

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Sciences Biologiques de l'Environnement
Filière: Sciences Biologiques
Option: Environnement et Sécurité Alimentaire



Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

Inventaire et géolocalisation de quelques sources karstiques de la région Nord-est de Bejaia – Algérie.

Présenté par:

Melle. BOUBEKEUR Leila

Soutenu le : **17 Juin 2017**

Devant le jury composé de :

Noms et Prénoms	Grades	
M ^r SIDI H.	MCA	Président
M ^r LAISSAOUI M.	MAA	Examineur
M ^r BENHAMICHE N.	MCA	Encadreur
M ^r Saou H.	MCB	Invité

Année universitaire: 2016/2017



Remerciements

Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la patience d'arriver à terme de ce modeste travail.

Ensuite j'exprime ma profonde gratitude et mes vifs remerciements avant toute personne à mon encadreur M^r BENHAMICHE N., mon professeur qui m'a orienté, et soutenue tout au long de ce travail.

Je remercie aussi les membres du jury de soutenance, M^r SIDI H, et M^r LAISSAOUI M, pour avoir bien voulu examiné mon travail. Je ne saurais oublier les enseignants et responsables de la faculté SNV qui ont participé à ma formation de près ou de loin.

Je remercie aussi Mr SAOU qui m'a beaucoup aidé par ses conseils et ses orientations

Je Tiens également à remercier tous les organismes qui m'ont aidé le long de ce travail. Je cite :

- APC MELBOU
- La Subdivision des ressources en eaux de Souk El Tenine

Enfin un grand remerciement à mes parents qui m'ont soutenus tout au long de mes études.

BOUBEKEUR, Leila

Dédicace

Au terme de ce travail je remercie

*Dieu d'avoir écarté de mes yeux le voile de l'ignorance et de m'avoir guidé
vers la connaissance de la vraie nature des choses*

*Ce travail est l'aboutissement d'un grand courage, d'une éducation et d'un
grand sérieux. Je le dédie :*

- 🌸 A la mémoire de ma grande mère NANA Zahra (rabi yerhemha)*
- 🌸 Mes chers parents pour leur confiance, leur aide morale, leur amour, leurs encouragements, leurs sacrifices ainsi que leurs précieux conseils*
- 🌸 Mon frère HEMZA*
- 🌸 Mon frère Adel et sa femme Wassila*
- 🌸 Mon cousin Karim sa femme ses enfants surtout Hocine et cirine*
- 🌸 Mes baux parents et belles sœurs : JOUJOU et SOUHILA*
- 🌸 Mon fiancé Mounir qui m'a aidé avec ses encouragements, ses conseils et la confiance qu'il a mis en moi durant tout le long de ce travail (merci pour tout)*
- 🌸 Mes amis d'enfance et mes cousins et cousines ; sousou, dalila, feriel, lydia, ismahane,*
- 🌸 Toute la promo de Environnement et Sécurité Alimentaire*

Leïla BOUBEKEUR



Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 01

Chapitre I. Synthèse bibliographique sur le Karst

I.1. Généralité sur le Karst 04

I.1.1. Introduction 04

I.1.2. Etymologie et définition du karst 04

I.1.3. Les aquifères karstiques 05

I.1.3.1. Définition d'un aquifère karstiques 05

I.1.3.2. Caractéristiques des aquifères karstiques 05

I.1.4. Le système karstique 07

I.1.5. La karstification 10

I.1.5.1. Origine de la karstification 10

I.1.5.2. Définition et principe de la karstification 10

I.1.6. Aquifères karstiques côtiers 11

I.1.6.1. Le karst côtier 11

I.1.6.2. Diminution du niveau marin 12

I.1.6.3. Montée du niveau marin (transgression) 12

I.1.6.4. Flux d'eau dans les aquifères karstiques côtiers 13

I.1.6.5. Diffusion et dispersion moléculaire 13

I.1.6.5. Diffusion et dispersion moléculaire 14

I.2. Généralités sur les sources karstiques 16

I.2.1. Particularités des eaux karstiques 16

I.2.2. Exploitation des sources karstiques 16

I.2.3. Vulnérabilités des aquifères karstiques 17

I.3. Les paramètres physiques 17

I.3.1. La température 18

I.3.2. Le pH 18

I.3.3. La conductivité électrique 18

I.3.4. La salinité 19

I.3.5. Total des solides dissous (TDS) 19

I.3.6. La turbidité 20

Sommaire

I.4. Caractéristiques électrochimiques des eaux karstiques	20
I.4.1. Le calcium et les bicarbonates (Ca ²⁺ et HCO ₃ ⁻)	20
I.4.2. La silice (SiO ₂)	21
I.4.3. Les nitrites (NO ₂ ⁻)	21
I.4.4. Les nitrates (NO ₃ ⁻)	21
Chapitre II. Matériel et méthodes	
II. Présentation du milieu d'étude	22
II.1 Introduction	22
II.2 Situation géographique et limites	23
II.2.1 Description de la région d'étude	23
II.2.2 Délimitation du bassin versant de l'Oued Agrioun	24
II.3 Le cadre Géologique	24
II.4. Hydrogéologie	25
II.5 Climatologie	25
II.5.1 Les Températures	26
II.5.2 Les précipitations	26
II.6 Synthèse des données climatiques	27
II.6.1 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls	27
II.6.2 Climagramme d'Emberger	28
II.7 Faune et flore	29
II.7.1 Faune	29
II.7.2 La flore	29
II.8 Caractéristiques socio-économiques	30
II.8.1 Population	30
II.8.2 Agriculture	30
II.9 La géolocalisation et Cartographie	31
II.9.1 Objectifs de la géolocalisation	31
II.9.2 Définition et principe de GPS	31
II.9.3 Importation de données de GPS par satellite dans Google Earth	32
II.9.4 Cartographie	32
II.10 Le système d'information géographique	32
II.10.1. Définition et fonctions d'un SIG	32
II.10.2. Composantes d'un SIG	33
II.11 Présentation du logiciel de cartographie « MapInfo »	33
II.11.1 Définition et utilité de MapInfo	33

Sommaire

II.12 Méthode d'analyse	34
II.12.1 les informations à préciser au moment de l'analyse	35
II.12.2 Matériels utilisés	35
II.12.3 Difficultés rencontrées et solutions mises en œuvre	36
II.12.4 Mesure des débits par méthode volumétrique	37
II.13 Corrélation entre les paramètres physiques	37
Chapitre III Résultats et discussion	
III Résultats et Discussion	38
III.1 Elaboration de la carte de situation des différentes sources karstiques	38
III.2. Interprétations des résultats d'analyse	38
III.2.1 Discussion des résultats des paramètres physiques	40
III.2.1.1 Température	40
III.2.1.2 Potentiel d'hydrogène	40
III.2.1.3 La conductivité électrique	41
III.2.1.4 Salinité	41
III.2.1.5 Total des solides dissous	41
III.2.2 Corrélation entre les paramètres physiques	42
III.2.2.1 Températures et Potentiel d'hydrogène	42
III.2.2.2 Température et Total des solides dissous	43
III.2.2.3 Salinité et Total des solides dissous	44
III.2.2.4 Conductivité électrique et Total des solides dissous	45
III.2.2.5 Potentiel d'hydrogène et Conductivité électrique	45
III.3 Interprétation des résultats des débits	45
Conclusion générale et recommandations	47
Références Bibliographique	

Liste des figures

Listes des figures

Figure 01 : Bloc diagramme représentant un paysage karstique en surface et le milieu karstique souterrain.	05
Figure 02 : Représentation schématique d'un aquifère karstique.	07
Figure 03 : Les différents compartiments hydrauliques d'un aquifère karstique.	08
Figure 04 : Représentation schématique des systèmes karstique unaire et binaire.	10
Figure 05 : Schéma général de la karstification ((Création de vides dans la roche ou karstification).	11
Figure 06 : Mise en place d'un réseau de conduits suite à une chute du niveau de base	12
Figure 07 : Transgression marine et submersion des sources karstiques	13
Figure 08 : Intrusion saline dans un aquifère poreux	14
Figure 09 : Méthodologie d'étude des ressources en eaux karstiques intégrant modélisation numérique géologique 3D et analyses hydrogéologiques	16
Figure10 : Les principaux Karst d'Algérie.	22
Figure11 : Situation géographiques des zones d'étude	23
Figure 12 : Diagramme Ombrothermique de la région d'étude (Oued Agrioun) durant la période (1978-2016).	27
Figure13 : Situation bioclimatique de la région d'étude sur le climagramme pluviothermique d'Emberger modifié par Stewart, 1969.	28
Figure 14 : Matériels utilisés sur le terrain – Original.	35
Figure 15 : Carte de Localisation des Sites des points d'eaux.	38
Figure 16 : Représentation graphique T°C vs PH.	43
Figure 17 : Représentation graphique T°C vs TDS.	43
Figure 18 : Représentation graphique salinité vs TDS.	44
Figure 19 : Représentation graphique CE vs TDS	44
Figure 20 : Représentation graphique pH vs CE.	45

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I - Goût de l'eau avec les différentes concentrations de TDS.	20
Tableau II - Températures moyennes mensuelles corrigées en degrés Celsius de la région d'étude pour la période (1978-2016).	26
Tableau III - La répartition des précipitations moyennes mensuelles en (mm) corrigées de la station de Bejaia et notre région d'étude (1978-2016).	27
Tableau IV - Répartition de la population du bassin versant de l'Oued Agrioun par commune.	30
Tableau V - Occupation des sols (ha) par communes.	30
Tableau VI - Résultats d'analyse des eaux de sources et calcul des statistiques descriptives	39
Tableau VII - Description de la qualité des eaux des sources analysées (TDS) comparée aux normes de l'OMS (2003)	42
Tableau VIII - Mesure des débits de quelques sources et calcul des valeurs caractéristiques.	46
Tableau VX - Classement de quelques sources selon leurs débits	46

Liste des abréviations

Liste des abréviations

T°C: Température Degré Celsius

pH: Potentiel d'Hydrogène

CE : Conductivité Electrique

TDS : Total des Solides Dissous

P : Précipitation

CV : Coefficient de Variation

Eq : Equation

SAD : Système Annexe au Drainage

GPS : Système de Positionnement Global

SIG : Système d'Information Géographique

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

DPAT : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire

ONM : Station Office National de la Météorologique

WGS : world Geodesic System (Système Géodésique du Monde)

pCO₂: Pression partielle du carbone

ORGM: Office National de Recherche Géologiques et Minière

ANDI: Agence National du Développement et de l'Investissement

SGBD: Système de Gestion des Bases de Données

OMS: Organisation Mondiale de la santé

μS: Microsiemens

FEPS: Fondation de l'Eau Potable Sûre

WHO: World Health Organization

RGPH: Recensement générale de la population et de l'habitat

*Introduction
générale*

Introduction

Introduction

Cette contribution s'inscrit dans un projet de recherche CNEPRU agréé en 2015. Le projet intitulé « Caractérisation et évaluation des ressources en eaux souterraines des systèmes aquifères karstiques de la région de Bejaia » est subdivisé en différentes étapes. Ce manuscrit constitue une « partie traitant de la localisation et la caractérisation des émergences karstiques » dont le but est l'identification des systèmes karstiques à fort enjeu pour l'alimentation en eau potable actuelle et future de la région de Bejaia.

L'eau joue un rôle important dans l'évolution des sociétés humaines. Pour vivre et agir l'homme a été et demeurera toujours un consommateur d'eau (Bailly, 2009).

Les civilisations méditerranéennes nous apprennent qu'elles ont su très tôt s'organiser autour de trois types de ressources en eau, les fleuves, les nappes phréatiques alluviales et les grandes sources karstiques. Pour chacune, l'homme a développé des techniques spécifiques d'exploitation et de gestion (Bonnin, 1984 ;Nordon, 1991). Les civilisations méditerranéennes nous ont aussi apporté les techniques nécessaires à l'exploitation d'une ressource en eau à la fois abondante et mystérieuse, celle des grandes sources karstiques (Yevjevich, 1972).

- **Les eaux souterraines karstiques dans le monde**

Les eaux souterraines représentent une part importante du cycle de l'eau et participent, de ce fait, aux équilibres naturels. Elles constituent également une formidable ressource renouvelable, exploitée pour l'approvisionnement en eau potable l'usage industriel ou agricole (OFEFP, 2004). En outre, les eaux souterraines karstiques constituent la ressource principale pour l'alimentation en eau potable de la population mondiale (Goldscheider, 2002). Les roches carbonatées avec une grande partie karstifiée couvrent environ 7 à 12% de la surface des continents. Environ 25% de la population est alimentée entièrement ou en partie par les eaux souterraines karstiques (Ford & Williams 1989, DrewetHotzl 1999). Dans certains pays européens, les eaux karstiques couvrent 50% des besoins en alimentation en eau potable (COST 65, 1995 in Goldscheider, 2002), alors que dans certaines régions elles sont les seules eaux de bonne qualité. En Algérie en général et dans la wilaya de Bejaia en particulier, les eaux karstiques contribuent pour une large part au développement socio-économique de la population.

