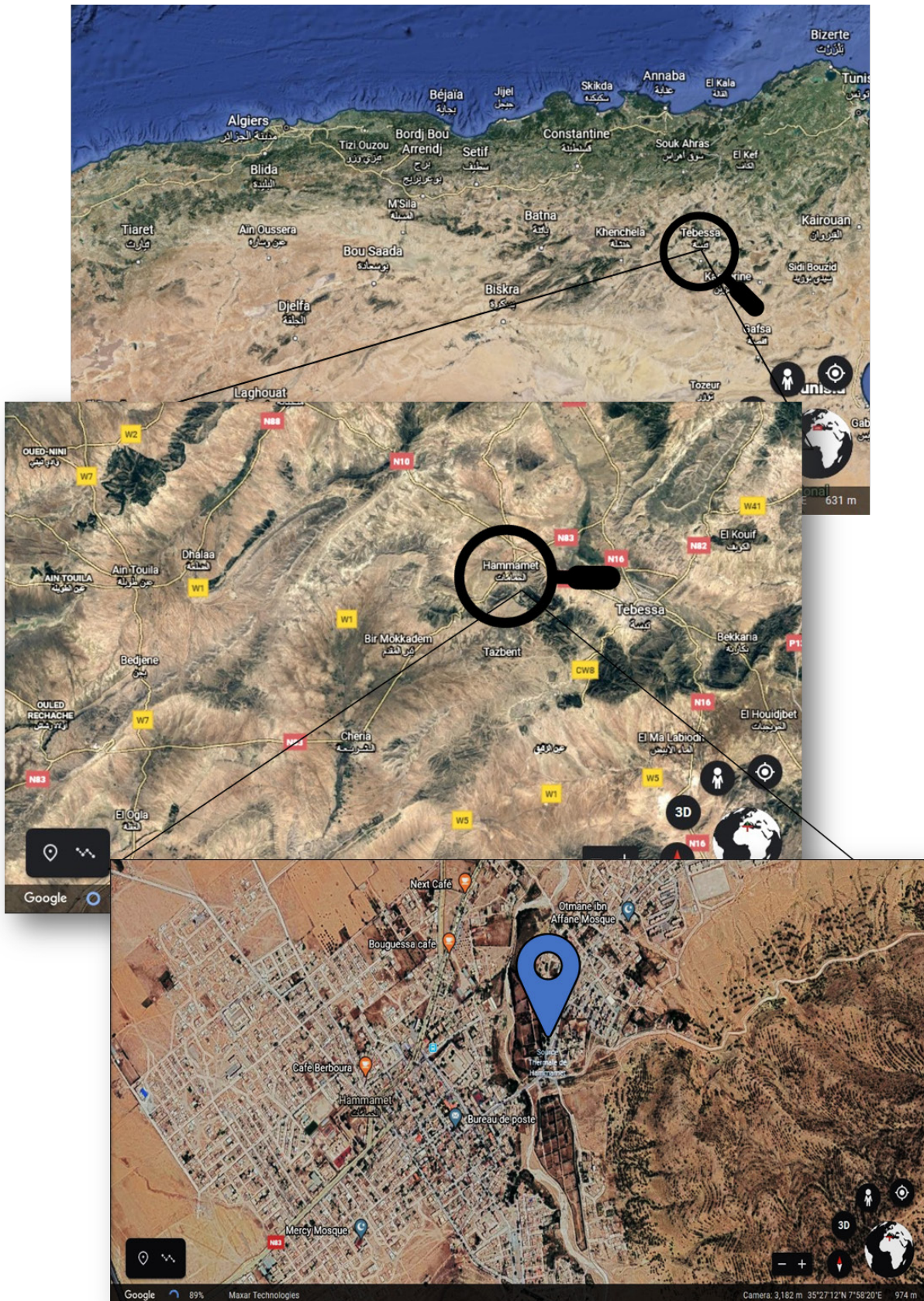


Figure 11: Situation géographique de la région de Hammamet (google earth).

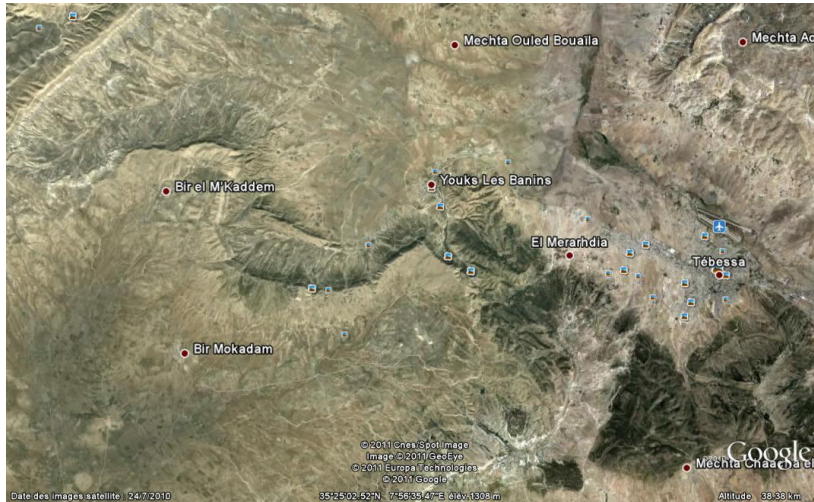


Figure 12: Photo satellite présentant la région d'étude (Google map).

La région d'étude se trouve à une longitude : $7^{\circ}54'$ et $7^{\circ}58'$ et une latitude : $35^{\circ}23'$ et $35^{\circ}27'$

La station thermale se trouve au Nord-Ouest de Tébessa à 19 Km de la route nationale N°10. La source se trouve à 500 m à l'Ouest du village de Hammamet ex Youkous les Bains, elle date de l'époque romaine (Figure 28)

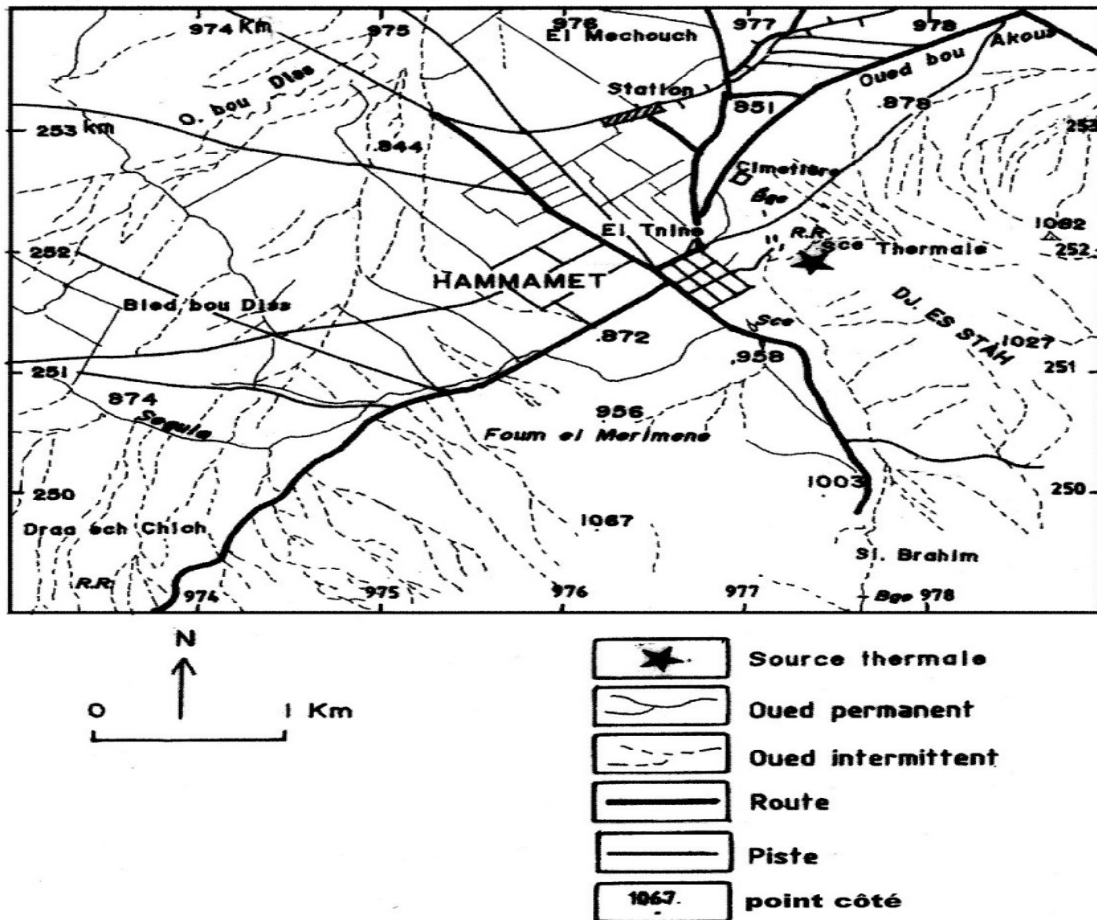


Figure 13: Position de la source thermo minérale sur la carte topographique de youks les bains).

2/Historique de la région d'étude

Youks les bains, actuellement Hammamet (Aquae cesaris pour les romains) est initialement un regroupement de vétérans de la Deuxième Légion Augusta III autours de la source thermale (Arnaud 1995). Comme en témoignent l'étendue des lieux où l'on retrouve des vestiges romains, et la date de création administrative de la localité de youks les bains par le colonialisme français dès 1886, ce village a depuis des générations fait l'objet d'un intérêt peu commun par les colonisations qui s'y sont succédées pour la qualité et le nombre de ses points d'eau potable, les bienfaits de son thermalisme et la fertilité de ses terres. Le village de youks était bâti sur une terrasse au milieu de la rive gauche de la reculée de Bouakous et tous les versants ainsi que la plaine étaient couverts de vergers, et ses souks étaient très encombrés pour ses fruits et légumes très prisés. Actuellement, après la fermeture de la station de concassage, la principale production de Hammamet est la mise en bouteille de l'eau minérale issue dans sa presque totalité des calcaires maestrichtien. (in Samoune, F, 2011)

La source thermo minérale peut être très éloignée de son (ses) impluvium(s), mais la zone d'étude déterminée pour essayer d'éclaircir les conditions d'émergence.

3/Réseau hydrographique

Le sous bassin versant de bouakous est drainé par l'oued de bouakous à écoulement temporaire, alimenté en amont par les exurgences.

4/Couverture végétale

La composition végétale de la zone en question est constituée des forêts, de maquis et de Reboisement, le reste de surface se répartie entre des terres agricoles et improductives. Le développement de l'agriculture est fortement compromis par les caractéristiques du Sol, des écoulements des altièrès et de l'intensité de l'action humaine. Les forêts de Hammamet sont essentiellement peuplés de pin d'Alep, c'est une plante qui s'adapte le mieux aux conditions climatiques de la région, elle n'exige pas beaucoup d'eau ainsi qu'elle s'adapte un sol à base calcaire.

5/Géomorphologie de la région de Hammamet

L'étude géomorphologique et structurale est essentielle pour l'approche des phénomènes hydrogéologiques en générale et des sources thermales en particulier.

Différents types de reliefs constituent la région d'étude. Ils se subdivisent en trois groupes:

- les montagnes.
- les collines.
- les plaines.

5-1-Les montagnes :

Elles se présentent comme une chaîne continue et étalée dont les sommets varient de 1000m à 1500m. Elles occupent environ 40% de la superficie de la région et s'étendent de l'Ouest à l'Est. Cette chaîne représente le reste des principales structures tectoniques atlasiques de la région. Une alternance de calcaires et des marnes d'une épaisseur considérable favorisent le dégagement des formes structurales par érosion différentielle, souvent des replats structuraux comme c'est le cas des Djebels Gagaa, Troubia, Bouziane, Mestiri. Ses deux versants NE et SW ont une évolution morphologique assez différente probablement en raison du dispositif structural. En effet, son versant NE est court et s'abaisse

rapidement vers la plaine de Tébessa. Son versant SW est raide et escarpé au niveau de Bouakous (rive droite d'Oued Bouakouss). Au SE, une grande incision vient limiter Djebel Mestiri et Djebel Doukane. Sa linéarité et sa profondeur le classent comme un linéament orographique assez particulier.

5-2 -Les collines

Ce type de relief se présente comme des structures réparties dans toute la région. Cette répartition se fait de la manière suivante : Une zone limitée par la montagne et la plaine de Hammamet, Djebel Serdiès au Nord et la bande comprise entre les revers monoclinaux de Troubia et Bouziane.

Sur le plan structural ces formes sont installées sur les formations argileuses du Néogène dans la partie septentrionale et sur les marnes d'âge Paléocène dans la partie méridionale. D'où leur morphologie plus ou moins monotone et leur moindre expression sur le paysage.

5-3 -les plaines

En prenant la morphogenèse comme base, deux types de plaines se présentant comme suit :

- les plaines d'érosion et comme exemple la plaine de serdiès.
- Les plaines d'accumulation telle que celui d'el Hammamet.

5-3-1-Les plaines d'érosion

La plaine de serdiès est une vaste comble dégagée dans une puissante série marneuse d'âge Emschérien, limitée par Djebel Troubia au Sud et les crêtes rectilignes de Djebel Serdiès à l'Ouest. Au Nord Nord-est la limite est assez vague sauf Djebel Belkefif. Elle est ouverte en même temps à la plaine d'El-Hammamet.

5-3 -2-Les plaines d'accumulation

La plaine de Hammamet correspond à un fossé d'effondrement subsident. La prospection géophysique (carte du remplissage quaternaire) et les coupes des forages qui y étaient exécutés montrent que le remplissage peut atteindre une épaisseur de 500m.

CADRE GEOLOGIQUE

1/Introduction

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie parce qu'elle permet la prévision des formations susceptibles d'être aquifères et de suivre leur évolution dans l'espace du terrain d'étude.

D'après l'inventaire stratigraphique dressé par plusieurs géologues et en particuliers par G. Dubourdiu (1956), J.M. Vila (1980) et les travaux récents (W.M. Kowalski), la région d'étude est formée d'un context géologique formant ainsi une série stratigraphique allant du Trias au Quaternaire. L'extrait de la carte géologique au 1/500.000e constitue la seule référence géologique officielle, car, la région ne possède pas une carte géologique jusqu'à présent (Figure 1) On distingue alors, deux grands ensembles:

- Les affleurements de bordures de la plaine, d'âge Crétacé, constituent le premier ensemble.
- Les formations d'âge Miocène et Quaternaire, qui occupent toutes les superficies des plaines étudiées, et qui constituent le second ensemble.

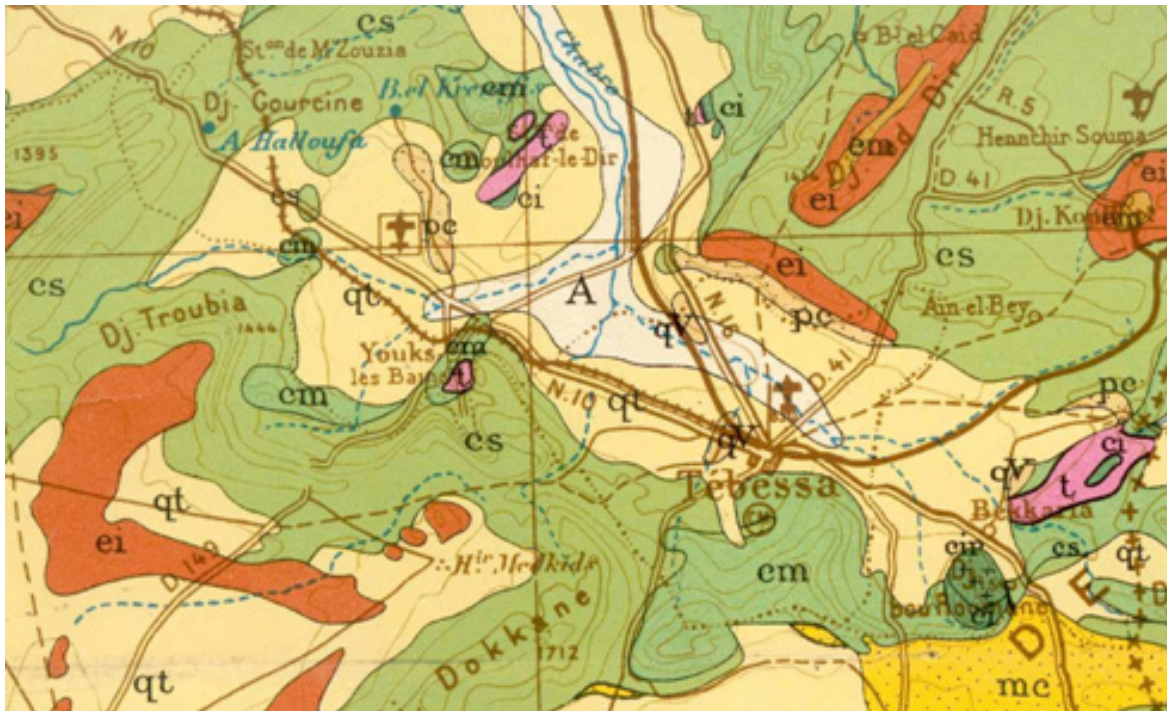


Figure 14: extrait de la carte géologique d'Algérie au 1/500.000e.

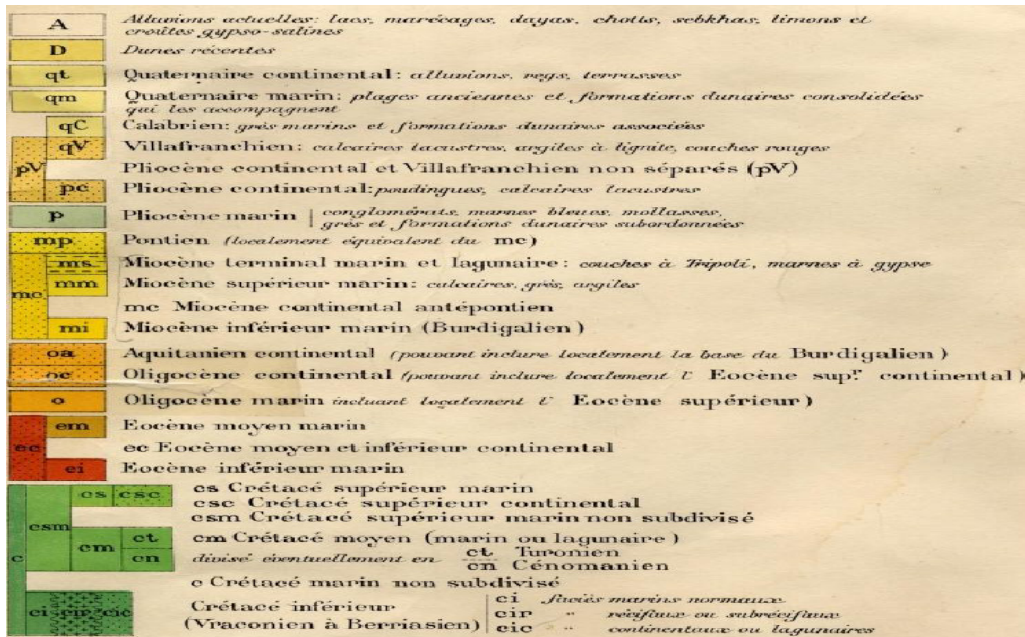


Figure 15: Légende de la figure 11.

2/ La stratigraphie

L'enchaînement chronologique des formations de la région de Hammamet, débute de bas en haut par :

2.1. Le secondaire:

A- TRIAS : Les formations de ce étage n'affleurent pas dans la zone d'étude mais probablement existent dans la partie profonde du Turonien de Djebel Es-Senn, donc ils sont probablement poussés du coté oriental par le diapir Triasique. Il se caractérise aussi par des argiles rouges et des marnes gypsifères.

B- CRÉTACÉ :

a- Crétacé inférieur et moyen :

APTIEN : les formations de cet étage se présentent en grands bancs de calcaire de deux couleurs, gris ou rose à Orbitolines avec des intercalations des marnes, apparaît à Djebel Belkif, avec une épaisseur d'environ de 100 mètres.

ALBIEN : Il affleure près de Djebel Belkif. Ses Calcaires sont en bancs bruns épais dont l'épaisseur est de 90 mètres. Ces assises forment une grande partie des pentes moyennes du versant Ouest de Djebel Belkif.

LE VRACONIEN : Il apparait dans la zone de Djebel Belkif, surtout à Hmeimet où il est bien développé. Cet étage est caractérisé par un ensemble de Calcaire et Marno – Calcaire grisâtres en plaquettes, renfermant des empreintes d'Ammonites (Figure 2)



Figure 16: Empreinte d'ammonites au niveau des calcaires marneux en plaque du Vraconien [SAMOUNE F.2011].

b- Crétacé supérieur :

CENOMANIEN: Il affleure dans la partie Nord – occidentale du fossé de Hammamet à l'Est de Djebel Es-Senn, ce sont des marnes bleues violettes à intercalation de Lumachelles. On les trouve aussi au sud de Djebel Belkfif et surtout à Hameimat où elles s'étalent sur plus de 600m et présentent en plus des lumachelles, des passées carbonatées et des failles syn-sédimentaires emplies de calcite. (Figure 3)



Figure 17: le Cénomanién marneux avec ses passées carbonatées et des failles synsédimentaires qui en coupent quelques-unes [SAMOUNE F.2011] .

TURONIEN : Il se subdivise en deux parties :

La base du **Turonien inférieur** se présente par des marno- calcaires grisâtres dont l'épaisseur est de l'ordre de 60 mètres. Le sommet du Turonien inférieur est représenté par des calcaires

beiges qui forment les falaises de Djebel Essen, Djebel Belkfif, Kef Daheche, Djebel Tella (Chaîne Ozmor).

Turonien supérieur se présente sous forme de marnes grises, d'épaisseur environ 150 mètres.

EMSCHERIEN : C'est une série épaisse et monotone de marnes grises ou vertes, admettant à la partie supérieure des niveaux calcaires lumachelliques avec une épaisseur de 250 mètre.

CAMPANIEN : le **Campanien inférieure et supérieur** sont caractérisés par une série de marnes grises d'une épaisseur de 200 mètres. Par contre la **Campanien moyenne** présente dans le relief une corniche entre celle de Turonien et celle du Maestrichtien. Il passe sensiblement aux formations marneuses qui font le passage entre la Campanien supérieure et Maestrichtien.

