

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département : Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire en Vue de l'Obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Thème :

Les systèmes karstiques de la région de Hammam Debagh (Wilaya de Guelma). Caractérisation et étude hydrochimique.

Présenté par :

ALLIOUI Idriss

BENCHABANE Ibrahim

BOUMENDJEL Moncef

Soutenu le : / 07/ 2021

Devant le jury composé de :

Mr MAOUI Ammar
BRAHMIA ALI
Mme DJERRAB Muriel

PR. (Université de Guelma)
MCA (Université de Guelma)
MCB (Université de Guelma)

Président
Examineur
Encadreur

Année Universitaire 2020 / 2021

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, on tient à remercier Dieu le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience.

Nous tenons tout d'abord à remercier notre directrice de mémoire, Madame **DJERRAB MURIEL**. Recevez ici nos sincères remerciements pour la confiance, les conseils que vous nous avez accordés tout le long de ce travail. Merci également pour votre encadrement, votre disponibilité et votre gentillesse. Nous vous adressons notre profonde reconnaissance pour vos remarques et conseils en vue d'améliorer ce manuscrit.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury : Monsieur **BRAHMIA ALI** et Monsieur **MAOUI AMMAR**. Recevez nos plus vifs remerciements pour avoir accepté de juger ce travail. Notre profonde reconnaissance va également à nos enseignants Monsieur **NOUAR TAHER** et Monsieur **GHRIB LESSAAD** qui nous ont apporté leur soutien pour réaliser la partie sur l'hydrochimie.

Nous remercions également le responsable du laboratoire Monsieur **LAGOUNE GHANI** de la station de traitement du barrage de Hammam Debagh ainsi que Mesdames **ROUABHI CHAHRA**, **FISLI AMEL** et **CHOUARFA RADIA**, qui nous ont accueilli pour réaliser les analyses chimiques.

Résumé

Dans ce travail de fin d'étude de Master en hydrogéologie, nous nous sommes intéressés aux systèmes karstiques de la région de Hammam Debagh, située dans la Wilaya de Guelma (nord-est de l'Algérie). Les aquifères karstiques, qui peuvent constituer une ressource en eau importante, ont été étudiés au niveau de deux sites : le lac souterrain de Beir Ben Osmane et la grotte de Ghar Djemaa. Nous avons tout d'abord caractérisé la morphologie karstique (traces de dissolution avec des lapiez, des dolines, des grottes), puis réalisé une analyse hydrochimique des eaux souterraines.

Selon cette étude, nous avons d'une part défini la potabilité de l'eau par rapport aux normes de l'OMS : nous avons constaté que les eaux souterraines des deux sites ne sont pas potables.

Nous avons également défini la qualité des résultats en utilisant la balance ionique, elle est excellente pour l'eau du lac souterrain de Beir Ben Osmane, et médiocre pour celle de Ghar Djemaa.

Enfin, nous avons caractérisé le faciès chimique à l'aide des diagrammes de Piper et de Schoeller Berkalov : le faciès est de type mixte (entre chloruré calcique et sulfaté calcique) pour l'eau de Beir Ben Osmane, et de type bicarbonaté calcique et magnésien pour l'eau de Ghar Djemaa.

MOTS-CLES

Système karstique - Guelma – Algérie - Hydrochimie – Potabilité - faciès chimique – lapiez-dolines- grottes

ABSTRACT

During our final Master work in hydrogeology, we were interested in the karstic systems of the Hammam Debagh area, located in the Guelma Wilaya (north-eastern Algeria). Karst aquifers, which can constitute an important water resource, were studied at two sites: the underground lake of Beir Ben Osmane and the Ghar Djemaa cave. We first characterized the karstic morphology (traces of dissolution with karren or lapies, sinkholes, caves), then carried out a hydrochemical analysis of the groundwater.

According to this study, on the one hand, we defined the potability of the water in relation to WHO standards: we found that the groundwater at the two sites is not drinkable.

We also defined the results quality using the ionic balance, which is excellent for the water of the underground lake of Beir Ben Osmane, and poor for that of Ghar Djemaa.

Finally, we characterized the chemical facies using Piper and Schoeller Berkalov diagrams: the facies is of mixed type (between calcium chloride and calcium sulphate) for Beir Ben Osmane water, and of calcium bicarbonate type and magnesian for the Ghar Djemaa water.

KEY-WORDS

Karst system- Guelma – Algeria - Hydrochemistry – Potability - chemical facies- karren or lapies- sinkholes- caves

ملخص

في مذكرة نهاية الدراسة من الماستر في علم الهيدروجيولوجيا، كان اهتمامنا بمنطقة حمام دباغ التي تقع في ولاية قالمة (شمال شرق الجزائر). وقد درسنا طبقات الكارست المائية الجوفية، التي يمكن أن تكون موردا هاما للمياه، في موقعين: بحيرة بئر بن عصمان الجوفية وكهف غار جماعة. قمنا أولا بتميز مورفولوجيا الكارست (آثار الانحلال مع اللابياز، بالوعه، الكهوف)، ثم قمنا بتحليل هيدروكيميائي للمياه الجوفية. ووفقا لهذه الدراسة، قمنا من ناحية بتحديد قابلية المياه للشرب فيما يتعلق بمعايير منظمة الصحة العالمية: فقد وجدنا أن المياه الجوفية في الموقعين غير صالحة للشرب. كما حددنا جودة النتائج باستخدام التوازن الأيوني:

ممتاز لمياه بئر بحيرة بن عصمان الجوفية، ومتوسط لمياه غار جماعة. وأخيرا، قمنا بتميز الوجوه الكيميائية باستخدام مخططات بايبر وشولر، بيركالوف: الوجوه من نوع مختلط (بين كلور الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم) لمياه بئر بن عصمان، ونوع بيكربونات الكالسيوم والمغنيزيوم لمياه غار جماعة .

الكلمات المفتاحية

الوجوه الكيميائية-الجزائر – هيدروكيميائي – قالمة – بالوعه- الكهوف- نظام الكارست- اللابياز - صالحة الشرب.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I- 1 : Carte de situation de la zone d'étude (région de Hammam Debagh)	4
Figure I- 2 : Carte géologique simplifiée de Hammam Debagh (d'après la carte publiée en 1937 par le service géologique de l'Algérie, source : http://djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com).	11
Figure I- 3 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelle de la station de Hammam Debagh (2000-2020).....	13
Figure I- 4 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la station de Hammam Debagh (2000-2020).....	14
Figure I- 5 : Variation des températures moyennes mensuelles de la station Hammam Debagh (2000-2020).....	15
Figure I- 6 : Histogramme des températures moyennes interannuelles de Hammam Debagh (2000-2020).	16
Figure I- 7 : Diagramme pluviothermique de Hammam Debagh (2000/2020).....	17
Figure I- 8 : Nuage de points de l'indice d'aridité annuel, station Hammam Debagh.	18
Figure I- 9 : Carte de réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Bouhamdane (Zeghaba, 2018).....	19

Chapitre II

Figure II- 1 : Bloc-diagramme d'un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999).	23
Figure II- 2 : Coupe et paysage synthétique d'un aquifère karstique (d'après Mangin, 1975). L'épikarst est figuré en orange.....	27
Figure II- 3 : Schéma représentatif de la zone épikarstique (Mangin, 1975).....	28
Figure II- 4 : Localisation de la dissolution dans un réseau karstique exemplaire.....	30
Figure II- 5 : Coupe de principe au travers d'un cryptokarst. Le toit du calcaire est découpé en lapiaz à gauche et cryptodoline à droite sous la couverture perméable sableuse (Quinif, 2010).....	31

Chapitre III

Figure III- 1 : Localisation du site de Beir ben Ousmane (Vue satellite Google Earth).	33
Figure III- 2 : Localisation de la grotte de Ghar Djemaa (Vue satellite Google Earth)	38

Figure III- 3 : Carte topographique montrant le relief et la localisation du Djebel Taya (Vue satellite Google Earth).....	38
--	----

Chapitre IV

Figure IV-1 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME.....	59
Figure IV- 2 : Diagrammes de Piper et de Schoeller Berkaloff vierges.....	61
Figure IV- 3 : Représentation des faciès chimiques des eaux avec le diagramme de Piper. ...	62
Figure IV- 4 : Représentation des faciès chimiques des eaux avec le diagramme de Schoeller Berkaloff.	64

Liste des photos

Chapitre II

Photo II- 1 : Doline sur le plateau de Lescaumère, Bielle, Pyrénées,-Atlantiques, France (source : Wikipédia).....	24
Photo II- 2 : Lapiez du Sillet (Jura, France) (Source : Wikimedia Commons).	24
Photo II- 3 : Poljé de Feneos dans le Nord-Est du Péloponnèse, en Grèce (source : Wikipédia).	25
Photo II- 4 : Abime de Rabanal (Brissac, Hérault, France) (source : Wikipédia).	25
Photo II- 5 : Ouvala en Croatie (source : Wikipédia).	26

Chapitre III

Photo III- 1 : Vue de l'accès au lac souterrain de Beir Ben Osmane (photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	34
Photo III- 2 : Entrée de Beir Ben Osmane (photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	34
Photo III- 3 : Dissolution à l'extérieur du lac de Beir Ben Osmane (photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	35
Photo III- 4 : Il peut s'agir d'une doline visible en partie, ou de traces d'effondrement (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	35
Photo III- 5 : Intérieur du lac (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	36
Photo III- 6 : Traces de dissolution à l'intérieur du lac (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	36
Photo III- 7 : Traces de dissolutions sur la bordure du lac. Ces traces suivent la ligne de plus grande pente (flèche). (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	37
Photo III- 8 : Intérieur du lac (photos issues de la page Facebook des thermes médicalisés complexe hammam challala).	37
Photo III- 9 : Vue de différentes grottes présentes au niveau du Djebel Taya (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	39
Photo III- 10 : Entrée de la grotte de Ghar Djemaa (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	39
Photo III- 11 : Traces de dissolution et fractures dans la roche (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	40
Photo III- 12 : Vue de l'intérieur de la Grotte de Ghar djemaa (à 10 mètres de l'entrée) (photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).	41
Photo III- 13 : Stalagmite à l'intérieur de la grotte de Ghar djemaa (photo Mdm.Djerrab)....	41
Photo III- 14 : Vues de l'intérieur de la grotte de Ghar djemaa (photos issues de la page Facebook de l'association 'Ghar Djemaa', prises le 24/04/2021).	42

Chapitre IV

Photo IV- 1 : A gauche : GPS de type GARMIN, A droite : Appareil multi-paramètre (WTW ,350i).	43
Photo IV- 2 : Appareillage utilisé pour l'analyse chimique des eaux au laboratoire de la station de traitement du barrage de Hammam Debagh.	48

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I- 1 : Les principales caractéristiques de Hammam Debagh	3
Tableau I- 2 : Caractéristiques de la station de mesure du barrage, Hammam Debagh	12
Tableau I- 3 : Précipitations moyennes mensuelles, station de Hammam Debagh (2000-2020).....	12
Tableau I- 4 : Moyennes mensuelles des températures, station de Hammam Debagh (2000-2020).....	15
Tableau I- 5 : Valeurs de l'indice d'aridité, type de végétation et climats correspondants (source : http://jymassenet-foret.fr/cours/ecologie/CHAPITREclimato2012ppt.pdf).....	18

Chapitre IV

Tableau IV- 1 : Paramètres physiques mesurés sur terrain.	45
Tableau IV- 2 : Méthode de dosages des paramètres chimiques.....	49
Tableau IV- 3 : Normes concernant les paramètres physico-chimiques d'une eau potable... ..	53
Tableau IV- 4 : Classes de turbidité usuelles (NTU= nephelometric turbidity unit) [Merzoug, 2009].....	54
Tableau IV- 5 : Qualité des eaux en fonction de la conductivité électrique (Monod, 1989)... ..	55
Tableau IV- 6 : Potabilité en fonction du taux de résidus secs (Rodier, 2005).	55
Tableau IV- 7 : Normes concernant les polluants dans les eaux potables.....	55
Tableau IV- 8 : Les paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain.	56
Tableau IV- 9 : Les éléments chimiques majeurs.	56
Tableau IV- 10 : Paramètres physico-chimiques mesurés en laboratoire.	56
Tableau IV- 11 : Balance ionique et fiabilité des résultats.	58
Tableau IV- 12 : Analyse chimique de l'eau du Lac Beir Ben Osmane et Ghar Djemaa (en meq/l).....	58

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I. Généralités

I.1. Cadre géographique	3
I.2. Cadre géologique.....	5
I.2.1. Cadre géologique régional	5
I.2.2. Cadre géologique local.....	9
I.3. Cadre climatique.....	11
I.3.1 Introduction	11
I.3.2 Types de climat	12
I.4. Cadre hydrologique	18
I.4.1. Le bassin versant de l'Oued Bouhamdane.....	19
I.4.2. Le réseau hydrographique du bassin versant de L'Oued Bouhamdane	20

Chapitre II. Généralités sur le karst

II.1. Présentation générale du karst	21
II.1.1. Morphologies karstiques caractéristiques.....	22
II.1.2. Caractère hydrodynamique du karst	26
II.1.3. Karstification et type d'altérations	28

Chapitre III. Etude du karst de Hammam Debagh

III.1. Introduction	33
III.2. Zone de Beir Ben Osmane	33
III.2.1. Introduction	33
III.2.3. L'endokarst.....	36
III.3. Zone du Djebel Taya	37
III.3.1. Introduction	37
III.2.2. Le karst de surface (exokarst ou épikarst).....	39

III.2.3. L'endokarst.....	40
---------------------------	----

Chapitre IV : Etude hydrochimique

IV.1. Méthodologie	43
IV.1.1. Résultat sur le terrain	43
IV.1.2. En laboratoire	47
IV.2 Résultats et discussions.....	53
IV.2.1 Les normes des paramètres physico-chimiques d'une eau potable selon OMS....	53
IV.2.2 Présentation des résultats	55
IV.2.3. Conclusion :.....	65
Conclusion générale	66
Liste des références bibliographiques :.....	69

Introduction générale

Introduction générale

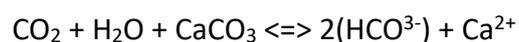
Le milieu karstique est un milieu très complexe. Il se distingue des milieux poreux par une forte hétérogénéité des milieux fissurés et par une forte évolutivité. Les écoulements en milieu karstique font l'objet de l'attention des karstologues et hydrogéologues. Leur étude reste cependant limitée à certains points du réseau : les émergences et les écoulements présents dans les cavités karstiques accessibles. Ces cavités symbolisent à elles seules la spécificité du karst. Elles se développent par dissolution de la roche carbonatée à la suite de l'interaction avec l'eau et l'air. Leur évolution en a rendu certaines accessibles à l'homme, parfois depuis plusieurs millénaires.

Aujourd'hui, ces cavités représentent pour l'hydrogéologue une opportunité de pénétrer à l'intérieur du massif karstique. La zone non saturée joue un rôle crucial dans la dynamique des aquifères karstiques, même si le fonctionnement de cette zone est encore mal compris. Le manque d'accès direct à la zone non saturée, autres que les cavités spéléologiques, dans lesquelles les réseaux d'écoulements sont déjà structurés, rend difficile la caractérisation de l'ensemble des processus hydrodynamiques et hydrochimiques qui s'établissent dans cette zone.

Dans la région de Hammam Debagh (wilaya de Guelma), on trouve à l'affleurement seulement des roches sédimentaires, et parmi elles une grande quantité de roches de nature carbonatée, et donc autant de zones karstiques potentielles.

La karstification se développe en effet dans les roches carbonatées comme les calcaires (constitués essentiellement de CaCO_3), les dolomies ($\text{Ca, Mg (CO}_3)_2$), ainsi que dans des roches solubles telles que les évaporites (halite, anhydrite ou gypse) ; et il est constitué de formes superficielles et souterraines qui résultent de la dissolution de ces roches.

Le processus de dissolution « classique » des formations carbonatées (ici la calcite) fait intervenir de nombreux paramètres physico-chimiques dans un ensemble de réactions pouvant être représenté par l'équation générale suivante :



L'objectif de ce Master est donc d'étudier les zones karstiques présentes autour de la commune de Hammam Debagh (localisation de l'épikarst, puis étude de l'endokarst avec des prélèvements des eaux souterraines et analyse hydrochimique). Nous avons pour ce faire

Introduction générale

focaliser notre travail sur le lac souterrain de Beir Ben Ousmane et les environs du Djebel Taya (grotte de Ghar Djemaa).

Nous consacrerons un premier chapitre de cette étude à des généralités sur la région d'étude (cadre géographique, climatique, géologique et hydrologique). Un second chapitre regroupe des généralités sur le karst, et donne des définitions, des schémas explicatifs et des images. Un troisième chapitre s'intéressera tout d'abord à l'épikarst puis à l'endokarst des environs de Hammam Debagh (lac souterrain de Hammam Debagh, Grotte du Djebel Taya...). Le dernier chapitre de ce travail présente l'étude hydrochimique, avec tout d'abord les méthodes d'étude utilisées et le mode d'échantillonnage, puis la présentation des résultats et enfin une interprétation par rapport à la qualité de l'eau et au faciès chimique.

Chapitre I

Généralités

I.1. Cadre géographique

La wilaya de Guelma se situe à environ 60 km au sud de la Mer Méditerranée. Sur le plan administratif, elle est issue du découpage de 1974. Elle est limitée au nord par la wilaya d'Annaba, au nord-est par celle d'El Tarf, au sud-est par celles de Souk Ahras et d'Oum-El Bouaghi, à l'ouest par celle de Constantine et au nord-ouest par celle de Skikda (fig. I-1).

Elle compte, depuis le découpage de 1984, 34 communes réparties sur 10 daïras. Sa population était de 506 007 habitants en 2011 pour une superficie de 3 686 km², soit une densité de 135 habitants/km². La population n'est pas répartie de façon homogène sur le territoire (elle est concentrée dans les zones urbaines).

Les limites de la wilaya se situent aux coordonnées géographiques suivantes : Ouest : 6°50' Est : 8°00' Nord : 36°40' Sud : 36°5'.

Hammam Debagh est une daïra de la willaya de Guelma, anciennement connu sous le nom de Hammam Maskhoutine. C'est une station thermale située à 15 km de la ville de Guelma au nord-est de l'Algérie et l'une des nombreuses stations thermales de cette région (tableau I-1).

Tableau I- 1 : Les principales caractéristiques de Hammam Debagh

Coordonnées géographiques	Latitude : 36.5044, Longitude : 7.44118 36° 30' 16" Nord, 7° 26' 28" Est
Altitude	287 m
Climat	Climat sera prise avec reflue eau méditerranéen avec été chaud (Classification de Köppen : Csa)
Nombre d'habitants	16 391

On trouve dans la région de Hammam Debagh différents reliefs montagneux, les plus élevés sont :

- Le Djebel Taya (1055m d'altitude).
- Le Djebel Debagh (1060m d'altitude).
- Le Djebel Grar (1078m d'altitude).

- Le Djebel Debar (1060m d'altitude).

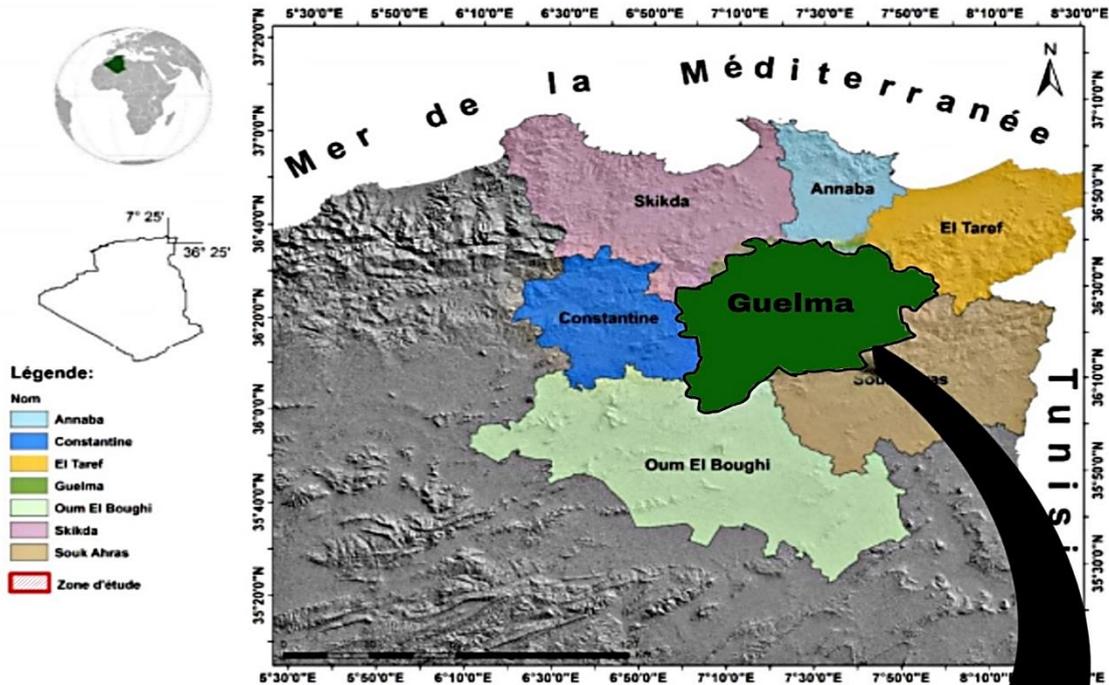


Figure I- 1 : Carte de situation de la zone d'étude (région de Hammam Debagh)

I.2. Cadre géologique

I.2.1. Cadre géologique régional

Le Djebel Debagh fait partie des massifs du segment nord oriental de la série néritique du constantinois. Dans sa synthèse stratigraphique du domaine néritique constantinois, J.M. Vila (1980) subdivise ce complexe en deux sous-groupes partiellement superposés :

- La séquence néritique comportant une série de formations condensées à dominance carbonatée et silico-clastiques du Jurassique et Trias ;
- Les formations allochtones à dominance argilo-marneuse et quartzique.