Introduction

- **Les eaux souterraines karstiques en Algérie**

Les régions calcaires d'Algérie offrent une grande diversité des paysages depuis les karsts bien arrosés des hautes montagnes de l'Atlas jusqu'aux affleurements peu karstifiés du désert du Sahara (Collignon, 1991). Ce sont des formations qui s'étalent sur toute l'échelle géologique des temps les plus anciens, du carbonifère (dans la région de Bechar), du Trias (nombreux affleurements de gypse et de sel à travers l'Algérie), Jurassique et Crétacé (massifs côtiers oranais, nappes telliennes, domaine tlemcénien, néritique constantinois, Atlas saharien), Miocène post-nappe (Bensaoula, 2006). Le Nord-est algérien, avec une superficie de 42 000 km², s'étend depuis Bejaïa jusqu'à la frontière Algéro-tunisienne jusqu'à 200 km au sud. Les formations carbonatées, généralement karstifiées affleurent sur une superficie de 7200 km², soit un peu plus de 17% de la superficie totale (Bouroubi, 2009). Selon Bensaoula et al., 2007, le karst n'a pas encore divulgué tous ces secrets. Les quelques travaux réalisés concernent l'Ouest du pays, particulièrement les monts de Tlemcen et Mascara.

- **Les eaux souterraines karstiques dans la région de Bejaia**

Les formations calcaires sont très abondantes dans la région de Bejaia. Selon la carte géologique de la wilaya, sur le côté Ouest du littoral, les régions de Toudja jusqu'à Beni Ksil sont caractérisées par le crétacé inférieur marin. Dans la région Est de la wilaya, Tala Hamza, Berbacha, Kendira et leurs alentours sont dominés par le crétacé inférieur marin. Les autres localités, du même secteur, présentent une variété géologique. Le crétacé inférieur marin, le crétacé supérieur, le jurassique inférieur marin et peu de trias marin et lagunaire caractérisent les régions d'Aokas jusqu'à Tamridjet et de Melbou à l'extrême de Draa Elkaid. Les localités des rives de la Soummam : Sidi Aich, Ouzellaguen, Ighram et Timezrit jusqu'à Boujllil sont dominés par le crétacé inférieur marin avec la présence du jurassique inférieur marin et de trias marin et lagunaire à Chelata et Amalou ainsi que du crétacé supérieur marin à Beni Djellil.

Suite à l'importance de cette ressource vitale, l'objectif de notre travail est d'inventorier les sources karstiques de la région Nord-Est de Bejaia, de connaître leur localisation, mesurer les caractéristiques physiques de leur eau (température, potentiel d'hydrogène, conductivité électrique, total des solides dissous et salinité) et mesurer leur débit.

Le présent mémoire comprend, en plus de l'introduction et de la conclusion, trois chapitres. Le premier chapitre contient une synthèse bibliographique sur les milieux karstiques. Elle décrit les notions de karst et les méthodes utilisées pour l'étude de ses milieux. Le deuxième

Introduction

chapitre comporte le matériel et méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail. Le dernier chapitre comprend les résultats et leurs interprétations.

Chapitre I

*Recherche
bibliographique
sur le Karst*

I.1. Généralité sur le Karst

I.1.1. Introduction

Les aquifères karstiques sont, pour beaucoup de pays méditerranéens, une ressource en eau essentielle, sinon même unique. Leurs caractéristiques rappelées succinctement, ainsi que celles des spécificités du karst méditerranéen, sont déterminées par un climat particulier et, surtout, une histoire géologique récente marquée par la crise messéniennes de salinité. Les conséquences en sont analysées de manière à insister sur la nécessité d'améliorer les connaissances et de mettre en place des dispositifs de suivi permanent pour une gestion et une protection durable de ces ressources (Bakalowicz, 2010).

I.1.2. Etymologie et définition du karst

De *karst*, nom allemand de la région des plateaux calcaires de Slovénie dont le nom slave est *Kras*. L'adjectif karstique est attesté en 1896 (de Lapparent) ; 1892 (Guérin : Phénomènes du Karst) ; 1928 (E. De Martonne et L. Aufrère : L'extension des régions d'écoulement vers l'Océan) (Bakalowicz, 2000).

Le karst est un paysage résultant de processus particuliers d'érosion: La karstification. Ces processus sont commandés par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies) constituant le sous-sol des régions concernées. C'est l'eau de pluie infiltrée dans ces roches qui assure cette dissolution. L'eau acquiert l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant de gaz carbonique (CO₂) produit dans les sols par les végétaux et les colonies bactériennes. Le paysage de surface, constitué en général de dépressions fermées (appelées dolines, pour les petites, et poljés, pour les plaines d'inondation), est associé à un paysage souterrain, dont les grottes et les gouffres parcourables par l'homme font partie. Le karst est par conséquent un paysage original, créé par les écoulements d'eau souterraine. L'eau circule en son sein, s'y accumule et émerge par des sources aux débits souvent considérables, mais très fluctuants dans le temps. Le karst est donc également un aquifère : l'aquifère karstique (Bakalowicz, 1999).

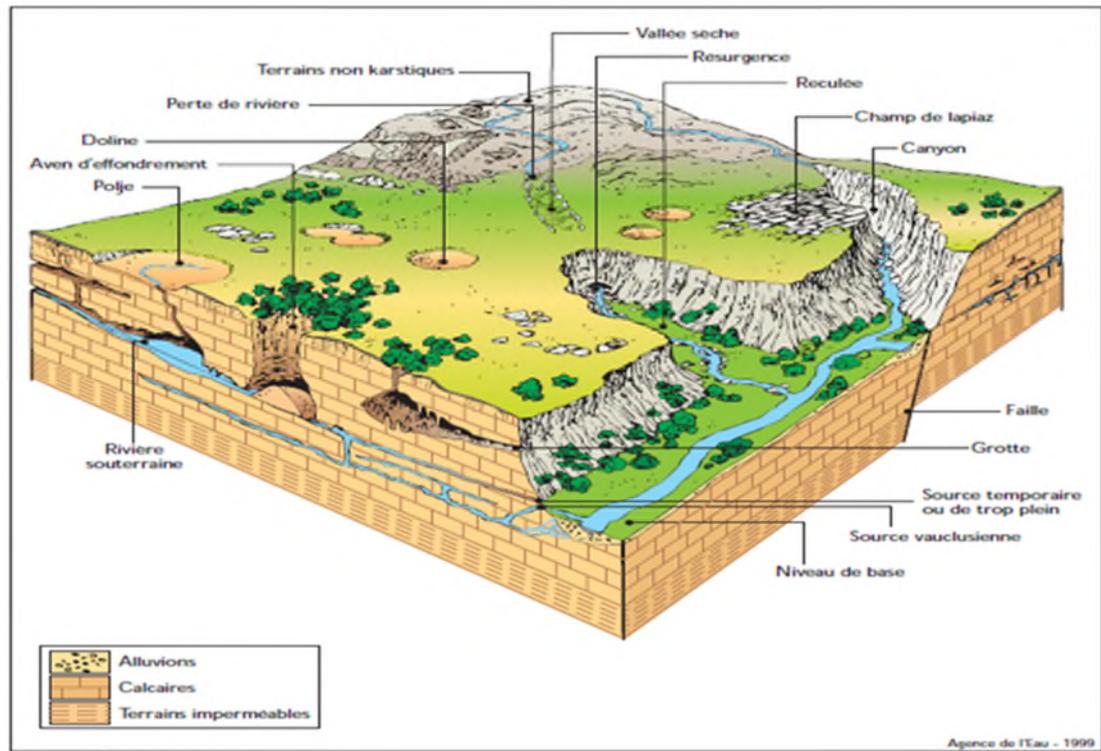


Figure 01. Bloc diagramme représentant un paysage karstique en surface et le milieu karstique souterrain (Bakalowicz, 1999).

I.1.3. Les aquifères karstiques

I.1.3.1. Définition d'un aquifère karstique

Un aquifère est une formation géologique possédant une perméabilité suffisante pour que l'eau souterraine puisse y circuler (Bakalowicz, 1999).

Les aquifères karstiques résultent du processus de la karstification; ils possèdent une morphologie spécifique que ce soit au niveau de la surface avec la présence de dolines, de vallées sèches, de lapiez, de gouffre ou au niveau interne du massif carbonaté avec des réseaux de conduits (cavités, grottes, siphons, ...) (Dörfliger *et al.*, 2004).

I.1.3.2. Caractéristiques des aquifères karstiques

Les aquifères karstiques possèdent les caractéristiques suivantes :

- 1) L'aquifère karstique est le seul type d'aquifère où c'est la circulation des eaux dans la formation géologique qui façonne les vides de l'aquifère et induit des caractéristiques aquifères spécifiques.
- 2) La constitution d'un aquifère karstique peut être rapide à l'échelle des temps géologiques: quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années. De ce fait, l'aquifère karstique enregistre les variations, même de faible amplitude, du niveau de

base où est localisée la source, par le développement d'un drainage associé à chaque niveau. Toutes les régions karstiques présentent la marque de plusieurs phases de karstification, dont seules les plus récentes, associées au niveau de base actuel, participent au fonctionnement de l'aquifère. Ainsi, un aquifère carbonaté peut présenter un réseau de conduits visitables, ne fonctionnant plus : c'est une partie non fonctionnelle de l'aquifère karstique.

- 3) Dans l'aquifère karstique (Fig. 6), les écoulements ont créé des vides organisés en une structure hiérarchisée de drainage, le réseau de conduits, de l'amont (la surface) vers l'aval (la source, exutoire en général unique de l'aquifère). Souvent, au cours de la saison de recharge de l'aquifère, des remontées importantes de l'eau dans le réseau de conduits provoquent l'inondation des réseaux supérieurs, habituellement sans écoulement, et la mise en fonctionnement de sources temporaires de trop plein. L'aquifère karstique, à maturité, possède un réseau de conduits organisé à la façon d'un bassin versant de surface. L'aquifère karstique n'est pas d'un type unique : il existe une grande variété d'aquifères karstiques en fonction de l'état de développement de la karstification, depuis le pôle aquifère fissuré jusqu'au pôle aquifère karstique pur. Le degré d'évolution karstique de l'aquifère se traduit dans son fonctionnement hydrogéologique.
- 4) L'aquifère karstique présente une organisation des écoulements souterrains, qui détermine celle des vides qu'ils créent. Dans cette organisation (Fig. 02), les deux fonctions classiques (stockage et drainage) sont séparées, au moins dans la zone noyée, et sont assurées par des éléments distincts de la structure : le drainage est assuré par un réseau de conduits hiérarchisé. Le stockage est fourni soit par les parties microfissurées ou poreuses de la roche non karstifiée, soit par des cavités karstiques, parfois de grandes dimensions, connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charge (Systèmes Annexes au Drainage, SAD).
- 5) L'aquifère karstique se distingue des aquifères poreux et des aquifères fissurés par le fait qu'il possède des vides de grandes dimensions, dans lesquels les eaux souterraines sont susceptibles de circuler très vite.

Les dimensions des vides dans le karst couvrent une très large gamme de valeurs, depuis les fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. De même, les vitesses d'écoulement souterrain vont de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure (Bakalowicz, 1999).

I.1.4. Le système karstique

L'ensemble du réseau entre la zone où l'eau s'infiltré et le ou les exutoires est appelé système karstique. Ce système est caractérisé par :

- L'épi karst est la partie la plus superficielle de l'aquifère karstique. Son existence est le résultat d'une décompression et d'une altération qui lui confère une perméabilité élevée comparée au reste de l'aquifère. La base de l'épi karst est délimitée par une zone de transition de perméabilité, qui forme une barrière semi-perméable. l'état de saturation en eau de cette partie de l'aquifère karstique est dépendant des conditions hydrométéorologiques de surface.
- La zone non saturée fait suite à l'épi karst. Ce compartiment se caractérise par un écoulement diphasique eau – air, dans un réseau de discontinuités de perméabilité très variable. La zone non saturée est la zone de transit de l'eau de l'épi karst jusqu'à la zone saturée.
- La zone saturée ou zone noyée est la zone de stockage principale de l'eau dans l'aquifère karstique, sa structure est semblable à celle de la zone non-saturée, mais l'écoulement se fait en milieu saturé (Fig. 03).