MAESTRICHTIEN : Le **Maestrichtien inférieur** est représenté par 30 mètres des marnes grises qui sont souvent masquées par des éboulis au pied des reliefs.

Le **Maestrichtien supérieur** est une formation puissante de calcaires massifs blancs bien lités avec de nombreuses empreintes *d'Inoceramus regularis*. Leur épaisseur est de l'ordre de 80 à 100 mètres, mais avoisine les 200 mètres au Sud ouest de Youkous.

2.3- Le Tertiaire:

n'affleure pas dans la zone d'étude.

2-3-Quaternaire :

Il est représenté par le remplissage du fossé de HAMMAMET et la couverture des versants où l'on distingue :

Villafranchien supérieur : caractérisé par des galets.

Pléistocène moyen : représentés par des argiles sableuses.

Pléistocène supérieur : il est formé par des galets et des graviers.

Holocène : composé essentiellement par des matériaux alluviaux dans les vallées de Hammamet.

Éboulis actuel : ils existent aux pieds des reliefs calcaires avec un pendage important. Ces dépôts sont en majeure parties déposées sur les séries marneuses du Crétacé supérieur.

2.4-La colonne stratigraphique

La colonne stratigraphique de la région d'étude est représentée par la figure 4

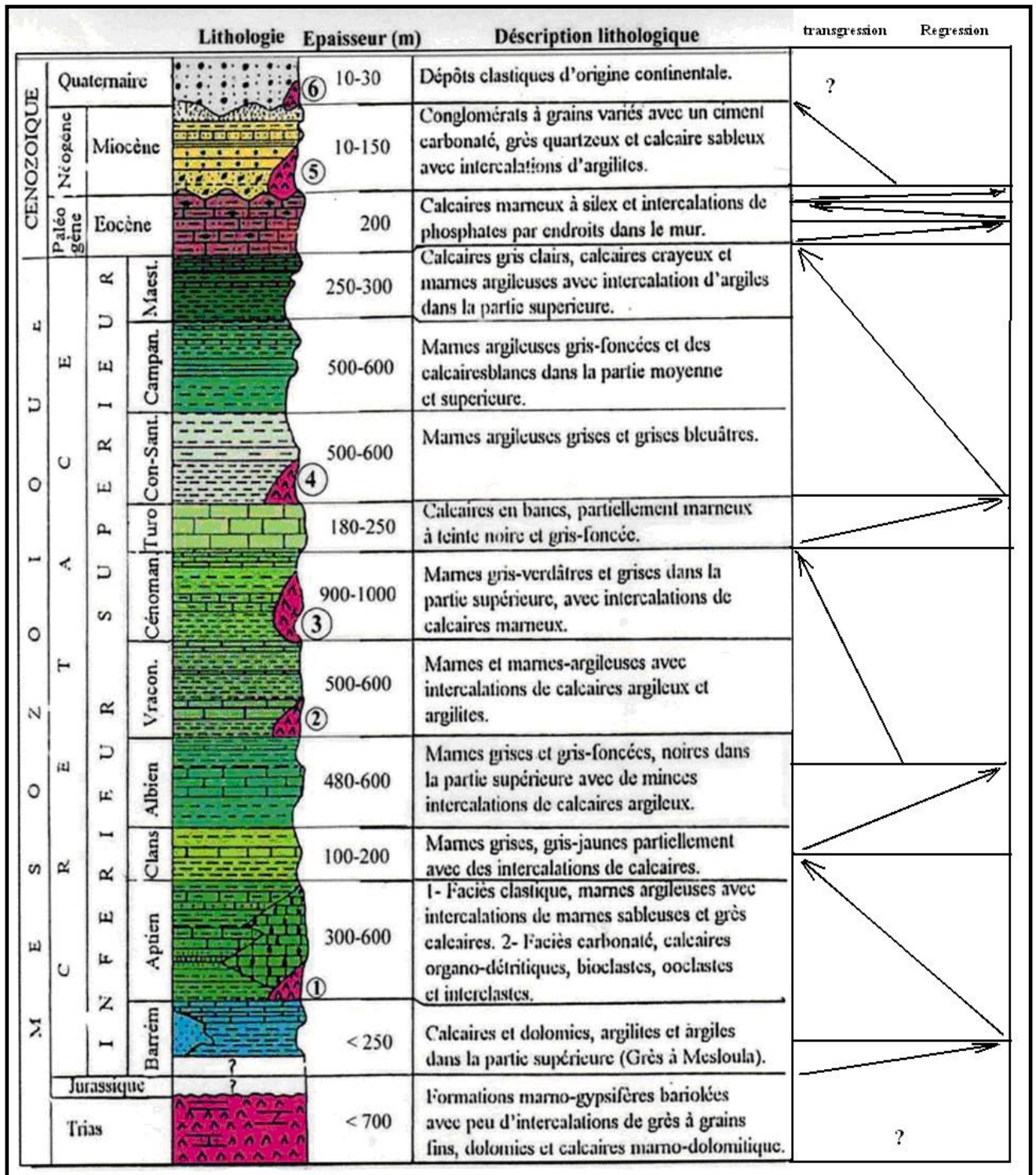


Figure 18: Colonne stratigraphique de la région de Hammamet. In Benmensour 2010.

2.5-L’anticlinal effondré de Hammamet

Les structures voisines à celle de la zone d’étude ; (le synclinal de Guerigueur, l’anticlinal de Serdies – effondré (figure 5), le synclinal de Troubia (figure 6), et le synclinal de Tazbent (figure 7) mettent en évidence l’anticlinal effondré de Hammamet.

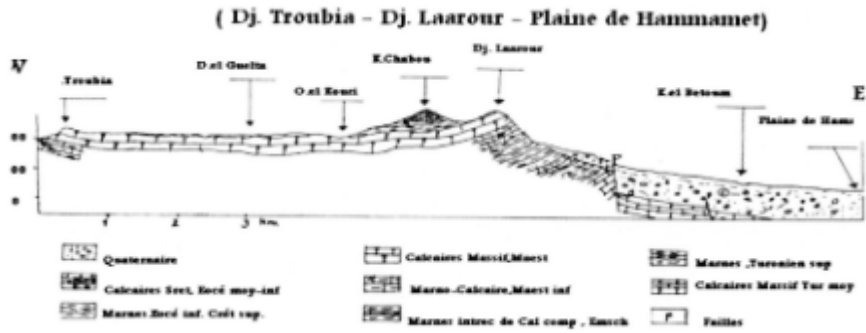


Figure 19: le synclinal de Guerigueur.

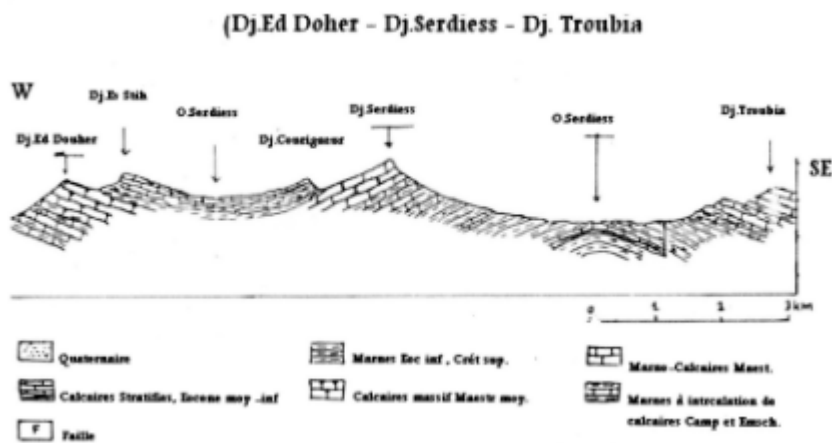


Figure 20:anticlinal effondré de Serdiess.

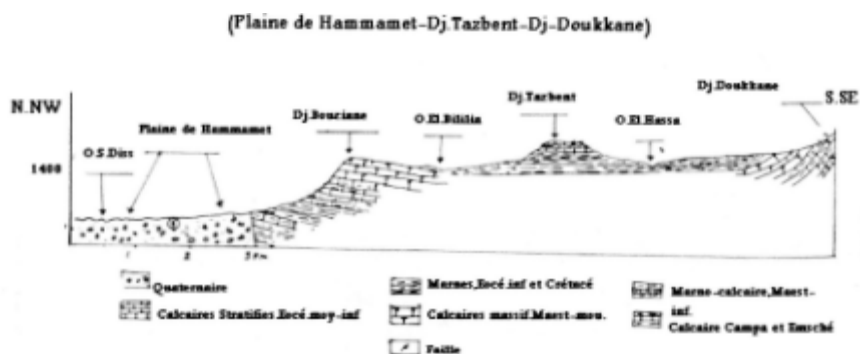


Figure 21: le synclinal de Tazbent Coupes géologiques Nouri (1992)- in Hibi 2010 [SAMOUNE F.2011].

Les limites des anticlinaux effondrés gardent les spécificités des formes perdues. Les formations de la rive droite de la reculée, à proximité de la grotte sont disloquées et altérées et présentent des signes de zone de broyage. Au SE, une grande incision vient limiter Djebel

Mestiri et Djebel Doukane faisant de lui une entité individualisée. Son versant NE (F. Tébessa) est court et son versant SO (O. Bouakous) est plus abrupt. Des failles listriques (bordières) longent les limites élevées de la plaine et forment ainsi des versants plus ou moins gradués. Figure 8 [SAMOUNE F.2011]

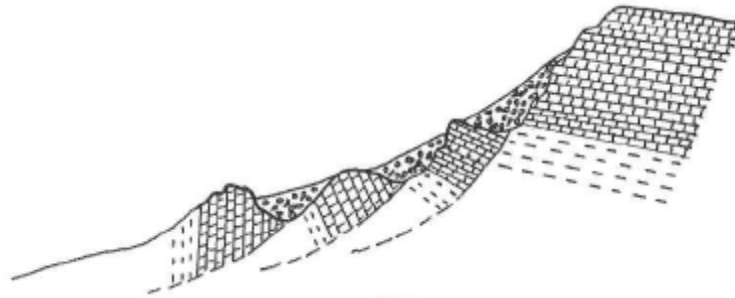


Figure 22: failles listriques (extrait d'une étude du Dyr) [SAMOUNE F.2011].

La carte de substratum du fossé de Hammamet (Figure 9) montre des zones d'enfouissement préférentielles et un fond assez faillé (failles profondes).

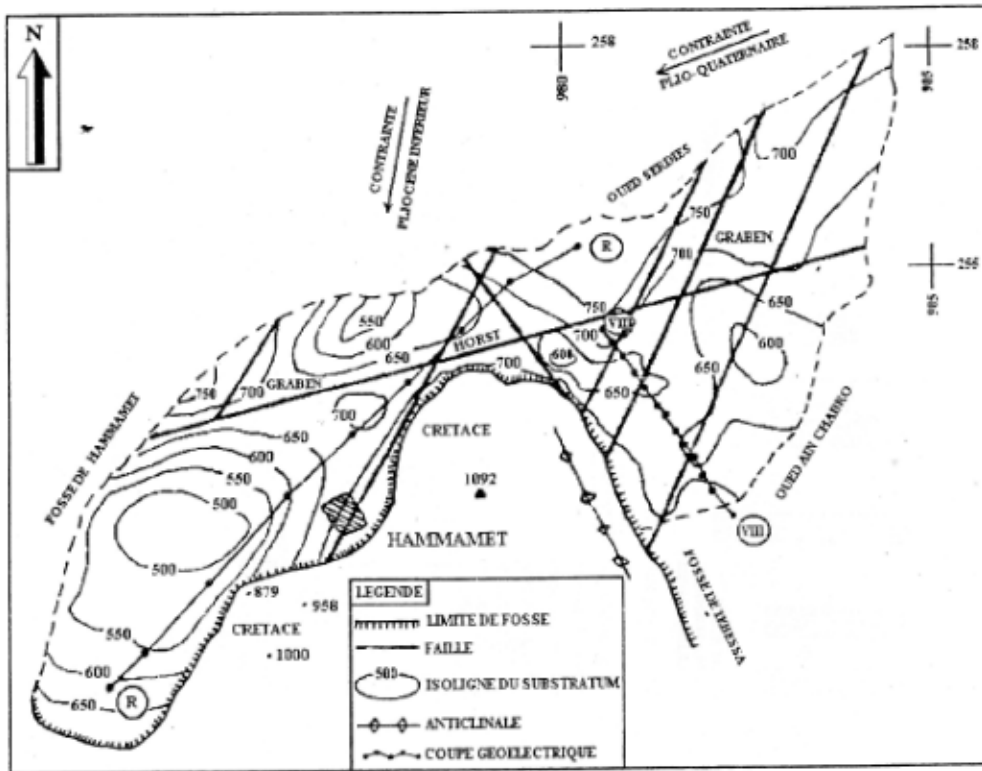


Figure 23: La carte de substratum du fossé de Hammamet in Kowalski et al (2002) [SAMOUNE F.2011].

La bordure crétacée du fossé de Hammamet (Figure 10) est très faillée surtout au niveau de la terminaison Nord de Djebel Stah.

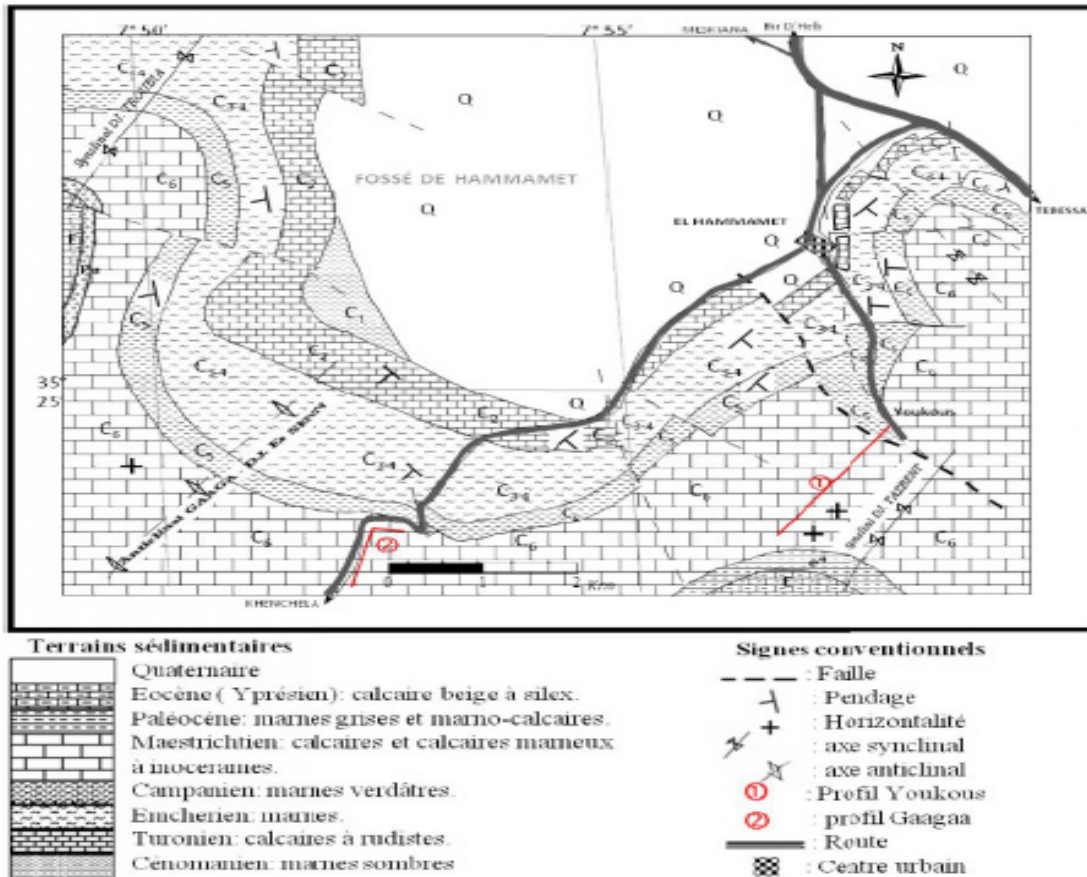


Figure 24: Esquisse géologique et structurale du fossé de Hammamet par Kowalski et al (2000) [in ZAROUKI H, 2013] .

3\ La tectonique de la région

La zone de Hammamet n'a pas une tectonique indépendante de celle de la région de Tébesa qui voit soumise à des contraintes d'ampleur et de direction propre à chaque étage. Le résultat de tous ces événements, pour ce qui est de notre zone d'étude et sa région, est illustré par la photo satellite (figure12) et par l'esquisse établie par feu Mr Kowalski et al (figure 23).

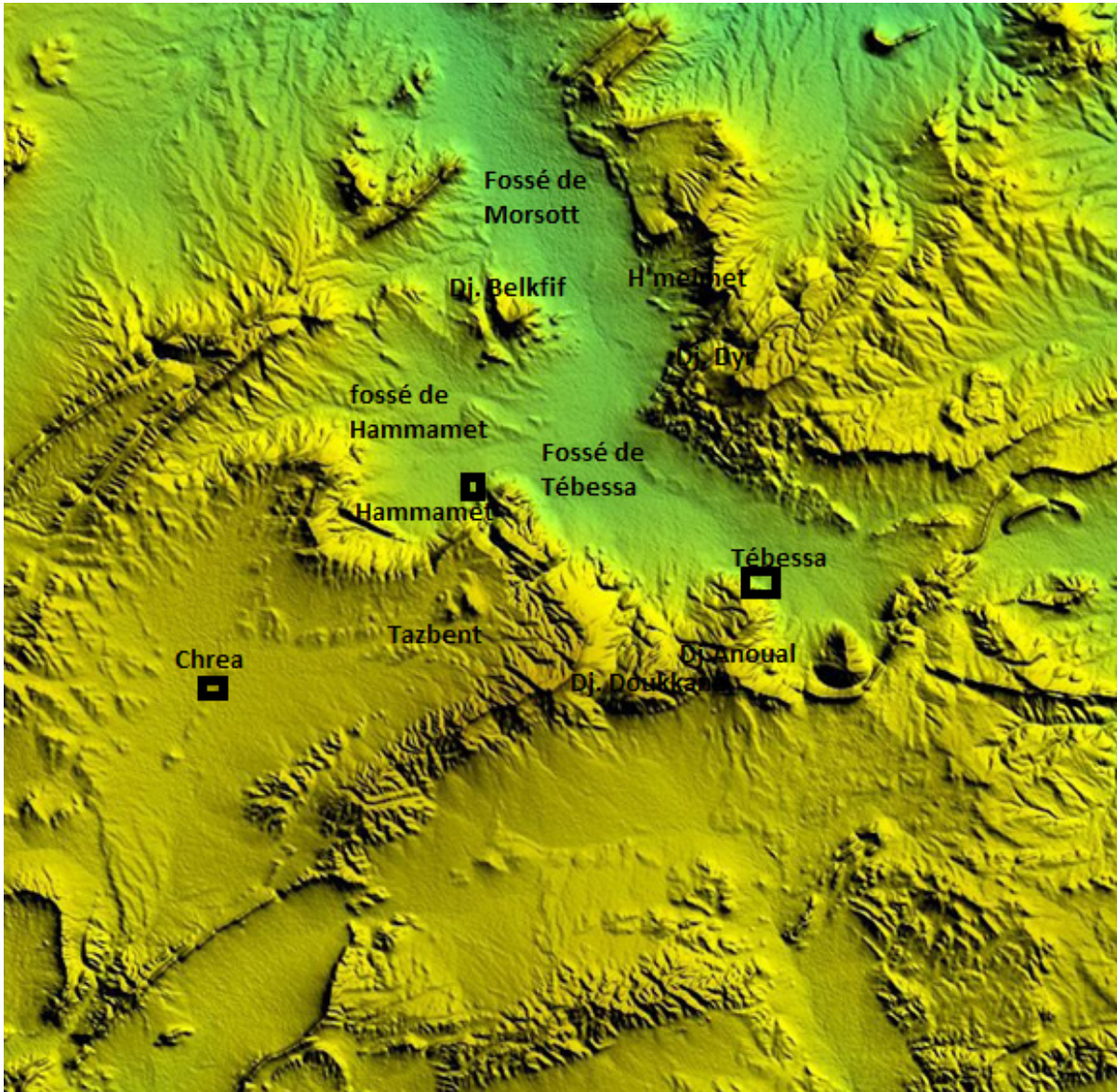


Figure 25: Résultats des phases tectoniques sur la zone d'étude. Photo satellite in Zereg Salah (2010).

La tectonique se diffère d'un étage à un autre ; selon la disposition et le contact des formations elle est liée aux déformations cassantes et souples.

La région de Tébessa a subi les cinq phases de l'orogénèse alpine (Kowalski et al., 2002):

1-La phase atlasique compressive fini-Lutetienne

Elle est caractérisée par une contrainte maximale d'orientation N150°. Elle a provoqué le plissement régional N50-60°, créant les plis, comme le synclinal du Djebel Troubia, l'anticlinal du Djebel Gaaga–Es Senn et le synclinal de Tazbent.

2-La phase distensive du Miocène

Elle est responsable de la formation du bassin d'El Ma Labiod au cours du Langhien-Serravalien et Tortonien, ainsi que celui des Ouled Soukies et du graben de Foussana et Kesserine en Tunisie. La distension miocène a facilité le diapirisme dans le fossé des Ouled Soukies, à Dj. Ouenza, à Dj. Boukhadra et dans la zone entre Dj. Belkfif et Hameimat.