Le contact entre ces deux ensembles est marqué par des failles de direction E-W à NW-SE.

I.2.1.1. Eléments de stratigraphie de la série néritique constantinoise

La succession stratigraphique du segment nord-oriental de la série néritique de la constantinoise comporte :

I.2.1.1.1. Les formations autochtones à faciès néritique

I.2.1.1.1.1. Le Trias

Se rencontre à la station de Nador ainsi qu'à l'Est de Djebel Debagh (Durand Delga, 1969 ; Vila, 1980). Cette série débute par des couches grésopélitiques rouges légèrement métamorphiques du Trias inférieur et moyen, des niveaux argilo-gypseux et des calcaires.

I.2.1.1.1.2. Le Jurassique

Affleure au Djebel Debagh et au Kef Hahouner (Raoult, 1974), il est représenté par des formations dolomitiques noires et azoïques dont l'épaisseur varie de 20 à 100 m.

I.2.1.1.1.3. Le Crétacé

Occupe la plus grande partie des affleurements de la région, L'épaisseur totale de cet étage atteint 1000 m en moyenne (Raoult et Fourcade, 1973). Le passage Jurassique-Crétacé défini dans la partie orientale de Djebel Debagh, est souligné par un repère à Coprolites (*Fraveina salvenis* et *Fraveina prusensis*) à la base des alternances calcaro-dolomitiques du Néocomien (Vila, 1980).

- a) Le Néocomien : correspond à une alternance de calcaires massifs et de dolomies noires. Il a été identifié par J.F. Raoult (1974) au Kef Hahouner où il a livré des charophytes et des Textularidés. Le Néocomien est très épais, il atteint 100 m à Djebel Debagh et 500 m au Kef Hahouner.

- b) Le Barrémien : est constitué par des dolomies de base surmontées par des calcaires massifs identifiés au Kef Hahouner (Raoult, 1974), au Djebel Grar et Djebel Taya (Vila, 1980) grâce aux associations à *Orbitolinopsis capnensis*, *Neotrocholina fibrugensis*, des Cunéolines et *Palorbitolina Lenticularis*. Il est très bien développé, sa puissance peut atteindre les 500 m. Au Djebel Debagh, le Barrémien fait corps avec le Néocomien à l'Est, tandis qu'à l'Ouest, il fait à peu près 200 m d'épaisseur et sa limite inférieure est marquée par l'apparition de Néotrocholines et Dasycladacées (Vila, 1980).
- c) L'Aptien : comprend à sa base des calcaires micritiques, puis massifs qui ont livré des Orbitolines (*Pracorbitolina*), un niveau à Charophytes, des Salpingoporelles et des Cunéolines (*Cuneolina scarcellai*, *Debarina hahonnerensis* et *Cuneolina glaurentiscamposauri*) des Miliolites ainsi que des Ovalvéolines (*Ovalveolina reicheli*). Ces calcaires affleurent largement au Djebel Debagh, ils peuvent atteindre 100 m d'épaisseur (Vila, 1980).
- d) L'Albien : l'Albien supérieur a été défini au Djebel Grar, Kef Hahouner (Raoult, 1974) et Djebel Taya où il fait corps avec le Vraconien. Son épaisseur varie de 100 à 200 m et correspond à des calcaires à silex et des biosparites à *Agardiellopsis cretacea* et *Hedbergella washitensis*.
- e) Le Vraconien-Cénomaniens inférieur : affleure à l'Est de Djebel Debagh, au Grar et à El Kalaa (Vila, 1980). C'est une formation Calcaire qui a livré notamment des associations à Orbitolines (*Rotalipora sp.*, *Orbitolina conica*) et des Mélobésiées (*Neoiraqia sp.*) ; son épaisseur est d'environ 100 m. Le Cénomaniens supérieur est représenté par des calcaires à Rudistes (*Caprina schiosinsis*) et à grandes Cunéolines et n'affleure qu'au Djebel Debagh oriental (Vila, 1980), son épaisseur dépasse 100 m. Ailleurs, il est absent ou fait corps avec le Sénonien Inférieur.
- f) Le Turonien : Cette formation n'affleure qu'au Kef Hahouner, elle est représentée par des formations calcaires disposées en bancs minces à débris d'Oursins, d'Inocérames et des Mélobésiées (Raoult, 1974).
- g) Le Sénonien : les formations sénoniennes correspondent à un Campanien calcaire à *Globotruncana sigali*, *Globotruncana laparenti* et *Rotalia sp.* Ces formations reposent parfois sur une surface de ravinement et contiennent des Orbitolines remaniées du Cénomaniens franc (Vila, 1980). Le Campanien supérieur, d'une épaisseur de 400 m à

Orbitoïdes media, *Siderolites vidali*, *Rotalia sp*, affleurant au Grar et au Debagh et contient des lentilles conglomératiques et microconglomératiques (Vila, 1980).

I.2.1.1.1.4. Le Paléocène

Identifié par J.C. Lahondère et G. Magné (1983), il est représenté par des marnes noires à passées brunâtres à *Globigerina daubergensis*, *Globigerina triloculinoïdes* et *Globorotalia pseudobulloïdes*, rencontrés au-dessus des niveaux marneux du Maastrichtien inférieur et des biomicrites du Maastrichtien supérieur au massif de Mechtat Bou Zitoune et à Kalaa Bou Diar. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 20 à 25 m.

I.2.1.1.1.5. L'Eocène

Il est représenté par des calcaires noirs de l'Eocène inférieur (Lahondère et Magné, 1983). Ces formations reposent sur les marnes paléocènes. Les marnes et pélites à concrétions calcaires jaunes de l'Eocène moyen feraient suite stratigraphiquement à la formation inférieure mais dans certains cas ils pourraient reposer directement par un contact anormal sur le paléocène. Il s'agit ici d'un terme ne dépassant pas 25 m d'épaisseur.

I.2.1.1.2. Les unités allochtones

De bas en haut, J.M. Vila et J. Magné (1969) décrivent :

I.2.1.1.2.1. La nappe numidienne

Qui forme par exemple les hauteurs de Djebel Bou Aslouge. Sa structure est simple, elle débute par une série argileuse d'âge Aquitaniens qui est surmontée par un ensemble de bancs gréseux à Globigérines, attribués au Stampien supérieur et qui sont tronqués à leur base.

I.2.1.1.2.2. La nappe du flysch Tithonique – Crétacé inférieur

Affleure au Nord et à l'Est des massifs septentrionaux (Durand-Delga et Lambert, 1956 ; Vila, 1968 ; Raoult, 1969 et 1974 ; Bouillin, 1977 ; Gelard, 1979) et comprend :

- Un Crétacé inférieur à faciès Guerouche à gros bancs de grès verdâtre alternant avec des pélites grises ou brunâtres ;
- Un Albien à repère quartzique vert ;
- Un Cénomaniens microbréchiq ue à bandes silicifiées blanches ;
- Un Sénonien à calcaire microbréchiq ue et conglomérats grossiers se poursuivant jusqu'à la fin du Lutétien et incluant un Paléocène riche en calcaire sableux.

I.2.1.1.2.3. La nappe du flysch Sénonien à microbrèches

Correspond à :

- Des micrites et des calcaires fins à *Nannoconus* du Crétacé inférieur ;
- Un flysch pélito-quartzique de l'Albo-Aptien ;
- Des micrites de l'Albien supérieur-Vraconien ;
- Des microbrèches avec pélites et calcaire fin du Cénomaniens ;
- Un repère à phtanites blanc ou noir du Cénomaniens supérieur-Turonien ;
- Un flysch argilo-marneux à plaquette microbréchique, des calcaires sableux et des marnes rouges du Sénonien.

I.2.1.1.2.4. L'allochtone tellien

Seule la nappe ultra-tellienne est en relation avec les massifs néritiques nord orientaux, elle regroupe toutes les formations marneuses et marno-calcaires avec d'une part le Barrémo-Aptien au Nord- Est, et d'autre par la série marneuse éocène et crétacée qui enveloppe à l'Est les calcaires massifs de Djebel Debagh. La série crétacé-éocène est renversée, J.M.Vila et G. Magné (1969) définissent, de haut en bas, la succession suivante :

- Les calcaires du Barrémo-Aptien affleurant exclusivement au Nord ;
- Les calcaires à Globigérines du Campanien inférieur ;
- Des marnes jaunes ou grises du Maastrichtien-Danien ;
- Les marnes noires à Globigérines et Mélobésiées du Paléocène ;
- Le Lutétien-Yprésien à *Globorotalia rex*, et *Globorotalia aff*, à la base des calcaires marneux à silex noirs.

I.2.1.1.3. Les formations post- nappes

Elles sont représentées par une épaisse série de grès jaunâtre, montrant de nombreuses intercalations argilo-marneuses grises ou jaunes, parfois gypseuses attribuée au Mio-Pliocène (Vila, 1980). Les blocs de grès à patines violettes du Quaternaire recouvrent les épandages structurés à partir d'une zone haute allant du Nord-Est de Guelma à Constantine.

I.2.2. Cadre géologique local

I.2.2.1. Aperçu d'ensemble

La région de Hammam Debagh appartient au Tell-Nappe épitellienne d'après (Kieken, livre à la mémoire de P. Fallot, tome I-SGF).

Ces nappes résultent d'une poussée vers le Sud de la chaîne du Djebel Debar, du Grar et du Kef-Hahouner où affleure un substratum formé de calcaires crétacés. C'est sur celui-ci qu'ont été charriées les nappes dites telliennes, constituées de marnes noires ou grises intercalées de bancs calcaires appartenant au Crétacé et au Tertiaire. Une autre nappe, dite du Flysch Crétacé, recouvre indifféremment les nappes telliennes ou le Crétacé "autochtone". Elle est composée de schistes noirs et de puissants bancs de grès, localement de poudingues.

La structure régionale a une direction Est-Ouest, et présente des fractures aussi bien parallèles à l'allure générale que perpendiculaires à celle-ci. Plusieurs de ces fractures sont le siège d'une circulation géothermale.

Les circulations les plus importantes affleurent à Hammam Debagh, elles semblent en relation avec les circulations d'eau profonde suivant des failles localement minéralisées. Il s'agit d'eaux sulfatées - calciques et chlorées -sodiques, vraisemblablement sans relation directe avec les eaux de surface. Le barrage Hammam Debagh est implanté dans un resserrement de la vallée de l'Oued Bouhamdane qui correspond à un lambeau de la nappe du flysch crétacé, alors que la cuvette se développe dans sa quasi-totalité dans les marnes telliennes et le Crétacé autochtone. Au droit du barrage, le cours de l'Oued Bouhamdane suit approximativement la charnière faillée d'un pli en chaise très accusé. D'importantes terrasses réparties en plusieurs niveaux recouvrent le substratum, aussi bien en amont qu'en aval du barrage.

I.2.2.2. Lithostratigraphie de la zone du barrage Hammam Debagh

Les principales entités stratigraphiques de la région sont (fig. I-2) :

I.2.2.2.1. Le Crétacé Autochtone

Les affleurements se rencontrent en particulier au Djebel Debar et au Djebel Taya.

On trouve :

- Des calcaires massifs cristallins (Néocomien),
- Des calcaires et calcaires cristallins (Barrémien),

- Des calcaires cristallins massifs,
- Et enfin des calcaires compacts à orbitolines (Aptien).

I.2.2.2.2. La série des Nappes Telliennes

On trouve :

- Des marnes schisteuses gris noir, feuilletées assez friables,
- Des marnes calcaires gris blanc ;
- Des calcaires marneux blanchâtres,

I.2.2.2.3. La série du Flysch- Crétacé

On trouve :

- Des schistes gris noir verdâtres, parfois carbonatés,
- Des schistes gris noir minces intercalations gréseuses,
- Des schistes à grains de quartz, particulièrement altérable,
- Des grès friables gris blancs à jaunes, peu cimentés,
- Des grès conglomératiques et quartzitiques, en gros bancs.

I.2.2.2.4. Dépôts de grès psammitiques rouges et verts

On les trouve en affleurement en rive gauche de la cuvette, et ils relèvent probablement de l'Eocène.

I.2.2.2.5. Dépôts des terrasses

On trouve quatre niveaux distincts dont les niveaux de base à proximité du barrage. Ces terrasses correspondent à des dépôts relativement récents caractérisés par une épaisseur variable de graves sableuses qui reposent sous des silts argileux. Ces terrains peuvent contenir des argiles surtout vers leur base, par remontées des produits d'altération des marnes.

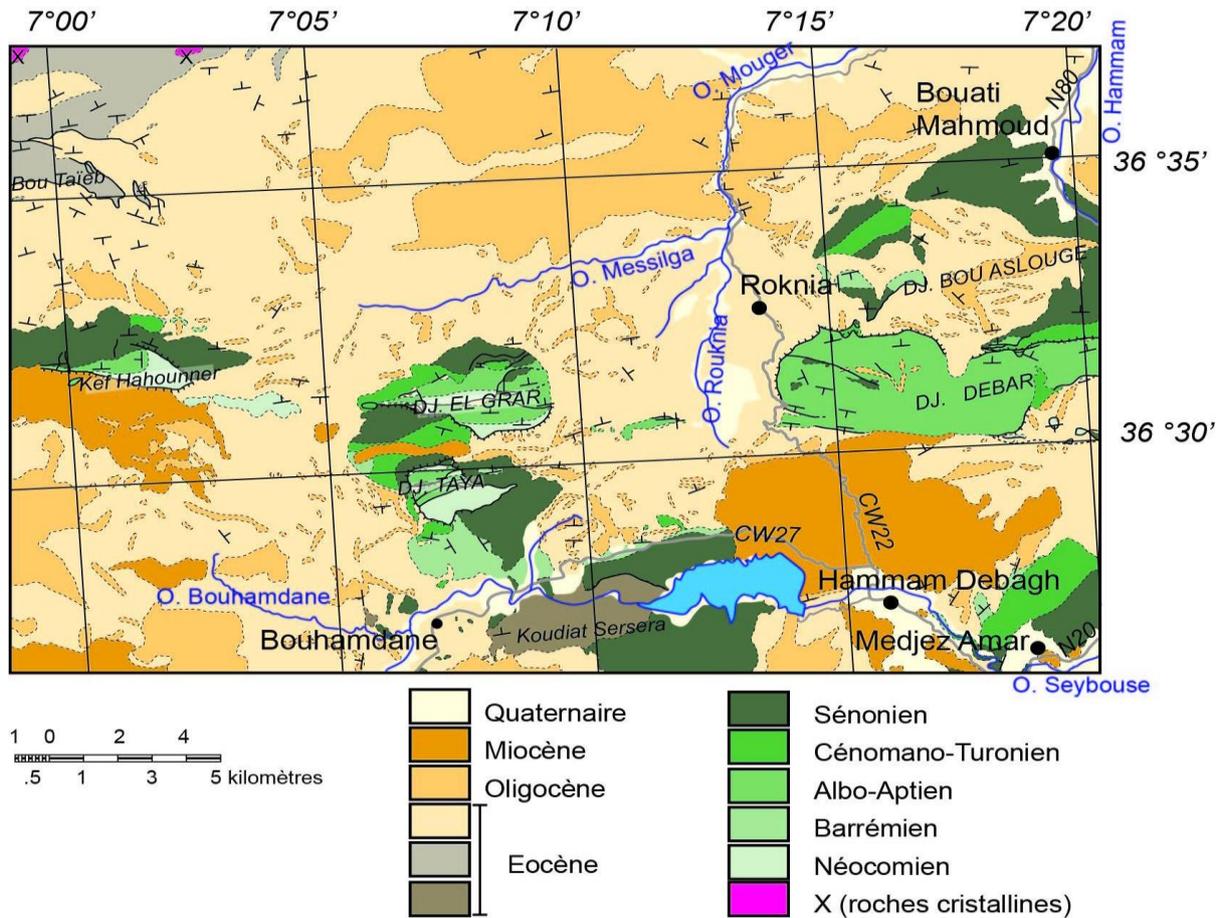


Figure I- 2 : Carte géologique simplifiée de Hammam Debagh (d'après la carte publiée en 1937 par le service géologique de l'Algérie, source : <http://djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com>).

I.3.Cadre climatique

I.3.1 Introduction

L'étude des caractéristiques climatiques, basée sur les données de précipitation et de température, nous permet de donner un bref aperçu sur leur répartition dans le temps et dans l'espace et sur le type de climat prévalent dans la région.

Pour réaliser notre travail nous avons utilisé les données collectées à la station météorologique du barrage de Bouhamdane à Hammam Debagh, qui couvrent une période de (21) ans ; dont les caractéristiques sont portées dans le Tableau.

Tableau I- 2 : Caractéristiques de la station de mesure du barrage, Hammam Debagh

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Hammam Debagh	7° 15, E	36° 27, N	350	2000-2020

I.3.2 Types de climat

I.3.2.1. Les précipitations

Les précipitations constituent le facteur primordial dans le comportement hydrologique du bassin. Elles sont variables et irrégulières d'une année à une autre et d'une saison à une autre.

Les mesures de celles-ci permettent d'évaluer la quantité d'eau tombée et surtout d'estimer la quantité destinée aux écoulements.

Nous allons présenter dans un premier temps les précipitations moyennes mensuelles (sur la période 2000-2020), puis les précipitations moyennes annuelles (toujours sur la même période).

I.3.2.1.1 Précipitations moyennes mensuelles

Le calcul de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré sur un grand nombre d'années, ou dit précipitation moyenne mensuelle, donne un aperçu sur les variations mensuelles pluriannuelles des précipitations.

Les précipitations moyennes mensuelles de la station du barrage Hammam Debagh sont présentées dans le tableau et la figure qui suivent (tab. I-3, fig. I-3) :

Tableau I- 3 : Précipitations moyennes mensuelles, station de Hammam Debagh (2000-2020).

Mois Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
Hammam	33,0	43,7	65,6	77,1	78,27	68,74	60,02	45,25	39,80	12,51	2,9	10,1
Debagh	2	3	5	6							3	7

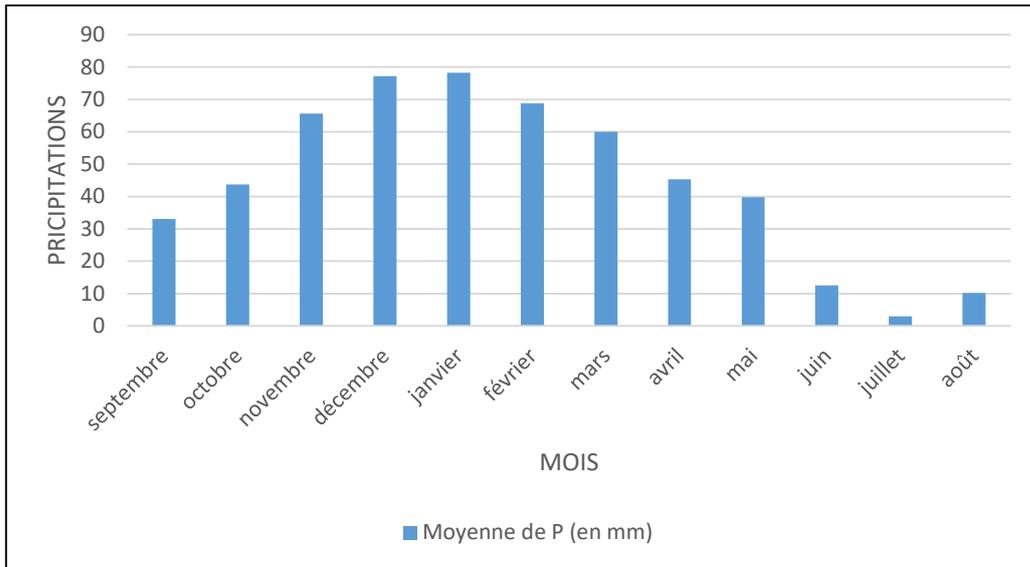


Figure I- 3 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelle de la station de Hammam Debagh (2000-2020).

La Figure 3 montre les variations de la distribution des précipitations d'un mois à un autre, nous voyons que la pluviométrie maximale est de 78,27 mm au cours du mois de janvier (le mois le plus humide), alors que la valeur minimale est de 2,93 mm au cours du mois de Juillet (le mois le plus sec).

I.3.2.1.2 Les précipitations moyennes annuelles

La figure 4 ci-dessous montre les variations de la distribution des précipitations d'une année à une autre, avec un maximum de 928,8 mm dans l'année 2003 (année la plus humide), et un minimum de de 294,8 mm dans l'année 2016 (année la plus sèche).

La valeur de la pluviométrie moyenne interannuelle (2000-2020) est égale à environ 555 mm.