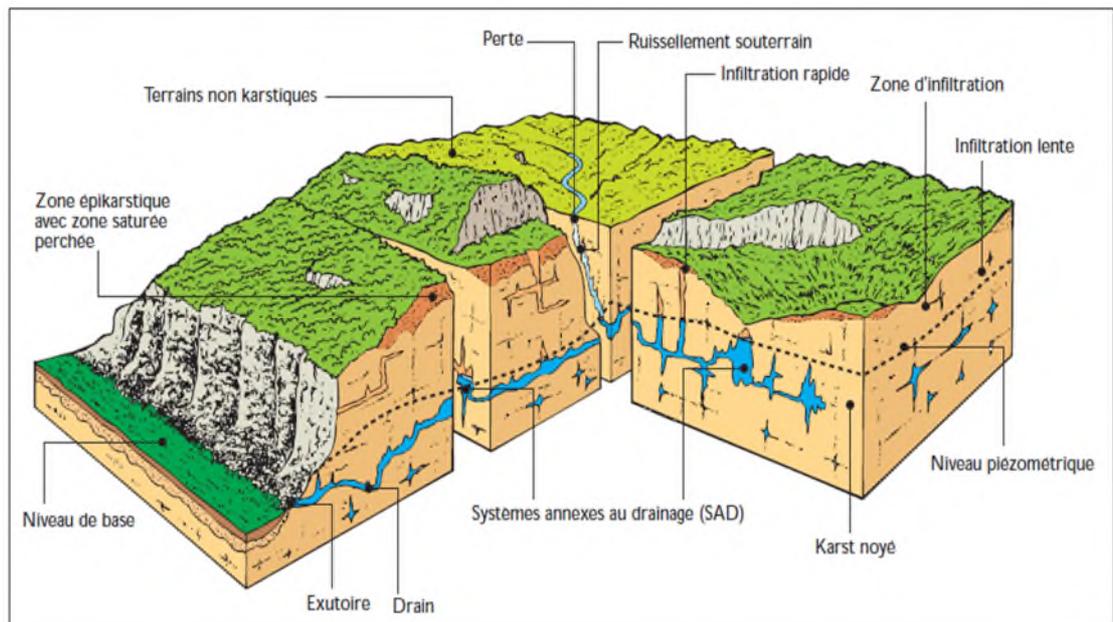


Figure 02. Représentation schématique d'un aquifère karstique (Mangin, 1975)

- Ces différentes entités d'écoulement sont le résultat de la variabilité spatiale des champs de perméabilité dans les trois directions de l'espace. Vient s'ajouter à cette variation de perméabilité horizontale, latérale et verticale, la connectivité du réseau drainant. L'étude

des écoulements dans les systèmes karstiques, peut se faire suivant deux approches, l'approche fonctionnelle (Mangin, 1975) ou l'approche structurelle (Kiraly, 1969; 1975).

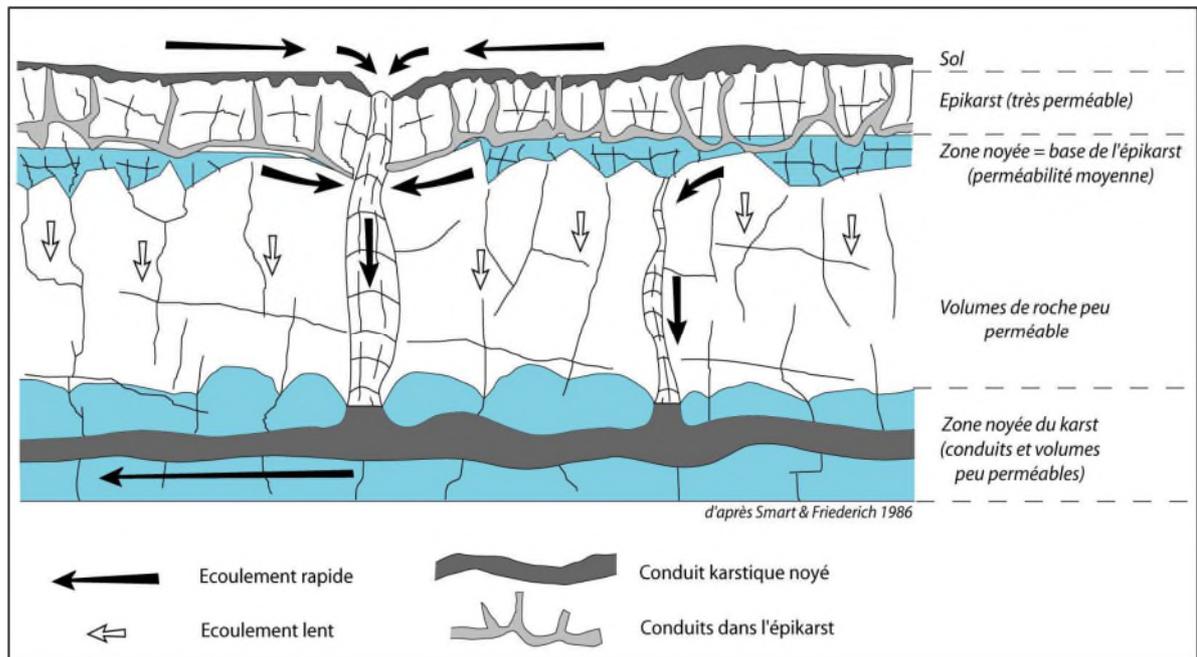


Figure 03. Les différents compartiments hydrauliques d'un aquifère karstique (Smart et Friedrich, 1986).

La première approche s'intéresse au fonctionnement du karst, d'un point de vue temporel. Elle en déduit le comportement spatial et permet donc d'en déduire une structure. La seconde approche s'intéresse d'abord à la structure de l'aquifère et en déduit le type de fonctionnement qui en découle. Les outils utilisés pour les deux types d'approches sont différents. Statistiques et mathématiques pour la première, physiques pour la seconde. (Charmoille, A. 2005).

Aucune de ces deux approches n'est parfaite. Il convient donc, en fonction des objectifs visés, d'alterner les deux approches (Jeannin, 1996) de manière à obtenir le plus d'informations possibles. Dans notre cas, ces deux approches seront utilisées à l'échelle du groupe de fractures et de l'aquifère dans son ensemble. Ces deux types d'approche ont amené à différencier deux types d'écoulement dans un réseau karstique. Les drains ou axes de drainage, qui constituent la fonction transmissive du système et les systèmes annexes de drainage (SAD), qui assurent une fonction capacitive (Plagne, 1997).

Deux réseaux drainants principaux sont représentés. Un premier réseau drainant dans l'épi karst et un second dans la zone saturée présentant tous les deux un développement spatial horizontal. L'eau passe du réseau drainant superficiel au réseau drainant profond soit à la faveur de zones à écoulement rapide qui correspondent à des fractures karstifiées très perméables, soit par l'intermédiaire de zones à écoulement lent qui correspondent à des zones micro-fissurées de

blocs de roche à porosité matricielle extrêmement faible (SAD). Dans cette partie centrale de l'aquifère les écoulements adoptent donc une répartition spatiale verticale (Charmoille, 2005).

La réponse d'un système karstique au niveau de son exutoire à l'air libre ou au niveau du lit d'un cours d'eau en termes d'intensité et de durée de l'épisode, dépend des caractéristiques du système ainsi que de l'intensité des précipitations. Les caractéristiques du système sont résumées ci-après : fonctionnalité, degré de développement et d'organisation du réseau de drainage, existence de formations imperméable (ruissellement, infiltration concentrée au niveau de pertes) (Dörfliger, *et al.*, 2004).

Le système karstique est défini par Mangin en 1975 comme étant un ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage. Ainsi un tel système a la spécificité d'englober les terrains non karstiques de l'impluvium dont les eaux de ruissellement sont drainées par l'aquifère karstique au niveau de points singuliers de type pertes. En fonction de la nature de l'impluvium, on distingue deux types de systèmes karstiques. Les systèmes karstiques de type unaire et les systèmes de type binaire. Ces deux types se différencient par le mode d'infiltration de l'eau en surface (Fig. 04).

- **Systèmes de type unaires:** l'aquifère est uniquement alimenté de manière diffuse, l'impluvium de l'aquifère correspond à la surface de la roche perméable affleurante.
- **Système de type binaire :** deux modes d'infiltrations interviennent. On trouve un mode d'infiltration direct par l'intermédiaire de pertes alimentées par des cours d'eau de surface ayant circulé sur des terrains exogènes et une infiltration de type diffus correspondant au mode d'infiltration d'un karst unaire. Dans ce type de configuration, le réseau de drainage karstique est beaucoup plus développé vers l'amont de l'aquifère et traverse toute la masse carbonatée. Cependant, cette classification reste peu pertinente. Plusieurs mode d'infiltrations peuvent être identifiés à la surface d'un même aquifère karstique (Mangin, 1975), (Kiraly, 1969; 1975).

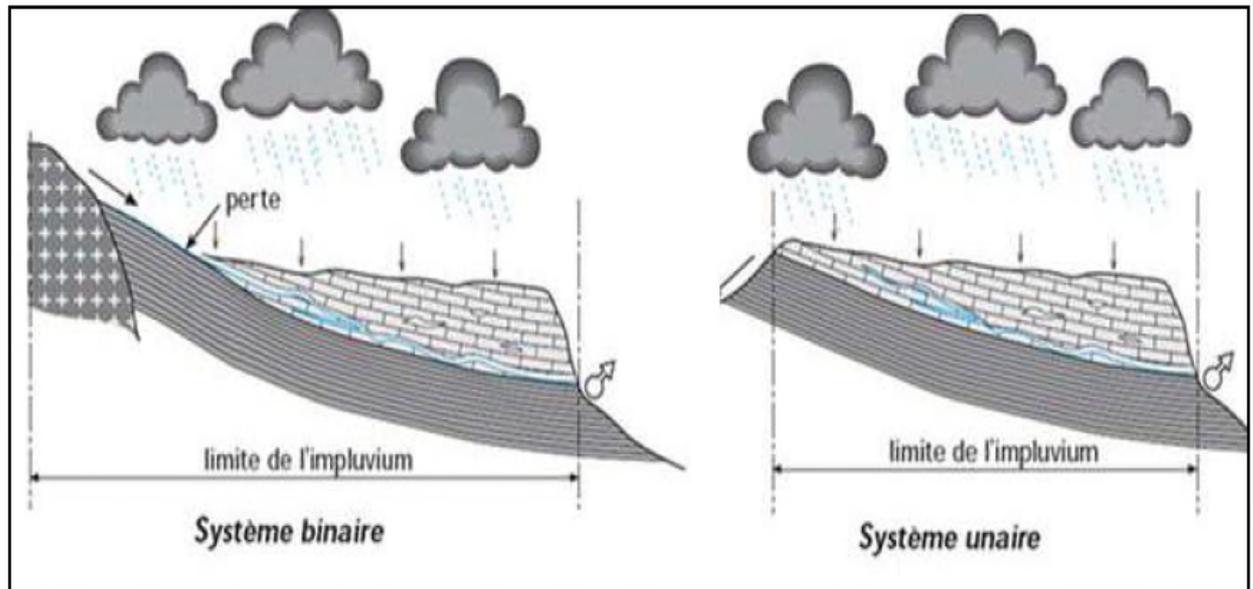


Figure 04. Représentation schématique des systèmes karstiques unaires et binaires (Marsaud, 1996).

I.1.5. La karstification

I.1.5.1. Origine de la karstification

Un des ouvrages de référence qui décrit la karstification du point de vue géomorphologique et hydrogéologique est celui de Ford et Williams, 1989. Des descriptions claires et synthétiques (en Français) de la structure et du fonctionnement général des aquifères karstiques peuvent être trouvées dans Bakalowicz, 1999 ainsi que dans la section dédiée au karst d'un ouvrage sur les «Aquifères & eaux souterraines en France » rédigé par ce même auteur (Collectif, 2006). Enfin, une analyse synthétique récente des différents modèles conceptuels qui expliquent le fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques pourra par exemple être trouvée dans la thèse de Perrin (2003). Le principe de la karstification est néanmoins rappelé sous l'angle des interactions avec les eaux de surface en insistant sur les particularités des karsts Méditerranéens.

I.1.5.2. Définition et principe de la karstification

La karstification est un processus d'altération chimique et d'érosion mécanique (abrasion) qui permet la formation de vides karstiques connectés et hiérarchisés constituant une unité de drainage karstique au sein de la roche originelle. Les roches concernées sont celles qui pourront être dissoutes directement par l'eau de pluie et surtout celles qui peuvent être dissoutes par l'eau infiltrée à travers le sol, ce qui regroupe l'ensemble des formations carbonatées (calcaires et dolomies). En effet, l'activité biologique au niveau du sol joue un rôle fondamental en

augmentant la pression partielle de CO₂ (pCO₂) du milieu ; l'eau infiltrée va alors s'équilibrer avec ce milieu et s'enrichir en CO₂, ce qui lui confère un caractère acide qui favorise la dissolution des carbonates (système calco-carbonique, voir (Ford et Williams, 1989). Ces eaux infiltrées sont dites agressives vis-à-vis de la calcite compte tenu de leur fort pouvoir de dissolution. Néanmoins, la très faible minéralisation de l'eau de pluie qui s'équilibre avec la pCO₂ de l'atmosphère peut aussi présenter un pouvoir de dissolution élevé : C'est le cas des eaux de ruissellement direct sur un terrain non karstique qui atteignent plus en aval un aquifère karstique. De plus, l'oxydation de la matière organique qui est amenée en quantité importante par les pertes de rivière produit du CO₂ et favorise d'autant plus la dissolution de la calcite et le développement des réseaux de drainage karstique. Dans le cas d'une perte en rivière, le flux d'éléments dissous sera donc lié au débit de la rivière qui atteint le karst (Fig. 05) (Palmer, 2003).