3-La phase compressive de Miocène

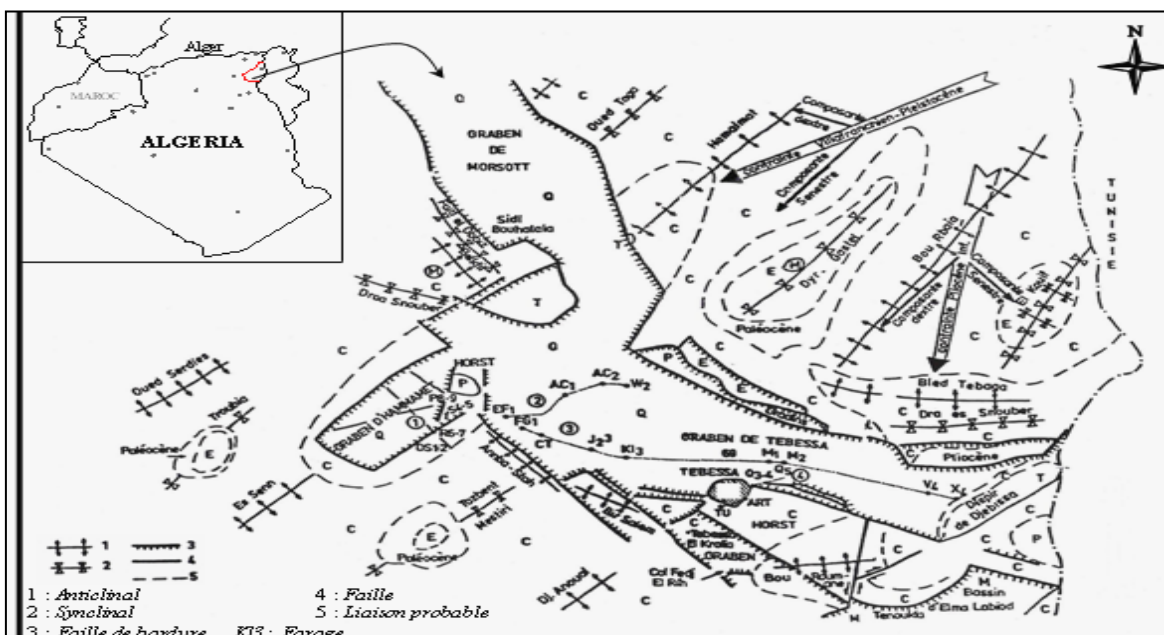
Elle ne se manifeste que dans la zone de Sebkhha Sellaoua et plus au Nord. Dans la zone d'étude, ces manifestations sont amorties (Vila, 1980). Les dernières manifestations de la compression miocène vers le sud ont été observées dans les monts de la Haute Mejerda

4- La phase compressive du Pliocène inférieur

Elle a une contrainte maximale $N0^{\circ}-20^{\circ}$ responsable de la formation des plis orientés $N90^{\circ}-100^{\circ}$ (exemple : l'anticlinal de Bled Tebaga, le synclinal de Draa Es Snouber et l'anticlinal de Bou Roumane). L'effondrement du fossé de Morsott provoqué par la composante senestre de la contrainte $N0^{\circ}-20^{\circ}$ au cours du stade distensif était accompagné par le percement du diapir de Belkfif-Hameimat.

5-La phase compressive du Pliocène supérieur (Villafranchien inférieur)

Elle est responsable des structures plissées plus jeunes que le fossé de Morsott qui lui sont parallèles. A cette phase appartiennent l'anticlinal de Dj. Belkfif, le synclinal Faid Al Obbiz et l'anticlinal d'Oued Annba-Dj. Stah. Ces plis orientés $N160^{\circ}-170^{\circ}$ sont formés par la contrainte maximale $N80^{\circ}$. La composante dextre de cette contrainte est responsable de l'effondrement du fossé de Tebessa. La composante senestre de cette contrainte a réactivé la montée du diapir de Dj. Belkfif avec sa couverture turonienne et de la zone de Sidi Bouhalala. Ce soulèvement diapirique a déformé le fossé de Morsott et parallèlement se produisait la réactivation du Dj. Djebissa. La zone de jonction des fossé de Morsott, orienté NNW-SSE, et de Tebessa, orienté WNW-ESE, constitue une sorte de décrochement. La prolongation septentrionale du fossé de Tebessa déborde sur cette zone de jonction en modifiant partiellement le synclinal de Draa Snouber (Pliocène inférieur) à l'ouest de Dj. Belkfif. Par contre les plis du Villafranchien inférieur, parallèles au fossé de Morsott, sont conservés. La composante senestre de la contrainte maximale du Plio-Villafranchien est responsable de la formation du fossé de Hammamet. Le substratum de ce fossé basculé est constitué d'un système de horsts et grabens orientés SW-NE.



4-LES DONNEE STRUCTURALES

La tectonique est caractérisée avant tout par la diversité, la répartition et l'intensité des Déformations la région d'étude par les déformations suivantes :

4.1 Les déformations plicatives

Dans la région d'étude, les plis sont le résultat de mouvements tectoniques postlutétien orientés comme partout ailleurs dans l'atlas saharien oriental NE-SW. Ce sont des structures formant l'essentiel du relief structural de la région d'étude. On distingue du NW vers le SE les structures suivantes :

4.2 Le synclinal de Guerigueur

C'est un exemple typique de val perché, situé dans la partie NW de la feuille de Hammamet. Il s'allonge selon une direction générale N40°E.

Ce synclinal présente un abaissement de son axe du NE vers le SW. La terminaison périsinglinale NE se distingue par un relèvement important des pentes :

Les deux flancs structuraux du Guerigueur sont bien dégagés grâce aux calcaires yprésiens tandis que les marnes paléocènes forment des dépressions assez importantes de part et d'autre du val.

Le flanc occidental est limité par un escarpement de faille très net dans ce relief. Cette scarpement joue semble-t-il un rôle important dans l'évolution morpho-géologique du synclinal.

4-3 L'anticlinal de Serdies

On a observé le même cas au niveau de l'anticlinal la Meskiana, à l'Ouest du terrain d'étude. En effet, il est difficile de calibrer partout ce pli à partir des photographies aériennes surtout dans sa partie méridionale.

Tout le flanc oriental est effondré, cependant la combe est bien dégagée au niveau de la partie amont de Serdies.

4-4 Le Synclinal de Troubia

Dans la région, le synclinal de Troubia, du moins une partie du pli, apparaît comme une structure très perturbée (grande densité de fracturation essentiellement NW-SE).

Il semble être limité dans une bande allongée de direction E-W ; on note un relèvement Important du pendage à la limite de la cornice

4-5 L'anticlinal d'El Hammamet

L'axe de ce Pli est difficile à suivre dans la région de Oued Hadjra à cause de l'abaissement brutal et de la nature lithologique des formations qu'il traverse (argileuses et terrigènes).

4-6 Le Synclinal de Tazbent

Cette structure présente une allure assez particulière. En effet, sa direction est NE-SW au niveau de Bordj Tazbent et devient E-W dans la région de Oued el Blilia ; ceci montre une grande anomalie dont le changement de l'axe du pli serait dû à l'effet d'accidents EW).

5/ Les déformations disjonctives

5.1 Les failles

La fracturation ancienne ne semble pas jouée un rôle important dans le paysage. En revanche elle a exercé une grande influence sur l'érosion, depuis l'Eocène car ce sont ces failles qui ont accompagné les plissements facilitant le démantèlement des charnières anticlinales.

On pense qu'il en est autrement. A notre humble avis, l'héritage tectonique (le bâti structural) aurait joué un grand rôle dans la genèse et aurait conditionné l'évolution du relief. La tectonique post-Miocène a par contre joué un rôle orographique très important dans la région. C'est à cette phase qu'on attribue les grandes failles à rejet important, à orientation Nord-West, Sud-Est orthogonalement aux structures atlasique du type Jurassien. Celle-ci a défini de nombreux fossés d'effondrement dans toute la région. Les plus importants sont ceux de Hammamet, Morsott et Tébessa.

5.2 Les diaclases

Les diaclases sont très développées au niveau de Djebel Essenn (**fig.14**). On les rencontre aussi au niveau de Djebel Guerigueur

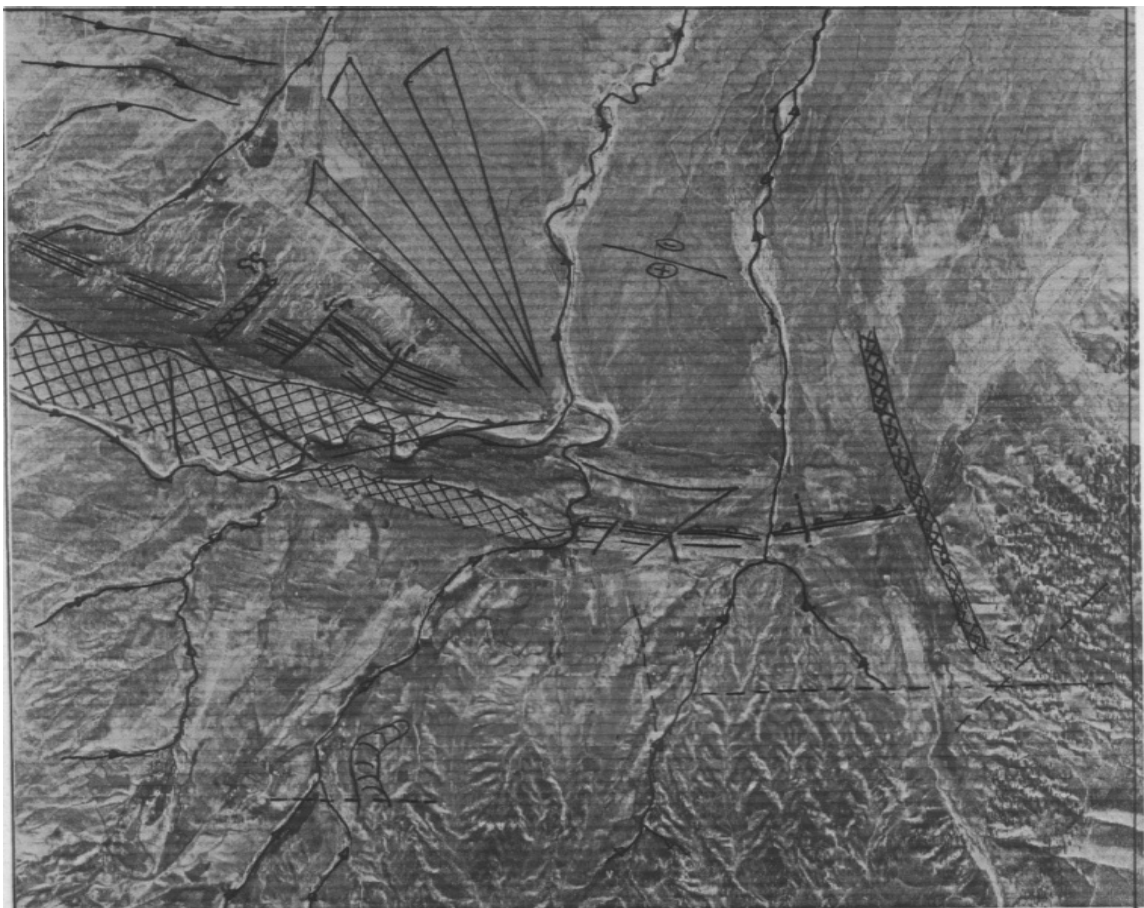


Figure 27: Développement de diaclase dans Dj. Essenn.



Hydroclimatologie

II- Hydrologie/climatologie :

Le bassin versant de l'oued Bouakous couvre une superficie de 16 Km² est drainé par la cour d'eau du même nom. Il fait partie du bassin versant de la Medjerdah. Cet oued principal, avec une longueur de 5.5 Km traverse la vallée de Youkous depuis sa source (la grotte de Bouakous) jusqu'à la sortie en rejoignant la plaine de Ain Chabro sur un axe en demi-cercle avec un changement d'orientation de son lit. Plusieurs affluents de moindre importance constituent le chevelu hydrographique. Ce réseau hydrographique dans sa totalité, suit un régime d'écoulement, même au niveau de l'oued principal, semi-permanent ou absent.

2- Étude de sous bassin versant de Bouakous

Sur la base d'une bonne étude hydrologie résulte un bon dimensionnement et d'une bonne exploitation et plus de sécurité. L'une des premières parties essentielles de cette étude est la détermination de la géométrie du bassin versant.

2-1-Les paramètres géométriques

A- le périmètre, la surface et l'indice de compacité :

Par curvimètre et par plan métrage on a déterminé

- le périmètre (P) du sous bassin : P =19Km.

- La surface (S) : S=17.5 Km².

Mais l'indice de compacité (KC) du sous bassin versant est donnée par la formule suivante :

$$Kc = \frac{p}{2\sqrt{\pi S}} = \frac{0.28P}{\sqrt{S}}$$

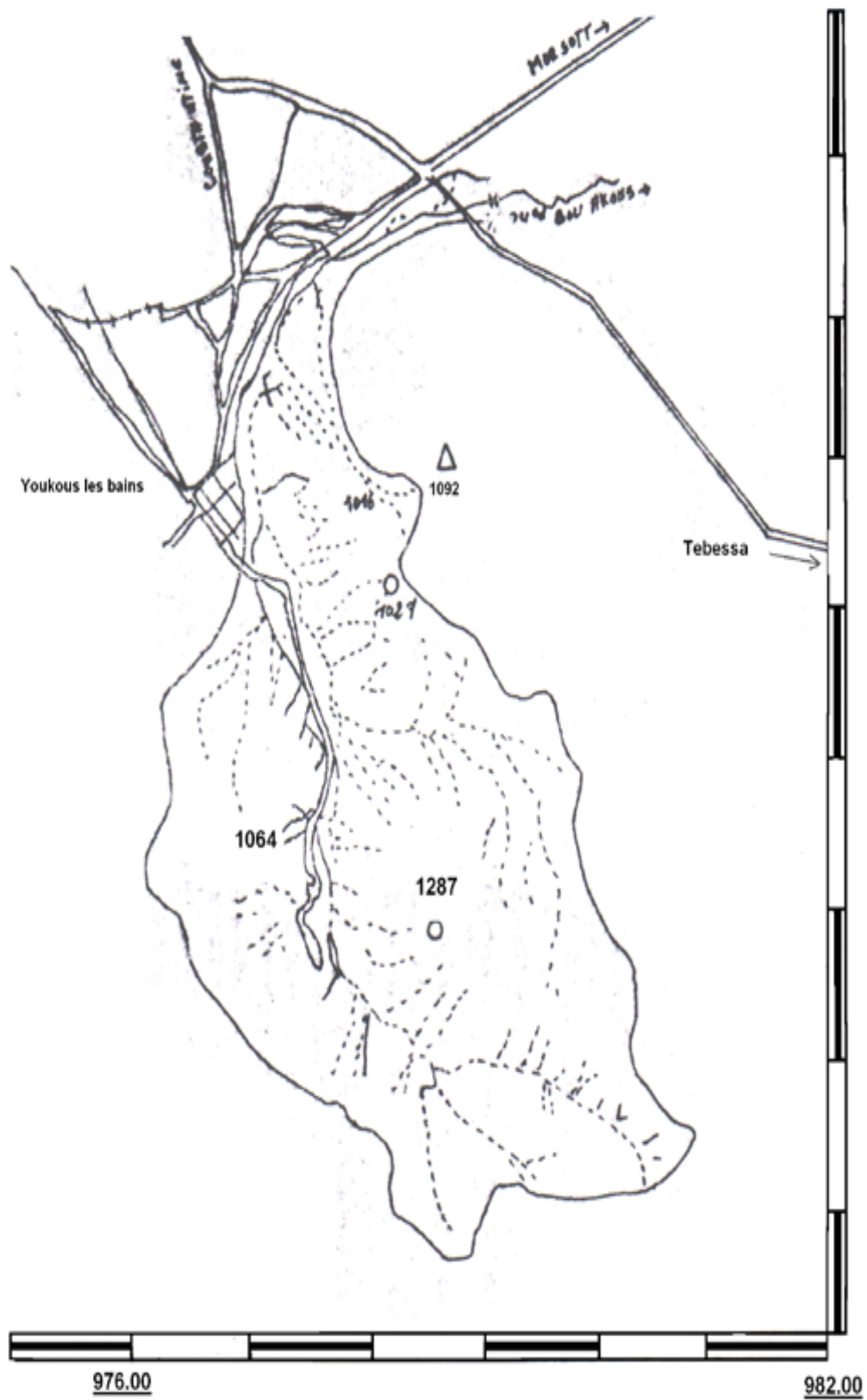


Figure 28: Bassin versant 'Youkous [Geufaifia Omar 2007].

Application numérique :

$$KC = \frac{0.28 \cdot 19}{\sqrt{17.5}} \Rightarrow kc = 1.27$$

Le KC est étudié pour caractériser la forme du bassin qui d'après sa valeur supérieure à 1 (Dans notre cas : $KC > 1$)

On déduit que le sous bassin de Bouakous est d'une forme allongée ce qui augmente le temps de concentration de l'eau à l'exutoire

B – la pente moyenne du sous bassin de Bouakous :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$IP_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Application numérique : $IP = \frac{1626 - 870}{6.97 \times 10^3} = 68.29 \times 10^{-3} = 6.82 \%$

L'indice de pente globale (Ig) :

$$Ig = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Application numérique $Ig = \frac{4.85}{6.97 \times 10^3} = 0.07 \rightarrow Ig = 7.03\%$

La classification du relief

Selon la classification de ORSTOM d'après les valeurs de Ig et D :

Indice de pente globale	Denivlée <<D>>	Relief <<R>>
0.01 < Ig < 0.02	50 < D < 100m	Moderé
0.02 < Ig < 0.05	100 < D < 250m	Assez fort
0.05 < Ig < 0.1	250 < D < 500m	Fort
Ig > 0.1	D > 500m	Très fort

Tableau 4: Classification du relief selon l'ORSTOM (Douichine F, 2018)

Rectangle équivalent

Le but du rectangle équivalent est de comparer les sous bassins entre eux, du point de vue influence de la forme sur l'écoulement et la détermination de l'indice de forme pour chaque sous bassin.

- Les dimensions du rectangle équivalent : La longueur équivalente : (L)

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

Application numérique :

$$L = \frac{1.27\sqrt{17.5} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.27} \right)^2} \right]}{1.12}, L = 6.9 \text{ km}$$

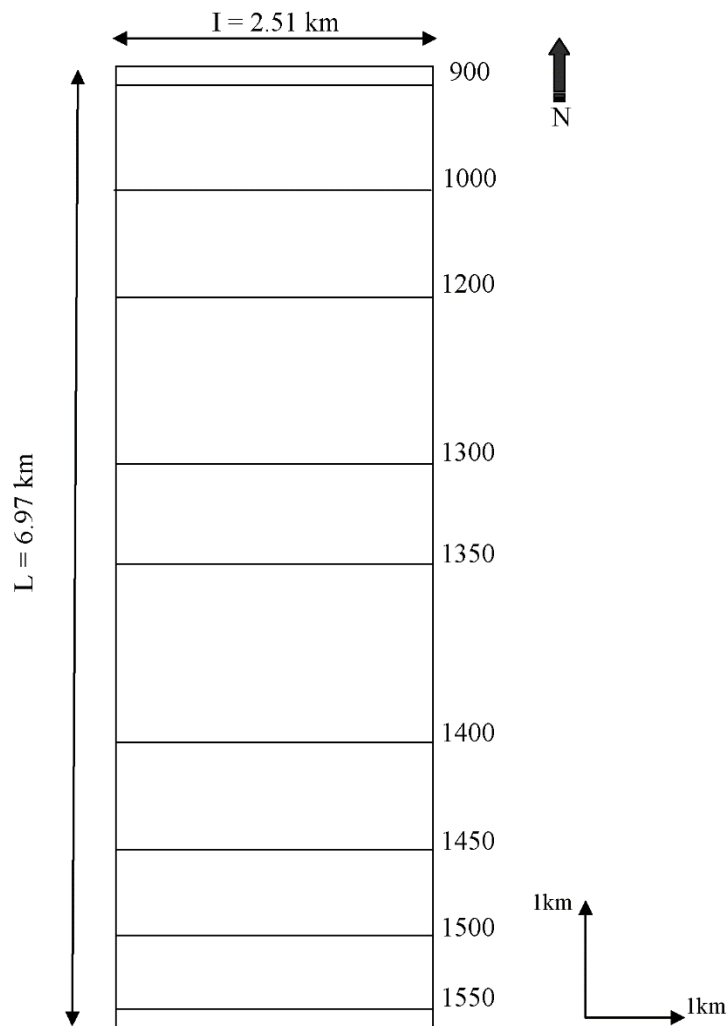


Figure 29: Rectangle équivalent du sous bassin versant de Bouakous.

Tranche d'altitude en (m)	Superficies partielles si		Superficies cumulées		Altitude moyenne Hi	E Hi Si
	Km2	%	Km2	%		
> 1600	0.175	1	0.175	1	1600	272
1550 - 1600	0.248	1.42	0.423	2.42	1575	378
1550-1500	1.247	7.13	1.670	9.54	1525	1891
1500-1450	1.850	10.57	3.520	20.12	1475	2728.75
1400 - 1450	1.873	10.69	5.390	30.8	1425	2664.75
1350 - 1400	2.62	14.97	8.010	45.77	1375	3602.5
1300 - 1350	1.850	10.57	9.860	56.34	1325	2451.25
1200 - 1300	3.120	17.82	12.980	74.17	1250	3900
1000 - 1200	1.84	10.52	14.820	84.69	1100	2024
900 - 1000	2.34	13.37	17.160	98.05	950	2223
900<	0.34	1.94	17.50	100	900	306
	17.5	100				1341.15

Tableau 5: Répartition des surfaces en fonction des altitudes du sous bassin versant de Bouakous. (Douichine F, 2018)

Paramètres du relief :

L'établissement de la courbe hypsométrique et la courbe de fréquence altimétrique, nous conduit vers l'analyse du relief qui est un facteur influençant sur le comportement du sous bassin, en ce qui concerne le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration.

La courbe hypsométrique :

On trace cette courbe, en portant en abscisse les tranches d'altitudes et en ordonnées les superficies en pourcentage (%) comprise entre les tranches d'altitude d ou on peut tirer les paramètres suivants :

L'altitude maximale : M max = 1626m.

L'altitude minimale : M min = 878m.

L'altitude moyenne : $M_{moy} = \frac{E \text{ Hi Si}}{S} = H_{moy} = 1282.35 \text{ m.}$

On a trouvé: $I_g = 0.07 \Rightarrow 0.05 < I_g < 0.1$ et $D = 485 \Rightarrow 250 < D < 500\text{m.}$

Alors on peut classer notre relief dans la classe du relief fort.

Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du sous bassin versant : La surface du bassin est drainée par Oued Bouakous alimenté à l'amont par la grotte de Bouakous qui est de longueur d'ordre 5.25 Km jusqu' à la limite aval du Bassin

Les caractéristiques hydrographiques

a- Le temps de concentration Le temps de concentration est la durée nécessaire que met la pluie tombant sur un point hydrologiquement éloigné jusqu' à l'exécutoire. On peut l'obtenir par la formule de (Griondotti).

$$\text{Avec } \mathbf{Ic} = \frac{4\sqrt{s}+1.5(Lp)}{0.8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}}$$

Lp : la longueur du talweg en Km $Tc = \frac{\sqrt{17.5+1.5(5.25)}}{0.8\sqrt{1341.15-1150}} = 2.20h$

b- Vitesse d'écoulement de l'eau (Ve):

$Ve = Lp/Tc$ en m/s. Application numérique : $Vc = 5.25 \times 10^3 / 2,22 \times 3600 = 0,65m/s$

c- Coefficient d'allongement (K)

$K = P^2/S$. Application numérique : $19^2 / 17.5 = 20.62$

Paramètres	symbole	valeur	unité
Surface	S	17.5	Km²
Périmètres	P	19	Km
Indice de compacité	Kc	1.27	/
Longueur équivalente	L	6.97	Km
Largeur équivalente	L	2.51	Km
Altitude maximale	H max	1626	m
Altitude minimale	H min	878	m
Altitude moyenne	H moy	1282.35	m
Indice de pente moyenne	Ipmoy	10.84	%
Indice de pente globale	Ig	7.03	%
Dénivelé	D	480	m
Temps de concentration	Tc	2.22	H
Coefficient d'allongement	K	20.62	/
Vitesse d'écoulement	Ve	0.65	m/s

Tableau 6: récapitulatif des différents paramètres du sous bassin versant de Bouakous. (Douichine F, 2018)

2- Etude des paramètres climatologiques

Dans ce chapitre, il est utilisé les données climatiques recueillies durant la période d'étude et celles mises à notre disposition par la station météorologique de Tébessa.

	Code	Coordonnées		Altitude(m)	Mise en service
		X	Y		
Station de Tébessa	12.03.01	991,9	247,2	890	1943

Tableau 7: caractéristique de la station météorologique de Tébessa (Douichine F).

2-1- Les précipitations

La pluie est un facteur très important et l'étude pluviométrique présente un intérêt considérable en hydrogéologie afin d'évaluer la lame d'eau tombée sur l'ensemble du bassin versant et son influence sur l'alimentation,

Notre étude est donc basée sur les données enregistrées pendant une période de 17 ans (2000 à 2017).

2-1-1- Précipitations annuelles

Les précipitations sont un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. L'étude des variations des précipitations annuelles dans notre région montre une grande variation dans le temps et dans l'espace. Le graphe suivant donne les valeurs moyennes annuelles de pluviométrie mesurées par la station sur indiquée:

2-1-2- Précipitations mensuelles

Pour mettre un aperçu sur la variation des précipitations mensuelles à l'échelle de la région nous avons celle de Tébessa le tableau suivant, illustre les précipitations moyennes mensuelles pour la station sur 17 années d'observation allant de 2000 à 2017 :

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou	Total	Min	Max
P(mm)	49.2	37.8	36.5	39.3	32.1	24.4	30.9	40.2	49.4	28	20.1	29.3	417.2	20.1	49.4

Tableau 8: Distribution mensuelle des précipitations interannuelles (Douichine F).

On y observe que les précipitations maximales sont marquées au mois de mai avec une moyenne de 49.4 mm, alors que le mois le plus sec est juillet avec 20.1mm.

La figure ci-dessous donne les moyennes mensuelles des pluies cumulées de 2000 à 2017, qui fait apparaître une variation nette des précipitations d'un mois à l'autre, elles atteignent leur maximum en mai puis diminuent pour atteindre le premier minimum en juillet, puis reprennent avec un deuxième maximum en mois de septembre pour atteindre le deuxième minimum en mois de février.

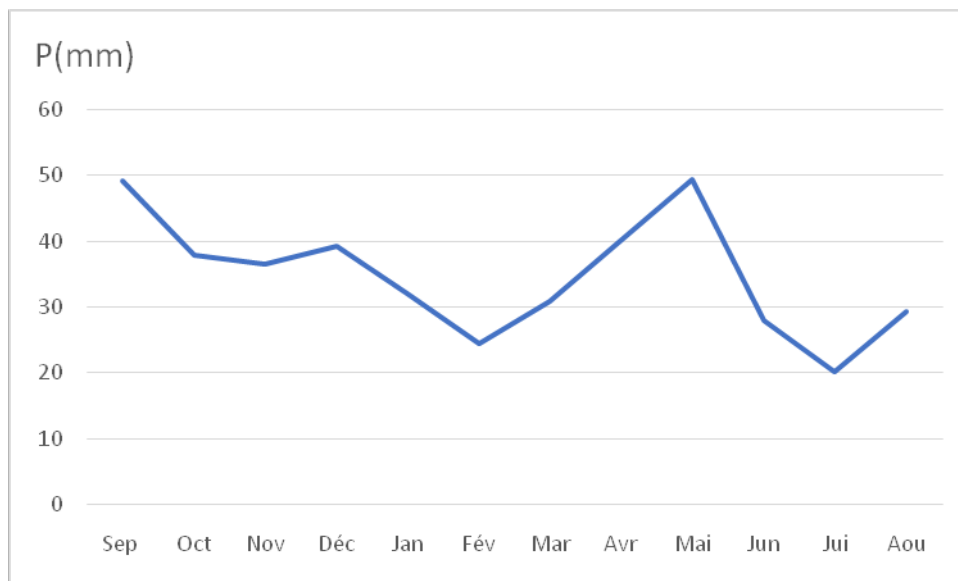


Figure 30: Variation moyennes mensuelles interannuelle des précipitations (2000-2017). (d'après le tableau précédent).

Précipitations moyennes annuelles (1981-2014)

-L'Année 2003-2004 est la plus arrosée avec 602.8mm.

-L'Année 2000-2001 est la plus sèche avec 276.65mm.

-Précipitation moyenne annuelle est 399mm.

2-1-3- Le coefficient pluviométrique

Ce paramètre climatique joue un rôle important dans la détermination des années excédentaires et déficitaires.

Il est défini comme le rapport de la pluviométrie de l'année à la pluviométrie moyenne pour

la station $H = \frac{P}{P_{\alpha}}$

H: coefficient pluviométrique.

P: pluviométrie de l'année donnée.

Pa: pluviométrie moyenne.

- Si $H > 1$: l'année est excédentaire.

- Si $H < 1$: l'année est déficitaire

Années	H	Anées	H
2000-2001	0,55	2011-2012	0,59
2001-2002	1,09	2012-2013	0,50
2002-2003	1,47	2013-2014	0,49
2003-2004	1,67	2014-2015	
2004-2005	1,20	2015-2016	
2005-2006	1,34	2016-2017	
2006-2007	1,09		
2007-2008	0,83		
2008-2009	1,69		
2009-2010	0,95		
2010-2011	0,76		

Tableau 9: Bilan de coefficient pluviométrique (2000-2017) (Douichine F, 2018)

2-2- La neige

Les montagnes de bordure et en particulier djebel Doukane, Mestiri et Tazbent et leurs prolongements reçoivent en hiver des précipitations neigeuses qui peuvent être importantes. D'après P.Seltzer la région se situe dans la zone d'enneigement moyen au sol de de 5 à 10 jours par année.

Ce phénomène a un rôle important si l'on considère la superficie des montagnes bordant Youkous. Les précipitations neigeuses suivies par une lente fonte favorisant au maximum l'infiltration d'ailleurs, les débits des exurgences de Youkous sont fortement influencés.

2-3- Les températures

Ce paramètre est joue un rôle très important dans l'évaluation du déficit d'écoulement, qui entre dans l'estimation du bilan hydrologique. Le climat semi-aridse traduit par un été très chaud et un hiver très froid. La température moyenne annuelle est environ 16 C°.

Mois T°	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou	Tot	Min	Max	Moy
Max	36.1	32.6	23.8	19.9	18.4	18.1	24.7	29	33.3	38.7	41.6	41	357.1	18.1	41.6	29.76
moy	23.9	20.3	13.3	9.2	8.07	8.69	13.01	16.4	21.4	26.4	30.2	28.8	219.6	8.07	30.2	19.13

Tableau 10: Les températures maximales mensuelles à la station de Tébéssa (2000-2017) (Douichine F, 2018)

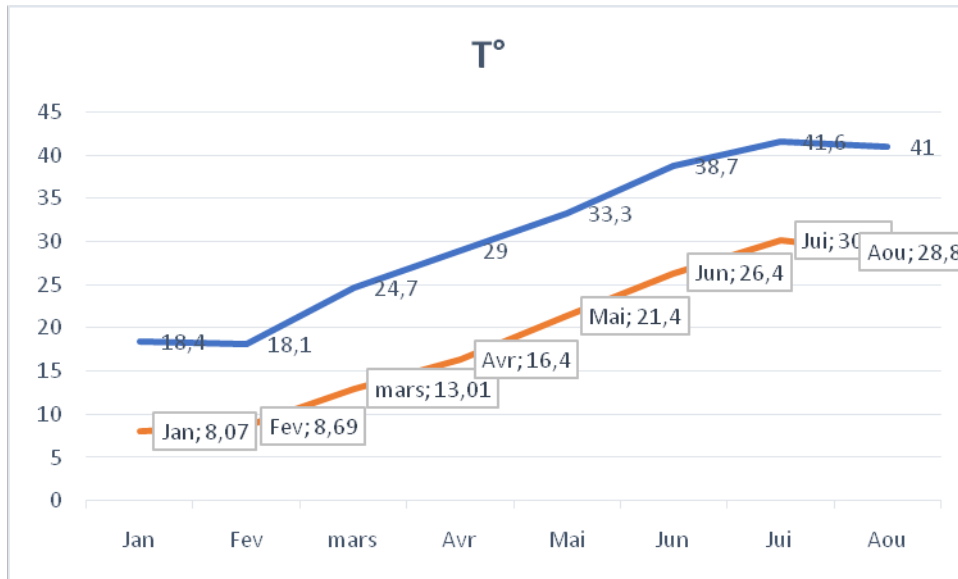


Figure 31: Variation mensuelle des températures maximales à la station de Tébessa.(d'après le tableau précédent).

À la station de Tébessa, représentés dans le tableau ci-dessous, font apparaître un hiver doux et un été chaud et des grands écarts entre les minimas et les maximas, surtout en été ce qui est une caractéristique typique du climat méditerranéen semi-aride.

2-3-1- Températures moyennes annuelles

A l'échelle annuelle, les variations sont peu importantes et relativement stables, cependant on peut apprécier une augmentation générale des températures, traduisant le réchauffement climatique qui a sévit depuis plus d'une décennie à travers la planète.

2-4- Le vent

Les vents dans notre région d'étude sont caractérisés par leurs directions, leurs vitesses et leurs intensités.

- les vents de direction W-NW sont responsables de la pluviométrie.
- Les vents de direction S-N ou le siroco engendrent une forte évapotranspiration et une sécheresse abaissant l'humidité.

3- l'indice d'aridité

L'indice de l'aridité est un indicateur quantitatif du degré du manque d'eau, présent à un endroit donné (John E. Oliver. 2006). On va calculer cet indice (i) par la formule de DE MARTONNE.

$$\text{Indice d'aridité: } I = \frac{P}{T+10}$$

P: précipitation moyenne annuelle (mm).

T: température moyenne annuelle (C°).

$I < 5$: climat hyperaride.

$5 < I < 7,5$: climat désertique.

$7,5 < I < 10$: climat steppique.

$10 < I < 20$: climat semi-aride.

$20 < I < 30$: climat tempère.

Le tableau 07 montre la température moyenne annuelle, la précipitation moyenne annuelle, et l'indice d'aridité calculés pour la station de Tébessa, pour la période considérée de 2000 à 2017. Nous remarquons à travers les valeurs obtenues de l'indice d'aridité que la région appartient au climat semi-aride, ce qui est conforme à ce qui est connu pour la zone.

	<i>Température</i>	<i>Précipitation</i>	<i>Indice d'aridité</i>	<i>Type du climat</i>
	(°C)	(mm)	(I)	
Tébessa	16.3	399	15.32	Semi-aride

Tableau 11: Tableau 07 : La température moyenne annuelle. La précipitation moyenne annuelle, et l'indice d'aridité(2000-2017) (Douichine F, 2018)

4- Le bilan hydrique

Le bilan hydrique permet de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations et comporte trois termes: Ruissellement, L'infiltration et L'évapotranspiration. Donc ce sont ces processus qui suivent une quantité d'eau arrivant au sol selon les précipitations ou les neiges avant de retourner à l'atmosphère.

L'équation globale du bilan peut s'écrire comme suite:

$$P (mm) = EX (mm) + ETR$$

P: précipitation annuelle.

EX: excédent annuel (Ruissellement +Infiltration).

ETR: évapotranspiration réelle.

4-1- Calcul des paramètres du bilan hydrique

4-1-1- Evapotranspiration

L'évapotranspiration est la somme de l'eau utilisée, dans une région donnée, par la croissance de la végétation pour sa transpiration et la constitution de ses tissus et de l'eau évaporée du sol, de la neige, et cela dans un temps donné. Donc, l'évapotranspiration est définie comme étant l'ensemble des pertes par transformation de l'eau en vapeur, autrement dit, c'est la somme de l'évaporation (phénomène physique), et la transpiration de la couverture végétale (phénomène biologique).

Les facteurs qui conditionnent l'évapotranspiration sont nombreux et mal connus, on en citera quelques-uns, à savoir :

- **Les facteurs climatiques :**
 - La température de l'air.
 - La vitesse et turbulence du vent.
 - Le degré d'insolation.
 - L'humidité relative de l'air.

- **Les facteurs géographiques :**
 - L'état de la surface évaporant du sol.
 - L'altitude.

- **Les facteurs biologiques :**
 - Les espèces végétales.
 - La profondeur des racines.

On peut distinguer trois notions dans l'évapotranspiration (André Musy 2005)

1- L'évapotranspiration potentielle (ETP), est défini comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau.

2- L'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales (sol fertile, bon état sanitaire, ...).

3- L'évapotranspiration réelle (ETR) est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

4-2- Estimation du bilan hydrique

4-2-1-Estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP

La méthode de Thornthwaite nous permet à partir des données de base (précipitation, température, coefficient thermique mensuel et de l'indice thermique mensuel).L'évapotranspiration potentielle selon THORNTHWAITTE basée essentiellement sur la température est donnée par la formule :

$$ETP = 16 \left[\frac{10T}{I} \right]^a K$$

Avec:

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

T : Température moyenne mensuelle en C°

K : Coefficient d'ajustement.

a : Indice lié à la température. $a = (1.6/100) \cdot I + 0.5$

I : Indice thermique annuel obtenu à partir de la somme de deux valeurs mensuelles de températures : $I = \sum I^2_1$

i : Indice thermique mensuel : $i = (T/5)^{1.514}$

Cette formule est bien adaptée aux climats à précipitations régulières (océanique, équatorial), mais ne convient pas aux climats à saison sèche marquée, tel est le cas de notre région d'étude.

4-2-2 Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Par définition on appelle évapotranspiration réelle la somme des effets d'une évaporation réelle des plantes sur une surface donnée et pour une période définie.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), nous avons utilisé la méthode de Thornthwaite où on distingue deux cas principaux :

Si : $P - ETP > 0$; c'est - à - dire $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

Si : $P - ETP < 0$; c'est - à - dire $P < ETP$; ce cas est subdivisé en deux cas :

- Si : $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.
- Si : $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Application:

$$P + RFU = 417.2 + 29 = 446.2 < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$$

4-2-3-Résultats de calculs de l'ETP

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou
T(c°)	23.9	20.3	13.3	9.2	8.07	8.69	13.01	16.4	21.4	26.4	30.2	28.8
I	10.68	8.34	4.39	2.51	2.06	2.30	4.25	6.03	9.03	12.41	15.22	14.16
L	91.38											
A	1.96											
ETPnc	105.3	76.4	33.3	16.2	12.5	14.4	31.9	50.3	84.8	127.9	166.5	151.7
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETPc	108.4	74.1	28.6	13.77	10,8	12.24	32.85	54.82	102.6	154.75	204.79	175.97

Tableau 12: Résultats de calcul de l'ETP par les formules de Thornthwaite (Douichine F, 2018)

4-2-4- Bilan hydrologique simplifié selon THORNTHWAITTE

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU) ; On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau, cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (200 mm). On admet que la satisfaction de l'ETP a la priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait

le pouvoir évaporateur (ETP = ETR). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement (J.P. Laborde, 2000) On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'ETP et de la RFU.

- Si : $P > ETP$, alors : $ETR = ETP$

Il reste un excédent ($P - ETP$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q.

- SI : $P < ETP$

On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit:

$$ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$$

$$RFU = 0 \text{ ou } RFU + p - ETP$$

- Si $RFU = 0$:

La quantité ($Da = ETP - ETR$) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas d'un manque d'eau.

4-2-5- Estimation des réserves facilement utilisable (RFU)

Elle représente la quantité d'eaux emmagasinée dans le sol son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs:

- La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche parcourue par les racines;
- La profondeur de niveau piézométrique de la nappe;
- Le climat de la région;
- Le type de la couverture végétale;

J. RICHARD a évalué la RFU pour la plaine de Tébessa en tenant compte de la nature de sol et de type de culture : $25 < RFU < 35$.

D'après la formule de HAILLER: $RFU = 1/3(Da \cdot He \cdot P)$

RFU: réserves facilement utilisables en mm.

Da: densité apparente du sol. ($Da=14$).

He: humidité équivalente du sol= 0.25. ($He=25\%$)

P: profondeur de la couche de la terre parcourue par les racines en mm. ($P=25$ mm)

Application:

$$RFU = 1/3(14 \times 0.25 \times 25) = 29$$

RFU=29 mm c'est la valeur maximum de RFU. Bureau de Lepetit

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avri	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
T (°C)	23.9	20.3	13.3	9.2	8.07	8.69	13.01	16.4	21.4	26.4	30.2	28.8	/
i	10.68	8.34	4.39	2.51	2.06	2.30	4.25	6.03	9.03	12.41	15.22	14.16	91.38
I	91.38												
a	1.96												
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	/
P (mm)	49.2	37.8	36.5	39.3	32.1	24.4	30.9	40.2	49.4	28	20.1	29.3	417.2
ETP _c	108.4	74.1	28.6	13.77	10, 8	12.24	32.85	54.82	102.6	154.75	204.79	175.97	973.69
ETR (mm)	49.2	37.8	28.6	13.77	10,08	12.24	30.9	40.2	49.4	28	20.1	29.3	
RFU (29mm)	00	00	7.9	25.53	28	28	00	00	00	00	00	00	89.34
EXD(mm)	00	00	00	00	21.3	12.16	00	00	00	00	00	00	33.46
DA(mm)	59.2	36.3	00	00	00	00	1.59	14.62	53.2	126.75	184.69	146.67	623.02

Tableau 13: Bilan hydrologique pour ETP de Thornthwaite de la station de Tébessa de la période (Douichine F, 2018)

4-2-6- Commentaire sur le bilan hydrique

A l'issu des résultats obtenus du calcul du bilan hydrologique de THORNTWAITE, à travers la région étudiée nous remarquons que l'emploi de formule pour l'estimation de l'ETP ; donne un bilan hydrologique déficitaire. Induisant un déficit agricole important et considérable sur la longueur de l'année, la figure 22 illustre sous forme de graphique le bilan hydrologique en utilisant l'ETP de THORNTWAITE qui confirme les résultats chiffrés précédents surtout en matière de l'importance du déficit hydrique à l'échelle de temps à la plaine. On remarque que :

- ✓ La saturation de ces dernières est atteinte durant les mois de Janvier et Février.
- ✓ L'excédent est enregistré au mois de Janvier et février.

Le déficit agricole est enregistré durant les mois de Septembre, Octobre; et à partir du mois de Mars jusqu' au mois d'Aout.

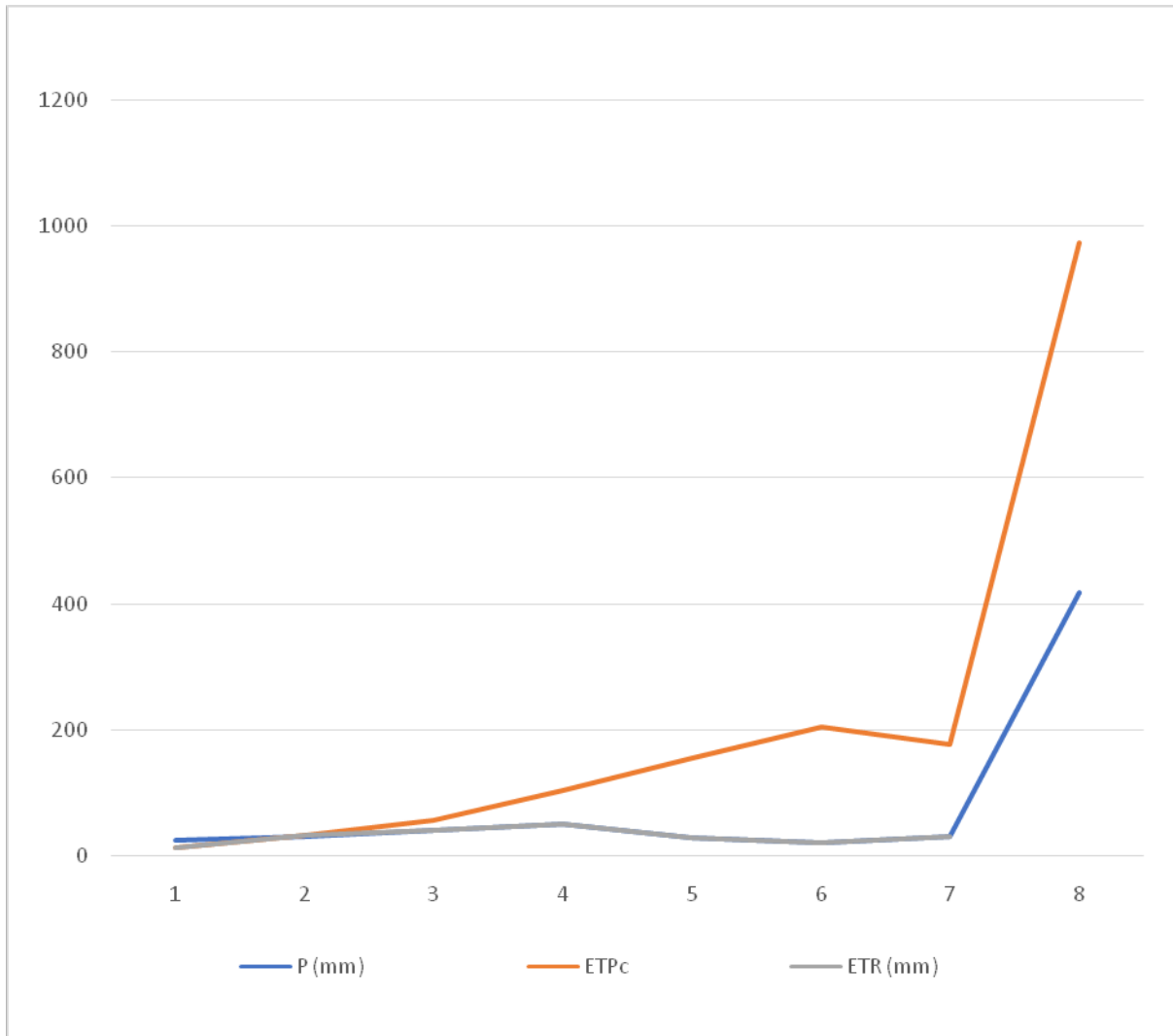


Figure 32: Bilan hydrique avec ETP de Thornthwaite.(D'après le tableau précédent).