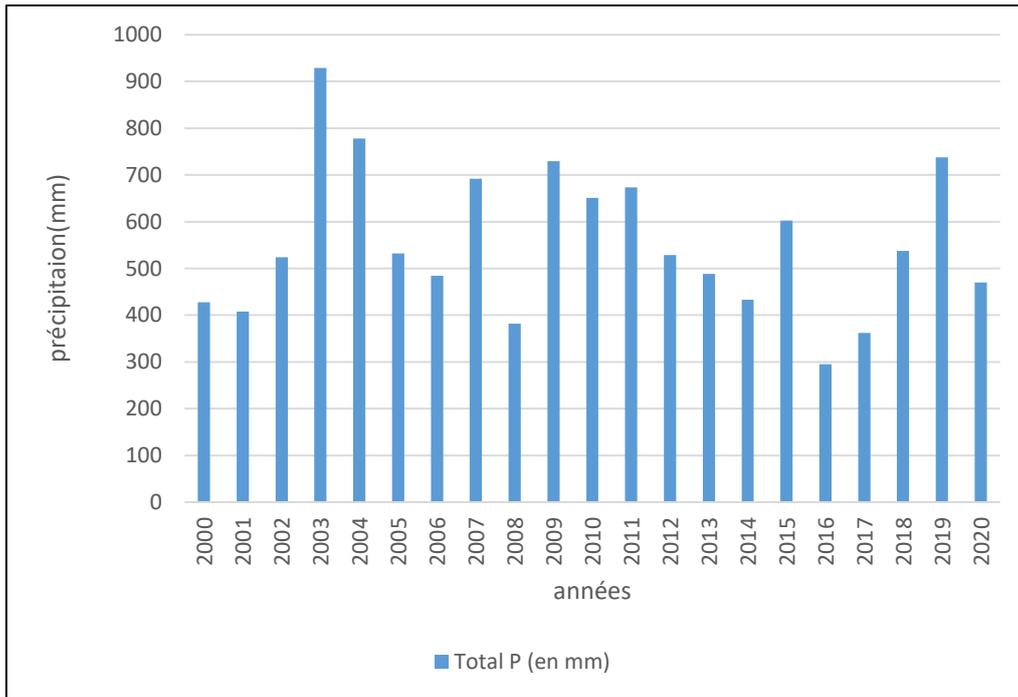


Figure I- 4 : Histogramme des précipitations moyennes inter annuelles de la station de Hammam Debagh (2000-2020).

I.3.2.2 Les températures

La présentation des résultats va suivre le même schéma que pour la pluviométrie.

I.3.2.2.1 Les températures moyennes mensuelles

Les températures moyennes mensuelles et annuelles régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (précipitations, insolation, hygrométrie...), le phénomène d'évaporation et par là même, le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les températures sont donc l'un des éléments majeurs influençant le climat.

Les données de température observées pendant une période de 21 ans (2000-2020), font ressortir que les températures moyennes minimales sont enregistrées durant le mois de Janvier (2.87°C), tandis que les températures moyennes maximales s'observent durant le mois de Juillet avec une valeur de l'ordre de (36.43°C) (Tableau I-4).

Tableau I- 4 : Moyennes mensuelles des températures, station de Hammam Debagh (2000-2020).

Mois	T (c°)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Station Hammam Debagh	Min	2.87	3.43	6.40	10.80	14.53	18.41	21.60	21.85	18.05	13.92	7.82	4.62
	Moy	8.15	9.08	12.47	16.26	20.22	24.05	29.01	28.45	23.88	19.85	13.00	9.68
	Max	13.44	14.73	17.97	21.71	26.00	31.68	36.43	35.33	29.72	25.79	18.19	14.75

Les variations des températures moyennes mensuelles (minimales, moyennes et maximales) sont représentées dans la figure ci-dessous :

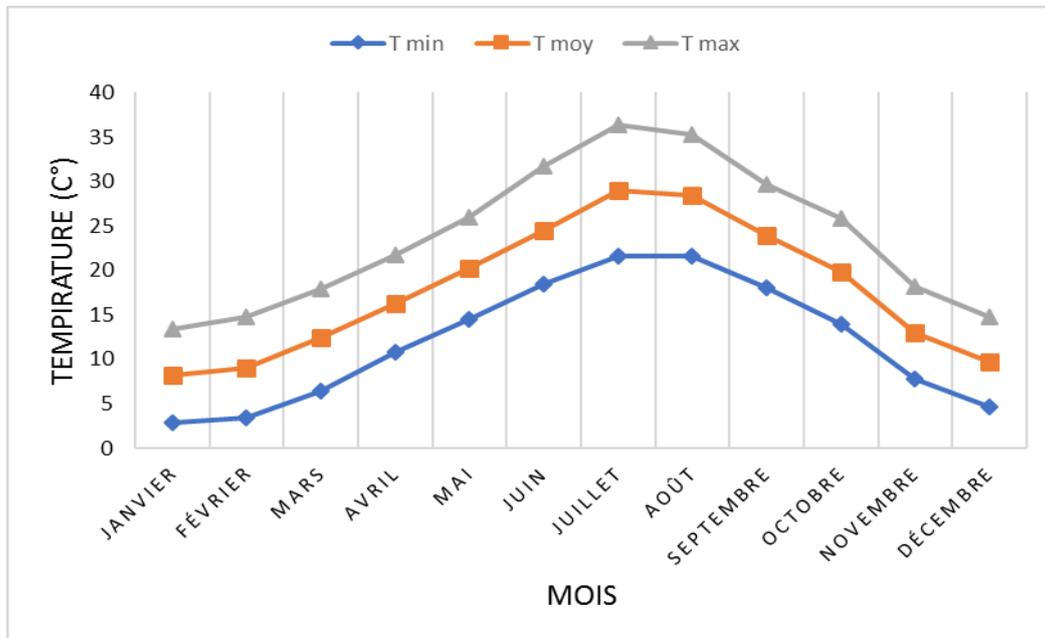


Figure I- 5 : Variation des températures moyennes mensuelles de la station Hammam Debagh (2000-2020).

I.3.2.2.2 Les températures moyennes annuelles

Les données de température observées pendant une période de 21 ans (2000-2020), font ressortir que les températures moyennes annuelle maximales sont enregistrées durant l’année de 2004 (20°C), tandis que les valeurs minimales sont enregistrées durant l’année de 2018 (16°C).

La figure ci-dessous montre l’évolution des températures moyennes interannuelles :

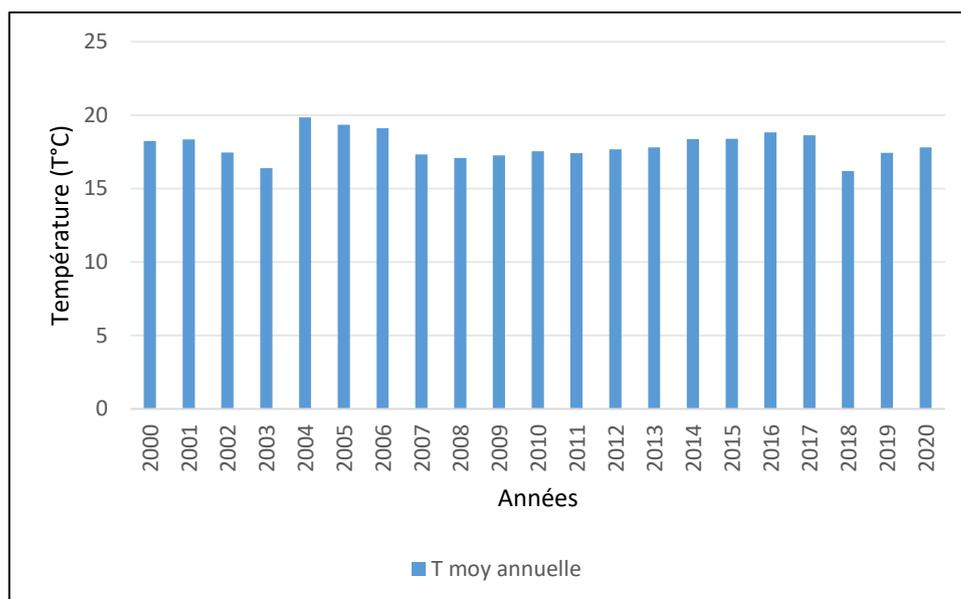


Figure I- 6 : Histogramme des températures moyennes interannuelles de Hammam Debagh (2000-2020).

I.3.2.3 Le diagramme pluvio-thermique

Le diagramme pluvio-thermique est établi en combinant les températures et les précipitations moyennes mensuelles pour déterminer les périodes sèches et humides.

D'après ce diagramme (Figure I-7), on peut déterminer deux périodes bien distinctes :

- Une saison humide et froide qui s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai.
- Une saison sèche et chaude qui s'étend du début du mois de Juin jusqu'au mois d'Aout.

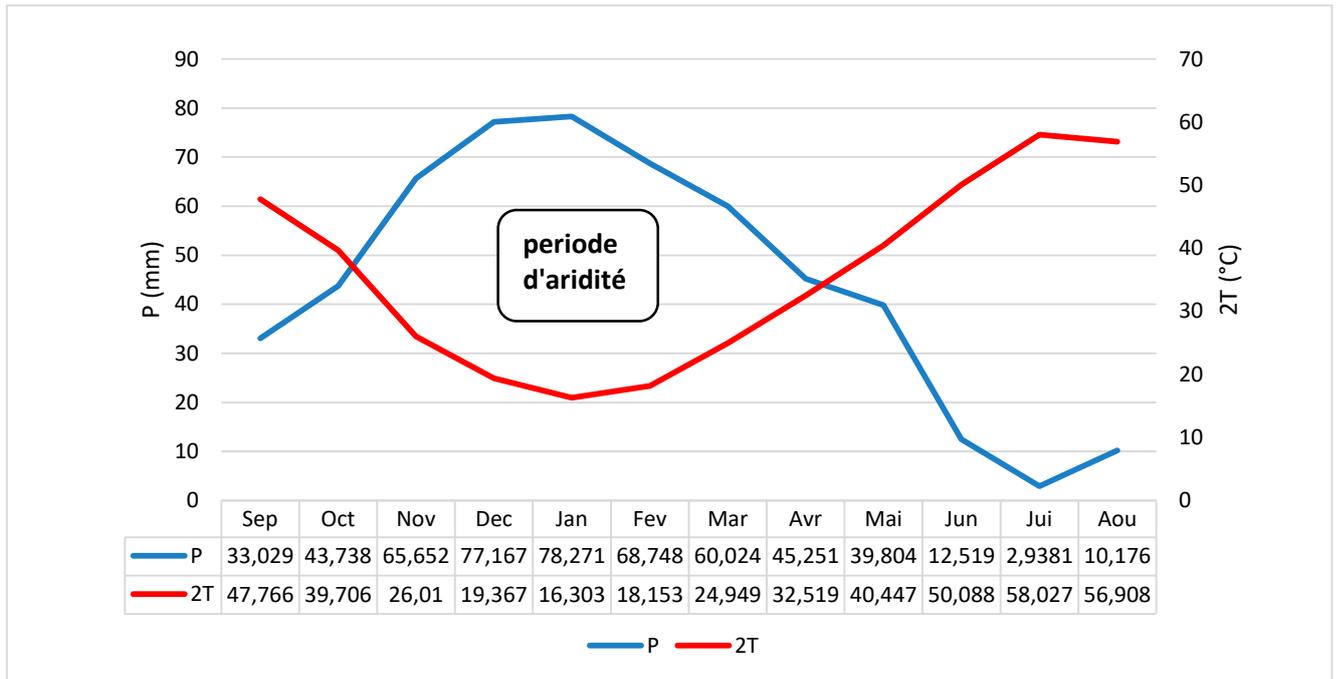


Figure I- 7 : Diagramme pluviothermique de Hammam Debagh (2000/2020).

I.3.3 L'indice d'aridité

C'est un indicateur numérique du degré de sécheresse du climat à un endroit donné à une période donnée. Il peut être annuel ou mensuel.

Cet indicateur permet d'identifier, de localiser ou de délimiter les régions qui souffrent d'un déficit d'eau disponible, une condition qui peut affecter gravement l'efficacité de l'utilisation des terres pour des activités telles que l'agriculture ou la potabilité (l'utilisation humaine en général).

Cet indicateur a été mis au point par Emmanuel de Martonne (en 1926).

Selon la relation suivante :

$$I = P / (T + 10)$$

I : l'indice d'aridité

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

T : température moyenne annuelle (C°)

Tableau I- 5 : Valeurs de l'indice d'aridité, type de végétation et climats correspondants

(source : <http://jymassenet-foret.fr/cours/ecologie/CHAPITREclimato2012ppt.pdf>).

Valeur de I	Type de climat	Type de végétation potentielle	Exemple
0 à 5	Hyper- aride	Désert absolu	Vallée de la mort aux USA
5 à 10	Aride	Désert	Désert du Sahara, Désert de l'Arizona (USA)
10 à 20	Semi- aride	Steppe	Sahel, Kalahari
20 à 30	Semi- humide	Prairie naturelle, forêt	Région Parisienne, région de Marseille (France)
30 à 40	Humide	Forêt	Nord de la France (région de Lille)
40 à 55	Humide	Forêt	Nord-ouest de la France - façade atlantique (région de Rouen, Dieppe)

L'indice d'aridité (I) a été calculé pour la station de Hammam Debagh (fig. I-8) :

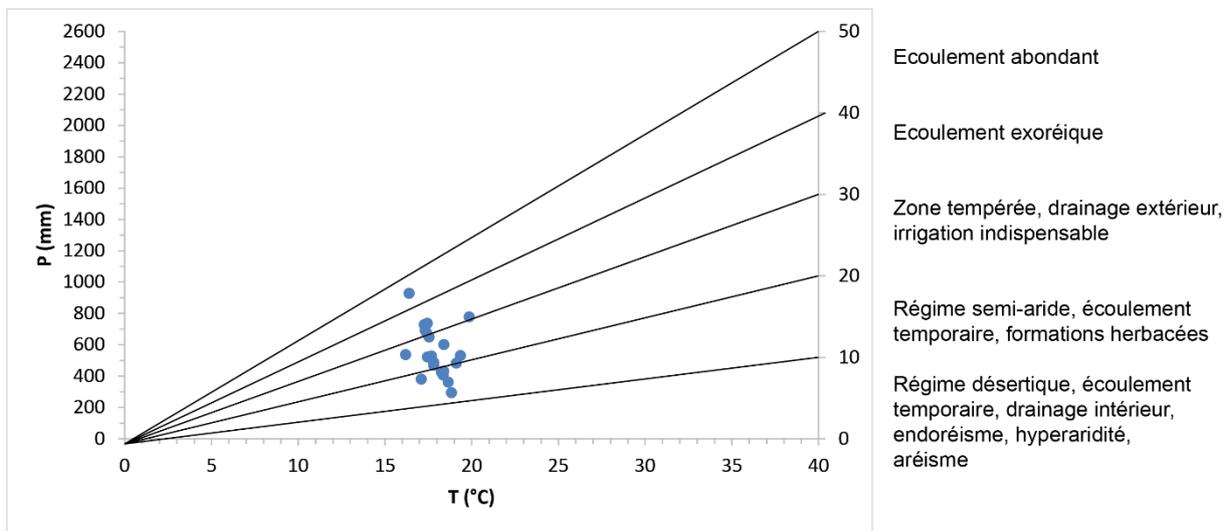


Figure I- 8 : Nuage de points de l'indice d'aridité annuel, station Hammam Debagh.

La valeur moyenne de I pour la station de Hammam Debagh est de 19,97 (c'est une valeur limite entre un type de climat semi-aride et tempéré), mais on peut constater sur la figure qu'il y a une grande variabilité selon les années, entre la zone semi-aride et la zone tempérée.

I.4. Cadre hydrologique

Etant donné que notre zone d'étude est située dans la région de Hammam Debagh, nous avons choisi de présenter uniquement les caractéristiques du sous bassin versant de l'Oued Bouhamdane, qui est le principal cours d'eau de cette zone.

I.4.1. Le sous bassin versant de l'Oued Bouhamdane

L'Oued Bouhamdane fait partie du bassin de la Seybouse, l'une des grandes artères hydrographiques de l'Algérie orientale tributaires de la mer Méditerranée. Il draine une surface de 1105 km² à la station hydrométrique de Medjez Ammar II et de 1070 km² au droit du barrage de Hammam Debagh.

Il est formé par deux principales artères (Fig. I-9), l'Oued Zenati et l'Oued Bordj Sabath qui drainent respectivement une zone semi-aride des Hautes Plaines (pluviométrie moyenne : 450-550 mm) et une zone sub-humide du Tell méridional (pluviométrie moyenne : 550-650 mm).

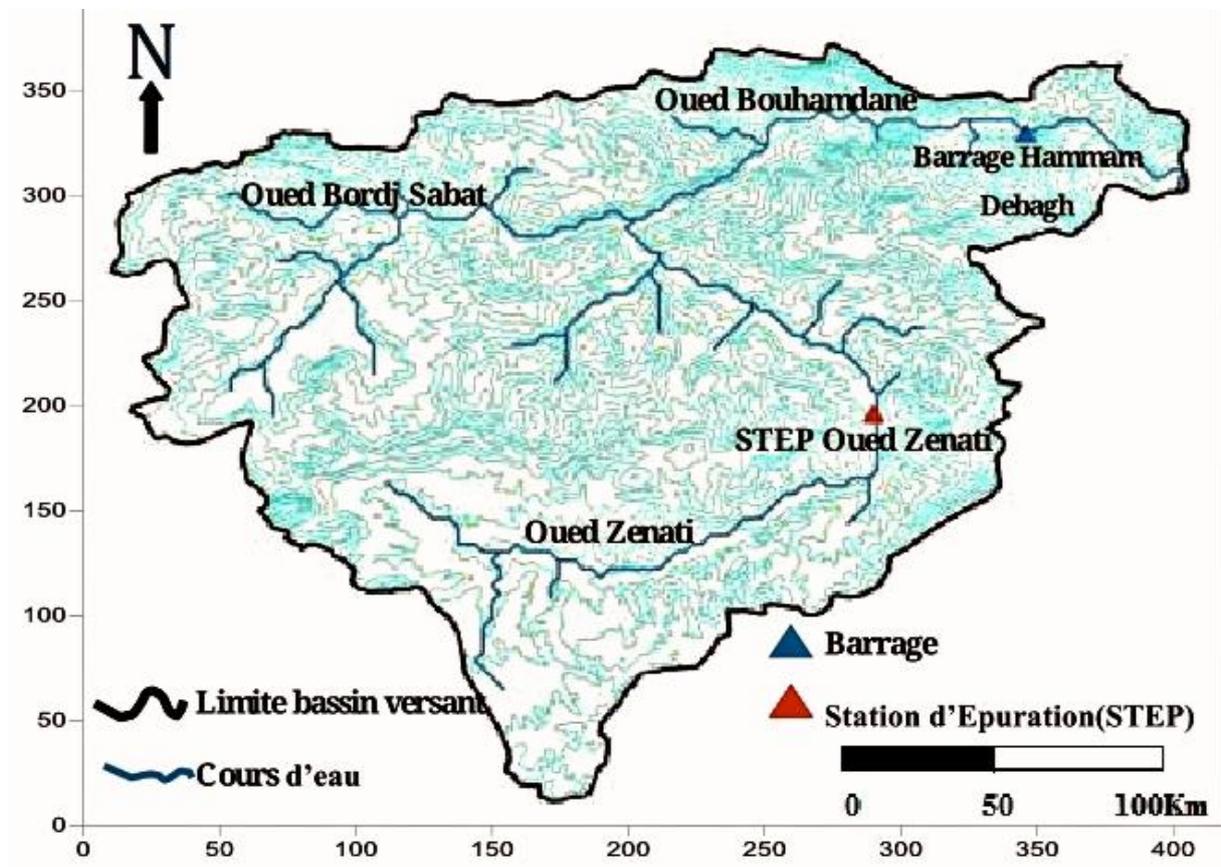


Figure I- 9 : Carte de réseau hydrographique du sous bassin versant d'Oued Bouhamdane (Zeghaba, 2018).

Le bassin versant de Bouhamdane présente un relief de moyenne montagne dont l'altitude moyenne est de 787.5 m (285 - 1289 m), la longueur du talweg principal est de 90 km (Monsouri, 2009), avec une pente moyenne de 0.8 % (A.N.R.H. 2008). La lithologie est variée,

constituée de formations superficielles (32.4%), grès, conglomérats, marno-calcaires et marnes schisteuses (40.5%), argiles et marnes (23.1%) et calcaires (4.0%).

L'Oued Bouhamdane suit l'axe d'un grand graben qui délimite au Sud la chaîne numidique. Celle-ci, d'orientation générale, SW-NE, s'étend sur les bassins de l'Oued Bouhamdane, la Moyenne Seybouse.

La région connaît une forte activité agricole, essentiellement la céréaliculture qui occupe 58.1% de la surface du bassin et l'olivier autour de 10 %, avec un couvert végétal naturel (chêne liège, maquis, reboisement) couvrant 31.7 % de la surface du bassin dont 19.5 % sont exploités comme terrains de parcours.

I.4.2. Le réseau hydrographique du bassin versant de L'Oued Bouhamdane

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du bassin versant (exutoire).

L'Oued Bouhamdane résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'Oued Bordj Sabath et l'Oued Zenati, drainant respectivement une superficie de 296.09 km² et de 592.15 km² et dont la confluence donne naissance à l'Oued Bouhamdane qui reçoit dans sa rive droite Oued El Hamira.