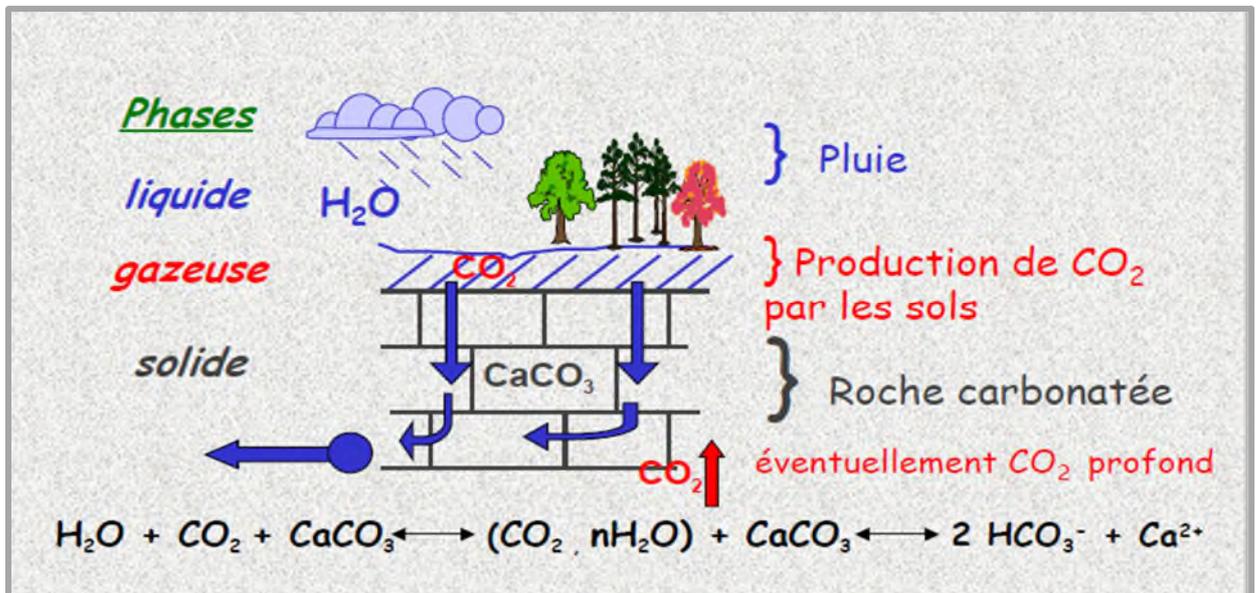


Figure 05. Schéma général de la karstification ((Création de vides dans la roche ou karstification) (Bakalowicz, 2002).

I.1.6. Aquifères karstiques côtiers

I.1.6.1. Le karst côtier

Dans le cas des aquifères karstiques côtiers, la mer représente le niveau de base jouant le rôle de couche imperméable (Mijatovic, 1961). Du fait de sa mise en place rapide à l'échelle des temps géologiques, l'aquifère karstique côtier enregistre grâce au développement d'un drainage associé à chaque niveau marin les variations, même de faible amplitude, du niveau de base à l'endroit où est localisée la source (Drogue, 1996, Bakalowicz, 1999). Les variations du niveau de base sont liées soit à la tectonique, soit à l'eustatisme. Compte tenu des temps d'enregistrement du niveau

de base dans le karst, il est beaucoup plus probable que les karsts côtiers enregistrent pour l'essentiel les variations eustatiques du niveau marin (quelques milliers d'années). Les mouvements tectoniques sont en général beaucoup plus lents. Une fois la source côtière formée, deux évolutions peuvent avoir lieu (Cooper *et al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988).

I.1.6.2. Diminution du niveau marin

On parle alors de régression marine et la source se retrouve « perchée » au-dessus du niveau de la mer. Un second réseau de drainage plus profond se met en place en relation avec le nouveau niveau de base (fig. 06). Le premier réseau de drainage se trouve partiellement abandonné. Il peut être réactivé lors des périodes de crue, fonctionnant alors comme réseau de trop plein. Ce sont ainsi les variations du niveau de base qui sont responsables de la structure particulière en réseaux étagés dans le karst (Cooper *et al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988).

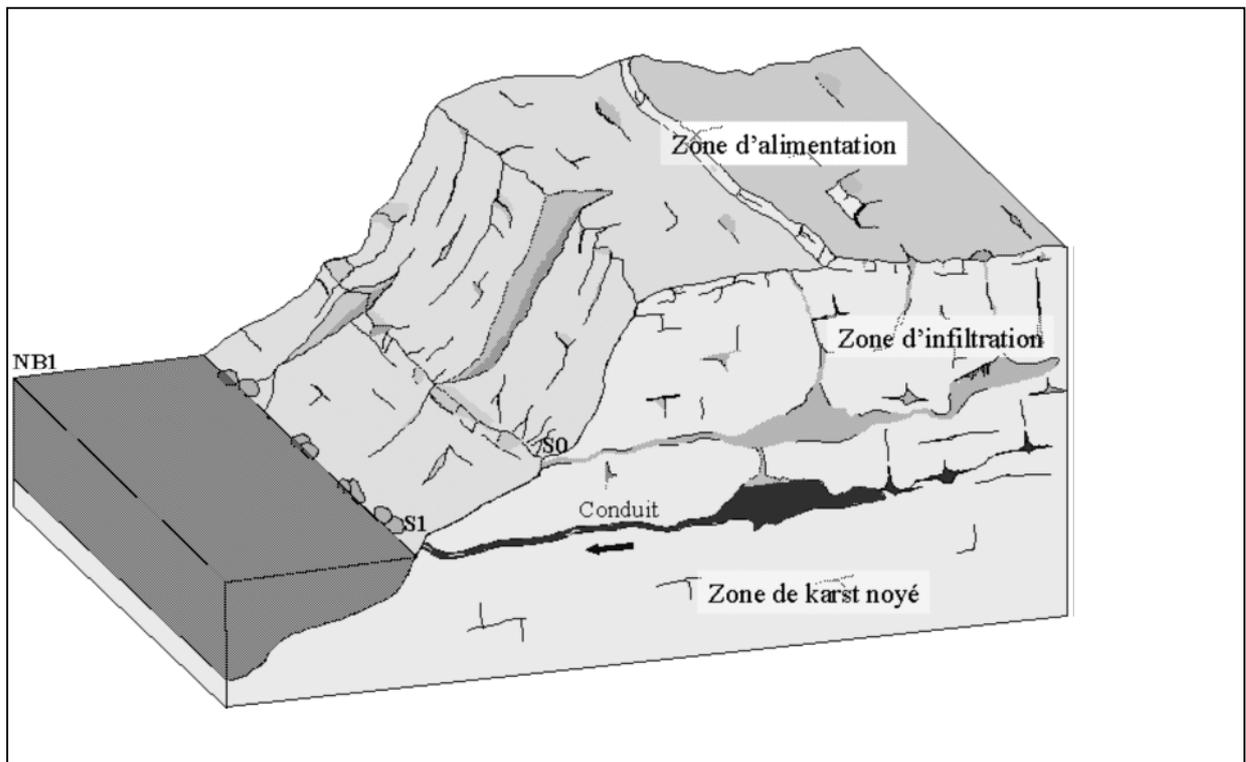


Figure 06. Mise en place d'un réseau de conduits suite à une chute du niveau de base (Cooper *et al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988)

NB1 : Niveau de Base à t_1 ; **S0** : Source à t_0 ; **S1** : Source à t_1 .

I.1.6.3. Montée du niveau marin (transgression)

Dans ce cas, les sources se retrouvent submergées (Fig.07). En fonction des conditions hydrauliques, les réseaux submergés peuvent, soit continuer à drainer l'eau du massif, auquel cas

nous avons des sources sous-marines, soit absorber de l'eau de mer (Cooper *et al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988).

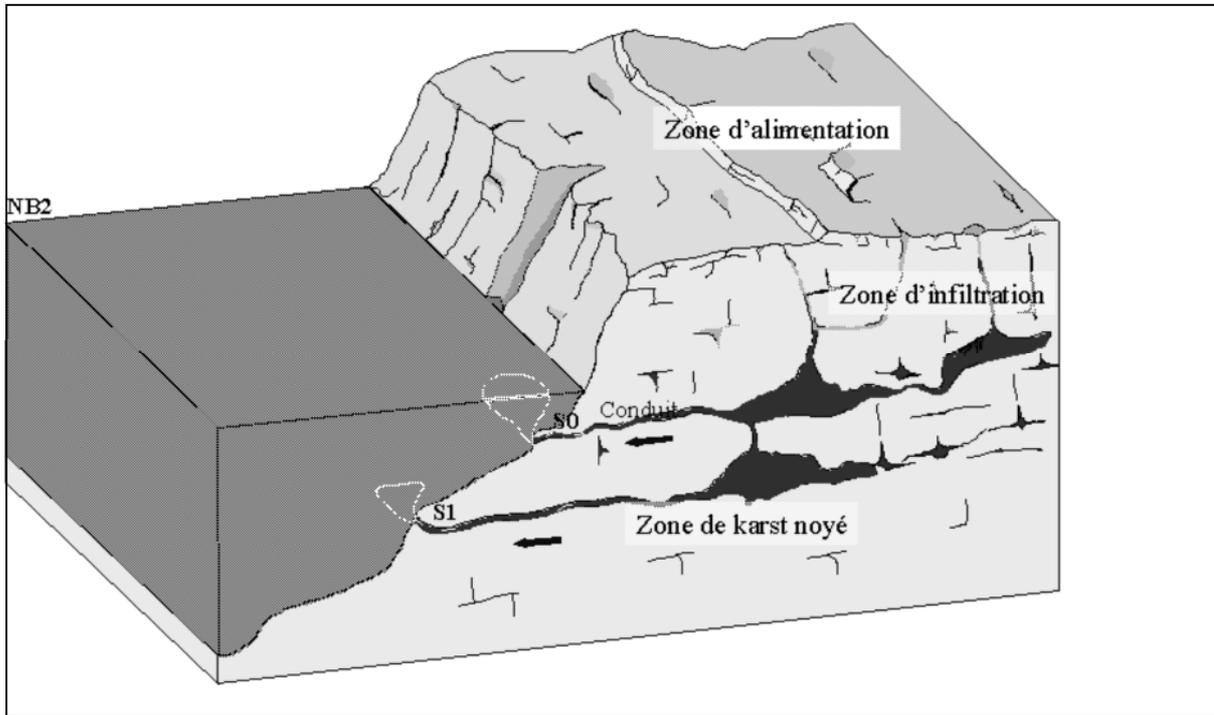


Figure 07. Transgression marine et submersion des sources karstiques (Cooper *et al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988)

NB2 : Niveau de Base à t_2 ; S0 : Source à t_0 ; S1 : Source à t_1

I.1.6.4. Flux d'eau dans les aquifères karstiques côtiers

Dans les aquifères côtiers, les relations entre l'eau douce et l'eau salée sont très particulières. Il existe des phénomènes d'intrusion d'eau de mer dans ces aquifères mais aussi des sorties d'eau douce ou saumâtre au-dessus et au-dessous du niveau de la mer. Le karst est un milieu hétérogène constitué d'une matrice calcaire souvent finement fissurée qui peut être comparée à un milieu équivalent, ou milieu continu. Au sein de cette matrice se trouve des conduits dans lesquels l'écoulement et le transport ne suivent pas les lois des milieux continus (Fleury, 2005).

I.1.6.5. Diffusion et dispersion moléculaire

En réalité, le contact entre l'eau douce et l'eau salée ne s'effectue pas suivant une surface bien définie. Les fluides sont miscibles et il existe une zone de mélange entre les deux fluides. La zone de transition (Fig. 08) est une zone de mélange due à la dispersion hydrodynamique (Cooper *et al.*, 1964 in Reilly et Goodman, 1985).