5-Conclusion

A travers l'étude climatique à l'échelle de la région étudiée nous avons remarqué que les précipitations sont très variables dans le temps, les températures présentent une légère augmentation progressive; traduisant le réchauffement climatique qui constitue l'ordre du jour actuel des météorologues du monde entier. La région fait partie de l'étage bioclimatique semi-aride ; confirmée par le calcul de l'indice d'aridité de Martonne, à travers le diagramme pluviothermique les périodes sèches sont plus longues et emportent beaucoup sur les périodes humides. L'évapotranspiration potentielle est importante à l'échelle de la région est fait presque trois fois l'évapotranspiration réelle traduisant un déficit agricole très important à l'issu du calcul du bilan hydrologique.

La géophysique

Etude géophysique

1/ Introduction

La prospection géophysique est un moyen d'investigation très répandu dans la recherche des structures géologiques et tectoniques en profondeur.

Dans le but d'atteindre notre objectif, nous avons cherché dans les travaux antérieurs qui ont été pris la région d'étude en considération et qui ont été réalisés des campagnes de prospection géophysiques à des fins hydrogéologiques et même ceux qui ont été pris la source thermique de youkous et son émergence en étude, citons par exemple les travaux de [GUIGUE S., 1946, CGG, 1970, DIB, H., 1976, 2004, 2008, SAMOUN F., 2011, ZAROUKKI H. 2013]

2/ Principaux résultats géophysiques

2.1/ Etudes géophysiques précédentes de la zone d'étude :

a/ Selon CGG, 1970

La plaine de Hammamet a fait l'objet d'une étude géophysique appréciable, comprend plusieurs profils géoélectriques (J,K,L,M,N,O,P,Q,R), parmi ces profils, seul le profil (R) qui est plus proche à notre site géothermique (la dite source thermique de youkous) (figure1), ce profil est éloigné de l'émergence chaude de plus de 500m.

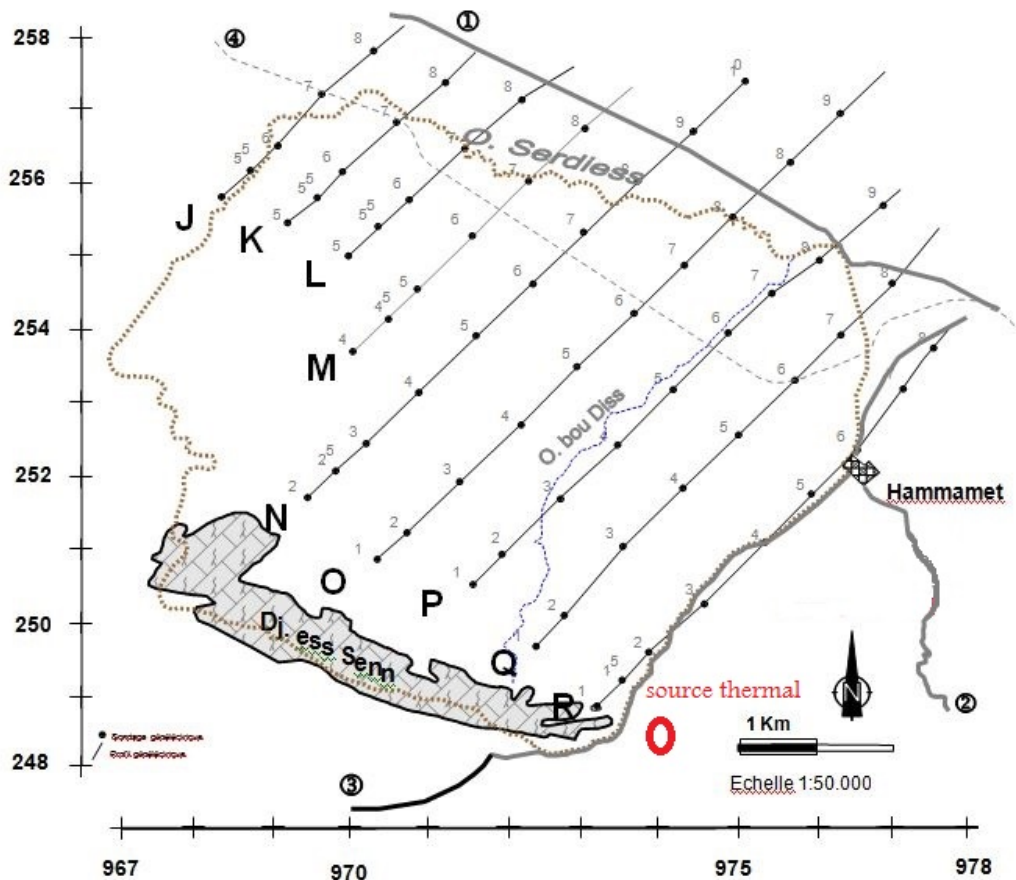


Figure 33: Position des sondages géo-électriques dans la plaine de Hammamet [SAMOUN, F., 2011].

L'analyse de la coupe géo-électrique montre l'existence de deux grands horizons superposés à résistivités différents, le premier horizon composé des alluvions et des cailloutis de calcaires présentent une épaisseur très importante allant jusqu'à 400 m au centre de la plaine (résistivité varie entre 10 et 60 Oum.m) et le deuxième se trouvait juste au-dessous composé fort possible des marne Sénonienne et quelques lambeaux des calcaires (Résistivité 20 Oum.m). Notons ici que ce profil n'a présenté aucune faille dans cette partie de la zone d'étude.

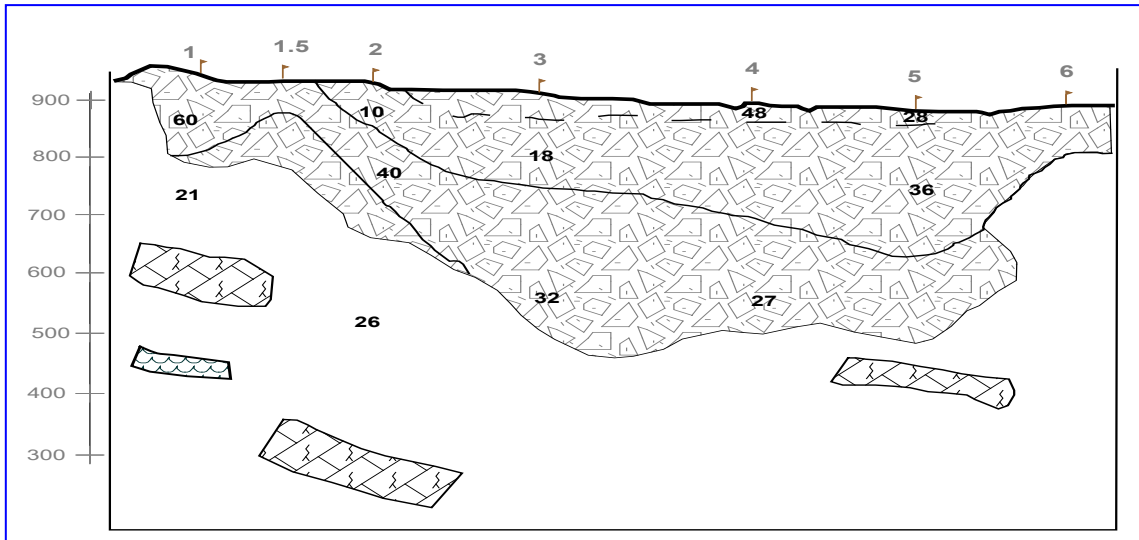


Figure 34: coupe géoélectrique selon la ligne de sondages électriques verticaux « R ». [SAMOUN, F., 2011].

Deux coupes électriques ont été effectuées par l'auteur SAMOUN F, 2011 dans la masse alluvionnaire pour rechercher une éventuelle canalisation de l'eau chaude de la source thermale de Hammam Youkous.

b1/ Tomographie 1 : Effectivement à l'endroit visé, en face du réservoir et à une profondeur de 4m, apparait une zone de basse résistivité juste à l'endroit où aurait du être le canal d'alimentation. (Figure 3).

Toujours à la même profondeur la moitié nord, au niveau de l'ancienne bâtisse romaine, présente une zone allongée de basse résistivité dont on ne voit que la partie supérieure.

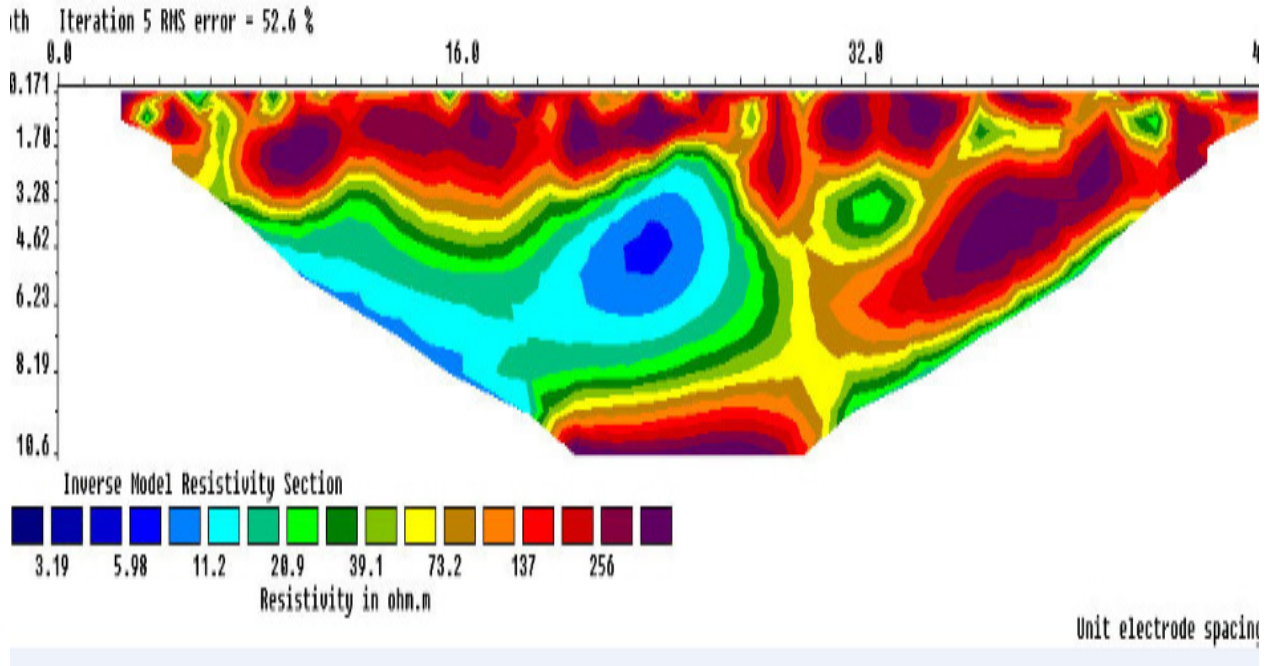


Figure 35: coupe tomographique N-S à 50cm à l'Est de la bâtisse romaine.

B2/ Tomographie 2 : Cette coupe effectuée à 8m de la première qui est parallèle et de même sens, montre une distribution Presque similaire sauf que cette fois la zone de basse résistivité est plus constante vers le Nord, continue est plus horizontale. (Figure4).

Cependant on observe, à 24m et à 32m de l'origine des mesures, deux zones de résistivité importante à une profondeur d'environ 2m.

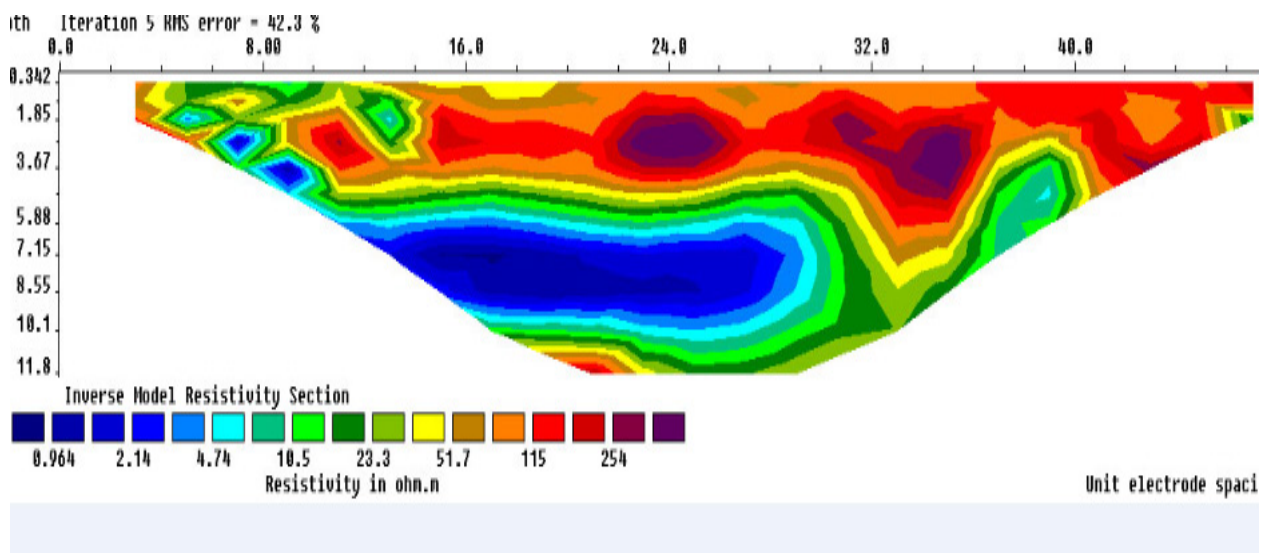


Figure 36: coupe tomographique N-S à 8.50cm à l'Est de la bâtisse romaine.

La distribution des valeurs dans les deux figures laisse supposer que la lentille de basse résistivité qui figure dans les deux coupes géoélectriques est la même. Jusqu'à une distance de 150m de l'oued vers le Nord-Est les blocs de calcaires s'ils existent sont situés à une profondeur supérieure à 20m ; profondeur théorique d'exploration des moyens

utilisés. La profondeur relativement élevée (8.4m) correspondant à la valeur de $\rho = 103 \Omega\text{m}$ est probablement due à la proximité de la route (1m) et que le sol y est plus compacté.

c/ Selon ZAROUKKI H., 2013

Cette campagne géophysique a été réalisée au cours de la période allant de 20 décembre 2012 au 4 Janvier 2013. Ce travail avait les objectifs suivants :

- détermination de l'état actuel de la grotte,
- détermination des zones de failles présentes au niveau de la ville de Youkous,
- mise en évidence des conditions de résurgence de la source thermale.

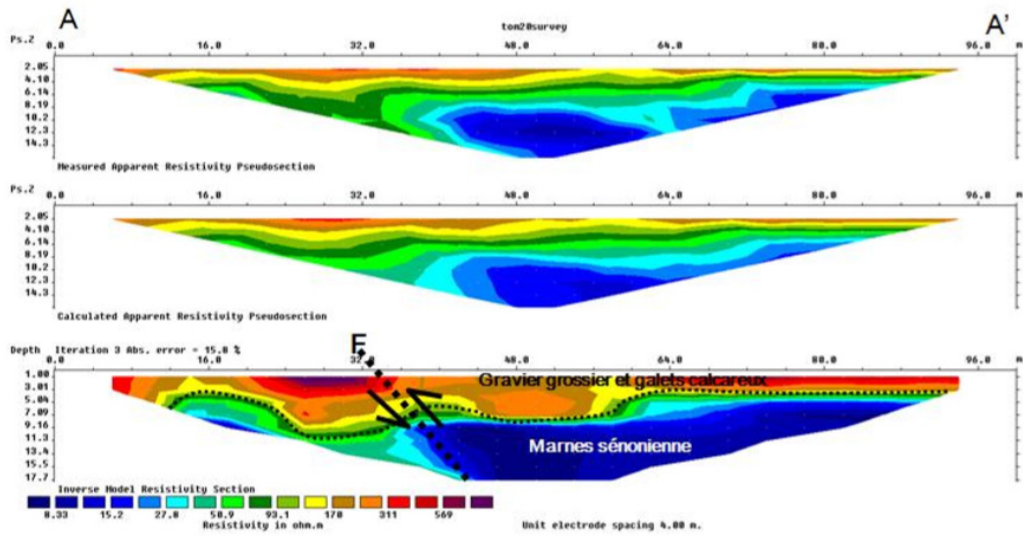
Parmi les sites choisis, nous avons pris le premier site (Figure 5):

- a. Site 1 : Coté de la source thermale de Youkous, où il a réalisé trois profils (AA', BB' et CC') (Fig.5)

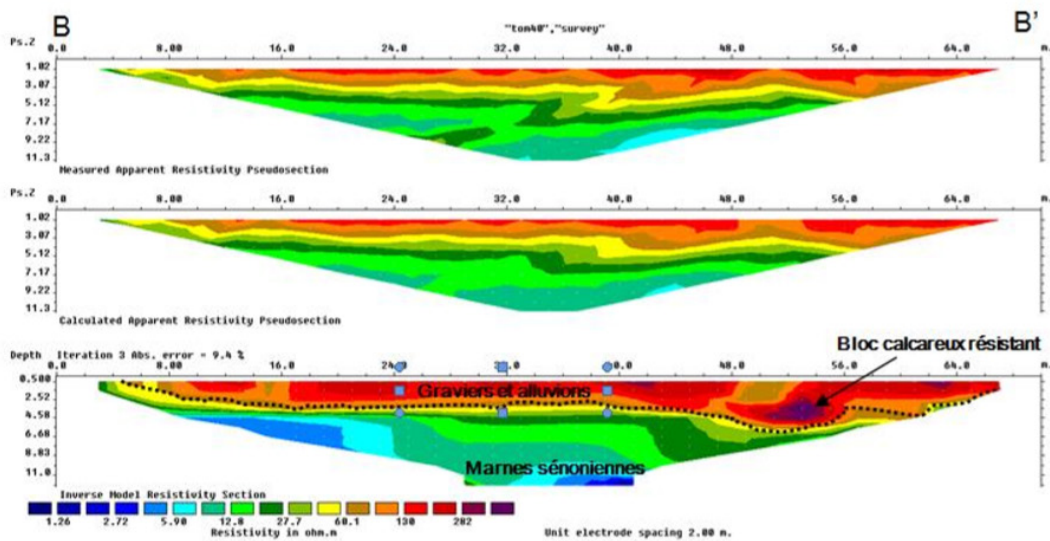


Figure 37: Localisation des profils de tomographie électriques. (Coté de la source thermale de Youkous)[ZAROUKKI, H. 2013].

- **Profil AA'** : Dans cette section, on remarque que la base se caractérise par la dominance des marnes sénonienne, surmonté par des alluvions contenant parfois des blocs calcaires, ce qui attire l'attention dans cette coupe de direction ENE-WSW (78°N), c'est le décrochement vertical marqué sur le substratum marneux, ces marnes se trouvent enfouies à une profondeur de 6m, avec des résistivités de l'ordre de 8 à 30 ohm.m. C'est une faille à rejet très visible, ce qui peut justifier l'apparition de la source thermale de Youkous.

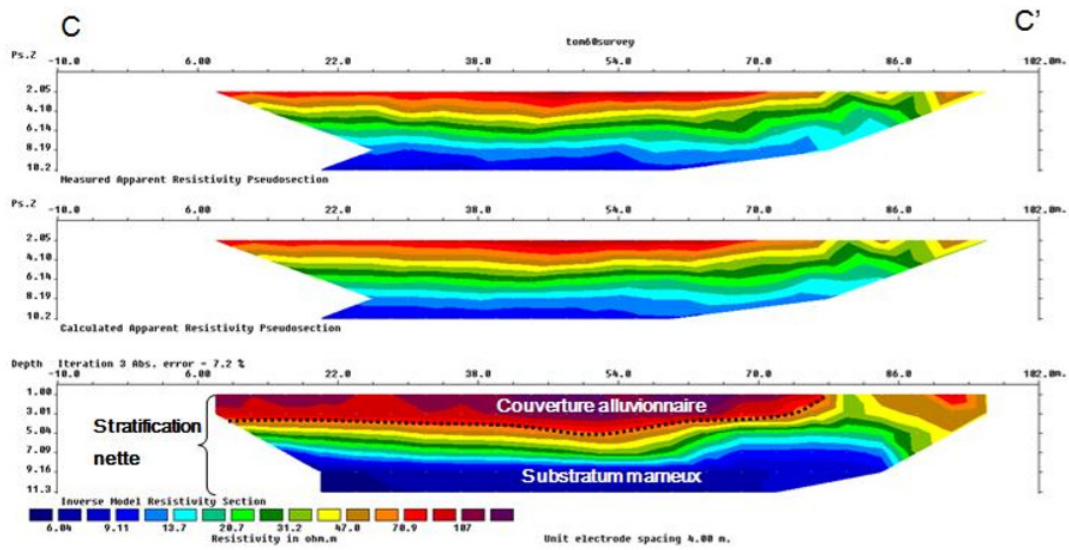


➤ Profil BB' :



Dans cette section de direction 177°N, nous distinguons un contraste de résistivité entre la couverture alluvionnaire comportant parfois des blocs calcaires et les marnes sous-jacentes, confirmant ainsi toujours la présence des marnes.