L'Oued Zenati :

- Il naît de la confluence de l'Oued El M'leh qui prend sa source à Djebel Oum Setttas (1325 m), et Chaâbet Toulfsa qui prend sa source à Kef Deb (1142 m) ;
- Il reçoit sur sa rive gauche les Oueds : Bou Skoum, Bemeb, Kalech, Chaâbet El Rassoul, Snoussi ; et sur sa rive droite Chaâbet Gueit et Terba, Oued El Gloub, Chaâbet Mrassel.

L'Oued Bordj Sabath :

- Il résulte aussi de la jonction de deux Oueds : l'Oued El Aria qui prend sa source à Djebel El Aria (1237 m), et reçoit dans sa rive droite : Oued Tarfà et dans sa rive gauche ; Oued Haoudja et Chaâbet Tamar. Et l'Oued Dardar qui prend naissance à partir de la confluence de l'Oued El Megroune qui prend sa source à M'zaret Sidi Chagraf (1289 m) et Chaâbet Sekek qui prend sa source à El Hadjar Essafra (1174 m).

Chapitre II

Généralités sur le

karst

II.1. Présentation générale du karst

Cette partie est inspirée de la très bonne description du karst dans la thèse de Chalikakis (2006).

De nombreuses définitions ont été proposées pour désigner convenablement le processus qui résulte de l'action dissolvante de l'eau sur certains types de roches. La définition proposée par Bakalowicz (1999) a été retenue : **le karst est l'ensemble des formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution de roches carbonatées (calcaires, dolomies) par l'eau rendue acide par le dioxyde de carbone ; par extension, l'ensemble des formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite).**

L'origine du mot karst est allemande et provient de la dénomination géographique d'une région s'étendant de Trieste en Italie, jusqu'au mont Snežnik à l'Est en Slovénie ; cette région était souvent étendue à une région située plus au Nord, le karst de la Carniole jusqu'à Ljubljana, avec la célèbre grotte de Postojna, Adelsberg (Cvijic, 1960). Le mot « karst » s'est répandu dans l'Europe centrale et occidentale. On désigne sous le nom de « phénomènes karstiques » les formes du relief, les caractères morphologiques et les processus hydrographiques particuliers aux terrains calcaires ou salins sur toute la surface de la Terre. En effet, le paysage karstique résulte des écoulements souterrains particuliers qui se mettent en place progressivement dans les roches carbonatées et salines et constitue également un aquifère puisque l'eau souterraine est totalement impliquée dans sa formation et dans son fonctionnement (Mangin, 1975 ; Bakalowicz, 1999).

Dans un premier temps, une description des morphologies typiques du paysage karstique est présentée, avant de voir les aspects hydrodynamiques du karst. Enfin, les processus de karstification et les différentes formes d'altérations sont détaillés à la fin de cette partie. Bien qu'il existe d'autres manières de voir et d'étudier le karst comme les approches génétique, spéléologique, chimique, climatique et archéologique, ce manuscrit est plus centré sur les visions morphologiques et hydrodynamiques, dans le cadre de l'approche fonctionnelle telle que décrite par Mangin (1975). Dans celle-ci, la définition et la compréhension du karst découlent de l'analyse du fonctionnement de l'aquifère, d'où son nom d'approche fonctionnelle. Cette démarche a débouché sur la définition du système karstique : "**Ensemble de formes de surface et souterraines organisées les unes par rapport aux autres pour constituer une unité de drainage**".

II.1.1. Morphologies karstiques caractéristiques

Une grande diversité morphologique et hydrographique est constatée dans les différentes régions karstiques (Fig. II-1). La composition chimique de la roche et le climat, sa couverture sédimentaire, la tectonique de la région, la présence et l'épaisseur de couches imperméables intercalées, sont des facteurs qui peuvent contrôler l'évolution de la karstification et provoquer des différences morphologiques considérables entre les régions karstiques.

On peut tout d'abord distinguer les formes karstiques de surface (exokarst) des formes souterraines (endokarst). Les dolines¹ sont, avec les lapiez, les premières expressions du karst en surface, même si on peut parfois retrouver ces morphologies plus en profondeur, notamment sous une couverture de sol (Fig. II-1). Les poljés, gouffres, avens et ouvalas sont également des formes superficielles remarquables par leurs dimensions car si les poljés et les ouvalas peuvent s'étaler sur de larges surfaces, les gouffres et les avens peuvent parfois atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres comme dans le système de Mammoth Cave aux Etats-Unis (Palmer, 1989).

En profondeur justement, on peut trouver des cavités de plus ou moins grande dimension, ainsi que des réseaux de conduits se développant parfois sur plusieurs dizaines de kilomètres linéaires et plusieurs centaines de mètres verticalement.

Toutes ces morphologies sont très bien décrites dans les ouvrages de Nicod (1972) et Salomon (2006).

L'eau de pluie infiltrée se charge en gaz carbonique d'origine pédologique lors de son passage à travers le sol et, sous l'effet d'un gradient hydraulique, circule dans les fractures de la roche. La karstification autour de ces fractures accroît les vides et le transport des particules solubles et insolubles provoque la création de vides plus importants. Des conduits organisés en réseau se forment ainsi et drainent les eaux depuis la surface jusqu'à une source généralement unique tandis que des zones de stockage connectées au réseau de conduits prennent place dans la zone saturée (Mangin, 1975, Bakalowicz et Dörfliger, 2005). Le résultat final se traduit

¹ La définition des termes utilisées et des photos d'illustrations sont proposées à la fin de ce paragraphe.

par une hétérogénéité considérable du milieu avec une organisation des vides déterminée par les écoulements souterrains (Mangin, 1975).

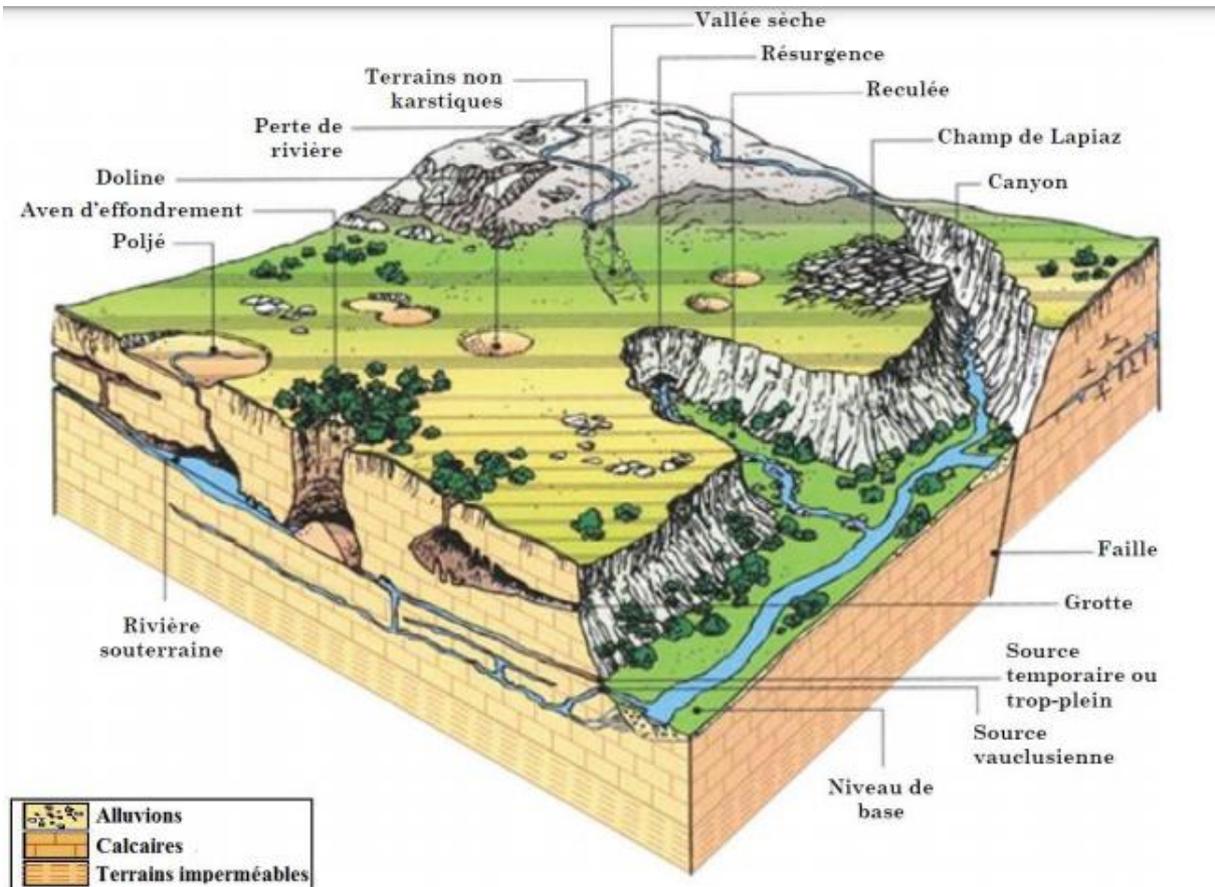


Figure II- 1 : Bloc-diagramme d'un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999).

Les photos ci-dessous illustrent des formes de relief caractéristiques des régions karstiques :

- La doline : C'est une dépression circulaire de modèle karstique.



Photo II- 1 : Doline sur le plateau de Lescaumère, Bielle, Pyrénées,-Atlantiques, France (source : Wikipédia).

- Le lapiez (ou lapiaz) : Il s'agit d'une surface de roche calcaire ou dolomitique creusée par dissolution de trous.



Photo II- 2 : Lapiez du Sillet (Jura, France) (Source : Wikimedia Commons).

- Le Poljé : C'est une dépression fermée d'origine karstique à fond plat ou presque, de quelques kilomètres à dizaines de kilomètres, elle correspond le plus souvent à une zone synclinale ou effondrée par failles, et ayant subi une morphogenèse karstique



Photo II- 3 : Poljé de Feneos dans le Nord-Est du Péloponnèse, en Grèce (source : Wikipédia).

- Le gouffre : C'est une cavité profonde et abrupte qui s'ouvre dans les régions calcaires, soit par dissolution, soit par effondrement de la voûte de cavité karstique.
- L'aven : C'est un gouffre s'ouvrant sur une cavité souterraine et résultant de la dissolution de couche calcaire.



Photo II- 4 : Abime de Rabanal (Brissac, Hérault, France) (source : Wikipédia).

- L'ouvala : C'est une dépression fermée par la coalescence de plusieurs dolines.



Photo II- 5 : Ouvala en Croatie (source : Wikipédia).

II.1.2. Caractère hydrodynamique du karst

Dans l'approche fonctionnelle, le fonctionnement des aquifères karstiques est étudié globalement, c'est à dire à l'échelle du bassin hydrogéologique en analysant les eaux à l'exutoire du système. Cela peut être d'un point de vue hydrochimique en étudiant les ions de l'eau et les isotopes (Bakalowicz, 1979 ; Plagnes, 1997 ; Emblanch, 1997), d'un point de vue hydrodynamique en étudiant les variations de débits par rapport aux entrées de pluie efficace (Mangin, 1975 ; Marsaud, 1996 ; Labat, 2000) ou encore à l'aide de modèles pluie-débit (Fleury et al., 2007 ; Moussu, 2011). La plupart du temps, plusieurs de ces approches sont combinées.

Au travers de nombreux travaux similaires et des observations *in-situ*, l'aquifère karstique proprement dit est divisé en trois zones principales : l'épikarst, la zone d'infiltration (zone non saturée) et la zone noyée (zone saturée) (Mangin, 1975, Bakalowicz, 1979).

Dans la zone noyée (Fig. II-2), les conduits assurent le rôle transmissif de l'aquifère, tandis que le côté capacitif est plutôt localisé dans les cavités moins bien connectées aux drains et aussi dans les fractures et la porosité inter-granulaire de la matrice rocheuse. Des études de décharge de conduits avec des traceurs ont montré des zones plus ou moins transmissives dans le réseau de drains (Morales et al., 2010). Les échanges entre conduits et matrice ont aussi fait l'objet de publications (Faulkner et al., 2009 ; Bailly-Comte et al., 2010).

La zone d'infiltration fait elle aussi l'objet d'études hydrodynamiques avec notamment des pluviomètres installés sous des stalactites pour corrélérer ce signal à celui de la pluie (Genty et Deflandre, 1998 ; Baker et Brunson, 2003 ; Arbel et al., 2010). Les auteurs ont montré un effet piston (transfert de pression entre la pluie nouvelle et les eaux plus profondes) et un mélange entre eaux d'infiltration rapide et eaux ayant un certain temps de séjour dans le système karstique. Ces phénomènes ont déjà été décrits dans la littérature à partir de l'analyse chimique à l'exutoire (Plagnes, 1997).

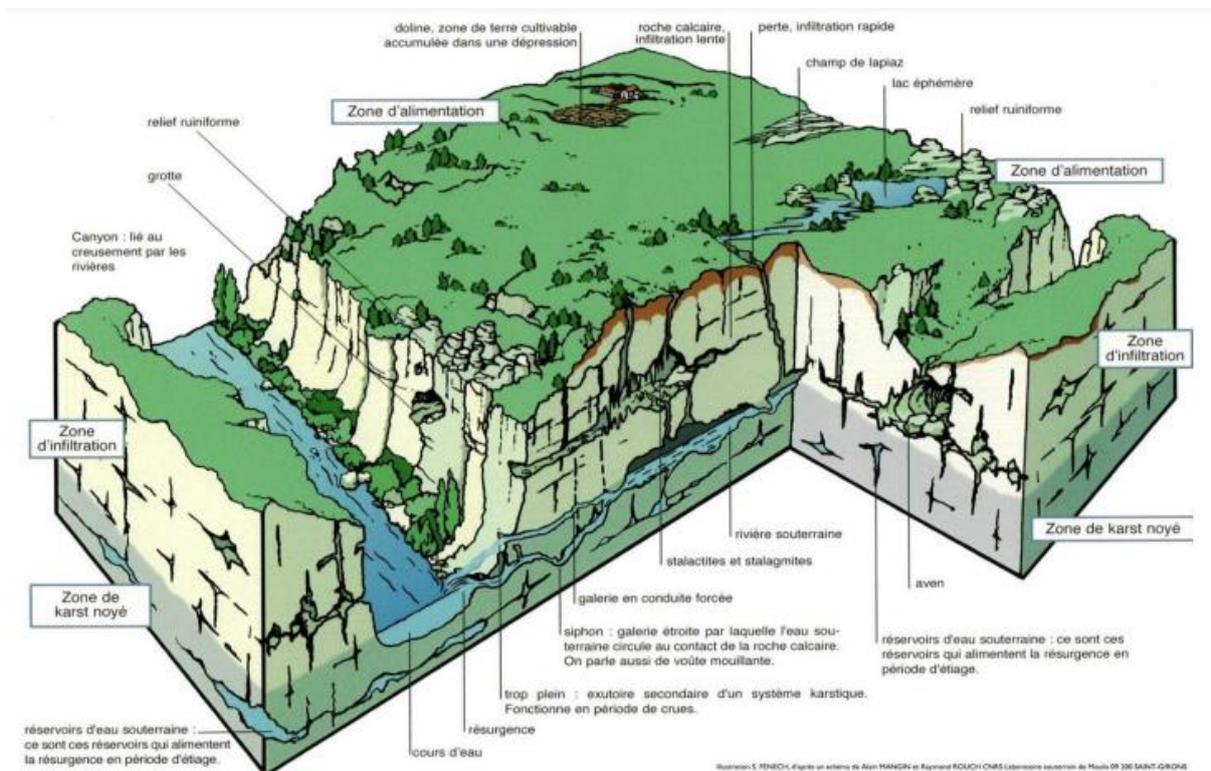


Figure II- 2 : Coupe et paysage synthétique d'un aquifère karstique (d'après Mangin, 1975).

L'épikarst est figuré en orange.

La zone d'alimentation est la partie la plus proche de la surface. Cette partie est caractérisée par un fort degré de fracturation et d'altération. Les eaux d'infiltration peuvent être momentanément retenues en formant un petit réservoir temporaire perché : l'épikarst (Fig. II-3). Cette zone saturée temporaire et discontinue, constitue l'aquifère épikarstique, elle assure l'interface entre le karst sous-jacent et les phénomènes externes et une alimentation permanente via l'infiltration lente vers la zone noyée (Bakalowicz, 1995 ; Kiraly, 2002 ; Perrin et al., 2003). Les eaux y sont soumises à l'évapotranspiration.

Le rôle de l'épikarst et son lien avec les dolines est très bien décrit par Williams (1983) et Klimchouk (2004) en propose une définition et une classification. L'épikarst est donc la frange plus altérée du massif carbonaté où la porosité et la perméabilité sont plus fortes et plus homogènes. Ce sous-système a une fonction régulatrice car il stocke l'eau et distribue la recharge à la zone d'infiltration de manière rapide ou lente (Fig. II-3).

Il faut noter également que même si la majorité de la porosité de l'épikarst est souvent représentée par des fractures, on peut aussi y trouver des conduits ainsi qu'une porosité matricielle (plus forte pour les dolomies par ailleurs).

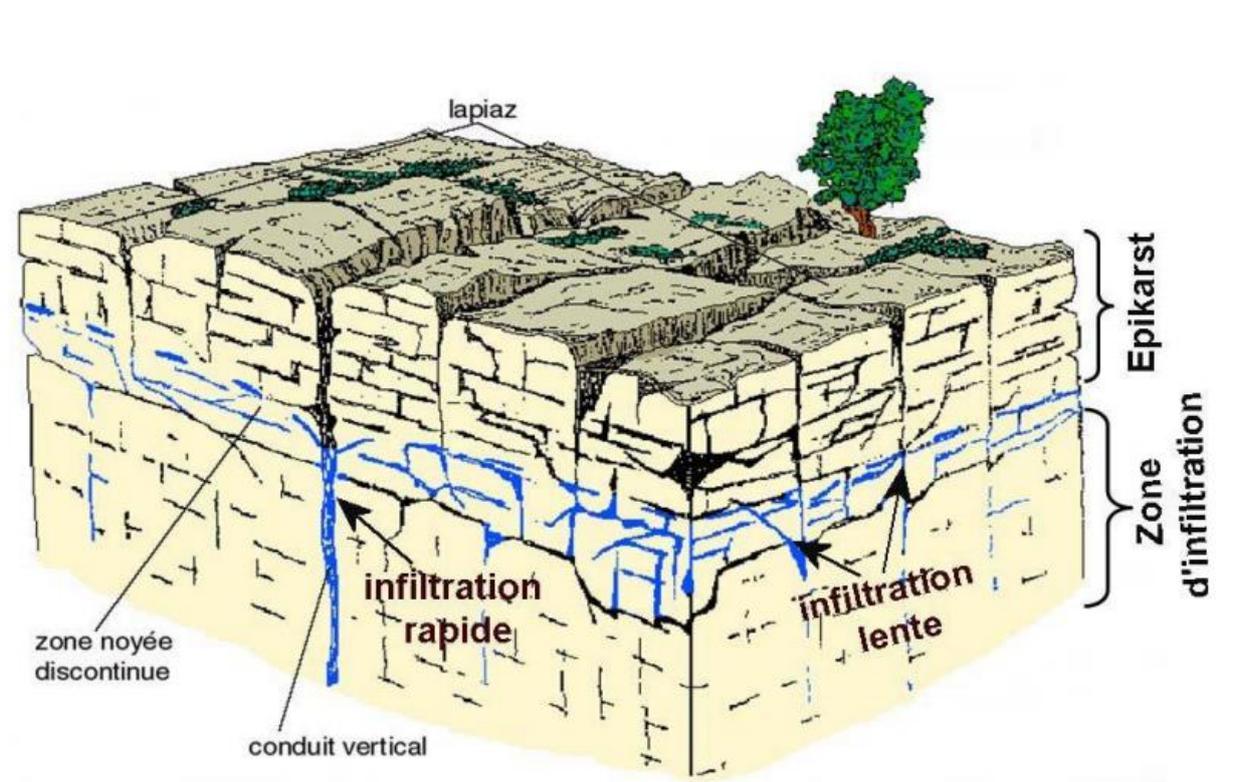


Figure II- 3 : Schéma représentatif de la zone épikarstique (Mangin, 1975).

II.1.3. Karstification et type d'altérations

Le système karstique provient d'une structuration spatiale et temporelle d'un ensemble de vides creusés au détriment de discontinuités dans une masse rocheuse grâce à une dissipation d'énergie (Quinif, 1998).

- La dissipation d'énergie résulte de la transformation de trois types d'énergies (chimique, potentielle et mécanique) : l'énergie chimique est la dissolution des roches carbonatées et donc la mise en solution d'ions (Ca^{2+} , HCO_3^- par exemple) et la

production de particules solides (argiles, sables...). L'eau acquiert un potentiel chimique plus important si elle est chargée en CO_2 . L'énergie potentielle permet l'évacuation des particules solides et en solution et donc dépend de la différence d'altitude entre l'entrée et la sortie et aussi de la quantité d'eau reliant ces deux points. Et enfin, l'énergie mécanique, créant et réouvrant la fracturation ou provoquant la surrection du massif, ce qui augmente l'énergie potentielle.

- Les discontinuités du massif rocheux permettent une circulation des eaux souterraines par certaines familles de fractures, dépendant de la perméabilité de celles-ci et donc des directions de contraintes tectoniques et du gradient hydraulique.
- La structuration temporelle et spatiale qui aboutit à la formation du système karstique résulte de la dissipation des énergies mises en œuvre dans un système ouvert. Le système de drainage tend à s'organiser de mieux en mieux au fil du temps.