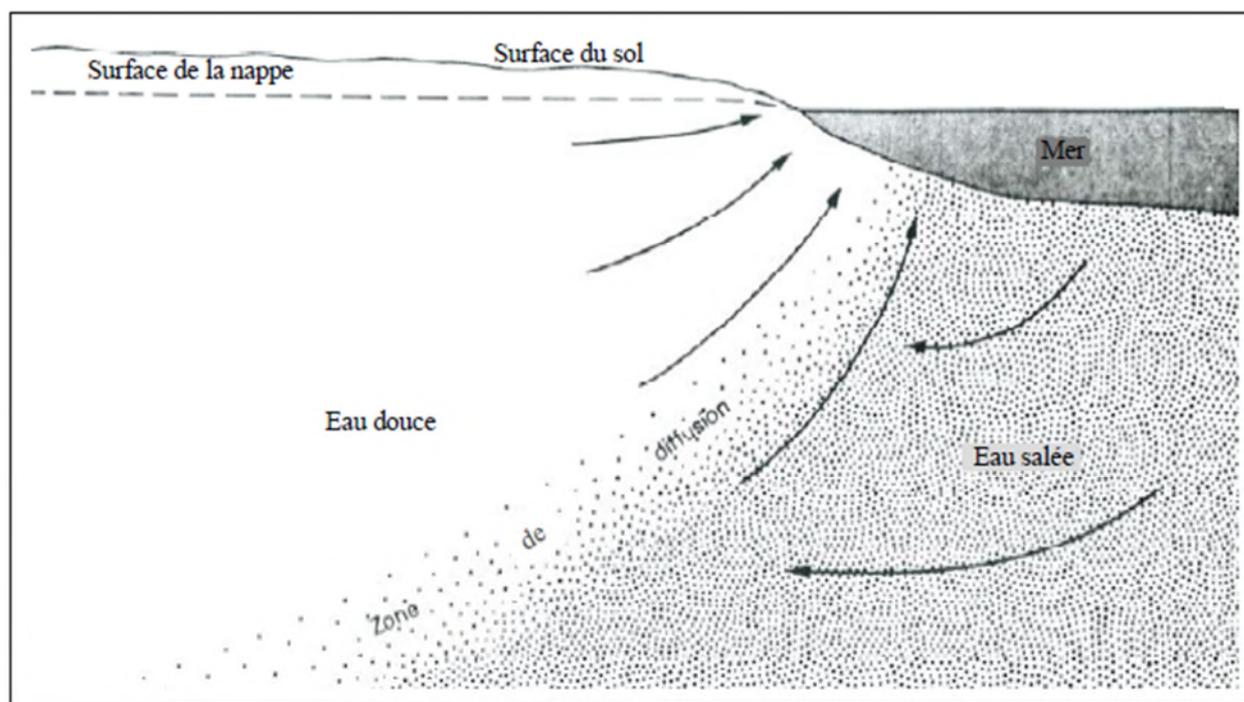


Figure 08. Intrusion saline dans un aquifère poreux (Cooper et *al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988).

I.1.7. Les méthodes d'études des systèmes karstiques

Alors que les nappes alluviales et les aquifères profonds commencent à présenter des indices de surexploitation et /ou de contamination, et dans un contexte de besoin en eau toujours croissant, les sollicitations des réserves en eau des aquifères karstiques, encore faibles, deviennent de plus en plus importantes. Néanmoins, il s'agit du milieu qui pose le plus de problèmes en hydrogéologie car ces aquifères présentent de fortes potentialités mais le manque de connaissances hydrogéologiques et géologiques limite leur exploitation (Chalikakis, 2006).

L'approche du fonctionnement et de la structure de l'aquifère karstique s'appuie nécessairement sur un large éventail de méthodes d'exploration et d'analyse. Selon les cas, elles s'appliquent soit à l'échelle locale, soit à celle du système dans son ensemble. Il faut distinguer entre les méthodes qui ont pour but de révéler la structure karstique du milieu et celles analysant le fonctionnement hydrologique du système (Bakalowicz, 2008).

L'étude des aquifères karstiques repose sur deux approches principales: l'approche fonctionnelle, et l'approche structurale. L'approche fonctionnelle vise à inférer les caractéristiques de l'aquifère karstique à partir de son fonctionnement. Cette approche peut reposer soit sur l'étude d'enregistrement de paramètres physico-chimiques de l'aquifère soit sur l'étude hydrochimique de l'aquifère. Selon (Jeannin 1996), cette approche présente l'avantage de pouvoir caractériser l'aquifère dans sa globalité mais pas de spatialiser les informations. Des

modèles de type boîte-noire peuvent en dériver. Ils n'ont pas, ou peu, de réalité physique mais peuvent servir d'outil de gestion des aquifères.

L'approche structurelle repose sur la caractérisation de l'ensemble des paramètres régissant le fonctionnement de l'aquifère étudié. Cette approche intègre donc les dimensions et les caractéristiques physiques de l'aquifère. Le fonctionnement temporel du karst doit alors être déduit de sa structure. Cependant, la quantité de données à récolter est telle que dans la pratique les applications de cette approche sont limitées. Néanmoins, elle peut être appliquée de manière pragmatique pour de nombreux problèmes, comme par exemple la reconnaissance d'horizons de karstification préférentielle en géotechnique. Cette approche est également préconisée dans la caractérisation des limites de l'aquifère. (Teutsch & Sauter 1998) ont également montré que cette approche peut s'intégrer dans la mise au point de modèles hydrogéologiques distribués en simplifiant les données d'entrée. Le développement d'outils tels le module Conduit Flow Process de Modflow se situe dans le prolongement de l'approche structurelle (Fournillon, 2012).

Les avantages et inconvénients respectifs des approches fonctionnelles et des approches structurelles montrent la nécessité de les intégrer, en particulier à travers la modélisation numérique. En effet, ces deux approches deviennent complémentaires et permettent de comparer et de corrélérer la réalité physique des aquifères et leur fonctionnement dynamique. Les approches intégrées doivent donc reposer sur une caractérisation multi-échelle des objets karstiques du fait de leur hétérogénéité. En effet, les échelles d'investigation ne sont optimales que pour une fourchette réduite de taille d'objets hydrogéologiques (Fournillon, 2012).

Comme l'ont signalé de nombreux auteurs, l'étude des aquifères carbonatés karstiques nécessite une approche multi-objet et multi-échelle, à la fois temporelle et spatiale. Ces mêmes auteurs soulignent également l'importance de combiner approche structurelle et fonctionnelle du karst. L'approche structurelle doit intégrer la caractérisation de la matrice en termes de stockage, et des karsts et fractures en termes d'écoulements. Les résultats ainsi obtenus doivent donc être comparés à ceux obtenus par la caractérisation dynamique, fonctionnelle, des objets considérés. Ces approches intégrées ont déjà été appliquées à des aquifères karstifiés et fracturés. Ces dernières sont également efficaces pour la caractérisation des réservoirs fissurés et karstifiés, en particulier d'hydrocarbures, où elles reposent sur le lien entre données statiques et dynamiques (Fournillon, 2012).

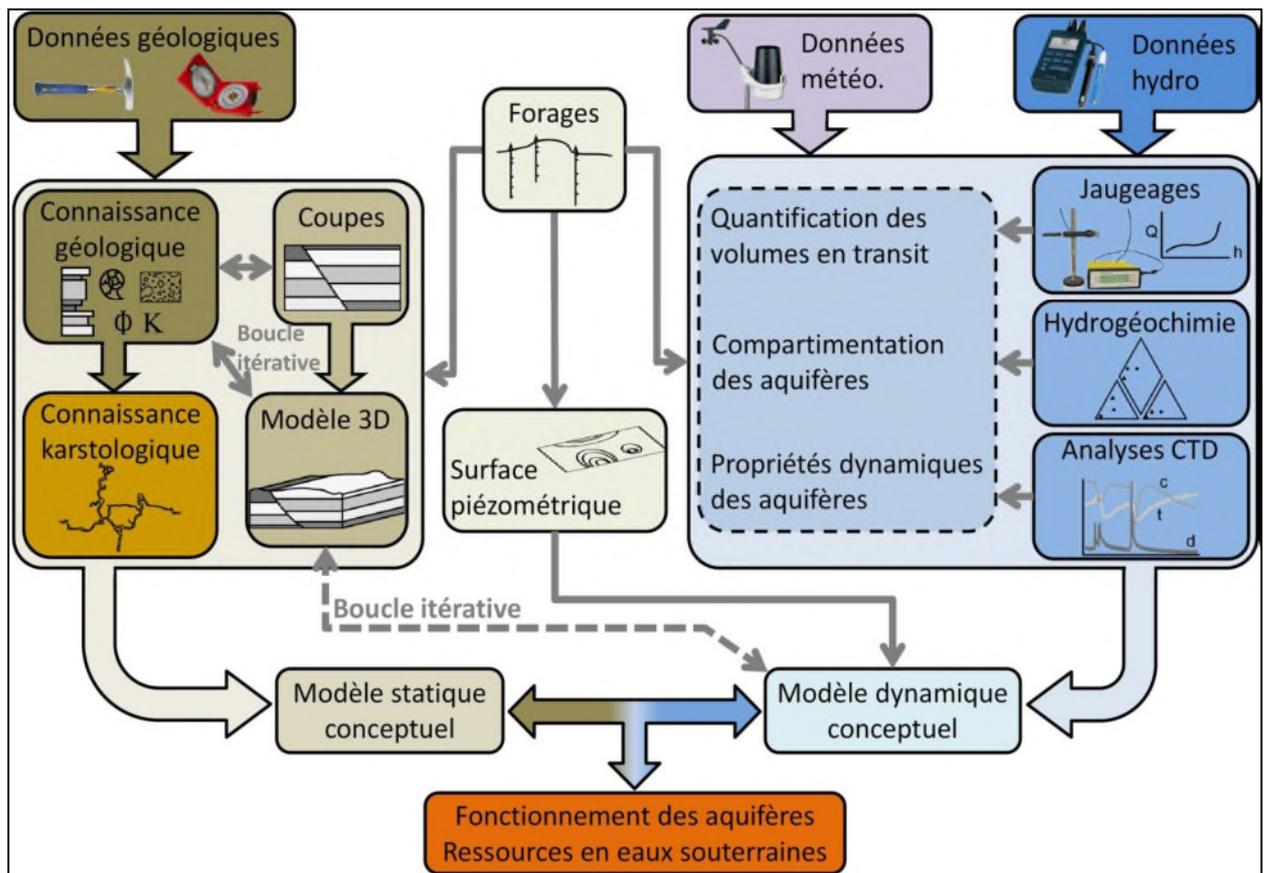


Figure 09: Méthodologie d'étude des ressources en eaux karstiques intégrant modélisation numérique géologique 3D et analyses hydrogéologiques (Fournillon, 2012).

I.2. Généralités sur les sources karstiques

I.2.1. Particularités des eaux karstiques

La minéralisation des eaux contient la totalité des informations relatives aux substances dissoutes (Bakalowicz, 1979). Cependant, deux éléments constituent en général à eux seuls souvent près de 90% de la minéralisation des eaux karstiques. Il s'agit des ions bicarbonate (HCO_3^-) et calcium (Ca^{2+}) dont la mise en solution résulte des processus de dissolution de la roche carbonatée. Viennent ensuite, dans un ordre variable selon les karsts étudiés, les ions Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} . Les teneurs en Na^+ , K^+ et SiO_2 sont généralement très faibles dans les eaux karstiques. Ces éléments peuvent alors être qualifiés de mineurs (Bouroubi, 2009).

I.2.2. Exploitation des sources karstiques

Les sources karstiques ont toujours été un point privilégié d'exploitation des eaux souterraines, pour des raisons d'accessibilité et de quantités disponibles. Il existe plusieurs stratégies techniques dont le choix est opéré sur la base de la connaissance hydrogéologique du milieu, de la demande des usagers et des coûts (Malard *et* Jeannin, 2013) :

- **Les captages:** Dans la plupart des cas, les eaux sont captées à la source, c'est-à-dire à l'exutoire visible du système.
- **Les forages:** Cette alternative est souvent privilégiée quand les sources ne peuvent être captées, soit parce qu'elles sont trop éloignées ou inaccessibles, soit en raison d'une qualité des eaux ou de débits insuffisants. Cette alternative peut s'avérer économiquement et écologiquement rentable à long terme, moyennant de caractériser correctement le système karstique exploité. Elle permet en particulier une meilleure gestion et prévision de la ressource que le captage à la source. Elle comporte toujours une part de risque liée à la probabilité de recouper ou non un conduit karstique actif.

I.2.3. Vulnérabilités des aquifères karstiques

Il est couramment admis que les aquifères karstiques sont très vulnérables aux pollutions de toutes sortes, du fait (Muet et Vier, 2011) :

- Du faible rôle filtrant de la zone d'infiltration ;
- Du faible effet de la dispersion et de la dilution liée à l'organisation des écoulements ;
- Du temps de séjour courts limitant les processus épuratoires au sein de l'aquifère.

En contrepartie, certaines caractéristiques de l'aquifère karstique sont intéressantes en termes de protection (Muet et Vier, 2011) :

- Elimination rapide des pollutions accidentelles touchant le réseau de drainage ;
- Effets retardateurs généralement réduits (adsorption, dispersion) ;
- Effets cumulatifs d'un cycle à l'autre très réduits du fait des temps de séjour globalement courts ;
- Une amélioration rapide de la qualité des eaux après réduction à la source des causes de pollution. Dans le détail, ces généralités doivent être modulées en fonction de la particularité de chaque aquifère karstique.

I.3. les paramètres physiques

Les paramètres physiques sont en relation avec la composition naturelle des eaux : au contact du sol, les eaux se chargent de certains éléments minéraux qui influent sur la conductivité et le pH (acidité). La température de l'eau est également prise en compte.