➤ Profil CC' :



Dans cette pseudosection, la chute progressive de la résistivité en fonction de la profondeur est exprimée par une stratification plus ou moins horizontale, commençant de haut en bas par la couverture alluvionnaire jusqu'au substratum marneux.

3 /Conclusion

Selon ces études antérieures, nous pouvons conclure que la source thermique de Hammam Youkous trouve son émergence suite à une faille de décrochement affectant le substratum marneux et qui est couvert par les alluvions de quaternaire.

L'hydrogéologie

Hydrogéologie de Hammamet et conditions d'alimentation de la source thermale de Youkous

1/ Introduction

L'étude hydrogéologique montre que la zone d'étude est composée de deux types d'aquifères :

- le premier est constitué par les calcaires fissurés (karstifiés) formé par les massifs qui bordent le fossé et les blocs effondrés de ces mêmes formations.
- Le second est poreux et constitue le remplissage quaternaire dans la plaine.

Pour comprendre, le mécanisme d'alimentation et l'origine de cet alimentation, de la source thermale de Youkous, nous avons fait une synthèse basée sur les principales études antérieures qui ont été faites sur la zone d'étude.

2/ L'étude des cartes piézométriques

Selon la carte piézométrique établie par SAMOUN FATAH, 2011, les courbes isopièzes montrent une allure parallèle dans les bordures Sud-Ouest de la zone de Ain chabro ce qui montre l'alimentation souterraine de cette entité par les eaux venant du Dj.Estah. par contre , dans la partie amont allant du Hammam vers la grotte les courbes sont devenues perpendiculaires ce qui montre l'absence d'alimentation par ces bordures (Figure 1)

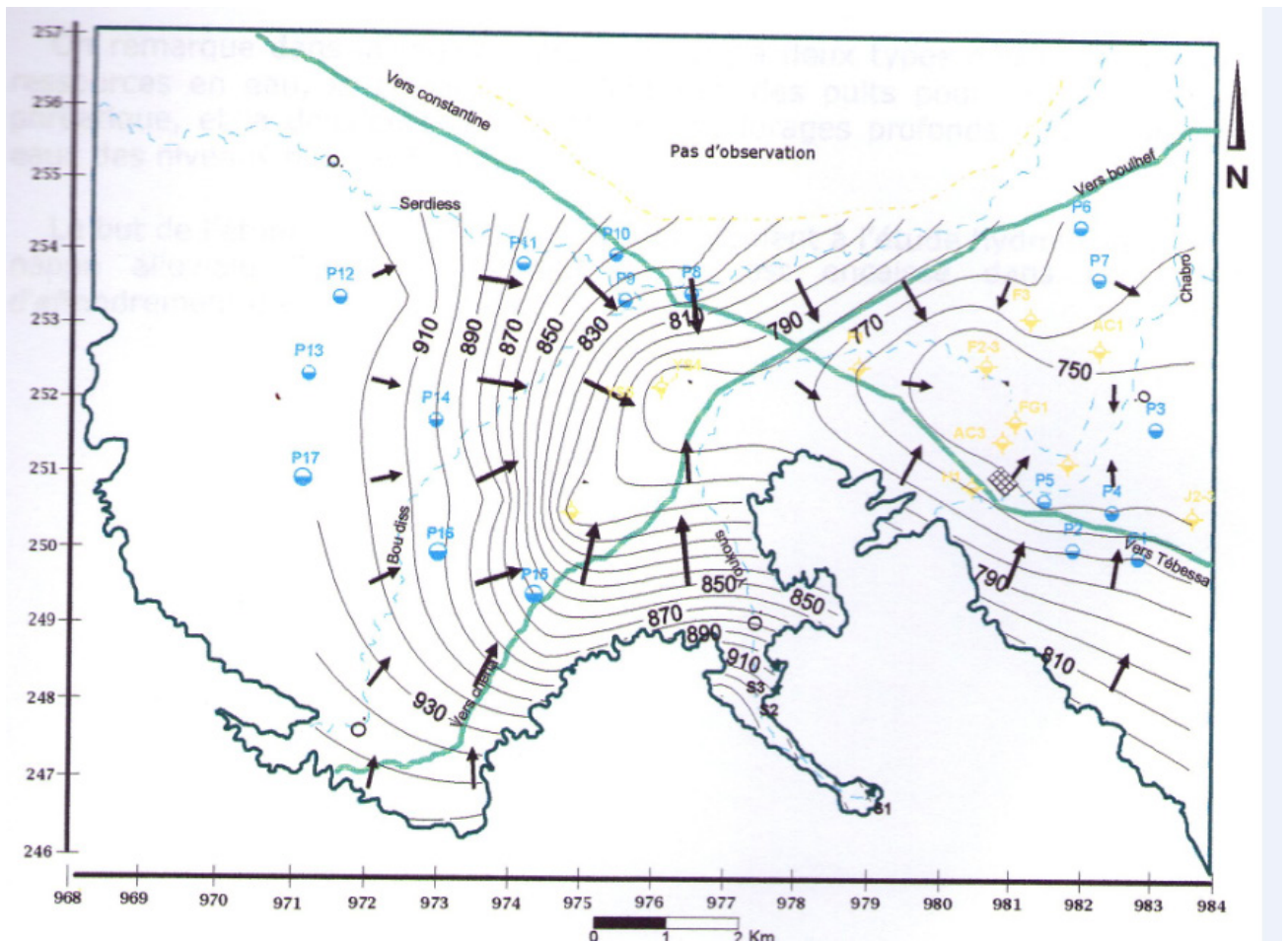


Figure 38: carte piézométrique de la zone d'étude mai 2008. In Beriani 2008 [in SAMOUN F 2011].

3/ Conditions aux limites du champ captant Ain chabro :

Ce champ captant est situé au Nord Est du Dj STA H et la zone de la source thermique. Il s'agit d'une sédimentation quaternaire continentale. Sur une épaisseur d'environ 170 m ce sont des cailloutis et galets calcaires du crétacé supérieur. Une matrice très argilo détritique est présente sur des épaisseurs variables et à certaines cotes. Au delà, dans la partie inférieure il s'agit d'argiles détritiques contenant des cailloutis calcaires de petit diamètre (> à 10 mm). A l'Est et au Sud, ces formations quaternaires viennent en contact par failles normales avec les couches calcaires du Turonien moyen (selon G. Durozoy). A noter que le secteur de Hammamet est le carrefour de tris accidents tectoniques important à savoir :

- la faille inverse de Boulhaf NE-SO.
- le système de failles normales de la bordure du fossé (par ex. ici contact quaternaire, Turonien moyen).
- une faille Nord-Sud qu'emprunte l'Oued Bouakkous qui abaisse le compartiment Est et décroche le Turonien.

La présence de la source thermique de Hammamet captée depuis les Romains n'est pas sans liaison avec ce système d'accidents.

Au Nord et au Nord Est et dans les autres directions la sédimentation des cailloutis varie en épaisseurs et se biseaute aux profits des formations plus imperméables.

- Drainance
- variation spatiale de T et S.

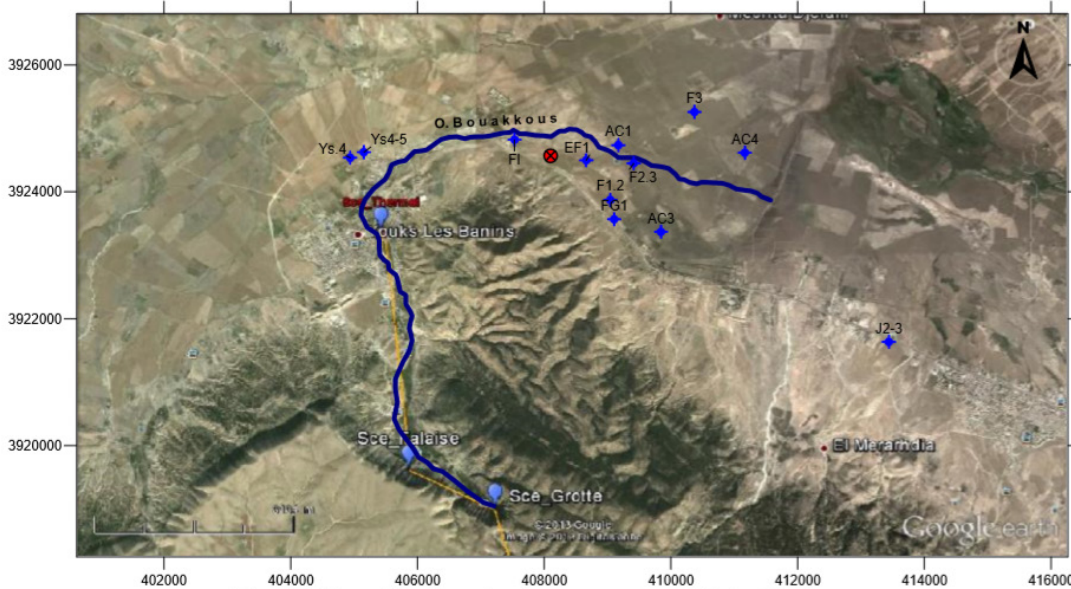


Figure 39: Localisation du champ captant d'Ain chabro par rapport à la source thermique [in ZAROUKKI H 2013].

4/ Identification hydrogéologiques des sources étudiées :

Le réseau souterrain du plateau de Tazbent n'est pas connu. La dispersion de l'énergie, par l'absence de concentration des écoulements, n'est pas apte à créer de grandes cavités. Les avens, qui sont des successions de puits verticaux et de galeries en méandres due à la tectonique et à la décompression, forment des collecteurs qui drainent des volumes d'eau important.

Les formes de reliefs caractérisées parfois par des fortes pentes, le soutirage des eaux par des exutoires très bas, la structure géologique et la décompression, favorisent l'installation de réseaux à grandes circulations verticales. Ils donnent naissance aux sources décrites plus bas.

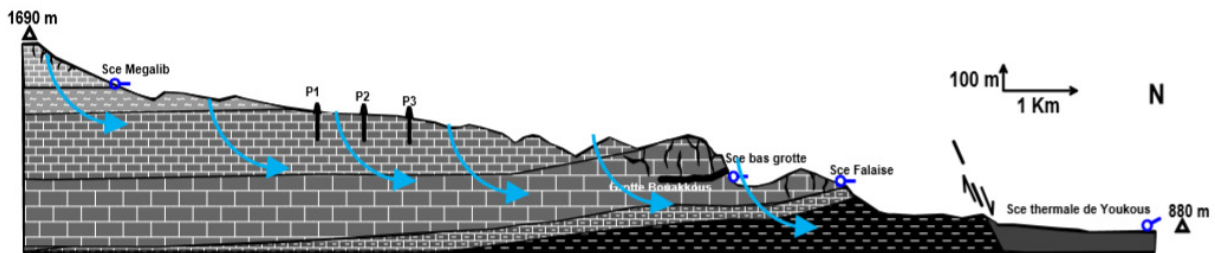


Figure 40: coupe présentant les sources froides et la source thermale de la région de Youkous-Hammamet [in ZAROUKKI H 2013].

5/ Conditions hydrogéologiques d'émergence de la source thermale de Youkous les bains-Hammamet :

La source thermominérale Youkous les bains de Hammamet est située sur la rive droite de Oued Bouakous, à environ 150 m du pont. La position de l'émergence vraie de la source étant toujours inconnue jusqu'à présent, elle est située aux coordonnées géographiques (Lat 35° 27' 01,9'' N et Long 7° 57' 27'' E) soit en coordonnées Lambert: X = 977,15Km, Y = 252,05Km et une altitude H = 878m (figure 3)

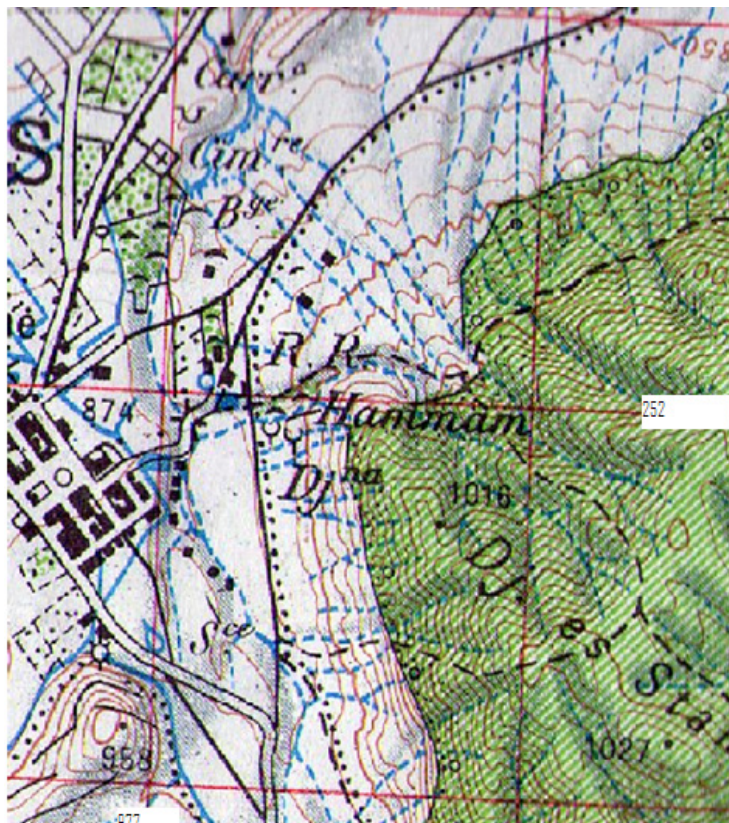


Figure 41: Position de la source thermo minérale sur la carte topographique de youks les bains)[SAMOUN F 2011].

La source dont l'émergence est cachée par les alluvions alimente un premier réservoir qui se déverse dans un deuxième bassin couvert d'où est prélevé un débit de 2,5 à 3l/s, de jour par gravité vers le hammam et les pépinières, et par pompage pour remplir les réservoirs du centre de repos des moudjahidines et ceux d'un bain maure la nuit après fermeture dudit hammam.

De part et d'autre des réservoirs réalisés par les services des mines Français avant 1939, se trouve des vestiges de thermes romains et des ruines comportant une piscine tapissée de mosaïques que les habitants appellent « hammam essoltan » - bain du sultan (Figure 4)



Figure 42: environnement restreint du hammam (des thermes) le point bleu positionne l'émergence chaude. Photo satellite [SAMOUN F 2011].

Durant l'époque coloniale, et jusqu'à l'élargissement de la route, le hammam comptait deux pièces pour « les indigènes » détruites pour y faire passer la route, et quatre pièces pour « les européens » détruites pour y construire l'actuel hammam.

La Figure 5 montre la position de la source thermale par rapport à la ville de Hammamet et au Djebel Stah.



Figure 43:Le point d'émergence de la source thermale de Hammamet se situe au nord ouest de la terminaison de dj. Stah. [SAMOUN F 2011]

Les parois du premier réservoir (figure 6) où surgit la source thermominérales ne présentent aucun indice de dépôt de sels minéraux autant que je m'en souviens, l'eau en s'écoulant n'abandonnait aucun dépôt particulier elle était aussi d'une parfaite limpidité et n'avait pas d'arrière-gout spécifique [SAMOUN F 2011]

On n'a constaté aucune protection de la source thermominérales. Les réservoirs sont fortement fissurés.



Figure 44: le fond et les parois du premier réservoir de la source thermale de Youks les bains [SAMOUN F 2011].

A : cadre structurale : Ce cadre structural, où la tectonique cassante joue un rôle essentiel, est bien illustré par la position de l'émergence thermique à proximité de l'intersection d'un important accident subméridien N150 qui correspond à l'axe du sous bassin versant de Oued Bouakous et d'un ensemble de galeries karstiques de direction subatlasique (figures 7 et 8).

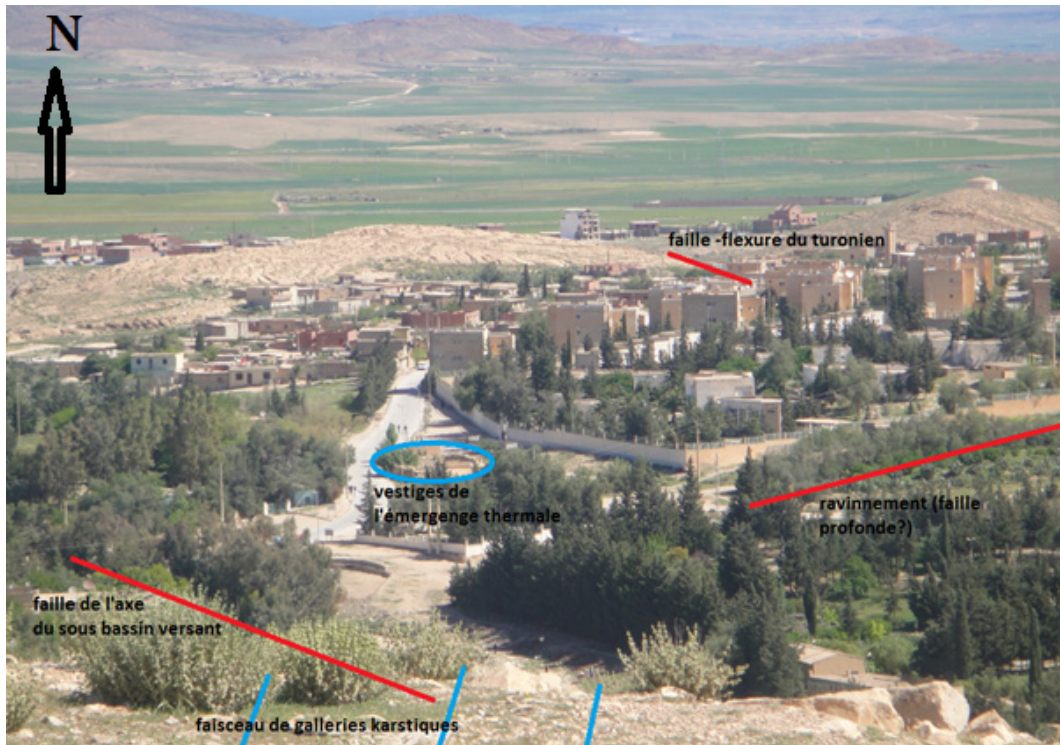


Figure 45: photo prise du haut de la colline (958) nord montre les alentours immédiats de l'émergence chaude de Hammamet. [SAMOUN F 2011].

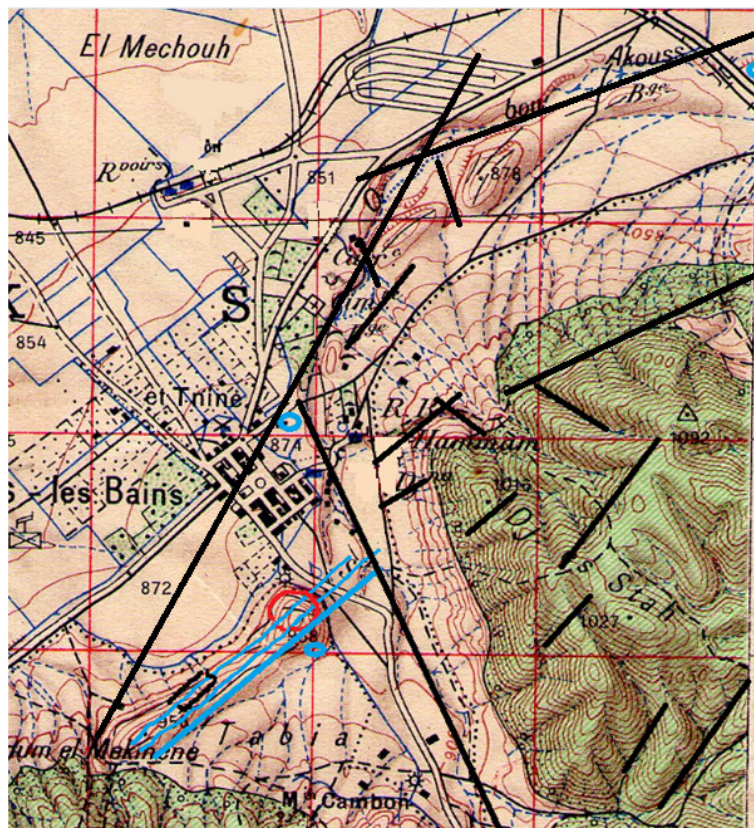


Figure 46: Extrait de carte structurale de la zone d'émergence [SAMOUN F 2011].

L'intersection d'un faisceau de galeries karstiques d'orientation préférentielle NE-SO qui passe par les deux dômes de côte 958 et traverse la formation triasique avec la faille de oued bouakous à quelques centaines de mètres de l'émergence thermique.

b. Bloc diagramme de Bouakous

La source thermominérale pourrait être issue de l'intersection de galeries karstiques du Turonien et de la faille de oued Bouakous. Comme indiqué sur le bloc diagramme suivant (figure 9)

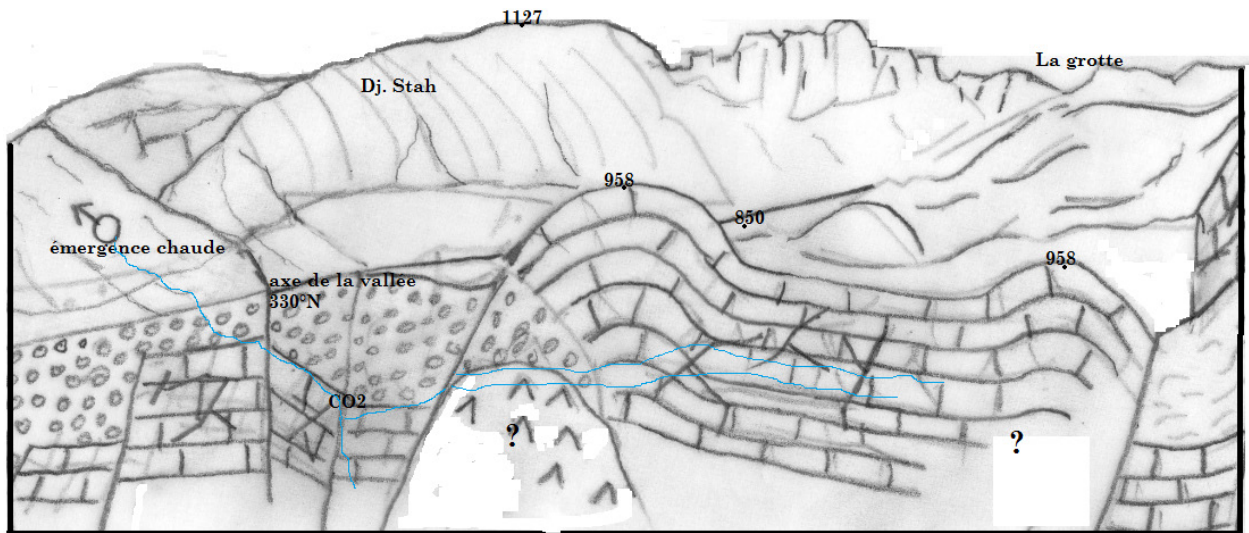


Figure 47: Bloc diagramme de la vallée de Bouakous[SAMOUN F 2011].