Comme le montre la Figure (II-4), les deux tiers de la dissolution sont concentrés à la surface du massif et le quasi tiers restant est localisé dans le massif. En effet, seul 0.05 % de la dissolution sert à élargir le conduit en zone dénoyée dans le cas du karst des Mendip Hills localisé à Somerest, en Angleterre (Atkinson et Smith, 1976). De nombreux auteurs attribuent la majorité de la dissolution à la zone d'infiltration (Aubert, 1969 ; Mudry, 1987 ; Lastennet, 1994 ; Maire, 1994) avec environ 65 % pour les systèmes des Préalpes en Haute Savoie (=département française situé dans les Alpes), et 70 % pour les karsts du Jura (= département de l'est de la France). Plagnes (1997) a montré qu'environ 80 % de la dissolution se produit au niveau de la zone d'infiltration sur le Causse du Larzac (= haut plateau karstique français du sud du massif central qui s'étend de Millau à Lodève).

C'est donc à partir de la surface que va se développer la majorité de l'altération, là où les eaux se seront chargées en CO_2 pédologique créant ainsi de remarquables morphologies karstiques de subsurface.

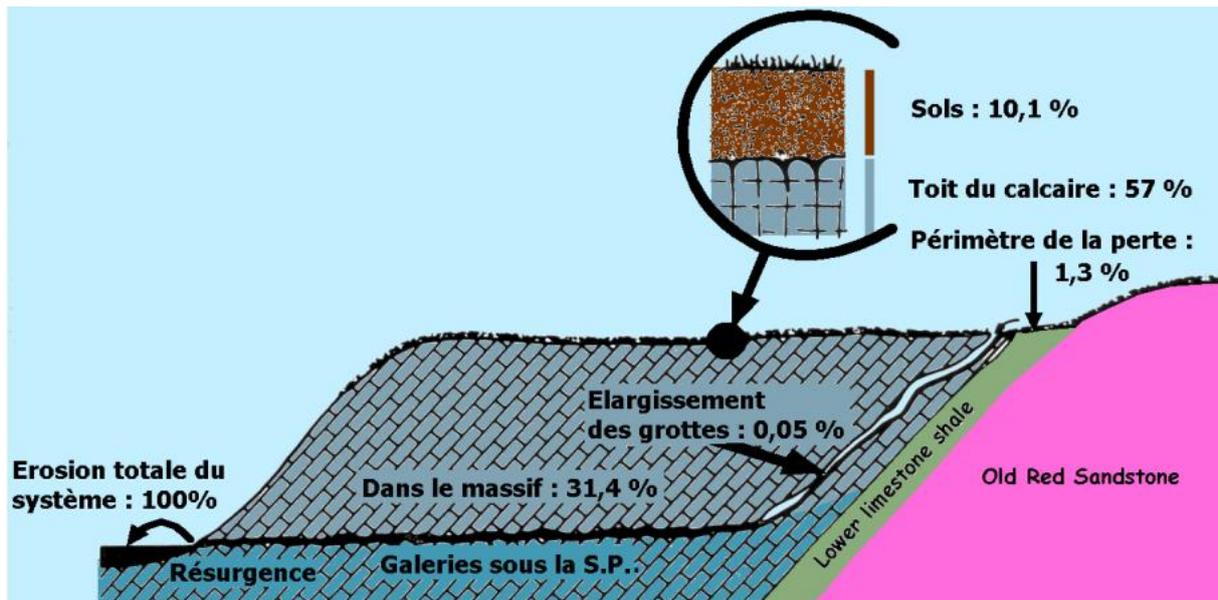


Figure II- 4 : Localisation de la dissolution dans un réseau karstique exemplaire.

Ce schéma localise la dissolution du calcaire dans un système karstique perte-résurgence inspiré du karst des Mendip Hills (d'après Atkinson et Smith, 1976). Les données sont obtenues par des analyses chimiques sur échantillons prélevés aux différents endroits

L'altération chimique joue un grand rôle dans la karstification car elle est à la base de l'exportation de matière hors du système (Ford et Williams, 1989). Cependant, les observations spéléologiques et en surface ont permis de dégager trois modes d'actions (Quinif, 2010) :

- **La corrosion :**

C'est le mode d'action le plus couramment invoqué pour expliquer la création des vides en surface comme en profondeur. L'action chimique de l'eau sur la roche provoque le départ de matière et donc la formation de vides.

- **La cryptoaltération :**

Elle se développe au contact des calcaires et d'une couverture suffisamment perméable et non karstifiable (Quinif et al., 1997 ; Bruxelles et al., 1999 ; Jaillet, 2000 ; Salomon, 2006). L'eau se charge en CO₂ dans les sols et la couverture, et dissout le calcaire à l'interface. Ce processus ne génère pas de vides car la couverture s'enfonce dans les zones où la matière a été dissoute. On peut ainsi trouver des cryptolapiaz et des cryptodolines comme le montre la Figure (II-5).

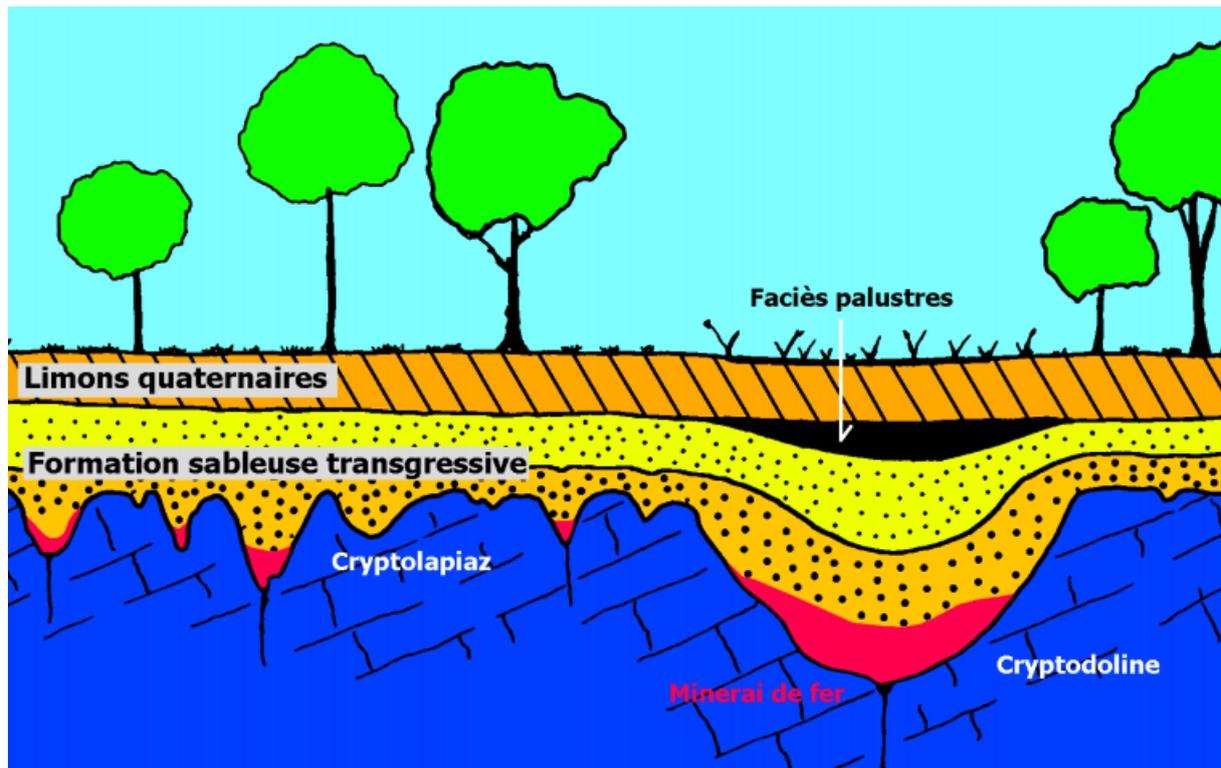


Figure II- 5 : Coupe de principe au travers d'un cryptokarst. Le toit du calcaire est découpé en lapiaz à gauche et cryptodoline à droite sous la couverture perméable sableuse (Quinif, 2010).

- **La fantômisation :**

C'est l'altération isovolumique d'une masse rocheuse, tout au moins dans sa première phase. Le terme de ce processus vient de ce que le massif fantômisé apparaît de loin intact ; la stratification, les accidents lithologiques sont toujours visibles mais la roche est devenue non cohérente, très poreuse, par disparition d'éléments solubles et conservation in situ des éléments moins solubles (Quinif et al., 1993 ; Vergari et Quinif, 1997 ; Kaufmann et al., 1999). Les vides souterrains résultants sont des pores et non des conduits. La fantômisation se déroule à partir de la surface *per descensum*, se traduisant par la formation de couloirs parallèles qui se réunissent pour dessiner de vastes volumes en forme d'entonnoirs ou d'hémisphères géants : les couloirs ont des largeurs de l'ordre de quelques mètres et des longueurs décamétriques, les grands fantômes ont des diamètres d'ordre hectométrique et des profondeurs allant jusqu'à plus de 100 m sous la surface du sol. Plus bas, ces structures se prolongent sous la forme de pseudo-endokarsts qui affectent la forme de galeries colmatées. La grande différence avec une galerie colmatée est qu'ici, le colmatage est en fait le résidu in

situ de l'altération (Vergari A, 1998). Jamais cette structure n'a été vide de matière. Ces pseudo-endokarsts dessinent des formes géométriques complexes qui se calquent sur la fracturation. Dans une phase évolutive ultérieure, le résidu d'altération se tasse sur lui-même et un vide apparaît au toit de la pseudo-galerie.

Chapitre III

Etude du karst de Hamмам Debagh

III.1. Introduction

La région de Hammam Debagh se caractérise par la présence de nombreux affleurements des roches sédimentaires de nature carbonatée. Il s'agit d'une région karstique, marquée par la présence de traces d'érosion de surface (comme des lapiez) et de traces d'érosion souterraine (comme les grottes).

Cette région a été étudiée au cours de notre travail de Master. Deux zones ont été explorées afin d'observer les traces d'érosion karstiques, la zone de Beir Ben Osmane et la zone qui entoure le Djebel Taya, zone montagneuse atteignant l'altitude de 1055 mètres. Le Djebel Taya se situe au nord-est de Machta 'Ain Taya.

III.2. Zone de Beir Ben Osmane

III.2.1. Introduction

Cette zone a été explorée pendant la journée du 25/05/2021.

Le Beir ben Osmane se situe à 3.5 km au Sud-Est de la commune de Hammam Debagh (nord-est Algérie $36^{\circ}26'27.12^{\circ}N$ et $7^{\circ}16'29.60^{\circ}E$), et à environ 15 km à l'ouest de la ville de Guelma.

Des données historiques et scientifiques indiquent que l'affaissement de ce terrain est survenu dans la région durant l'été 1878, donnant naissance à des poches souterrain que quelques infiltrations d'eau ont tôt fait de remplir. Le site de ce lac naturel souterrain est accessible par une petite ouverture.



Figure III- 1 : Localisation du site de Beir ben Ousmane (Vue satellite Google Earth).

Nous avons observé des affleurements de roches calcaires montrant des traces de dissolution, il s'agit de zone altérée, souvent détendue et fracturée à cause de l'eau chargée en acide carbonique (CO₂).



Photo III- 1 : Vue de l'accès au lac souterrain de Beir Ben Osmane (photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).



Photo III- 2 : Entrée de Beir Ben Osmane (photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).



Photo III- 3 : Dissolution à l'extérieur du lac de Beir Ben Osmane (photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).



Photo III- 4 : Il peut s'agir d'une doline visible en partie, ou de traces d'effondrement (Photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).

III.2.3. L'endokarst

Nous avons observé le lac souterrain de beir ben Osmane.

Nous sommes rentrés à l'intérieur par l'entrée de la grotte sur une distance jusqu'à 15 m.



Photo III- 5 : Intérieur du lac (Photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).



Photo III- 6 : Traces de dissolution à l'intérieur du lac (Photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).

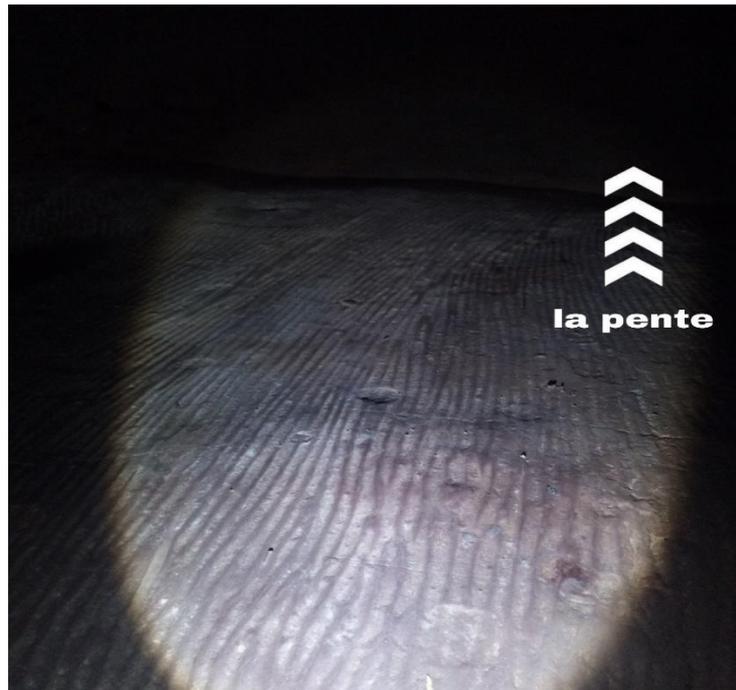


Photo III- 7 : Traces de dissolutions sur la bordure du lac. Ces traces suivent la ligne de plus grande pente (flèche). (Photo Alliouï, Benchabane, Boumendjel).

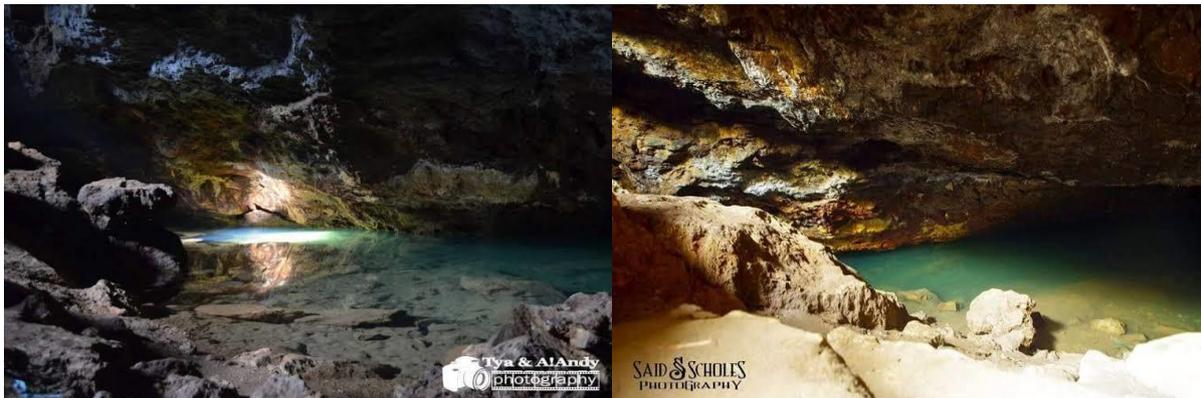


Photo III- 8 : Intérieur du lac (photos issues de la page Facebook des thermes médicalisés complexe hammam challala).

III.3. Zone du Djebel Taya

III.3.1. Introduction

Cette zone a été explorée pendant la journée du 07/06/2021.

Le Djebel Taya se situe à 15 Km au Nord-ouest de la ville de Hammam Debagh et il atteint l'altitude de 1055m. Plusieurs grottes sont présentes dans cette région, dont certaines accessibles au public (grotte de Ghar Djemaa).

On observe également des traces d'érosion en surface.

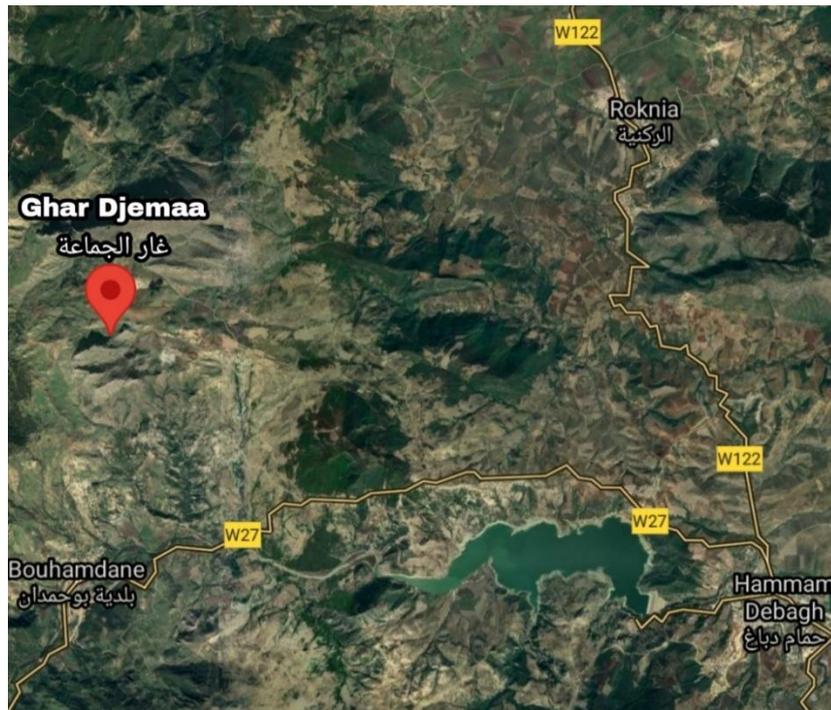


Figure III- 2 : Localisation de la grotte de Ghar Djemaa (Vue satellite Google Earth)

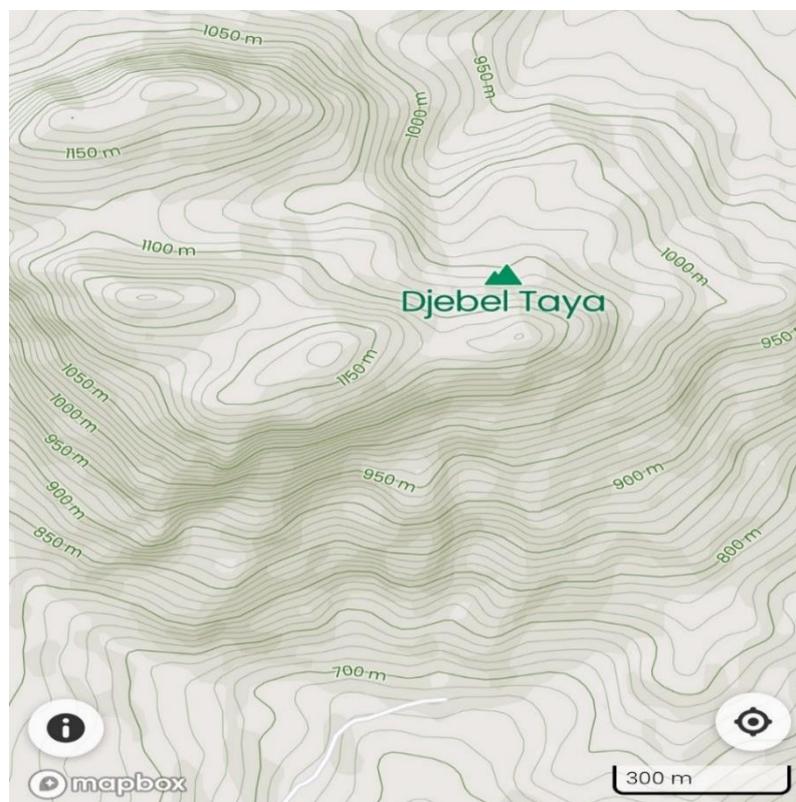


Figure III- 3 : Carte topographique montrant le relief et la localisation du Djebel Taya (Vue satellite Google Earth).

III.2.2. Le karst de surface (exokarst ou épikarst)

Nous avons observé des affleurements de roches calcaires montrant des traces de dissolution, dues à l'agressivité d'eaux riches en acide.



Photo III- 9 : Vue de différentes grottes présentes au niveau du Djebel Taya (Photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).



Photo III- 10 : Entrée de la grotte de Ghar Djemaa (Photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).



Photo III- 11 : Traces de dissolution et fractures dans la roche (Photo Alloui, Benchabane, Boumendjel).

III.2.3. L'endokarst

Nous avons observé la grotte de Ghar Djemaa.

Nous sommes rentrés à l'intérieur par l'entrée de la grotte sur une distance d'environ 10 m, mais malheureusement nous n'avons pas pu aller plus loin dans la grotte parce qu'il y a plusieurs raisons :

- L'absence d'un guide professionnel.
- L'absence des moyens nécessaires pour se déplacer à l'intérieur de la grotte (cordes d'escalade, projecteur de la lumière, moyens de communication spécial ...)

Donc nous n'avons pas pu faire de prélèvement d'eau dans ce site.