Les références de qualité fixées pour ces paramètres correspondent à des considérations de l'ordre du goût et de l'agrément plutôt qu'à des préoccupations sanitaires. Les eaux de distribution doivent respecter les valeurs suivantes (Ali Abbou, 2014).

I.3.1. La température

Le paramètre température, exprimée en degré Celsius, est un facteur écologique qui entraîne d'importantes répercussions écologiques (Leynaud, 1968). Elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels en particulier celle des gaz (Boeglin, 2000). Aussi elle agit sur la détermination du pH de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes (W.H.O, 1987). Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. La température optimale d'une eau d'alimentation se situe entre 8 et 15° C. La température d'une eau potable est de 12° C (Djilali, 2012).

I.3.2. Le pH

Ce paramètre mesure la concentration des protons H⁺ contenus dans l'eau, et donc l'acidité ou l'alcalinité de l'eau sur une échelle logarithmique de 0 à 14. Il influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux (Chapman et al., 1996).

Selon l'OMS (2004), le pH d'une eau potable doit être compris entre 6,5 et 8,5. Il diminue en présence des teneurs élevées en matière organique et augmente en période d'étiage, lorsque l'évaporation est importante (Meybecketal., 1996).

Le pH des eaux naturelles est lié à la nature géologique des terrains traversés. En régions granitiques ou schisteuses, en zones de tourbières ou forestières, les eaux ont un pH acide (<7). En régions calcaires, les eaux ont un pH basique (> 7) (Ali Abbou, 2014).

Le ph est relié à l'activité en protons par :

$$\text{pH} = \log [\text{H}] \quad \text{eq : 01}$$

log : Logarithme décimal

[H] : Concentration en ions H⁺ ou H₃O⁺

I.3.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique (Derwich et al., 2013). Elle est proportionnelle à la minéralisation de l'eau. Plus l'eau est riche en sels minéraux ionisés, plus la conductivité est élevée. La conductivité varie également en fonction de la température. La conductivité à, la plus part du temps, une origine naturelle due au lessivage des terrains lorsqu'il pleut. Ce lessivage entraîne naturellement la dissolution d'un certain nombre de sels minéraux. Elle peut également avoir pour origine l'activité humaine causée par les effluents agricoles, industriels ou domestiques qui contiennent des sels contribuant eux aussi à l'accroissement de la conductivité.

- Une eau faiblement minéralisée : (conductivité < 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$) peut être corrosive pour les canalisations et les appareils de chauffage.

Elle peut entraîner une dissolution des métaux toxiques comme le plomb.

- Une minéralisation trop importante : (conductivité > 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) peut être à l'origine de dépôts (entartrage lorsque les sels de calcium sont en excès), mais n'a pas de conséquences importantes sur la santé. Cependant des valeurs excessives de la conductivité (minéralisation) peuvent avoir chez l'homme des effets laxatifs.

Une telle eau peut également présenter un goût salé (Ali Abbou, 2014).

I.3.4. La salinité

La minéralisation est la teneur en sels dissous dans l'eau. Elle représente l'ensemble des sels déterminés et est exprimée en mg/l. Elle est en relation directe avec la conductivité (Mihoubi, 2008).

La salinité des eaux souterraines peut avoir plusieurs origines géologiques et lithologiques. Par contre, les facteurs favorisant une large dispersion de la salinité au sein d'un aquifère contribuent en l'occurrence, la tectonique, hydrodynamique, température et l'exploitation intensive des eaux souterraines en particulier en période sèche (Gherieb, 2011). Les salinités résultent des conductivités. La valeur de 1000 ppm est considérée comme la limite entre l'eau douce et l'eau salée. Du point de vue chimique, une eau d'irrigation peut être utilisable avec une salinité plus élevée (Adam et al., 2003).

I.3.5. Total des solides dissous (TDS)

Le TDS signifie le total des solides dissous. Exprimée en mg/l, il représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Il est composé de sel inorganique tel que (calcium, magnésium, potassium et sodium) et des carbonates (nitrates, bicarbonates, chlorure et sulfate) et ainsi que quelques matières organiques (FEPS, 2014).

Ces minéraux peuvent provenir d'un certain nombre de sources naturelles autant que suite aux activités humaines. Des sources d'eau minérales contiennent de l'eau avec un taux élevé de solides dissous parce qu'elles ont coulé à travers des régions où les roches contiennent beaucoup de sel. L'eau dans les prairies contient beaucoup de solides dissous dus aux fortes quantités de calcium et magnésium dans le sol. Ces minéraux peuvent aussi provenir d'activités humaines. Les eaux de ruissellement agricoles et urbaines peuvent provoquer un surplus de minéraux dans les sources d'eaux comme les bassins d'eaux usées, eaux usées industrielles et le sel qui est utilisé pour dégivrer les routes (Bellil et Benhamana, 2016).

Beaucoup de gens pensent que le TDS a seulement un effet esthétique. Dans une étude réalisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), un jury de dégustateurs sont venus à la conclusion sur la quantité de TDS préférable dans l'eau selon le tableau suivant :

Tableau I - Goût de l'eau avec les différentes concentrations de TDS (FEPS, 2008).

Niveau de TDS (milligrammes par litres)	Evaluation
Moins de 300	Excellent
300-600	Bien
600 – 900	Passable
900 – 1200	Faible
Plus de 1200	Inacceptable

Cependant, une concentration très basse de TDS donne un goût fade à l'eau qui est indésirable à beaucoup de personnes (FEPS, 2008).

I.3.6. La turbidité

La turbidité est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Dans les eaux naturelles la turbidité est causée par la présence des matières en suspension fines (argile, limon, grains de silice et les micro-organismes). Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM qui considère que les trois unités suivantes sont comparables :

- JTU (Jackson Turbidity Unit)
- FTU (Formazine Turbidity Unit)
- NTU (Nephelometric Turbidity Unit)

La détermination de la turbidité est très utile dans le contrôle d'un traitement, éviter les dépôts et aussi pour l'amélioration de l'aspect esthétique de l'eau de consommation (Rejsek, 2002).

I.4. Caractéristiques électrochimiques des eaux karstiques

Les éléments majeurs correspondent aux anions et cations qui constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux. Ils sont représentés par les éléments suivants (Bouroubi, 2009):

I.4.1. Le calcium et les bicarbonates (Ca^{2+} et HCO_3^-)

L'apport atmosphérique en ces deux éléments étant négligeables, leur teneur dans les eaux carbonatées a toujours une origine interne au système. On peut retenir parmi les différents facteurs qui contrôlent la teneur en Ca^{2+} et HCO_3^- :

- l'agressivité de l'eau qui entre dans le système, régie par sa teneur en CO₂ dissous et son pH ;
- le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère ;
- l'état du système calco-carbonique par rapport à l'équilibre de cette réaction. Si l'eau est sursaturée par rapport à la calcite, elle aura tendance à précipiter des carbonates. Par contre, elle tendra à dissoudre les calcaires si elle est sous-saturée par rapport à la calcite.

I.4.2. La silice (SiO₂)

La teneur en silice que l'on peut mesurer dans les eaux karstiques provient essentiellement des minéraux silicatés. La mise en solution de cet élément nécessite des temps de séjour de l'eau prolongée. Ainsi, la silice constitue un traceur d'acquisition lent dans le réservoir.

I.4.3. Les nitrites (NO₂⁻)

La présence des nitrites d'origine naturelle est très rare. Ils sont répandus dans le sol, les eaux et les plantes mais en quantité relativement faible. La présence des nitrites dans une eau naturelle peut être due à une oxydation incomplète de composés azotés (azote organique ou ammoniacal) ; ils correspondent à un stade intermédiaire très fugace et leur concentration reste donc, en général, assez faible (Rejsek, 2002).

I.4.4. Les nitrates (NO₃⁻)

Selon Rejsek 2002, la teneur naturelle des eaux souterraines en nitrates est faible ; elle dépend des types de sols, de la végétation qui les recouvre ainsi que de taux d'oxygénation dans la zone noyée. L'apport atmosphérique est faible lui aussi, par conséquent l'origine de ce traceur dans les eaux karstiques est essentiellement externe. Il est utilisé comme indice de pollution. Les apports anthropiques principaux sont liés essentiellement aux activités :

- agricoles : fertilisation des sols par des engrais azotés, fumiers, élevage;
- humaine : eaux usées.

Compte tenu de leur origine externe, ces éléments peuvent informer d'une part sur le fonctionnement des aquifères karstiques et particulièrement sur les modalités d'infiltration dans le système (lente ou rapide). D'autre part, les nitrates constituent un excellent traceur de la qualité des eaux (Bouroubi, 2009).

Chapitre II

*Matériel et
Méthodes*

II. Présentation du milieu d'étude

II.1 Introduction

Les régions calcaires d'Algérie offrent une grande diversité des paysages, depuis les karsts bien arrosés des hautes montagnes de l'Atlas jusqu'aux affleurements peu karstifiés du désert du Sahara (Fig. 10). Ce sont des formations d'âges qui s'étalent sur toute l'échelle géologique des temps les plus anciens, du carbonifère (dans la région de Bechar), du Trias (nombreux affleurements de gypse et de sel à travers l'Algérie), Jurassique et Crétacé (massifs côtiers oranais, nappes telliennes, domaine tlemcénien, néritique constantinois, Atlas saharien), Miocène post-nappe (Dj. Murdjadjo, vallée du Chéllif) (Bensaoula *et al.*, 2007).

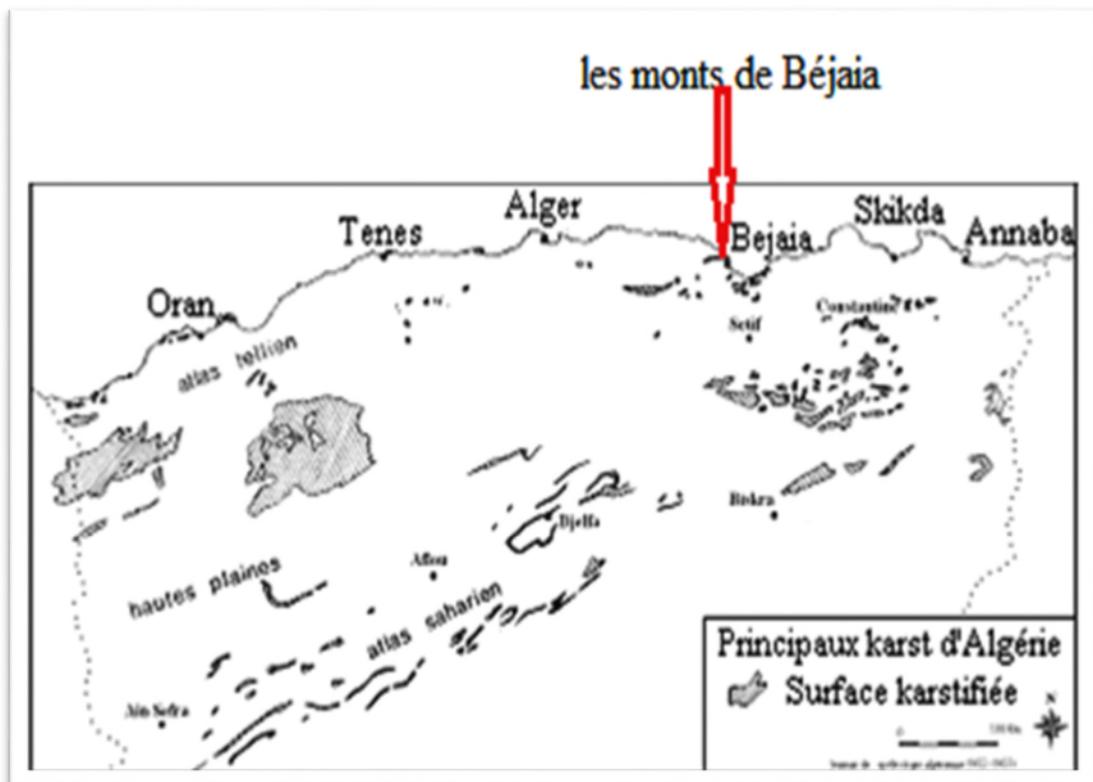


Figure10- Les principaux Karst d'Algérie (Bensaoula *et al.*, 2007).

La Wilaya de Bejaia est une région côtière du centre Est insérée entre les grands massifs du Djurdjura, des Bibans et des Babors et s'ouvrant sur la mer méditerranéenne avec une façade maritime de plus de 100 Kms, alternant criques rocheuses et plages de sable fin d'Est en Ouest.

Elle s'étend sur une superficie de 3 223.5 km² (Anonyme, 2005). La wilaya est située au Nord-est du pays, sur le littoral méditerranéen. Elle est limitée par :

- La mer méditerranée au Nord ;
- La wilaya de Jijel à L’Est, Les wilayas de Sétif et Bordj-Bou-Argeridj au Sud ;
- Les wilayas de TiziOuzou et Bouira à l’Ouest (ANDI, 2013).