Trois hypothèses de fonctionnement de la source thermo minérale de Youks les Bains ont été retenues :

Le Thermo-syphon :

- a. **Profond** : Il aurait pour zone d'alimentation Djebel Anoual et plongerait (selon son pendage 25° sur une distance de 12 Km) jusqu'à une profondeur de 5000 à 6000m où l'eau serait soumise à une température de 230°C avant de remonter vers un point où une des faille-flexures (Figure 3) qui bordent le turonien lui permette de se mélanger aux eaux de surface qui, en quantité bien plus importante lui attribuent leur caractère.
- b. **Peu profond** : La profondeur diminuant ainsi (1000 à 2000m) entraîne la baisse de température dans le réservoir supposé (jusqu'à 70°C) la différence sera compensée, par un apport de gaz d'origine profonde à travers les failles au niveau des réservoirs pas assez profonds. (Figure10)



Figure 48: L'apport de gaz des profondeurs compenserait la température acquise par effet du gradient géothermique [SAMOUN F 2011].

L'existence de faille flexure au niveau de l'affleurement des calcaires du Turonien permet de supposer que le mélange des eaux froides de surface avec les eaux ascendantes chaudes pourrait se faire selon l'idée émise par Trudgill (2002) comme le montre ce bloc diagramme extrait de la thèse de Duriez (2006) - Figure 11.

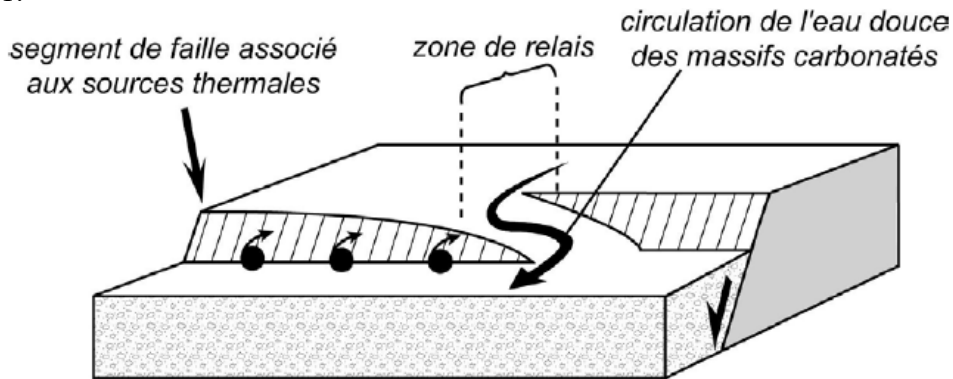


Figure VIII- 6 : Bloc diagramme illustrant la circulation de l'eau douce des massifs carbonatés au travers des zones de relais de failles. L'eau douce emprunte préférentiellement la rampe du relais de faille pour passer les accidents à jeu normal. Les sources thermales de Kamena Vourla dans ce contexte sont figurées. Extrait de Trudgill (2002) ; modifié.

Figure 49: Faille flexure par laquelle pourrait se faire le mélange des eaux profondes avec les eaux superficielles dans les formations carbonatées (Alban Duriez thèse 2006) [SAMOUN F 2011].

La faille unique :

a- ce cas aurait pour zone d'alimentation la grotte de Bouakous et ses environs, ces eaux se mélangeraient aux eaux issues des galeries karstiques du Turonien.

b- L'eau du maestrichtien descend à travers la faille en amont, jusqu'à une certaine profondeur où elle rencontre les gaz (et vapeurs) remontant, elle est alors réchauffée et entraînée vers la surface tout en gardant son caractère d'eau de surface.

Le cas complexe : Rien n'empêche que les eaux infiltrées au niveau de Dj Anoual ressortent par la faille de Oued Bouakous où elles se mélangeraient avec les eaux issues de la grotte et celles drainées par les canaux karstiques sous la carrière et la colline 958.

6/ Tariessement de la source thermale Youkous les Bains – Hammamet

La source thermale en question était disparu (devenue seche) pendant une longue période (entre 1995-2016)

Selon les travaux réalisés par SAMOUN FATAH en 2011, Le tariessement est probablement du à :

- des fissurations dans la canalisation
- Une diminution de la surface de contact eau roche suite à un encrouement des parois
- La mort du drain qui était en contact avec les gaz et les produits remontant
- Un élargissement de l'une des chambres de décompression successives au point de ne plus permettre la continuité de l'ascension des fluides chauds
- L'influence des explosions de la carrière sur l'une des phases du circuit hydrothermal ; alimentation, chauffage, mélange ou remontée

- Le forage de l'usine et le forage F1 par cumule d'influences (surtout le premier situé en amont).
- Le Tariessement par auto-colmatage est jugé très peu probable.

Mais, en 2015, les responsables du centre de repos des Moudjahidine situé dans la même zone que la source thermale et le Hammam salehine, ont demandé des autorités locales, notamment, l'Hydraulique de la wilaya de Tébessa de faire une prospection géologique et géophysique et hydrogéologique juste à coté du centre pour forer un nouveau forage pour alimenter le centre (Figure 12).

L'étude a été effectuée, et une prospection géophysique a été réalisée et les résultats ont été positifs, et le forage FYK2 est maintenant en fonction.

Ce forage a une profondeur 170 m

Le débit est 20l/s

La température des eaux est 35°C

Qualité hydrochimique des eaux : Bicarbonaté calciqu

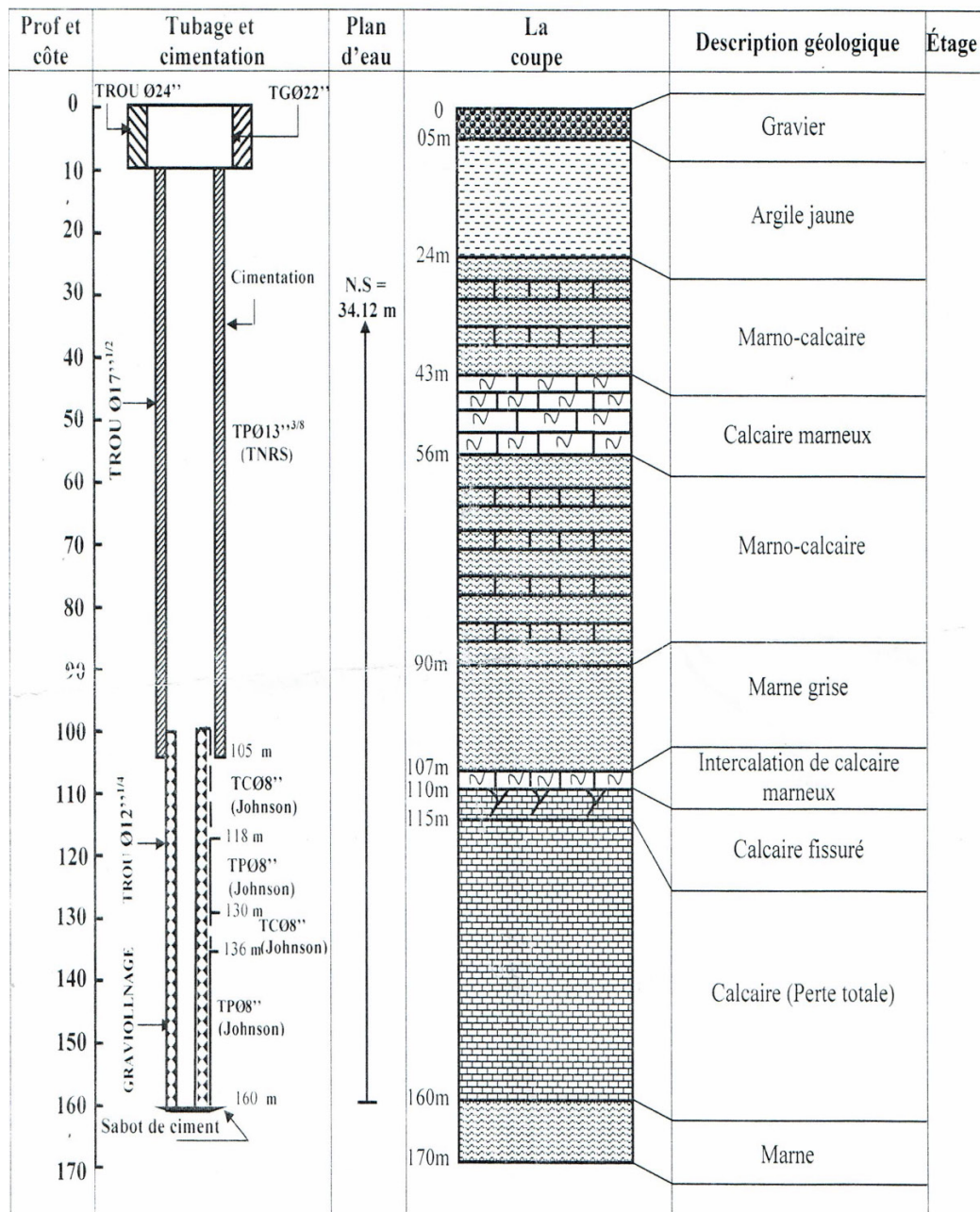


Figure 50: Colonne stratigraphique du forage F YK2 (DHW, Tébessa, 2016].

6/ Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous pouvons conclure que la source thermique de Youkous les Bains est une réponse claire des événements tectoniques et structuraux qui se déroulaient dans la zone d'étude. Cela, a été montré par les coupes géoélectriques réalisées.

Malgré tout ces travaux et les hypothèses proposés, le point initial d'émergence de la source thermique reste inconnu et les causes de son tarissement le sont aussi. Le nouveau forage qui capte une nappe profonde dans les calcaires Turonien, et les eaux chaudes qui remontent avec une température arrive jusqu'à 37°C en Hiver nous laisse supposer que la source était alimenté par les eaux de cette nappe et suite à une diminution de pression et/ou élargissement du canal hydrothermale que l'émergence ou la remonter des eaux chaudes a été arrêté et la source est taris.

L'hydrochimie

Qualité chimique des eaux thermominérales

1/Introduction

L'étude hydrochimique des eaux permet de déterminer la potabilité de l'eau, de classer les point d'eau selon leur chimisme, et de comparer les point d'eau entre eux.

Dès que l'eau touche le sol il s'établit une relation eau roche (séries de réactions) dont le résultat est l'acquisition d'une certaine minéralisation de l'eau qui témoigne de son évolution au travers des milieux qui lui ont donné chacun des éléments indice de leurs conditions d'existence en profondeur.

Vu que nous n'avons pas pu faire des analyses chimiques récentes pour les eaux thermales du Hammam, à cause du manque des réactifs et les conditions défavorables ; nous allons présenter dans ce chapitre une synthèse des données et travaux hydrochimiques des études antérieurs et d'essayer de les comparer et tirer des conclusions possibles.

1/ Ancienne étude hydrochimique

Pour ce qui est de la source thermo minérale de youks les bains, on a pu récolter trois échantillons analysés par différents laboratoires [SAMOUN F.2011] :

- Les analyses laissées par Melle Simone Guigue (1941) ont été longtemps les seules à représenter ce point d'eau.
- Les prélèvements effectués par Madame Dib en 1979 trouvées dans le mémoire N°11 du service géologique national (2008).
- Des analyses effectuées au centre de recherche scientifiques de l'université du Québec.

Ces trois analyses (Tableau 1) ont donné les classifications suivantes à l'eau de leur source ; « *sulfurée calcique* » pour la première où le gaz libre H₂S et le gaz libre CO₂ ont été quantifiés, et « *Bicarbonatée calcique* » pour les deux suivantes, (Si madame Dib a signalé la présence du H₂S, elle ne l'a pas quantifié mais elle mesuré le Strontium qui s'est avéré très important).

Date	T	pH	TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃ CO ₃	Reference
1941	35	/	431	92,4	35,31	20,92	2,55	28,40	45,95	191,7	S. Guigue
1979	35,2	6.4	591	94	25,8	14,72	1,56	61,06	54,72	323,3	H. Dib
1983	34	7,56	450	80	29	14,6	0,9	19.6	51	274	CRS Quebec

Tableau 14: analyses chimiques de l'eau de la source thermo minérale de Youks les bains.

On constate que :

- Tous les éléments chimiques fluctuent sauf Na et K qui décroissent clairement avec le temps.
- L'échantillon de 1941 a été prélevé le 08 mai « en période des hautes eaux ».
- L'échantillon de 1979 a été prélevé le 12 juillet « en période des basses eaux ».

2/ La représentation graphique

Nous avons reporté les résultats d'analyses sur le diagramme Piper et sur le diagramme de Schoeller Berkaloff pour voir la qualité chimique des eaux de la source youkous les bains. Les trois échantillons ont montré un faciès Bicarbonaté calcique (Figure 1,2)

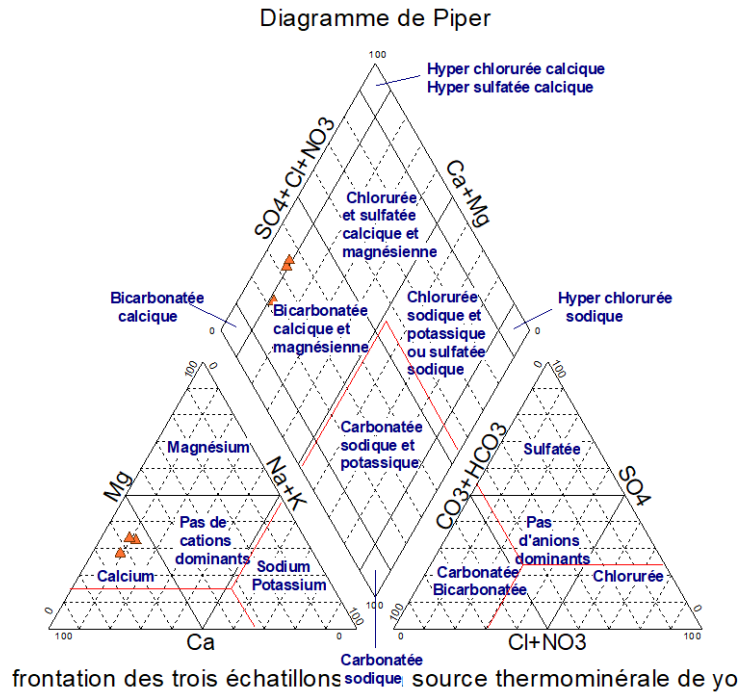


Figure 51: Confrontation des trois analyses entre elles sur le diagramme de Piper.

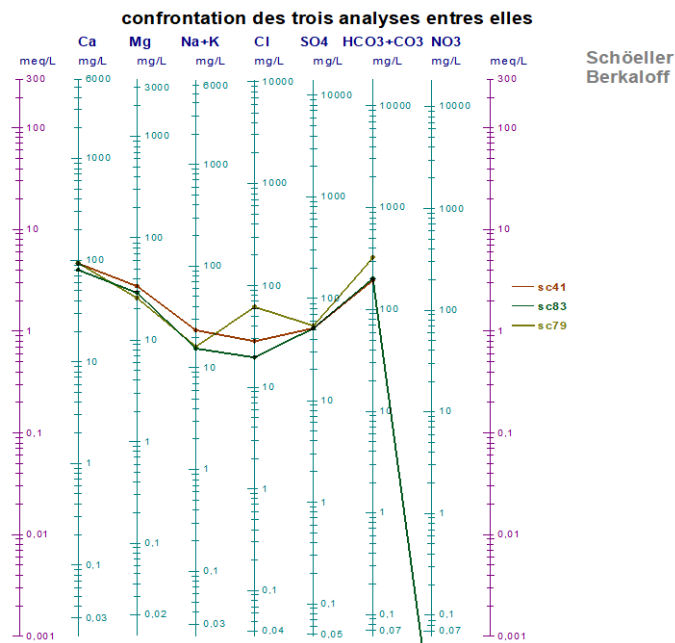


Figure 52: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les trois échantillons.

3/ Comparaison des données chimiques de la source thermale avec les eaux des sources froides qui existent dans la région de Youkous

La comparaison des données chimiques des eaux des sources froides, qui existent dans la région de Youkous les bains (sources du maestrichtien de Hammamet), représentées dans le Tableau 2, a permis leur confrontation avec les échantillons de la source hydrothermale. Ce qui a donné le résultat en figures 3,4.

Date	T	pH	TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3 CO3	Reference
S. djedida	/	/	395	60	07.64	07	04	33.72	33.00	183.5	2004
S. Gaagaa			451	64	14.5	13	04	62.12	39	277.5	Samira 2011
S. Ammacha			506	65	43.45	13	06	13	26	160	Samira 2011
Grotte			283	68	08	08	/	17	22	160	2004

Tableau 15: données sur les eaux de surface (sources du maestrichtien de Hammamet)[SAMOUN F 2011].

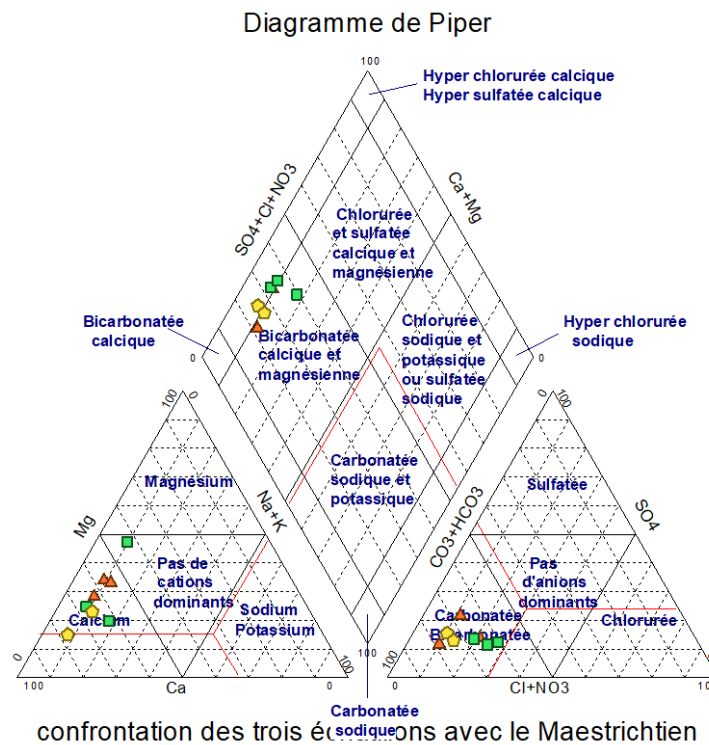


Figure 53: Confrontation des trois analyses avec les aux du Maestrichtien sur le diagramme de Piper.

Légende : Orange – eau thermale, Jaune – eau de sources Maestrichtien ech 2004, Vert - eau de sources Maestrichtien ech 2011.

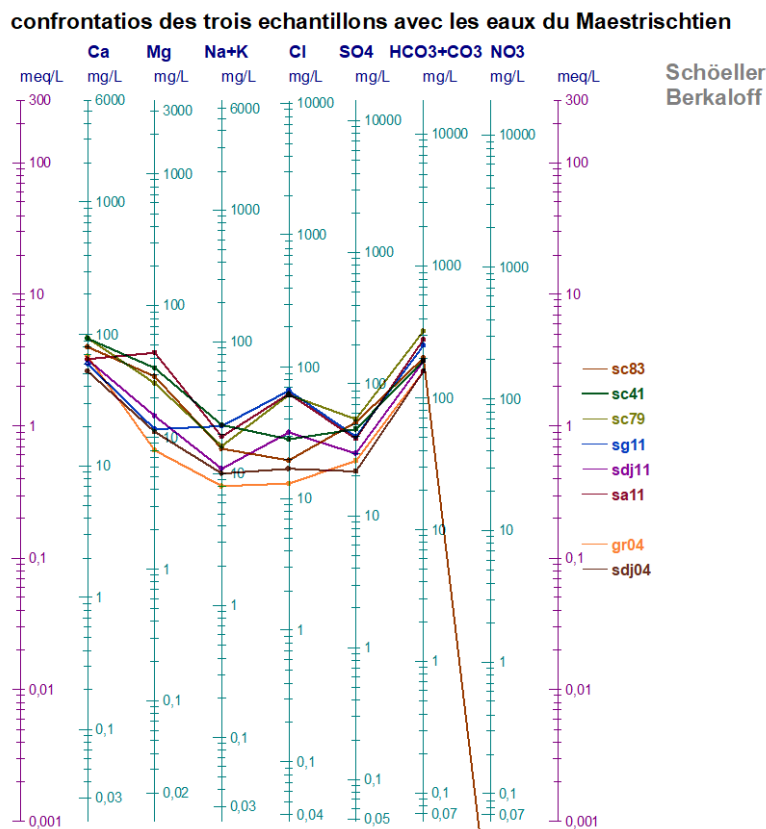


Figure 54: confrontation des trois analyses avec les aux du Maestrichtien sur le diagramme de Schoeller Berkloff.