Il existe une association 'Ghar djemaa' qui est localisée à Bouhamdane et qui organise des visites dans la grotte. Cette association possède une page Facebook, dans laquelle sont partagées des photos, et des vidéos. Nous avons contacté le responsable de cette association par l'intermédiaire de cette page Facebook, mais malheureusement nous n'avons pas pu obtenir de rendez-vous avec cette personne, à cause du manque de temps.



**Photo III- 12 : Vue de l'intérieur de la Grotte de Ghar djemaa (à 10 mètres de l'entrée)
(photo Alliou, Benchabane, Boumendjel).**



Photo III- 13 : Stalagmite à l'intérieur de la grotte de Ghar djemaa (photo Mdm.Djerrab)

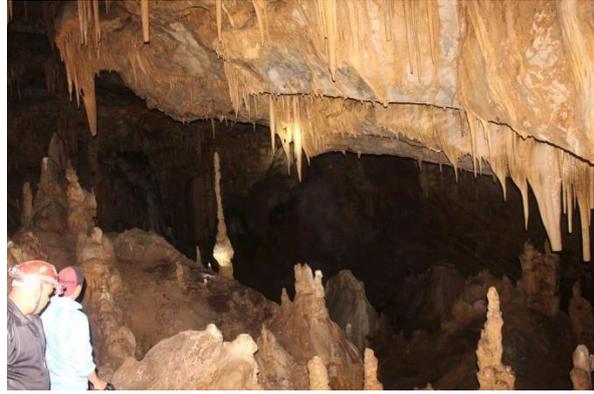
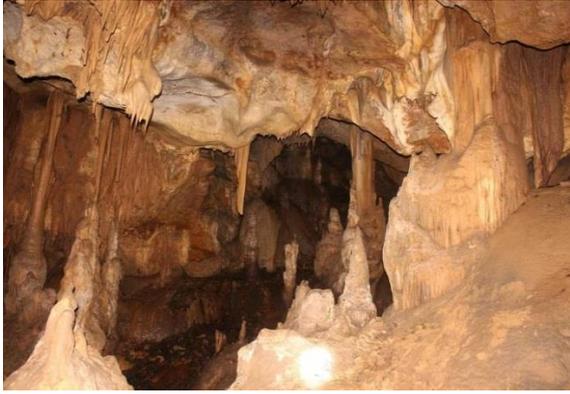


Photo III- 14 : Vues de l'intérieur de la grotte de Ghar djemaa (photos issues de la page Facebook de l'association 'Ghar Djemaa', prises le 24/04/2021).

Chapitre IV

Etude hydrochimique

IV.1. Méthodologie

IV.1.1. Résultat sur le terrain

Les prélèvements ont été réalisés au niveau du lac souterrain « Beir Ben Osmane » pendant la journée du 25/05/2021. Nous avons prélevé un échantillon dans un flacon en plastique bien nettoyé.

Nous avons utilisé un appareil de mesure multi-paramètre qui mesure :

- Le pH,
- La température,
- La conductivité,
- L'oxygène dissous,
- TDS (taux des sels dissous),
- La turbidité,
- La salinité,

Nous avons également utilisé un GPS pour mesurer les coordonnées géographiques de la zone d'étude (voir photo) :



Photo IV- 1 : A gauche : GPS de type GARMIN, A droite : Appareil multi-paramètre (WTW ,350i).

IV.1.1.2. Mode de Prélèvement

Les techniques de prélèvements sont variables en fonction du but recherché et de la nature de l'eau à analyser. Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée.

L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.) (Rodier et al, 2009).

Dans notre cas, l'échantillonnage pour les analyses physicochimiques s'est effectué dans des flacons propres de type bouteille en plastique d'eau minérale (Polyéthylène) de 1.5 litre.

IV.1.1.3. Mesures et analyse des paramètres

Les mesures *in situ* sont des analyses réalisées sur place par un appareil multi-paramètre (WTW ,350i) qui permet la mesure des différents paramètres fournis par la même sonde à 2 électrodes. Il faut suivre les procédures suivantes après avoir planté directement la sonde de mesure dans le récipient d'eau échantillonnée :

- Raccorder la sonde à l'instrument.
- Immerger la sonde dans l'échantillon à mesurer en évitant les chocs.
- Allumer l'instrument.
- L'instrument affichera les différents paramètres selon la programmation effectuée.
- Appuyer sur la touche LOG pour mémoriser les données ou sur la touche MENU pour entrer en mode programmation.

Pour certains paramètres, il est également possible de sélectionner l'unité de mesure en appuyant sur UNIT.

De nombreuses réactions (chimiques, physiques) peuvent se produire au sein d'un échantillon destiné à l'analyse, modifiant sensiblement les concentrations de certains éléments. Par exemple, la température, le pH, la conductivité et l'oxygène dissous doivent être mesurés sur place. Ces paramètres sont très sensibles aux conditions du milieu et susceptibles de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur le site (la liste des paramètres mesurés sur place est donnée dans le tableau suivant). Ils donnent les premières indications sur la qualité des eaux.

Tableau IV- 1 : Paramètres physiques mesurés sur terrain.

Paramètre	Matériel
Température T°C	Multi-paramètre (WTW ,350i)
Potentiel hydrogène (ph)	Multi-paramètre (WTW ,350i)
Oxygène dissous (OD mg/l) et en (%)	Multi-paramètre (WTW ,350i)
Conductivité électrique (CE µs/cm)	Multi-paramètre (WTW ,350i)
TDS (mg/l)	Multi-paramètre (WTW ,350i)
Salinité	Multi-paramètre (WTW ,350i)

Détails concernant les paramètres mesurés sur place :

- **Température (T°C) :**

Il est très important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision (Rodier et *al.* 1996). En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz (De Villers et *al.* 2005), dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique et dans la détermination du pH pour la connaissance de l'origine de l'eau. (Leclerc, 1996 ; Rodier et *al.* 1996). La température de l'eau dépend des échanges thermiques avec l'air ambiant et du rayonnement solaire.

La température joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique bactérienne et de l'évaporation des eaux. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. De plus elle met en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des inducteurs sur l'origine de l'eau (Drissi, 2008).

- **Potentiel d'Hydrogène (pH) :**

Le pH mesure la concentration en ions H⁺. Il traduit ainsi la balance entre l'acidité ou l'alcalinité sur une échelle de pH qui s'étend de 0 à 14 avec 7 étant neutre.

Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau (Castany et Margat, 1977, *in* Aouissi, 2010). Il joue aussi un rôle primordial dans les processus biologiques qui exigent des limites très étroites de pH (Zeddouri, 2003, *in* Aouissi, 2010), sans oublier que la mesure du pH donne des renseignements importants sur la nature des eaux (Detay, 1993, *in* Aouissi, 2010).

D'une façon générale, le pH des eaux naturelles est lié à la nature de terrains traversés, il varie habituellement entre 7,2 et 7,6 (Rodier, 1996, *in* Aouissi, 2010).

- **Conductivité électrique CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) :**

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique (Rodier *et al*, 2009).

La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés d'électrons. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (Saadali, 2007, *in* Aouissi, 2010).

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente (Mayet, 1994, *in* Aouissi, 2010). Elle s'exprime en micro siemens par centimètre (Detay, 1993, *in* Aouissi, 2010).

- **Oxygène dissous (O_2) :**

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il conditionne la vie des microorganismes aquatiques. Il est un facteur écologique essentiel indispensable pour la respiration des organismes vivants aérobies (Chocat, 1997, *in* Chibani, 2009). La diminution de sa teneur génère un milieu favorable à la fermentation et aux dégagements d'odeurs. Sa solubilité est fonction de la température, la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité (Rodier, 1994, *in* Aouissi, 2010). La mesure de l'oxygène dissous (mg/l ou en % saturation) est importante car elle permet de fournir des informations concernant la dégradation de substances organiques (réactions biochimiques), la provenance de l'eau, la mobilisation potentielle de certains métaux, etc. (Thierrin *et al*, 2001, *in* Aouissi, 2010).

- **Minéralisation globale d'une eau (TDS) :**

La minéralisation est fonction de la géologie des terrains traversés. D'une façon générale, elle est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux superficielles.

Une eau dont la minéralisation est inférieure à 600 mg/l est généralement considérée comme bonne ; au-delà de 1200 mg/l, elle devient (sauf accoutumance) assez désagréable (Rodier, 1996, *in* Aouissi, 2010).

- **Salinité :**

C'est la masse de sels (composés ioniques) dissous dans 1L d'eau. Elle s'exprime en g par Kg d'eau. Un composé ionique ou solide ionique cristallin est constitué de cations (ions chargés positivement) et d'anions (ions chargés négativement) régulièrement disposés dans l'espace.

Globalement, un cristal ionique est électriquement neutre. Chaque solide ionique cristallin possède une formule statistique qui indique la nature et la proportion des ions présents sans en mentionner.

IV.1.2. En laboratoire

L'étude hydro-chimique a été réalisée au niveau de la station de traitement de Hammam Debagh pendant la semaine du 26/05/2021.

Un seul prélèvement a été analysé (celui qui a été prélevée dans le site de Beir Ben Osmane à Hammam Debagh).

Nous avons utilisé les appareils suivants (photo page suivante) :

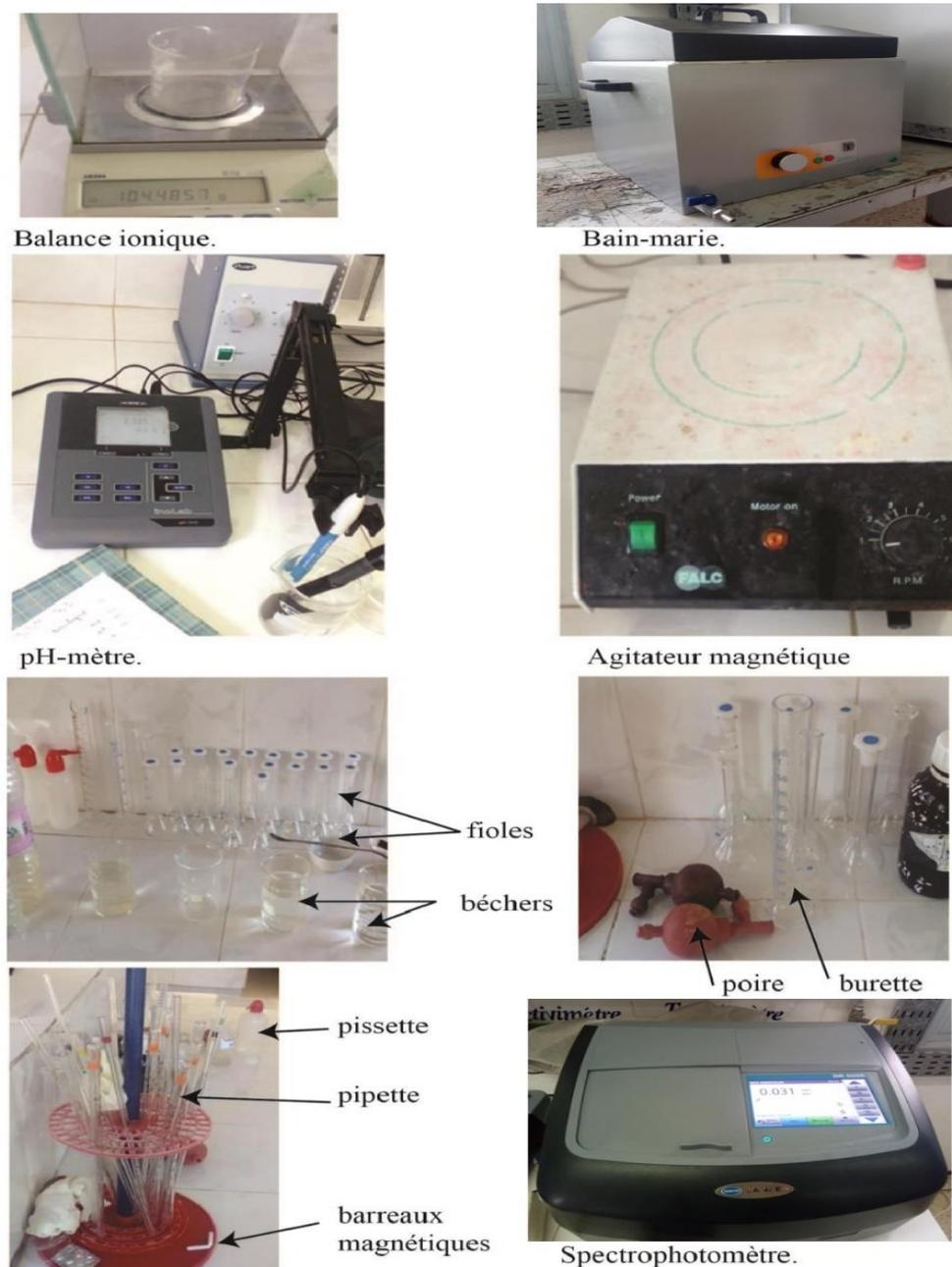


Photo IV- 2 : Appareillage utilisé pour l'analyse chimique des eaux au laboratoire de la station de traitement du barrage de Hammam Debagh.

Eléments chimiques analysés :

On procède à une analyse des éléments majeurs (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^- , NO_3^- , NO_2^-) ainsi que le titre alcalimétrique complet TAC et le titre hydrotimétrique TH.

Tableau IV- 2 : Méthode de dosages des paramètres chimiques.

Paramètre chimique	Unité	Méthode
Calcium	mg/l	Méthode titrimétrique à l'EDTA
Magnésium	mg/l	Méthode titrimétrique à l'EDTA
Fer	mg/l	Méthode spectrophotométrique à la phénantroline
Ammonium	mg/l	Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire
Bicarbonate	mg/l	Méthode titrimétrique à l'acide chlorhydrique à 1 N, et solution d'HCl à 0,1N.
Sulfate	mg/l	Méthode spectrophotométrique au BaCl ₂
Chlorure	mg/l	Méthode de Mohr
Nitrate	mg/l	Méthode spectrophotométrique au salicylate de sodium.
Nitrite	mg/l	Méthode titrimétrique
Phosphate	mg/l	Méthode spectrophotométrique à l'acide ascorbique
Th	°F (Degré français)	Méthode titrimétrique à l'EDTA

Les paramètres chimiques analysés sont les suivants :

Calcium (Ca⁺²) :

Le titrage des ions calcium est réalisé avec une solution aqueuse de l'EDTA à un pH compris entre 12 et 13. L'indicateur utilisé est le murexide, qui forme un complexe rose avec le calcium.

Lors du titrage, l'EDTA réagit avec les ions calcium, l'indicateur vire alors de la couleur rose à la couleur violette.

Magnésium (Mg⁺²) :

Le magnésium est l'un des éléments les plus répandus dans la nature ; il constitue environ 2,1% de l'écorce terrestre. La plupart de ses sels sont très solubles dans l'eau (Rodier, 1996).

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) (Debieche, 2002). Il est classé comme élément significatif de la dureté de l'eau.

Le titrage molaire des ions calcium et magnésium a été fait avec une solution de sel disodique de l'acide éthylène-diamine-tétra-acétique (EDTA) à pH=10.

Le noir érichrome T, qui donne une couleur rouge foncé ou violette en présence des ions calcium et magnésium, est utilisé comme indicateur (Rodier et al, 2009).

Sodium et Potassium (Na⁺ et K⁺) :

La photométrie de flamme permet le dosage des cations alcalins Li, Na, K.

Le photomètre de flamme est constitué de trois éléments : le bruleur, le monochromateur et d'une cellule photoélectrique ; d'un amplificateur et d'un afficheur.

Fer (Fe⁺²) :

On ajoute une solution de phénantroline-1.10 à une prise d'essai et on effectue une mesure photométrique du complexe rouge-orange à une longueur d'onde de 510 nm. Le complexe fer (IIphénantroline-1.10) est stable dans l'intervalle de pH de 2.5 à 9 et l'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité du fer.

Ammonium (NH₄⁺) :

On réalise une mesure spectrométrique du composé bleu formé par réaction de l'ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite en présence du nitroprussiate de sodium. Les ions hypochlorite sont générés *in situ* par hydrolyse alcaline du sel de sodium du dichoroisocyanurate de sodium.

Bicarbonate (HCO₃⁻) :

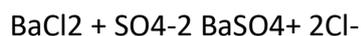
L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonates et hydroxydes. La détermination des volumes successifs d'acide fort en solution diluée est nécessaire pour neutraliser, aux niveaux de pH = 8.3 et 4.3, le volume d'eau à analyser.

La première détermination sert à calculer le titre alcalimétrique (TA), la seconde à calculer le titre alcalimétrique complet (TAC).

On titre avec de l'HCl à 0,1 N jusqu'à obtention d'un pH de 4,3 (Aminot et Chaussepied, 1983).

Sulfate (SO₄⁻²) :

Les ions sulfates sont précipités et dosés à l'état de sulfate de baryum suivant la réaction :



Nitrate (NO_3^-):

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitro-salicylate de sodium, coloré en jaune et qui peut être dosé par colorimétrie.

Nitrite (NO_2^-):

Les ions nitrites réagissent en milieu acide ($\text{pH} = 1.9$) avec la sulfamylade en formant du sel de Diazonium qui forme avec le N- (1-naphtyl) – éthylène-diamine – dichlorohydraté un colorant azoïque rouge.

Chlorure (Cl^-):

Les chlorures sont dosés en milieu neutre, par une solution titrée de nitrate d'argent N/10 en présence de chromate de potassium à 10%. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

Phosphate (PO_4^{3-}):

En milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium, les ortho phosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue susceptible d'un dosage spectrométrique. Certaines formes organiques pouvant être hydrolysées au cours de l'établissement de la coloration et donner des ortho phosphates, le développement de la coloration est accéléré par l'utilisation d'un catalyseur, le tartrate double d'antimoine et de potassium (Rodier, 2009).

Alcalinité (TA-TAC):

À l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement de la présence d'hydrogencarbonates, de carbonates et d'hydroxydes.

On distingue comme pour la mesure de l'acidité, deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

La détermination des volumes successifs d'acide fort en solution diluée est nécessaire pour neutraliser, aux niveaux de pH 8.3 et 4.3, le volume d'eau à analyser. La première détermination sert à calculer le titre alcalimétrique (TA), la seconde à calculer le titre alcalimétrique complet (TAC) (Rodier et al, 2009).

Matière en Suspension (MES) :

La détermination des matières en suspension dans l'eau s'effectue par filtration, l'eau est filtrée et le poids de matières retenues par le filtre est déterminé par pesée différentielle

Matière Organique (MO) :

L'échantillon d'eau est en présence d'une quantité connue de permanganate de potassium et d'acide sulfurique pendant une période donnée (10min). Une partie du permanganate est réduite par les matières oxydables de l'échantillon. L'excès de permanganate est déterminé par addition d'un excès d'oxalate, suivie par un titrage de l'oxalate en excès par du permanganate (principe de titrage en retour).

Résidu sec (RS) :

On provoque l'évaporation au bain d'eau bouillante d'un volume d'eau choisie en fonction des quantités de matières fixes présentes, dessiccation à l'étuve à température donnée et pesée du résidu.

Le résidu sec à 100-105 °C :

Une partie ou la totalité tant de l'eau interstitielle que de l'eau de cristallisation de certains sels peut s'évaporer. Vers 105-110 °C, les hydrogénocarbonates se transforment en carbonates, ce qui entraîne une perte d'anhydride carbonique.

Il peut y avoir, en outre, une perte plus ou moins négligeable de matières organiques.

Dureté totale (TH) :

La dureté d'une eau ou titre hydrotimétrique (TH) est la somme des cations alcalino-terreux présents dans l'eau, c'est le cas des ions calcium et magnésium. Ces ions présents dans l'eau sous forme de sels de chlorure, de sulfates ou hydrogénocarbonate. On détermine la dureté totale de l'eau par la méthode complexométrique.

Turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, etc. L'appréciation de l'abondance de ces particules mesure son degré de turbidité. Celui-ci sera d'autant plus faible que le traitement de l'eau aura été plus efficace (Rodier *et al.*, 2009).

Elle est exprimée en unités et correspond à une mesure optique de passage de lumière. D'autres unités comparables sont employées, l'unité néphélométrique de turbidité ou NTU.

IV.2 Résultats et discussions

Les eaux naturelles constituent un milieu complexe. Si leurs compositions sont en relation directe avec les constituants des sols et des couches géologiques traversées, la qualité des eaux est largement affectée par le couvert végétal, les pratiques agricoles, l'urbanisation et plus généralement par l'activité économique développée dans les paysages où elles coulent. Mais c'est surtout depuis l'essor de la chimie au cours du XX^{ème} siècle et la mise sur le marché de plusieurs dizaines de milliers de substances de synthèse au travers de l'agrochimie, de la pharmacie humaine et vétérinaire, des produits phytosanitaires, des solvants, des matériaux, etc. que la contamination des eaux naturelles s'est diversifiée. Ceci explique l'inflation, au cours des dernières décennies, du nombre de paramètres utilisés pour définir la qualité des eaux (Rodier et *al.*, 2009).

Ce travail fait le point des connaissances sur la qualité physico-chimique de l'eau du lac souterrain Beir Ben Osmane (avec un prélèvement d'eau effectué le 25/05/2021) et de la grotte de Ghar Djemaa (résultats obtenus auprès du laboratoire de la station de traitement de l'ADE). Nous présenterons dans un premier temps les résultats sous forme de tableau, puis une interprétation est proposée (diagramme de Piper, de Schoeller Berkalov...).