Faisant partie d’une région assez arrosé, la wilaya de Bejaia est traversée par plusieurs oueds drainant les eaux superficielles de ruissellement vers la mer. Les plus importants sont : oued Soummam, oued Djemaa, oued Zitouna et oued Agrioun (ORGM, 1999). Ce dernier est situé dans la région étudiée dans la frange littorale Nord-est de Bejaia (de Souk el tenine à kherrata).

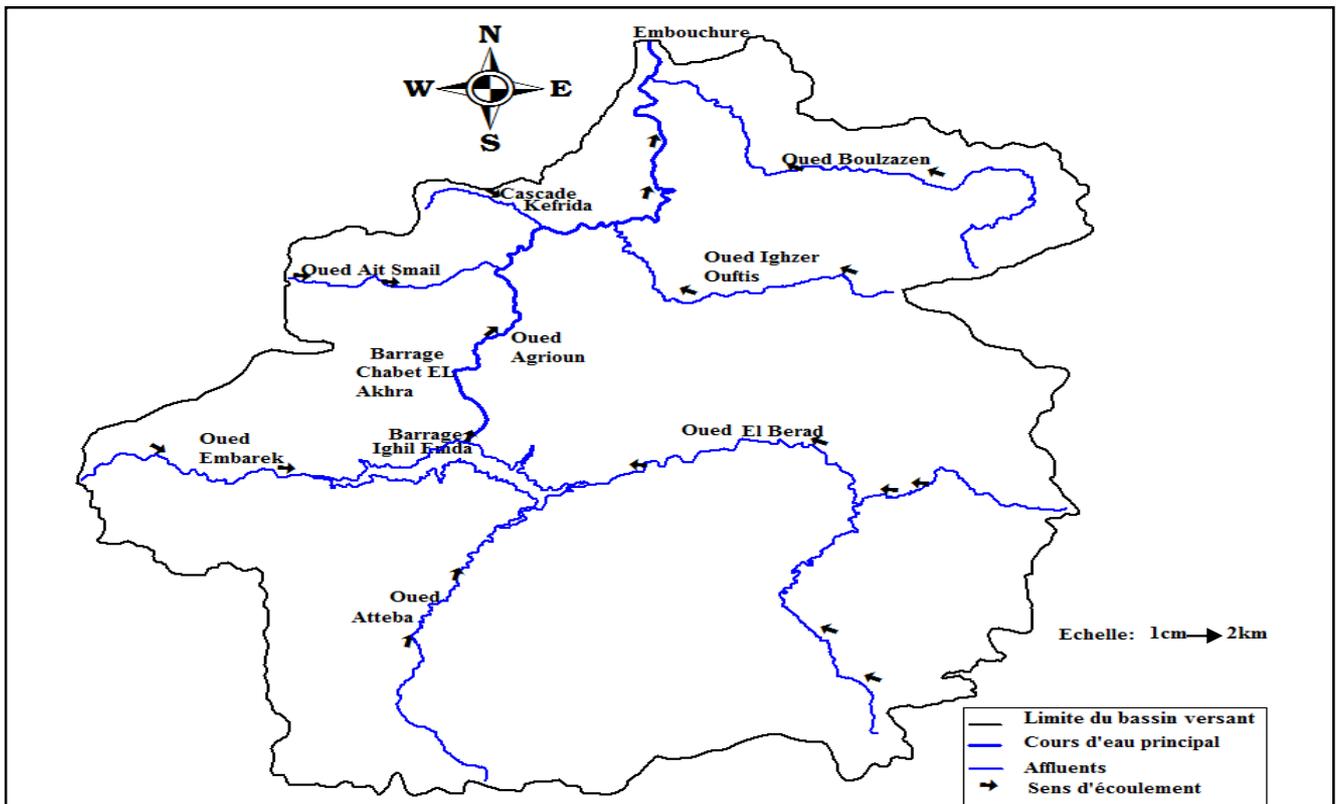


Figure11 - Carte de délimitation du bassin versant de l’Oued Agrioun

II.2 Situation géographique et limites

II.2.1 Description de la région d’étude

L’Oued Agrioun, qui draine le bassin versant d’Agrioun, est formé par la réunion de trois affluents : Oued EL Bared, Oued Atteba et Oued Embarek.

L’Oued Agrioun franchit la chaîne des Babors dans les gorges dites Chabet EL Akhra, par un trajet Sud-nord perdant en 10 Km près de 400 m d’altitude, pour enfin gagner le golf de Bejaia au niveau de la commune de Souk El Tenine.

Le plan d'équipement de 1944 a choisi l'Oued Agrioun comme le premier Oued à aménager en petite Kabylie. Son aménagement a été réalisé suivant un schéma classique qui comporte, à l'amont, une retenue importante de régularisation (barrage Ighil Emda), alimentant à volonté un bassin de prise situé au niveau des gorges de Chabet EL Akhra (Anonyme, 1955).

II.2.2 Délimitation du bassin versant de l'Oued Agrioun

Pour délimiter le bassin versant de l'Oued Agrioun, nous avons choisi d'utiliser la méthode de digitalisation (Map info). Ce logiciel nous a permis de superposer deux cartes (la carte de Ziama et la carte de Kherrata) après les avoir calées. Sur ces deux cartes topographiques, nous avons superposé une nouvelle couche de dessin sur laquelle nous avons retracé le cours d'eau principal puis ses affluents tout en faisant ressortir le réseau hydrographique. Une fois le réseau ressorti, nous avons tracé ces limites pour obtenir à la fin la limite du bassin versant (fig.11).

II.3 Le cadre géologique

La chaîne des Babors dessine une limite franche entre le bassin amont de l'Oued Agrioun à Kherrata et les bassins versants des affluents situés au Nord.

Le bassin amont de l'Oued Agrioun occupe des formations caractéristiques de la nappe de Djemila. Ces formations sont dominées par la présence de marnes noires, de calcaires et de calcaires marneux qui façonnent un relief mou. On y retrouve, par ailleurs, des formations d'âge éocène formées de roches tendres (schistes et calschistes). Les versants sont couverts de terres arables, de formations de pentes et d'alluvions anciennes.

A l'extrémité méridionale du bassin, les massifs du Djebel Megriss et du Djebel Chouf Karoun présentent des formations typiques de la nappe Numidienne formées d'alternances de grès et d'argiles à kaolinite.

Au niveau de Kherrata, les massifs des Babors, de Mellal et de Takoucht sont constituées de calcaires jurassiques qui entaillent profondément les gorges du Chabet EL Akhra. Ces formations, où l'on retrouve des calcaires marneux-schisteux, des calcaires massifs et dolomies, occupent une grande étendue de la partie septentrionale du bassin de l'Oued Agrioun.

Le bassin d'Ait Smail est, quant à lui, majoritairement recouvert de marnes schisteuses et d'éboulis de pentes en contrebas des sommets calcaires dolomitiques.

Le bassin d'Ighzer Oufis est recouvert de formations à dominante de schistes (Anonyme, 2007).

II.4. Hydrogéologie

Les nappes d'eau souterraine de la plaine côtière de Bejaia se trouvent pratiquement et exclusivement dans les formations alluvionnaires de la plaine. Ces nappes sont ainsi au nombre de trois se rapportant aux trois unités suivantes :

- La plaine de Tichy, limitée à l'Ouest par la vallée de la Soummam, à l'Est par le Cap Tichy.
- La plaine de l'embouchure de l'Oued Djemaa située entre le Cap Tichy et le Cap Aokas.
- La plaine de Souk EL Tenine située entre le Cap Aokas et la plaine de l'Oued Agrioun incluse (Anonyme, 2007).

II.5 Climatologie

La seule station existant au niveau de notre zone d'étude est celle du barrage d'Ighil E'mda. Cette station n'a pas fonctionné de façon continue (à l'arrêt depuis 2001). Pour les besoins de notre étude nécessitant des données récentes permettant d'expliquer l'interaction entre les variations climatiques et les caractéristiques de l'eau, nous avons utilisées les données provenant de la station météorologique de Bejaia (1,76 m d'altitude) que nous avons corrigé en utilisant la méthode de Seltzer (Seltzer *et al.*, 1946).

D'après cet auteur, l'abaissement des températures maximales est de 0,7°C pour une élévation de 100m d'altitude et celle des minimas est de l'ordre de 0,4°C pour la même élévation d'altitude. Ce qui correspond à un abaissement de 0,55°C par 100m d'altitude pour les températures moyennes mensuelles. Pour les précipitations, une élévation de 100m d'altitude va engendrer un gradient pluviométrique de l'ordre de 40mm.

L'altitude maximale de notre zone d'étude est de l'ordre de 737 m et l'altitude minimale est de 2 m. Ce qui signifie que l'altitude moyenne de notre zone d'étude est d'environ 488 m.

II.5.1 Les Températures

La température de l'air présente un facteur limitant de toute première importance. Elle conditionne l'évaluation du déficit d'écoulement. Elle rentre dans la détermination du régime climatique. Elle augmente avec la diminution de la distance à la mer. C'est un facteur qui a un rôle important dans la répartition des espèces et des communautés des êtres vivants de la biosphère (Ramade, 1984). La répartition des températures de la région d'étude pour la période comprise entre 1978 et 2016 est représentée dans le tableau I. Les valeurs mentionnées dans ce tableau sont relevées au niveau de la Station Météorologique de Bejaia et corrigées d'après la méthode de Seltzer *et al.*, (1946).

Tableau II - Températures moyennes mensuelles corrigées en degrés Celsius de la région d'étude pour la période (1978-2016) (Station ONM de Bejaia, 2016).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
T° _{max}	15.66	16.32	17.92	19.72	22.25	25.70	28.85	29.54	27.51	24.78	20.15	16.98
T° _{min}	07.11	07.19	08.6	10.51	13.51	17.18	19.96	20.78	18.72	15.53	11.39	08.31
T° _{moy}	11.38	11.75	13.26	15.11	17.88	21.44	24.4	25.16	23.11	20.15	15.77	12.64

A partir du tableau I, nous constatons que le mois d'Août est le mois le plus chaud avec une température maximale de l'ordre de 29.54°C et que le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température minimale de l'ordre de 7.11°C.

II.5.2 Les précipitations

- **Correction de la pluviométrie**

Les précipitations moyennes annuelles de Bejaia (Pan=775mm).

Les précipitations moyennes annuelles corrigées du site de l'Oued Agrioun :

$$P'an = 775 + 92 = 867mm \quad \text{Eq 02}$$

Donc, le rapport $K = P'an / Pan$ est égal à 1.12 (K=1.12)

Les précipitations mensuelles du site de l'Oued Agrioun sont le résultat du produit des données brutes de la station de Bejaia par le coefficient K=1.12.

D'après le tableau II, la pluviométrie minimale est enregistrée durant le mois de juillet. Elle est de 5.9mm. La pluviométrie maximale est enregistrée durant le mois de décembre. Elle est de 145.5mm.

Tableau III - La répartition des précipitations moyennes mensuelles en (mm) corrigées de la station de Bejaia et notre région d'étude (1978-2016) (Station ONM de Bejaia, 2016).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	P(mm)
Bejaia	110.3	92.5	83.8	66.9	42.1	15.8	5.3	11.0	54.9	72.1	99.9	129.0	784
Oued Agrioun	123.5	103.6	93.9	74.9	47.2	17.7	5.9	12.4	61.5	80.8	111.9	145.5	879

II.6 Synthèse des données climatiques

II.6.1 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

En 1954, Bagnouls et Gaussen ont établis un diagramme qui permet de dégager la période sèche en s'appuyant sur la comparaison des températures moyennes et de précipitations mensuelles moyennes, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec une échelle des précipitations équivalente au double de celles des températures ($P= 2T$) (Benhamiche *et al.*, 2013). Le diagramme ombrothermique de la région d'étude (Oued Agrioun) pour la période (1978-2016) montre l'existence d'une période humide et d'une période sèche. La période humide s'étale du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois de Mai. Par contre la période sèche s'étend sur quatre mois. Elle va de la fin du mois de Mai jusqu'à la fin de Septembre. Il y a sécheresse lorsque la courbe des précipitations rencontre celle des températures et passe en dessous (fig.12) (Benhamiche *et al.*, 2013).