Les deux diagrammes montrent que les eaux froides et les eaux de la source thermo-minérale présentent le même faciès chimique (Bicarbonaté Calcique), ce qui nous laisse supposer qu'elles ont la même source d'alimentation (même origine)

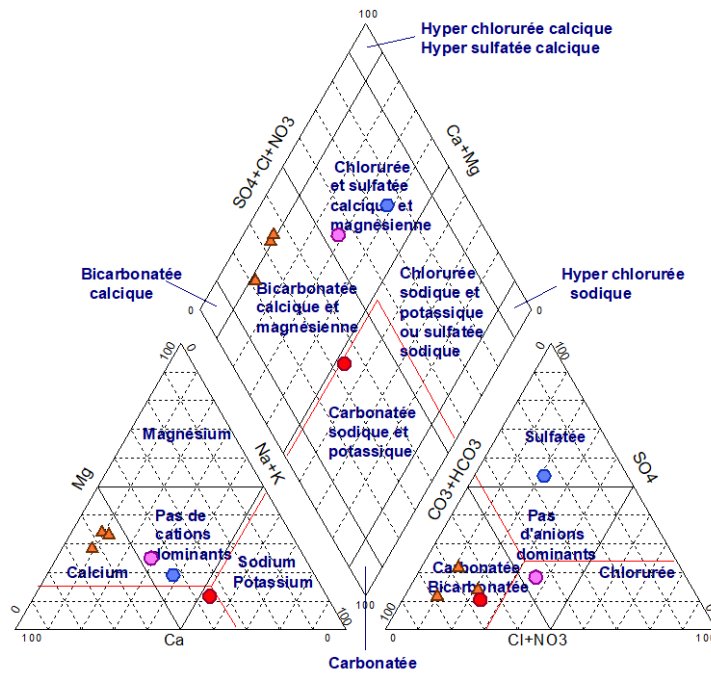
3/ Comparaison des données chimiques de la source thermique avec les eaux des nappes d'eau semi profonde/Profonde

L'acquisition de données sur les eaux d'une profondeur allant jusqu'à 200m (forages intéressants), représentées dans le Tableau 3, a permis leur confrontation avec les échantillons de la source hydrothermale. Ce qui a donné le résultat en figures 5 et 6.

Forage date	T	pH	TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3 CO3	Reference
Essen 84	/	7.4		150	40	144	15	145	500	299	
Abat80	/	/	638	60	48	98	8	115	70	275	
FT1	19.7	7.33	325	68	22.2	48	/	97.8	67.2	210	Loukam

Tableau 16: Données sur les eaux d'une profondeur allant jusqu'à 200m.

Diagramme de Piper



ntation des trois échantillons a sodiques eaux semi profondes Maestr

Tableau 17: Diagramme de Piper. (Légende :Orange – eaux thermales, Bleu - forage turonien Dj. Essen, Rose – forage F1 Maestrichtien effondré, Rouge – Forage dans les alluvions (marnes - graviers –galets) 200m à l'Ouest de l'émergence chaude.

confrontatios des trois echantillons avec les eaux semi profondes

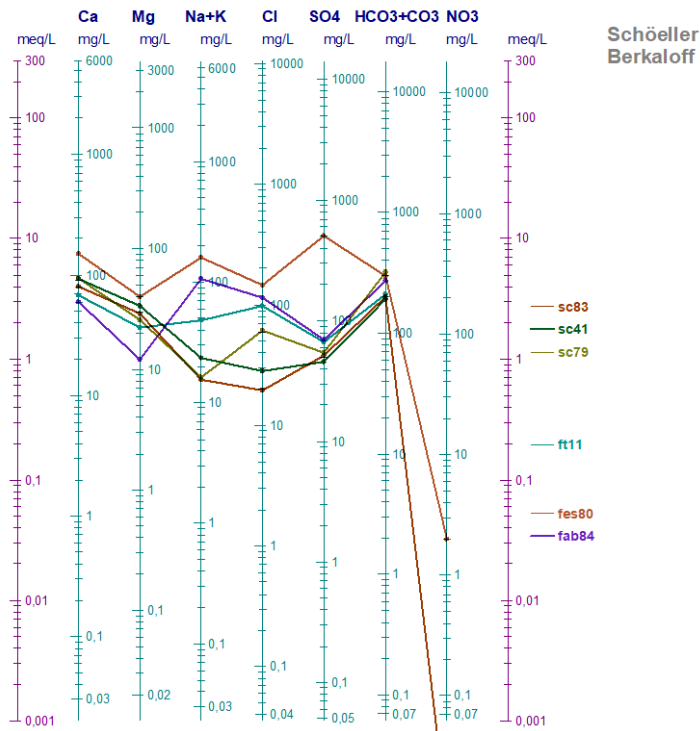


Tableau 18: Diagramme de Schoeller Berkloff.

Les diagrammes cette fois montrent une différence de faciès entre les eaux de la source chaude et les eaux des forages choisis. Cela est peut être du à la nature géologique du réservoir d'eau de la nappe souterraine.

3-1 / Comparaison entre les eaux de la source chaude et les eaux du forage récemment foré (FYK2) :

Cette fois nous avons pris les analyses du Forage (FYK2) réalisées en 2016 (Tableau 4) et les a représenté sur les diagrammes de piper et Scholler-Berkalof (Figure 7,8)

Date de prélèvement	Prof de la nappe	Teneur en MG /L							PH	C is/cm	R.S	Q (i/s)	S iii
		Ca	Mg	K Na	Cl	So4	HCo3	No3					
13/07/2016	160 m	79.91	24	13 1	35	64	262.30	1	7.20	630	430	20	18.88

Tableau 19: Caractéristique physico-chimique (Centre de repos El-moudjahidine- El Hammamet-Tébessa).

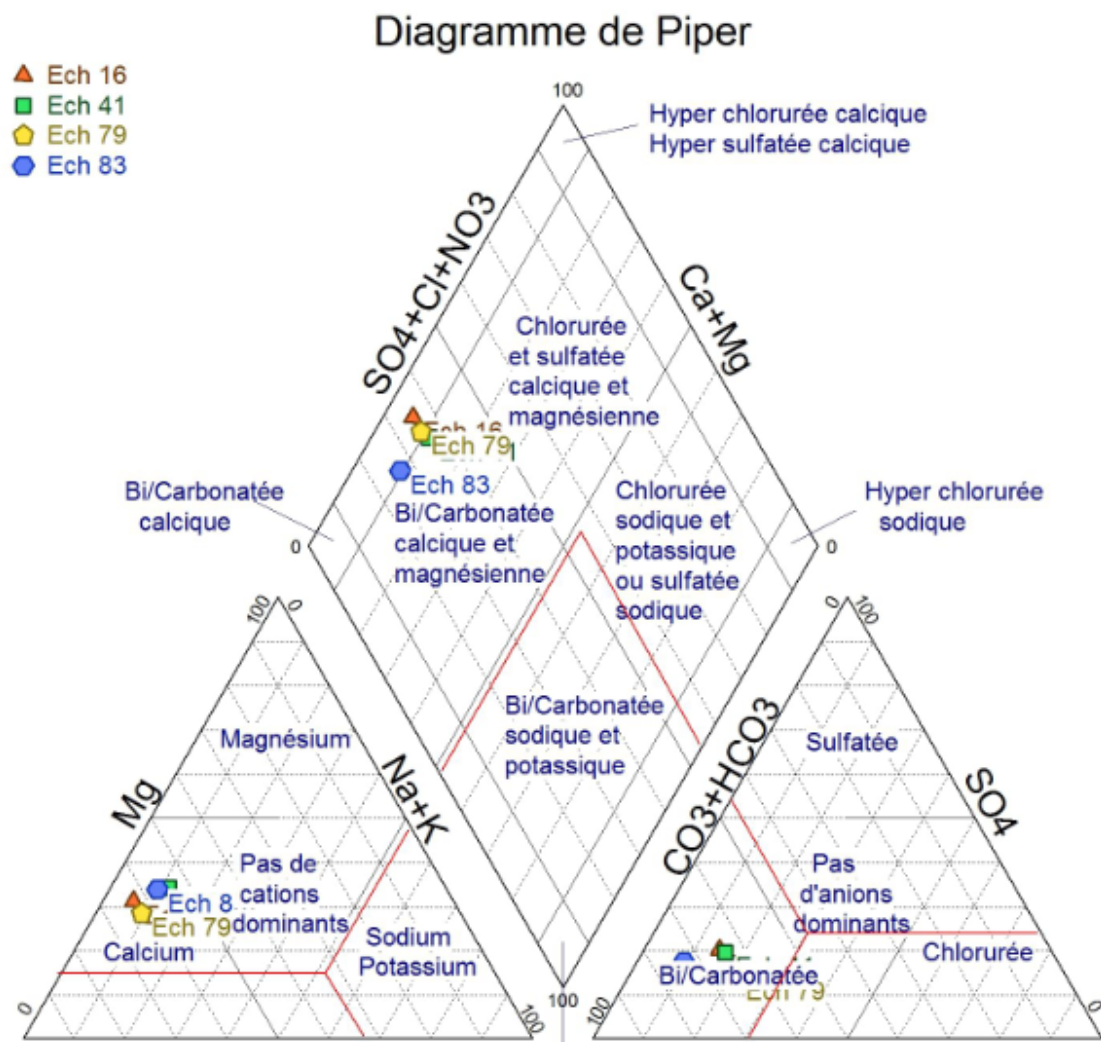


Figure 55: Diagramme Piper représentant les eaux de la source thermique et les eaux du Forage (FYK2) .

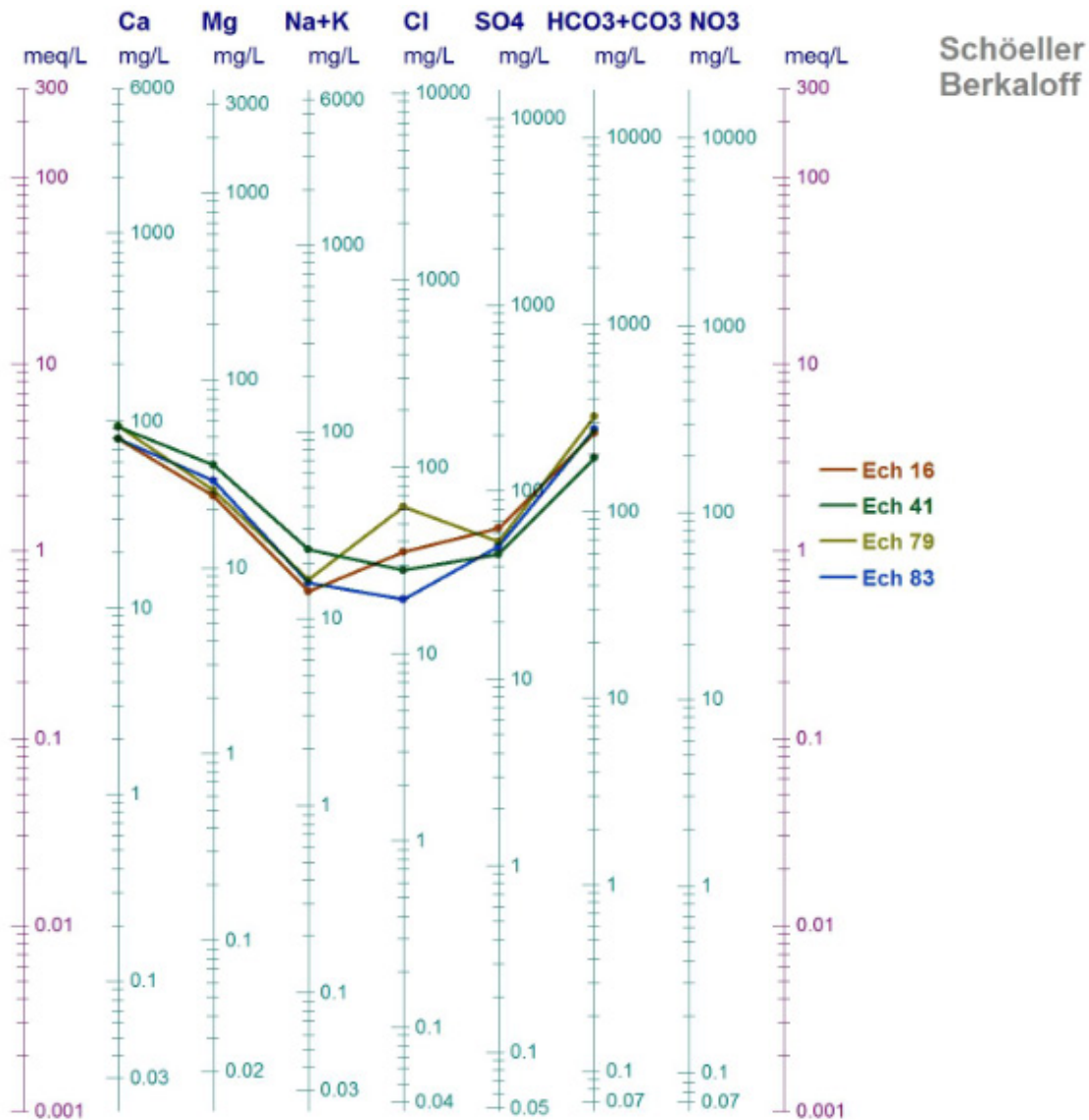


Figure 56: Diagramme Scholler-Berkalof représentant les eaux de la source thermique et les eaux du Forage (FYK2) .

Les deux diagrammes montrent que les eaux ont le même faciès chimique, cela nous laisse dire que l'alimentation de la source thermique était assurée par les eaux provenant de cette nappe.

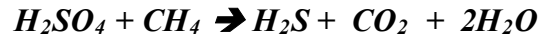
En **conclusion** de cette phase, on constate que les trois échantillons de la source thermo-minérale s'apparentent mieux aux eaux des sources froides et les eaux du Forage (FYK2).

4/ L'origine des gaz libres CO2 et H2S

Selon l'étude établie par Mme DIB, 2008, les eaux de la source thermo-minérale de Youkous Les Bains est caractérisée par la présence de l'hydrogène sulfuré provenant de la réduction des sulfates par les matières organiques. Et qu'elles renferment aussi des quantités notables de gaz carbonique qui favorise la mise en liberté de l'hydrogène sulfuré.

a. La réaction chimique proposée par Massonnat (1981) ;

Il est caractéristique de la source. Il provient d'une réduction des sulfates (obtenues par lessivage du Trias) sous l'action de bactéries anaérobies ou des matières hydrocarburées contenues dans les sédiments liasiques (Massonnat 1981):



b. La réaction chimique proposée par Simone Guigou (1941) ;



« Selon monsieur Kalla A. du labo de chimie : « la réaction est déclenchée dans des conditions de température très élevée et cela est valable aussi pour le CaSO₄ :

« Que ce soit CaS ou CaSO₄, en présence de l'eau et du dioxyde de carbone la réaction exothermique qui donne H₂S s'amorce dans des conditions de température très élevées plusieurs centaines de degrés »

Vue la température d'émergence de la source thermominérale de Hammamet (35°C) ; l'eau qui a subi la réaction a sûrement été refroidie par mélange avec une eau froide (superficielle).

Conclusion du labo de chimie par le biais de Monsieur Kalla ali : Les grandes profondeurs ne sont le milieu naturel du H₂S, Il est le produit de réaction et il doit en être vite éjecté vers un environnement moins hostile. »[SAMOUN F 2011]

Le gaz carbonique est peu soluble par température élevée et a tendance à se dégager de l'eau.

Par mauvais temps la pression est basse et l'eau se charge de CO₂ qui entraîne le H₂S dont l'odeur est alors plus forte. Le CO₂ provoque un allègement de l'eau thermale et accélère sa remontée vers la surface mais sa détente adiabatique provoque un refroidissement de cette dernière.

L'origine du CO₂, qui peut être multiple, ne peut être déterminée que par les analyses isotopiques par dosage du C 13.

Ne disposant pas de telles données, on énumère les diverses origines possibles et on élimine les incompatibles avec notre cas :

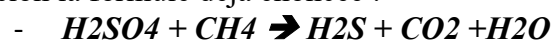
a. Origines exogènes :

- Météorique : l'atmosphère et par conséquent, les eaux météoriques contiennent du CO₂, mais en quantité insuffisante.
- La dissociation des bicarbonates par la réaction :



Ne peut fournir la quantité observée.

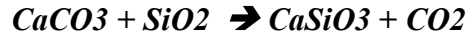
- La réduction des sulfates par les hydrocarbures, particulièrement le méthane produit du CO₂ selon la formule déjà énoncée :



assure au moins une partie de la quantité globale. (Massonnat 1981)

b. origines endogènes :

- L'origine volcanique : est évidemment impossible à Hammamet.
- L'origine magmatique : si elle est très peut probable, elle n'est pas exclue vu que les failles signalées dans la carte du substratum pourraient permettre la remontée d'un CO₂ profond.
- L'origine thermo-métamorphique : des pression et des températures importantes sur des niveaux carbonatés provoquent la libération de CO₂ suivant le processus :



Cette option n'aurait point été retenue, même si J.J.Risler et J.Maisonneuve (1979) ont opté pour elle concernant la source de Salins-les-Bains dans les alpes selon Massonnat (1981) si Mademoiselle Simone guigue (1941) n'avait signalé du SiO₃ dans ses analyses des eaux de la source thermominérale de youks les bains, vu l'absence de conditions apparentes qui pourraient donner naissance à de telles pressions et températures (tectonique compressive).

Dans le cas des eaux thermominérales de Bejaia le professeur issaadi (2004) a démontré l'origine profonde des gaz (CO₂ et H₂S) par analyse isotopique du C 13 et S 32.

5/ Actions thérapeutiques de la source thermales Youkous Les Bains :

Les eaux du Hammam salhine, qui est alimentée actuellement par les eaux chaude du forage (FYK2) depuis l'année 2016, est recommandées principalement dans les affections des reins, les maladies cutanées et rhumatismales et même la syphilis (DIB, 2008)

6/ Conclusion

A la fin de ce chapitre on peut conclure que :

Les eaux de la source thermale sont caractérisées par un faciès Bicarbonaté Calcique et qu'elles gardent ce faciès au cours des années depuis son émergence.

Une diminution du potassium et du sodium avec le temps ;

- Une plus grande ressemblance des eaux thermo-minérales avec les eaux des sources froides, ainsi que les eaux du Forage (YK2)
- Le H₂S pourrait être issu des Holokarsts ou des voix karstiques profondes car la nappe alluvionnaire de Hammamet ne donne pas signe d'en contenir.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail d'exploration sur la source thermale de Youkous Les Bains situé au Hammamet, W. de Tébessa, et le traitement des données recueillis nous permettent de faire une synthèse préliminaire globale sur les conditions d'émergence de la source thermale et l'identification de son contexte hydrogéologique et hydrochimique.

L'étude a permis de mettre en évidence :

- Selon l'étude géologique et structurale de la région de Hammamet, on peut dire que les formations géologiques à l'émergence de la source sont encore masquées et cachées par les formations quaternaires continentale qui forme la plaine de Hammamet et Tébessa (fossé d'effondrement) ;
- Les collines avoisinantes sont formées de calcaires crayeux du Sénonien ;
- Les formations triasiques sont également présents dans la zone d'étude et qui peuvent influencer sa qualité chimique;
- La source thermale a été taris depuis plus de dix ans, et la cause principale de son tarissement étant mal connu et des études ont fait l'objet de chercher les causes réelles de son émergence [SAMOUN F 2011],
- Une étude géophysique a montré qu'il y a une faille de décrochement dans la zone du Hammam thermale,
- Le faciès chimique de la source thermale est Bicarbonaté calcique,
- Les eaux de la source renferment de l'hydrogène sulfuré provenant de la réduction des sulfates par les matières organiques ;
- Elles renferment aussi une quantité notable de gaz carbonique qui favorise la mise en liberté de l'hydrogène sulfuré ;
- La minéralisation totale de la source est 591 mg/l ;
- Selon la température des eaux, elle est classée comme source hypo thermale ($T < 40^{\circ}\text{C}$)
- Le forage (FYK2) récemment foré dans la zone de Hammam thermale salhine (au niveau du centre de repos des Modjahidine), a une profondeur 170 m, a permis d'exploiter des eaux chaudes à $T=37^{\circ}\text{C}$, à débit important (20l/s), les eaux du Forage présentent presque, les mêmes qualités chimiques de l'ancienne source thermale,
- Cela nous laisse supposer que, le tarissement de la source est peut être dû à un soit à un élargissement du canal hydrothermal par dissolution ou mouvement tectonique, soit par un colmatage du drain thermale, qui diminue la pression d'ascendance des eaux thermales vers la surface.
- L'alimentation de la source thermale était assurée par une nappe captive profonde.

L'existence d'un patrimoine important des sources thermo-minérales dans notre région exige une action concertée et intégrée entre les principaux secteurs que sont les collectivités locales, les structures de la santé, du tourisme, l'Energie et des Mines ainsi que celles des Ressources en Eaux. L'assistance du ministère de Culture serait également d'une grande utilité pour la protection des sites archéologiques et ce qui reste des thermes romains [Dib,H, 2008]

Finalement nous recommandons de prendre ces patrimoines précieux en considération et si possible de les réhabiliter pour profiter de ses caractéristiques thérapeutiques.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

Carte Topographique de la région de Hammamet, N°205,

BOUAICHA Foued ; 2018 « LE GEOTHERMALISME DE LA REGION DE GUELMA », These de doctorat, Hydrogéologie, DEPARTEMENT DES SCIENCES GEOLOGIQUES.UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI – CONSTANTINE 1 –

Dib. H, 2008. Guide pratique des sources thermales de l'Est algérien. Editions du Service Géologique national (Alger): 106 pp.

Guefaifia Omar, 2007 « IDENTIFICATION ET CARACTERISATION D'UN MILIEU KARSTIQUE ET SA CONTRIBUTION A L'ALIMENTATION DU CHAMP CAPTANT : HAMMAMET - AIN CHABRO. CAS DE LA ZONE DE BOUAKKOUS- HAMMAMET.REGION DE TEBESSA » Thèse de Doctorat en Science, Université Badji Mokhtar ANNABA .

SAMOUN FATEH, 2011 «LE TARISSEMENT DE LA SOURCE THERMOMINERALE DE YOUKS LES BAINS CAUSES ET REMEDES » Mémoire de Master, département des sciences de la terre et de l'univers, Université de Tébessa.

SEGHIR Karima, 2008 « Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien) » Thèse de Doctorat en Science, Université Badji Mokhtar ANNABA .

ZARROUKI HICHEM, 2013 « ASPECTSQUANTITATIFSET QUALITATIFSDE LA SOURCE DE BOUAKKOUS:IMPACTSUR LE CHAMP CAPTANT D'AIN CHABRO (ZONE SEMI ARIDE TEBESSA) » Thèse de Doctorat en Science, Université Badji Mokhtar ANNABA .

Les annexes

Les annexes



Figure 57: Bain de romain (Dheraa elhammam-hammamet).

Les annexes



Figure 58: Forage



Figure 59: Bain (Hammam) en face de Centre de repos El moudjahidine