IV.2.1 Les normes des paramètres physico-chimiques d'une eau potable selon OMS

Concernant l'eau potable, seules les substances présentant un risque direct pour la santé ou donnant une mauvaise qualité esthétique sont contrôlées. Leurs concentrations doivent être comparées aux concentrations maximales acceptables (CMA), donc il est intéressant de comparer ces normes avec les recommandations.

Tableau IV- 3 : Normes concernant les paramètres physico-chimiques d'une eau potable.

Paramètres physico-chimiques	Unité	Norme OMS	Norme (Algérienne, 2000)
Température	°C	25 (OMS 2011)	-
PH	-	6,5 à 8,5 (OMS 2011)	6.5 à 8.5
Conductivité	µs/cm	1400 (OMS 2011)	1000

Chapitre IV. Etude hydrochimique

Résidus secs	mg/l après séchage	Max 2000 (OMS 2006)	Max 2800
Alcalinité totale	°F	≥ 2,5 (OMS 2006)	-
TDS	mg/l	≥1000	-
Dureté totale	mg/l	≥1500	10 à 50
Chlorure	mg/l de Cl ⁻	250 (OMS 2011)	200 à 500
Calcium	mg/l de Ca ²⁺	75 (OMS 2011)	200
Bicarbonate	mg/l de HCO ₃ ⁻	500 (OMS 2011)	-
Magnésium	mg/l de Mg ²⁺	50 (OMS 2011)	-
Sulfates	mg/l de SO ₄ ⁻	250 (OMS 2011)	200 à 400
Sodium	mg/l de Na ⁺	200 (OMS 2006)	200
Potassium	mg/l de K ⁺	12 (OMS 2006)	-
Fer	mg/l	0.3 (OMS 2011)	Au maximum 0.3

Tableau IV- 4 : Classes de turbidité usuelles (NTU= nephelometric turbidity unit) [Merzoug, 2009].

NTU < 5	Eau claire
5 < NTU < 30	Eau légèrement trouble
NTU > 50	Eau trouble

Tableau IV- 5 : Qualité des eaux en fonction de la conductivité électrique (Monod, 1989).

Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	Qualité des eaux	Classe
CE < 400	Excellente	1A
400 < CE < 750	Bonne	1B
750 < CE < 1500	Passable	2
1500 < CE < 3000	Médiocre	3

Tableau IV- 6 : Potabilité en fonction du taux de résidus secs (Rodier, 2005).

Résidu sec (mg/L)	Potabilité
RS < 500	Bonne
500 < RS < 1000	Passable
3000 < RS < 4000	Mauvaise

Tableau IV- 71 : Normes concernant les polluants dans les eaux potables.

Paramètres de pollution	Unité	Norme (OMS)	Norme (Algérienne, 2000)
Nitrates	mg/l	50 (OMS 2017)	Au maximum 50
Nitrites	mg/l	3 (OMS 2017)	Au maximum 0.1
Ammonium	mg/l	0.5 (OMS 2011)	Au maximum 0.5
Phosphate	mg/l	0.5 (OMS 2011)	Au maximum 0.5

IV.2.2 Présentation des résultats

IV.2.2.1 Les paramètres physico-chimiques de l'eau

➤ **Les résultats des mesures sur le terrain :**

Nos résultats sont tout d'abord détaillés sous forme de tableau :

Tableau IV- 8 : Les paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain.

Paramètre Site	PH	T (°C)	Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	Salinité (g / kg)	Turbidité (NTU)	Ox (%)
Beir Ben Osmane	7.72	21.50	2200	1112	1.10	0.67	77.70
Ghar Djemaa	7.85	19	1810	855	1.05	1.25	75.41

➤ Les résultats des mesures au laboratoire :

- Les éléments majeurs :

Tableau IV- 9 : Les éléments chimiques majeurs.

Eléments chimiques (mg/L) Site	Ca ⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻
Beir ben osman	390.08	11.18	47	51.7	184.6	735	158.6
Ghar Demaa	100.01	28.67	69.00	0.41	85.00	42.60	368.60

- Les autres paramètres physico-chimiques :

Tableau IV- 10 : Paramètres physico-chimiques mesurés en laboratoire.

Paramètres Site	TH	TA	Tac	MES	Mo	RS	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³	Fe ⁺²
Beir Ben Osmane	102	00	13	4	4	2000.5	0.015	19.4	0.307	0.02
Ghar Djemaa	95	00	9	3	3	1600	0.00	1.53	0.15	0.015

L'interprétation des résultats physico-chimiques :

A partir des résultats présentés dans les tableaux, on peut déterminer que les eaux du lac souterrain (Beir Ben Osmane) et celles de Ghar Djemaa ne sont pas tolérées pour être l'alimentation en eau potable parce que non conformes aux normes applicables par l'OMS.

Les paramètres qui sont non conformes sont les suivants :

- Beir Ben Osmane : calcium, potassium, sulfate, TDS (taux des sels dissous). Ces éléments sont présents en concentration trop élevée.
- Ghar Djemaa : calcium, conductivité.

IV.2.2. Hydrochimie

IV.2.2.1. Introduction

L'hydrochimie étudie les interactions entre l'eau et la roche. Au cours de sa circulation dans le sous-sol, l'eau va se charger en substances minérales. Ce phénomène est appelé échange de base.

La chimie des différentes sources en eau (eaux de surface, eaux souterraines) est souvent influencée par la dissolution des formations géologiques, les rejets industriels ou encore l'activité agricole.

En raison de l'utilisation de ces eaux, l'hydrochimie permet de :

- Donner une idée de la qualité chimique de l'eau,
- Visualiser à l'aide de cartes la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous

IV.2.2.2 Qualité des données :

L'analyse des balances ioniques permet de contrôler la cohérence des résultats. Il s'agit de comparer quantitativement les cations et les anions, pour voir si la somme des premiers correspond à celle des seconds. Pour ce faire, on utilise une unité commune (**le milli-équivalent par litre ou meq/l**). Dans le cas d'une trop grande différence entre les cations et les anions, cela indique que les résultats ne sont pas satisfaisants (un élément a pu être mal estimé ou oublié), et donc que les analyses ne sont pas fiables.

La méthode utilisée est la Balance Ionique (BI) : elle est exprimée sous forme d'un écart relatif par la formule suivante :

$$BI = \frac{\sum r(\text{cations}) - \sum r(\text{anions})}{\sum r(\text{cations}) + \sum r(\text{anions})} \times 100$$

Chapitre IV. Etude hydrochimique

Toutes les valeurs des cations et anions sont en **meq/l**.

D'une manière générale, plus l'écart entre cations et anions est faible, meilleur sont les résultats. On prend en compte la valeur absolue de la balance ionique (donc sans tenir compte du signe) :

Tableau IV- 11 : Balance ionique et fiabilité des résultats.

Valeur absolue de la balance ionique BI	Fiabilité des résultats
< 1 %	Excellente
Comprise entre 1 et 5 %	Acceptable
Comprise entre 5 et 10 %	Médiocre
> 10 %	Douteuse (mauvaise)

Tableau IV- 12 : Analyse chimique de l'eau du Lac Beir Ben Osmane et Ghar Djemaa (en meq/l)

La masse équivalente par litre (meq/l)	20	12	39	23	48	62	35.5	61	
Les éléments majeurs	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	La balance ionique
Beir Ben Osmane	19.50	0.93	1.32	2.040	15.31	0.31	5.20	2.60	0.88%
Ghar Djemaa	5.00	2.39	0.01	3.00	1.77	0.02	1.20	6.04	7%

- La fiabilité de résultat est excellente pour le lac de Beir Ben Osmane.
- La fiabilité de résultat est médiocre pour Ghar Djemaa.

IV.2.2.3 Outils et méthodes utilisé dans la présentation graphique

Pour pouvoir analyser ces données et en ressortir le plus d'information en peu de temps, il a fallu utiliser des outils et méthodes efficaces et rapides.

Chapitre IV. Etude hydrochimique

IV.2.2.3.1 Outils :

Le principal outil utilisé est le logiciel DIAGRAMMES (Fig. IV-1) créé par Roland SIMLER du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (2004). C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau. Ces fonctions sont variées et complètes, en voici quelques-unes :

· Les diagrammes :

- Piper-Stiff
- Schoeller-Berkalov – Binaire
- Korjinski - Rose des vents

· Les paramètres calculés :

- balances ionique - teneurs en cations
- dureté - teneurs en anions
- indice de saturation (calcite, dolomite, aragonite, gypse)

Toutes les fonctionnalités n'ont pas été utilisées, mais ce logiciel s'avère être simple d'utilisation. De ce fait, les diagrammes de PIPER et de SCHOELLER ont été établis grâce à ce logiciel. Pour finir l'aspect concernant les variations de pH ainsi que le calcul des équilibres calco-carboniques que nous verrons plus tard, ont pu être étudiés grâce à ce logiciel.

The screenshot shows the DIAGRAMMES software interface. At the top, there are menu options: Fichier, Affichage, Edition, Diagrammes, Constantes, A propos, Langue, Quitter, Rouvrir. Below the menu is a toolbar with options like 'Traiter des fichiers Excel en mg/L', 'mg/L', 'meq/L', 'mmol/L', and '20 groupes'. A legend table is visible on the right side of the toolbar.

Groupes	Légende	Fond	Bord
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

Below the toolbar is a data table with columns: n, Nom, Libellé, Groupe, Piper, Schoeller, Stiff, XY, Korjinski, Phreeq, Stat, TDS, T°C, pH, c25°C, cCALC, cCs%, Bal=0%, Balance, refaire, Cations, Anions, Ca, Mg, Na, K. The table contains 20 rows of data for various 'Galerie Salazie' samples.

At the bottom, there is a search bar with 'Utiliser ces facteurs' checked, and a table of factors for various ions: Ca, Mg, Na, K, Fe(III), Mn, Sr, HCO3, CO3, Cl, SO4, PO4, NO3, NO2, F, Br, SO2. Below this is a 'Rechercher dans Nom/Libellé' field, a 'Modification par cellule' dropdown, and a 'Nouvelle valeur' input field. A 'Recalculer' button is also present.

Figure IV-1 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME.

IV.2.2.3.2 Méthodes :

Le diagramme de Piper (Fig. IV-3) permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004)

Le diagramme de Schoeller, Berkalov (Fig. IV-4) permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

Chapitre IV. Etude hydrochimique

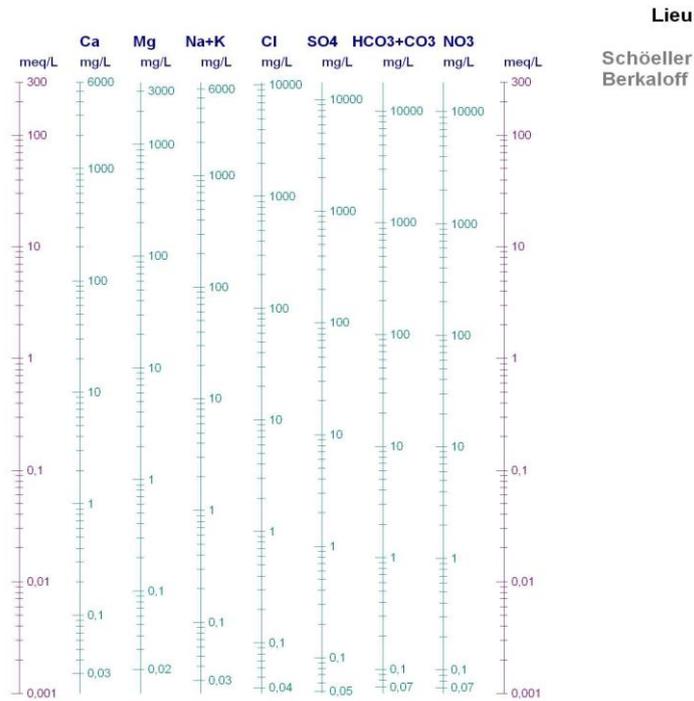


Diagramme de Piper

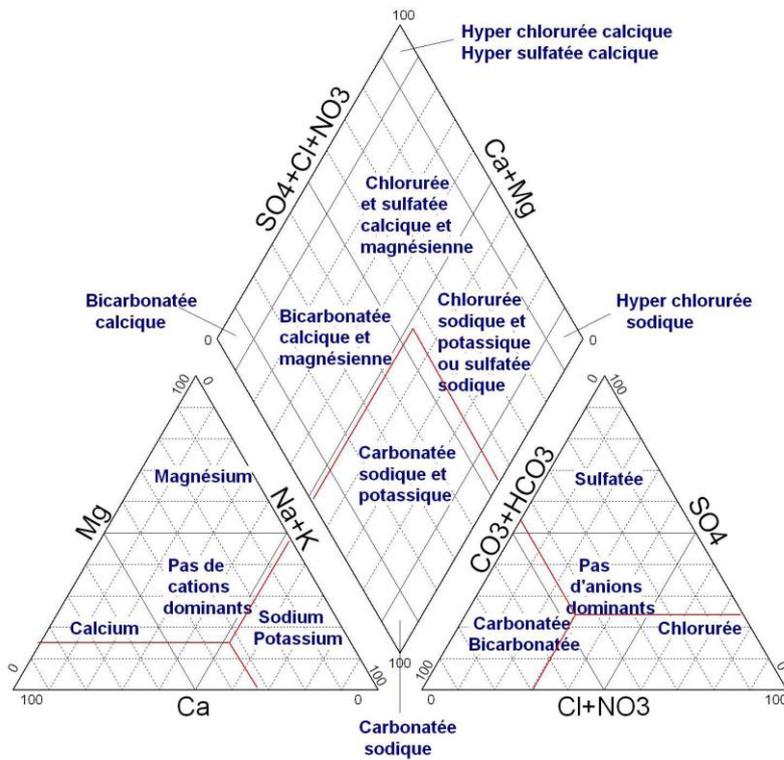


Figure IV- 2 : Diagrammes de Piper et de Schoeller Berkaloff vierges.

IV.2.2.4 Présentation graphique des faciès chimiques

IV.2.2.4.1. Diagramme de Piper

^

Diagramme de Piper

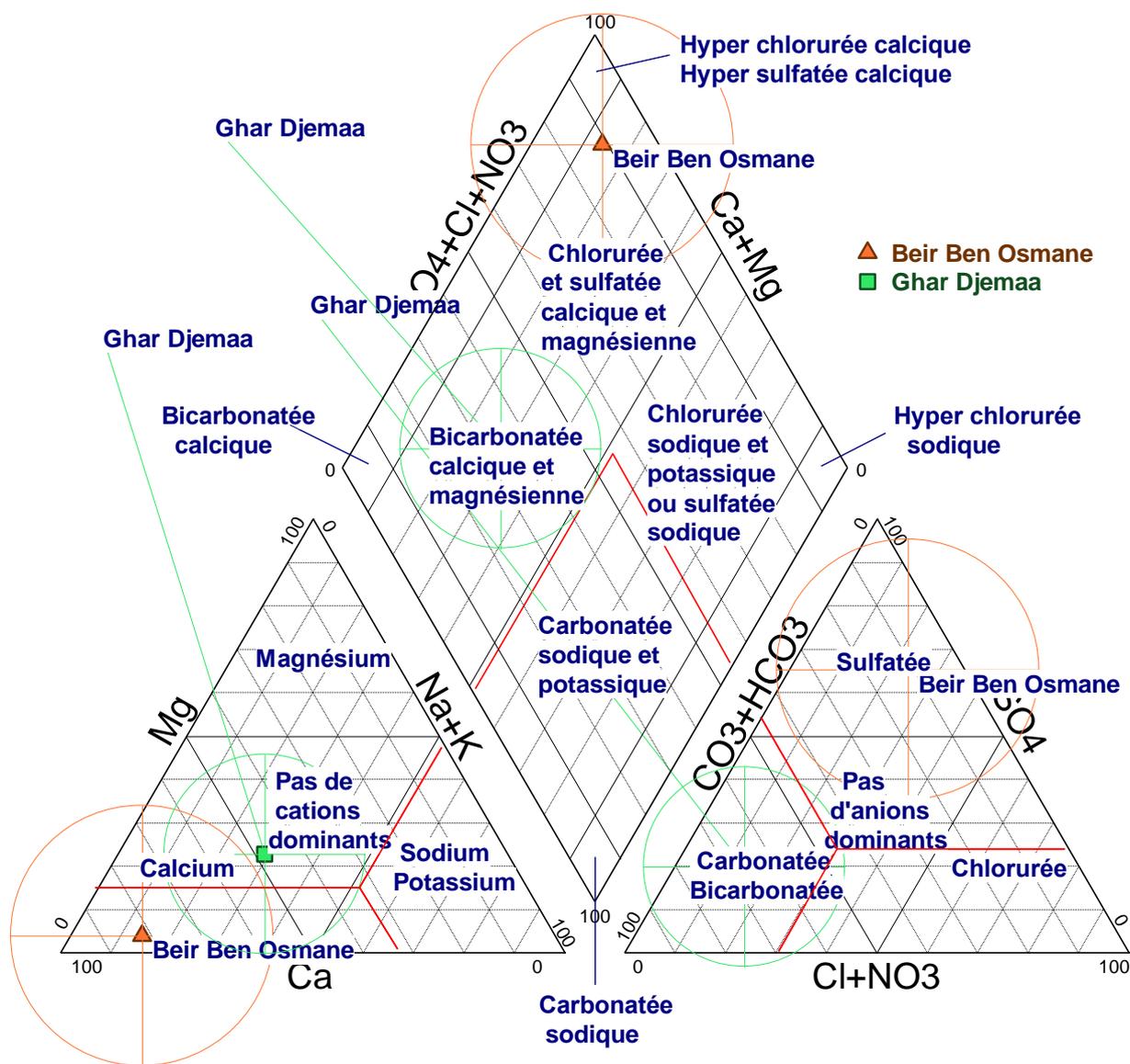


Figure IV- 3 : Représentation des faciès chimiques des eaux avec le diagramme de Piper.

➤ L'interprétation :

- Pour l'échantillon de Beir Ben Osmane :

Dans le triangle des cations, le calcium est le plus abondant par rapport au sodium et au magnésium.

Dans le triangle des anions, les sulfates et les chlorures sont abondants par rapport au bicarbonate et au nitrate.

Donc le faciès chimique est « **mixte entre chloruré calcique et sulfaté calcique** », à cause de la nature lithologique des formations dans la région d'étude à travers de la dissolution du calcaire et du gypse et le Marne pour le chlorure.

- Pour l'échantillon de Ghar Djemaa :

Le faciès chimique est « **bicarbonaté calcique et magnésienne** ».

Le faciès est dû à la nature lithologique des formations traversées par les eaux (des formations calcaires et les argiles pour le magnésium).

IV.2.2.4.2. Diagramme de Schoeller Berkaloff

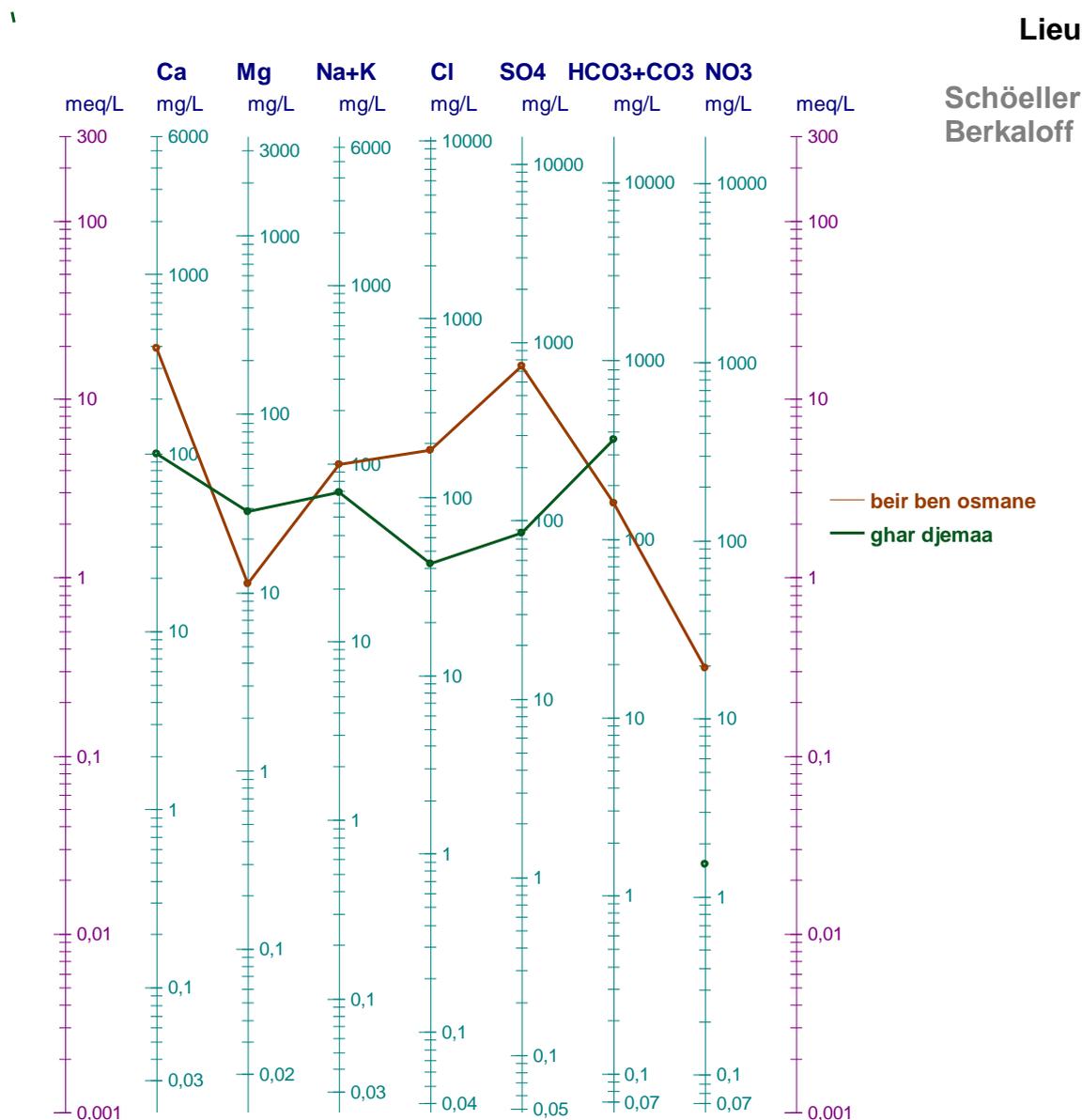


Figure IV- 4 : Représentation des faciès chimiques des eaux avec le diagramme de Schoeller Berkaloff.

➤ **L'interprétation :**

- La représentation graphique des analyses selon ce diagramme semi-logarithmique nous indique que l'eau de **Beir ben Osmane** se trouve au niveau des pôles SO_4 et Ca, donc le faciès chimique est chloruré calcique et sulfaté calcique.
- L'eau de **Ghar Djemaa** se trouve au niveau des pôles HCO_3 , Mg et Ca et à partir de cette présentation, nous pouvons dire que le faciès chimique est bicarbonaté calcique et magnésium.

IV.2.3. Conclusion :

D'après les résultats de l'analyse des échantillons et leur classification :

- On remarque que les échantillons d'eau de Beir Ben Osmane et de Ghar Djemaa ne sont pas potables parce que les résultats sont non conformes aux normes applicables par l'OMS. Les paramètres hors-normes sont le taux de calcium, de sulfate, de potassium, la conductivité et les TDS pour le lac de Beir Ben Osmane ; et le taux de calcium, la conductivité et les TDS pour Ghar Djemaa.
- Quant à la qualité de l'eau, nous avons déterminé que l'eau de Beir Ben Osmane est excellente, alors que l'eau de Ghar Djemaa est médiocre.
- Le faciès chimique de Beir Ben Osmane est de type « **mixte entre chloruré calcique et sulfaté calcique** », à cause de la nature lithologique des formations dans la région d'étude (dissolution du calcaire et du gypse, et des marnes pour le chlorure).
- Le faciès chimique de Ghar Djemaa : est « **bicarbonaté calcique et magnésienne** », ce qui est expliqué par la nature lithologique des formations traversées par les eaux des formations calcaires et des argiles pour le magnésium).

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce présent travail de Master a porté sur l'étude des systèmes karstiques de la région de Hammam Debagh (Wilaya de Guelma, nord-est de l'Algérie), dans le but de les caractériser et d'étudier les caractéristiques hydrochimiques des eaux.

Les zones karstiques présentes autour de cette région ont fait l'objet de plusieurs sorties sur le terrain, avec tout d'abord une localisation de l'épikarst, puis une étude de l'endokarst avec des prélèvements des eaux souterraines. Deux zones ont été explorées afin d'observer les traces d'érosion karstiques, la zone de Beir Ben Osmane, située à proximité de la ville de Hammam Debagh, et la zone qui entoure le Djebel Taya, zone montagneuse atteignant l'altitude de 1055 mètres, qui se trouve au nord-est de Machta 'Ain Taya. Des prélèvements d'eaux ont été réalisés au niveau du lac souterrain de Beir ben Osmane, mais malheureusement, le site de la grotte de Ghar Djemaa (situé au niveau du Djebel Taya) n'a été exploré que sur une distance d'environ 10 m, à cause de différents facteurs (absence d'un guide professionnel, absence des moyens nécessaires pour se déplacer à l'intérieur de la grotte comme des cordes d'escalade, des projecteurs de lumière, des moyens de communication spéciaux ...). Donc aucun prélèvement n'a pu être effectué dans ce site, mais nous avons cependant pu exploiter des données d'analyse hydrochimique disponibles pour ce même site. Notons cependant qu'il existe une association 'Ghar djemaa' (localisée à Bouhamdane) qui organise des visites dans la grotte et possède une page Facebook, dans laquelle sont partagées des photos et des vidéos. Le responsable de cette association a été contacté, malheureusement sans suite.

Notre mémoire présente dans un premier temps une synthèse bibliographique (avec des généralités sur la région d'étude : cadre géographique, géologique, climatique et hydrologique), puis des généralités sur le karst (définitions, schémas explicatifs). Dans la suite, nous présentons plus spécifiquement le karst de Hammam Debagh, qui est une région karstique marquée par la présence de traces d'érosion de surface (comme des lapiez) et de traces d'érosion souterraine (comme les grottes).

Le dernier chapitre traite de l'étude hydrochimique, en décrivant tous d'abord la méthodologie suivie puis les principaux résultats et l'interprétation.

Nous avons réalisé les analyses chimiques tout d'abord sur le site de prélèvement avec une sonde multi-paramètre (température, oxygénation, pH...) puis avons analysé le prélèvement

Conclusion générale

réalisé au niveau de la station de traitement du barrage de Hammam Debagh. Nous avons mesuré les principaux paramètres physico-chimiques (éléments majeurs et autres).

Ces résultats nous ont permis :

- D'évaluer la potabilité des eaux (en référence aux normes de l'OMS)
- De caractériser la qualité des données (utilisation de la balance ionique)
- De définir puis les faciès chimiques (en utilisant les diagrammes de Piper et de Schoeller Berkalo)

Les principaux résultats sont les suivants :

- En ce qui concerne la potabilité des eaux : les deux échantillons (Beir Ben Osmane et Ghar Djemaa) ne sont pas potables parce que les résultats sont non conformes aux normes applicables par l'OMS (par exemple le taux de calcium est beaucoup trop élevé)
- En ce qui concerne la qualité des données : la fiabilité de résultat est excellente pour le lac de Beir Ben Osmane, mais est médiocre pour Ghar Djemaa.
- En ce qui concerne le faciès chimique :
 - o Pour l'échantillon de Beir Ben Osmane :

Selon le diagramme de Piper, nous voyons que dans le triangle des cations, le calcium est le plus abondant par rapport au sodium et au magnésium ; tandis que dans le triangle des anions, les sulfates et les chlorures sont abondants par rapport au bicarbonate et au nitrate. Donc le faciès chimique est « **mixte entre chloruré calcique et sulfaté calcique** », à cause de la nature lithologique des formations dans la région d'étude (dissolution du calcaire, du gypse et des marnes pour le chlorure).

- o Pour l'échantillon de Ghar Djemaa :

Le faciès chimique est différent, de type « **bicarbonaté calcique et magnésienne** », ce qui s'explique par la nature lithologique des formations traversées par les eaux (formations calcaires et argileuses pour le magnésium).

Ce travail nous a donc permis d'atteindre nos objectifs, à savoir étudier et caractériser les zones karstiques de la région de Hammam Debagh, et réaliser des analyses hydrochimiques sur des eaux issues de deux sites de prélèvement.

Conclusion générale

Mais malheureusement il reste de nombreuses insuffisances. Le terrain karstique est un milieu très complexe, donc normalement il aurait été intéressant au cours de notre formation de détailler la méthode de travail en terrain karstique (par exemple en faisant des sorties au niveau de karst). Nous regrettons également le manque de temps pour réaliser ce travail de Master, au bien encore le fait de ne pas avoir pu réaliser de prélèvement dans le site de la grotte de Ghar Djemaa.

Liste des références bibliographiques :

- 📖 **A.N.R.H., 2008.** Agence National des Ressources Hydrauliques, « carte de géologique de l'algerie du nord à l'échelle du 1/500.000 » Notice explicative, Ministère de l'équipement, Alger, ED. I.N.C.
- 📖 **Aouissi A., 2010.** *Microbiologie et physico-chimie de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-Est Algérien)*. Mémoire de magister en Hydro-écologie, Université de Guelma, 164 p.
- 📖 **Arbel Y, Greenbaum N, Lange J, Inbar M, 2010.** Infiltration processes and flow rates in developed karst vadose zone using tracers in cave drips. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1682-1693.
- 📖 **Atkinson TC, Smith DI., 1976.** The erosion of limestones. In *The Science of Speleology*, Ford TD, Cullingford CHD (eds). Academic Press: London, 151–177.
- 📖 **Aubert D., 1969.** Phénomènes et formes du karst jurassien. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 62, 325-399.
- 📖 **Bailly-Comte V, Martin JB, Jourde H, Sreaton EJ, Pistre S, Langston A., 2010.** Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams. *Journal of Hydrology*, 386, 55-66.
- 📖 **Bakalowicz M, Dörfliger N., 2005.** Ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin méditerranéen. *Géosciences - l'eau souterraine*, BRGM 2, 26-31.
- 📖 **Bakalowicz M., 1979.** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, 257 p.
- 📖 **Bakalowicz M., 1995.** La zone des infiltrations des aquifères karstiques. Méthode d'étude, structure et fonctionnement. *Hydrogéologie* 4, 3-21.
- 📖 **Bakalowicz M., 1999.** Connaissance et gestion des ressources en eau souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, Lyon, Agence de l'eau Rhône-
- 📖 **Bakalowicz M., and Dörfliger N., 2005.** Ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin méditerranéen. *Géosciences - l'eau souterraine*, BRGM 2, 26-31.
- 📖 **Baker Andy et Brunson Chris., 2003.** non-linearities in drip water hydrology: an example from stump cross caverns, Yorkshire. *Journal of hydrology*, 277(3). 151-163

- 📖 **Bouillin.J. P.,1977.** Géologie alpine du petit kabyle dans la région de Collo et Milia (Algérie). Thèse faculté des sciences ; paris VI, 511p.
- 📖 **Bruxelles L, Ambert P, Guendon JL., 1999.** Altération et karstification sous couverture : le rôle morphologique de certaines formations superficielles du Causse de l'Hospitalet (Larzac, Aveyron). *Colloque européen Karst 99*, Le Bourget du Lac.
- 📖 Bull.Serv. Carte Géol. Algérie, N.S, n°39, 9.89-131, 9 fig., Alger
- 📖 **Castany.G et Margat.J, 1977.** Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech. Géol. Minière, 249p.
- 📖 **Chalikakis M.K., 2006.** Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques, Thèse de Doctorat de l'université Paris 6, 217p.
- 📖 **Chocat B., 1997.** Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yzeron (Lyon), *Revue de géographie de Lyon*, n° 4, 1997, p. 273-280.
- 📖 **Cvijic, 1960.** La géographie des terrains calcaires. Académie des sciences et des arts serbe, 147-168.
- 📖 **De Martonne E., 1926.** *L'indice d'aridité*, Bulletin de l'Association de Géographes Français, 9, p.3-5.
- 📖 **De Villers J., Squilbin M. et Yourassowsky C., 2005.** Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface : Cadre général. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE).16p.
- 📖 **Debieche. T.H., 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la
- 📖 **Detay M., 1993.** Le forage d'eau ; réalisation, entretien et réhabilitation, Masson, 379 p.
- 📖 **Diagramme (piper & Schoeller-Berkalov) 2004.** Créé par Roland SIMLER du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (2004).
- 📖 **Drissi., 2008.** Qualité des eaux de quelques sources dans la région de Souk-Ahras. Mémoire de Magister. Universitaire de Souk Ahras. 69 p.
- 📖 **Durand-Delga M. et Lambert., 1956.** La bordure occidentale de la nappe de Guerrouch (nord constantinois, Algérie), 1956, C.R. Somm. Soc.géol. Fr. n°15, p296, paris.

- 📖 **Durand-Delga M., 1969.** Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie.
- 📖 Editeur : institut des sciences de la terre, 1979, université de Californie.
- 📖 **Emblanch C., 1997.** Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques : étude en région méditerranéenne de montagne. Thèse de Doctorat, Univ. D'Avignon et des Pays de Vaucluse, 198 p.
- 📖 **Faulkner J., Hua B.X., Kish S., Hua F., 2009.** Laboratory analog and numerical study of groundwater flow and solute transport in a karst aquifer with conduit and matrix domains. *Journal of Contaminant Hydrology*, 110, 34-44.
- 📖 **Fleury P., Plagnes V., Bakalowicz M., 2007.** Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). *Journal of Hydrology*, 345, 38-49.
- 📖 **Ford D.C, Williams P., 1989.** *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman Ed., London, 601 p.
- 📖 **Gelard.J.P., 1979.** Géologie Du Nord-est de la Grande Kabyle, Thèse doctorat des sciences, mémoire géologique de l'université de Dijon, 335p.
- 📖 **Genty D., Deflandre G., 1998.** Drip flow variations under a stalactite of the Pere Noel cave (Belgium). Evidence of seasonal variations and air pressure constraints. *Journal of Hydrology*, 211, 208-232.
- 📖 **Jaillet S., 2000.** Un karst couvert de bas-plateau : le Barrois (Lorraine / Champagne, France). Structure - Fonctionnement - Evolution. Thèse de Doctorat, Univ. Bordeaux 3, 710 p.
- 📖 **Kaufmann O., Bini A., Quinif Y., Tognini P., 1999.** Etude microscopique d'une altérite de type fantôme de roche. *Actes du colloque Karst-99*, Colloque européen, Grands Causses – Vercors.
- 📖 **Kieken M., -** Traits essentiels de la géologie algérienne, Livre à la mémoire de P. Fallot, tome I- SGF.
- 📖 **Kiraly L., 2002.** *Karstification and groundwater flow*. In: Gabrovsek, F. (Ed.), *Evolution of Karst: from Prekarst to Cessation*. Postojna-Ljubljana: Institut za raziskovanje krasa, ZRC SAZU, 155–90.
- 📖 **Klimchouk A., 2004.** Towards defining, delimiting and classifying épikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2, 1-13.

- 📖 **Labat D., 2000.** Non-linéarité et non stationnarité en hydrogéologie karstique. Thèse de Doctorat, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 220 p.
- 📖 **Lahondère J.C. et Magné J., 1983.** L'évolution du domaine néritique constantinois dans la région de Guelma (Algérie), à la fin du secondaire et du début du tertiaire : conséquence paléogéographique. C.R Acad.Sci, Paris, t 197, pp775-778, 2 fig.
- 📖 **Lastennet R., 1994.** Rôle de la zone non saturé dans le fonctionnement des aquifère karstique : approche par l'étude physico-chimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse), thèse de doctorat en science de la terre : hydrogéologie, Université de Avignon, France ,1994.
- 📖 **Leclerc G., 1996.** Histoire de l'autorité L'assignation des énoncés culturels et la généalogie de la croyance, collection : sociologie d'aujourd'hui, p436. Editeur : Presses universitaire de France, 1996.
- 📖 **Maire R., 1994.** Point de vue sur l'évolution récente de la spéléologie. *Karstologia*, 24, 1-12.
- 📖 **Mangin A., 1975.** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat, Univ. Dijon, 298 p.
- 📖 **Mansouri Z., 2009.** Les ressources en eau et gestion intégrée du bassin versant de l'Oued Bouhamdane (Nord-Est Algérien), Thèse de magister. Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 134 p
- 📖 **Marsaud B., 1996.** Structure et Fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse de Doctorat, Univ. Paris XI Orsay, Editions BRGM, n°268, 305 p.
- 📖 **Mayet J., 1994.** La pratique de l'eau, « Traitement aux points d'utilisation, le Moniteur » 2ème Edition, paris, p382.
- 📖 *Méditerranée-Corse.*
- 📖 **Monod I., 1989.** Mémento technique de l'eau Tome I 9ème édition du cinquanteaire, p1200.
- 📖 **Morales T., Uriarte J.A., Olazar M., Antiguada I., Angulo B., 2010.** Solute transport modelling in karst conduits with slow zones during different hydrologic conditions. *Journal of Hydrology*, 390, 182-189.

- 📖 **Moussu F., 2011.** Prise en compte du fonctionnement hydrodynamique dans la modélisation pluie-débit des systèmes karstiques. Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, 200 p.
- 📖 **Mudry J., 1987.** Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse d'Etat, Univ. Franche-Comté, 381 p.
- 📖 **Nicod J., 1972.** *Pays et paysages du calcaire*. Presses universitaires de France, Paris, 239 p.
- 📖 **OMS.** Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable, Plusieurs mises à jour disponibles (en 2006, en 2011, en 2017), Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 1150p.
- 📖 **Palmer A.N., 1989.** Geomorphic history of the Mammoth cave system. In *Karst Hydrology: Concepts from the Mammoth cave area*, White WB, White EL (eds). Van Nostrand Reinhold: New York, 317-327.
- 📖 **Perrin J., Jeannin P.Y., Zwahlen F., 2003.** Épikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279, 106–124.
- 📖 **Plagnes V., 1997.** Structure et Fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, Editions, BRGM n°294, 376 p.
- 📖 **Quinif Y., 1998.** Dissipation d'énergie et adaptabilité dans les systèmes karstiques. *Karstologia*, 31, 1-11.
- 📖 **Quinif Y., 2010.** Fantômes de roche et fantômisiation – Est sur un nouveau paradigme en karstogenèse. *Karstologia Mémoire*, 18, 196p
- 📖 **Quinif Y., Baele J.M., Charlet J.M., De Putter T., Dupuis C., Rorive A., Vandycke S., 1997.** A la recherche du karst perdu des craies du bassin de Mons (Belgique). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 5, 361-371.
- 📖 **Quinif Y., Vergari A., Doremus P., Hennebert M., Charlet J.M., 1993.** Phénomènes karstiques affectant le calcaire du Hainaut. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 102, 379-394.

- 📖 **Raoult J.F. 1969.** Relation entre la dorsale kabyle et les flysche, sur la transversale du Dj. Rhédir (nord constantinois, Algérie) : phases tangentielles éocènes, paléogéographie, Bull. Soc. Géai. fr, (7), XI, paris
- 📖 **Raoult J.F. et Fourcade., 1973.** Crétacé du kef Hahouner et position stratigraphique de –'Ovalveolina' reicheli P.DE CASTRO, série septentrionale du mole néritique du constantinois. REV. Micropal, XV, paris.
- 📖 **Raoult J.F., 1974.** Géologie du centre de la chaine numidique (nord du constantinois, Algérie), thèse sciences paris, Mém.Soc Géai. Bibliographie 169 Fr, nouv, sér, 1 III.
- 📖 **Rodier J. et al., 1996.** *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduelles, eaux de mer.* 6ème édition. Editions Dunod. Paris. 1383p.
- 📖 **Rodier J., 1994.** *L'analyse de l'eau* 8é éd. DUNDO, paris, France, 1384p.
- 📖 **Rodier J., 1996.** *L'analyse de l'eau* eaux naturelles - eaux usées, troisième édition, Dunod, Paris, 412 p.
- 📖 **Rodier J., Legube B. et Merlet N., 2009.** *L'analyse de l'eau*, 9^{ème} édition, Edition Dunod, 1526p.
- 📖 **Saadali B., 2007.** Etude de la qualité des eaux des sources issues du massif dunaire de Bouteldja (Algérie Extrême Nord Orientale). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar. Annaba, 83p.
- 📖 **Salomon J.N., 2006.** *Précis de karstologie.* Presses Universitaires de Bordeaux, 245p.
- 📖 Seybouse N-E Algérien. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 199p
- 📖 T 10. N°4, p 175-187.
- 📖 **Thierrin J., Steffen P., Cornaz S., Vuataz F. D., Balderer W. et Looser M., 2001.** *Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines.* Société Suisse d'Hydrogéologie, 57p.
- 📖 **Vergari A. et Quinif Y., 1997.** Les paléokarsts du Hainaut (Belgique). Geodynamica Acta (paris).
- 📖 **Vergari A., 1998.** Nouveau regard sur la spéléogenèse : le pseudo-endokarst du Tournaisis (hainaut, Belgique). Karstologia, 31, 12-18.
- 📖 **Vila J.M. et Magné G., 1969.** Cadre structurale de Djebel Debbagh, Nord constantinois, Agérie Bull.Soc, Paris (France).

Références bibliographiques

- 📖 **Vila J.M., 1968.** Relation paléogéologiques structurales entre le flysch de Penthièvre et les unités externes de la dorsale kabyle dans la région de jemmafes.Ball. Soc.Géol. paris (France).
- 📖 **Vila J.M., 1980.** *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens.* Thèse de doctorat, Université Paris VI, 665 p.
- 📖 **Williams P.W., 1983.** The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61, 45-67.
- 📖 **Zeddouri A., 2003** - *Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine alluviale de Guelma (Essai de modélisation), Guelma, Nord-Est Algérien.* Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- 📖 **Zeghaba N., 2018.** Etude et suivi de la qualité des eaux du barrage Hammam Debagh (Nord-Est Algérien), Thèse Doctorat en Sciences, thèse hydrogéologique de l'université de Annaba, 123p
- **Les sites internet :**

Carte synthétique de la région de Hammam Debagh, d'après la carte publiée en 1937 par le service géologique de l'Algérie, source : <http://dierrab-geologie-guelma.e-monsite.com> ; Valeurs de l'indice d'aridité, type de végétation et climats correspondants source : <http://jymassenet-foret.fr/cours/ecologie/CHAPITREclimato2012ppt.pdf>; Wikipédia.