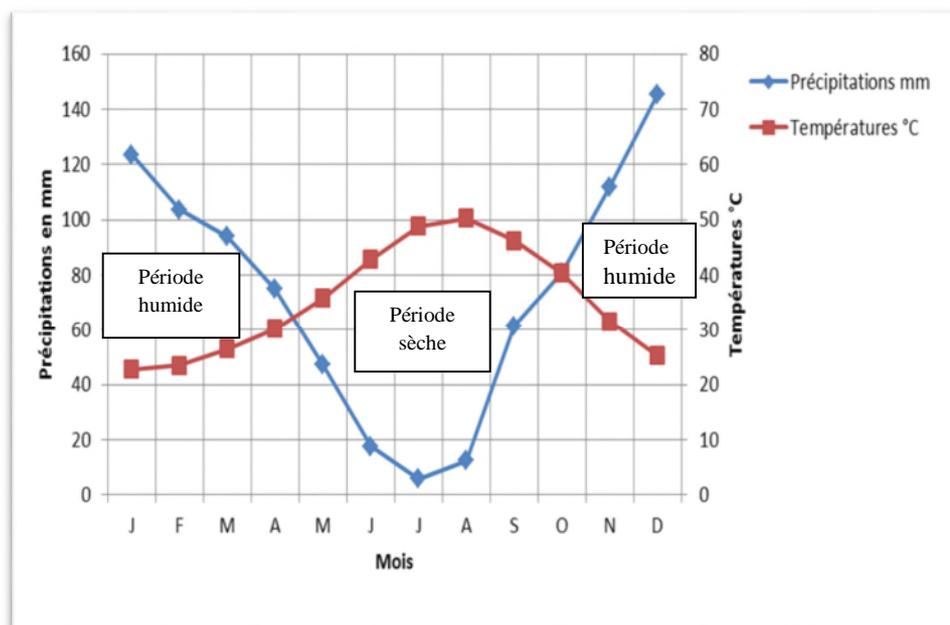


Figure 12- Diagramme Ombrothermique de la région d'étude (Oued Agrioun) durant la période (1978-2016).

II.6.2 Climagramme d’Emberger

Le climagramme d’Emberger permet de classer une région donnée en étages bioclimatiques en tenant compte du quotient pluviométrique d’Emberger. Il est exprimé par la formule suivante :

$$Q_2 = \left(\frac{P}{M^2 - m^2} \right) 2000 \quad \text{Eq : 03}$$

P : Précipitations annuelles exprimées en mm,

M : Moyennes des températures Max du mois le plus chaud (°K),

m : Moyennes des températures Min du mois le plus froid (°K),

Ce quotient a été simplifié par Stewart(1969) pour l’Algérie et le Maroc. Les températures sont exprimées en degrés Celsius. Il se calcule par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M - m} \quad \text{Eq. 04}$$

P : Précipitation annuelle moyenne.

M : Maximum annuel moyen de la température.

m : Minimum annuel moyen de la température.

Calcul de Q₂ pour notre région d’étude (Oued Agrioun) :

P= 878.8mm M = 29.54°C m= 7.11 °C

Q₂= 3.43 × 878.8 / 29.54 – 7.11 Alors : Q₂ = 134.4

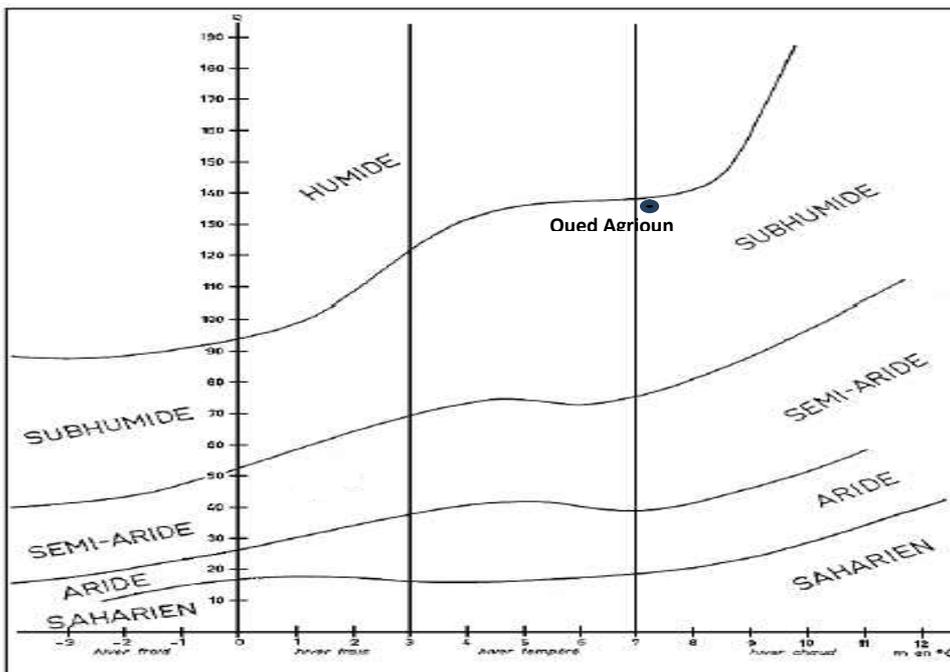


Figure 13- Situation bioclimatique de la région d’étude sur le climagramme pluviothermique d’Emberger modifié par Stewart, 1969 (Khanfouci, 2008).

II.7 Faune et flore

II.7.1 Faune

La région est d'une richesse faunistique importante. On trouve des mammifères comme le singe magot, porc épic qui existe dans toute la région de Bejaia ainsi que la perdrix, les lapins, les sangliers, certains oiseaux comme les cigognes et beaucoup d'autres espèces qui construisent leurs nids dans les arbres et les toits des maisons.

II.7.2 La flore

➤ La végétation forestière

La flore forestière comporte un certain nombre d'essences de premier ordre. Les feuillus sont plus nombreux que les résineux.

Selon l'ordre proposé par Maire 1962, on peut trouver trois types de formations forestières :

- Formation forestière d'arbres résineux (Gymnospermes) :
 - Le pin d'Alep (*Pinushalpensis*)
- Formation forestière d'Angiospermes à feuilles persistantes :
 - Chêne liège (*Quercus suberis*)
 - Olivier sauvage et lentisque (*Oleolentiscus*)
- Formation forestière d'Angiospermes à feuilles Caduques :
 - L'ormeaie-frêne (*Ulmofraxinetum*)
 - La peupleraie (*Populetumalbae*) ou (*peuplier blanc*).

➤ La végétation rare

Dans ce domaine, nous parlerons des plantes et des arbustes qui se trouvent dans la région comme par exemple : les phillyria, le romarin, la lavande, le ciste blanc et le ciste de Montpellier ainsi que le genévrier et la bruyère qui est une espèce qui vient coloniser des sols acides (généralement après les incendies).

Nous notons aussi la présence du Caroubier et l'Eucalyptus. Ce dernier a la capacité de changer son écorce après les incendies. Nous rencontrons également le rosier sauvage et le rosier des montagnes. Nous avons remarqué la présence d'une végétation caractérisant les lits de l'Oued Agrioun comme les Joncs et les Roseaux.

II.8 Caractéristiques socio-économiques

II.8.1 Population

Le total de la population pour les huit (8) communes appartenant à la limite du bassin versant est égal à 142025 habitants réparti sur une superficie de 488.72 km². Elle représente une densité d'environ 290 habitants/km². Cette répartition est représentée dans le tableau III (D.P.A.T., 2012).

Tableau IV - Répartition de la population du bassin versant de l'Oued Agrioun par commune (D.P.A.T 2012).

Communes	Population 31/12/2012	Superficies (Km ²)	Densité Habitants/Km ²
Kherrata	36173	98.00	370
Draa El-Gaid	30135	123.00	244
Derguina	14587	82.53	177
Ait-Smail	12151	27.08	449
Taskriout	16647	31.06	536
Souk el tenine	14485	26.28	551
Melbou	11753	47.47	248
Tamridjet	8679	53.27	163

II.8.2 Agriculture

La superficie agricole utile (SAU) de la wilaya de Bejaia est de 130 348 Ha qui sont répartis comme suit :

- Cultures permanentes : 69 470 Ha (dont 98.31 % en arbres fruitiers) ;
- Terres labourables : 60 878 Ha (D.P.A.T., 2012)

La superficie agricole utile (S.A.U) est de 16415 Ha pour les communes du bassin versant et elle se répartie selon le tableau 04(D.P.A.T., 2012).

Tableau V - Occupation des sols (ha) par communes (D.P.A.T., 2012).

Communes	Céréales	Légumes secs	Fourrages	Agrumes	Culture Maraichère	Vigne de table	Olivier	Figuier	Culture industrielle
Kherrata	11400	825	8165	39780	40	0	2592	3000	420
Draa El-Gaid	35000	2300	23725	53860	550	0	4536	5440	1680
Derguina	0	10	0	67	8	308	11	110	0
Ait-smail	50	10	2	71	23	314	1	100	2
Taskriout	30	5	10	103	20	104	11	40	2
souk el tenine	50	0	193	69	0	322	44	33	1
Melbou	0	0	0	80	0	273	24	11	3
Tamridjet	0	1	1	64	0	194	8	20	0

II.9 La géolocalisation et la cartographie

II.9.1 Objectifs de la géolocalisation

La géolocalisation est la capacité d'un système à déterminer la position géographique d'un équipement, qu'il soit mobile ou non. Les positions obtenues sont généralement exprimées sous forme de coordonnées géodésiques (latitude, longitude, altitude). Principalement utilisée pour la navigation, la géolocalisation a su profiter des évolutions technologiques en s'intégrant dans les systèmes de communication sans fil. Lorsqu'on a localisé un terminal, il est possible d'envoyer à son utilisateur des informations contextuelles, relatives par exemple aux commerces, aux services et aux lieux remarquables qui existent près de l'endroit où il se trouve. Les services de secours commencent également à tirer profit de la géolocalisation, notamment lors de la recherche de personnes en détresse (Montavont *et al.*, 2006).

II.9.2 Définition et principe de GPS

Le système de positionnement global ou GPS (Global positioning system) est un système de radionavigation spatial qui permet aux utilisateurs équipés de récepteurs convenables de déterminer sur terre, sur mer ou dans les airs, leur position, leur vitesse et l'heure à n'importe quel moment du jour ou de la nuit et ce, quelles que soient les conditions météorologiques. Le système offre un niveau de précision équivalent ou supérieur à tout autre système de navigation actuel (Canada, 2000).

Le repérage des sources karstiques se trouvant au Nord-est de Bejaia a été réalisé entre le mois de Février et le mois de Mai 2017. Leurs positionnement avec le GPS s'est fait comme suit :

- Pour le positionnement des sources karstiques, nous avons utilisé un GPS de marque (Etrex). Cet appareil fonctionne grâce à un réseau de satellites qui émettent en permanence des informations codés. Ces informations permettent d'identifier précisément les positions géographiques sur terre, en mesurant les coordonnées géographiques depuis les satellites.
- le système de positionnement global comporte trois éléments : le segment spatial, le segment contrôle et le segment utilisateur. Pour faire son travail, il doit connaître deux choses essentielles: la position des satellites et la distance à laquelle ils se trouvent. La page menu du GPS nous permet d'accéder aux

autres fonctions : marquer les coordonnées d'un point, personnaliser l'affichage, organiser les « waypoints »...etc.

II.9.3 Importation de données de GPS par satellite dans Google Earth

Google Earth est un logiciel de visualisation de la Terre, avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Ce logiciel permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de « zoomer » sur un lieu de son choix. Selon les régions géographiques, les informations disponibles sont plus ou moins précises.

Google Earth peut importer des données GPS de trois façons : à l'aide d'une connexion directe à un périphérique GPS mobile, via un fichier GPS (par exemple, .gpx), ou bien comme dans notre cas, la méthode qui consiste à entrer manuellement des données comprenant des longitudes, des latitudes et des points cardinaux, afin que Google Earth puisse trouver une adresse précise. Après avoir inséré les coordonnées des 22 sites relevées par le GPS, nous avons obtenu la carte ci-dessous :

II.9.4 Cartographie

La cartographie a pour but la représentation de la Terre ou d'une autre planète sous une forme géométrique et graphique grâce à la conception, la préparation et la réalisation de cartes. La cartographie est à la fois une science, un art et une technique. La définition de la cartographie suppose que la représentation de la Terre s'accomplit grâce à un ensemble de techniques et de méthodes (Poidevin, 2014).

II.10 Le système d'information géographique

II.10.1. Définition et fonctions d'un SIG

Un SIG est un outil informatisé capable de créer, transformer, afficher, analyser et stocker de l'information géographique. Il permet d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, en vue notamment de produire des plans et cartes (Christine, 2012). Un SIG est un système d'information qui permet de faire la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage des données géo-référencées puis les traduire sous forme de plans et de cartes qu'on peut interroger et modifier à partir d'une carte d'état-major, d'une photo aérienne, d'une photo satellite. Un SIG organise les informations géographiques sous forme de thèmes (appelés aussi couches, calques, plans,...). Chaque thème représente un ensemble de données similaires (Provost, 2011).

Un SIG a pour but d'informer sur la géographie d'un espace donné ;

- Il s'appuie donc sur un certain nombre de bases de données géographiées permettant d'intégrer, de gérer, de traiter et de représenter sous forme de cartes ;
- Plusieurs définitions des SIG existent mais toutes incluent l'ensemble de ces différentes fonctions.

Dans le cadre de ce travail, un Système d'Information Géographique (SIG) a été élaboré pour une synthèse actualisée de l'ensemble des données portant sur les différentes sources recensées. Il permet de constituer une base de données géo-référencée permettant une recherche rapide et précise

II.10.2. Composantes d'un SIG

Le cœur d'un Système d'Information Géographique est constitué par la base de données géographique (BDG), composée de deux éléments (Collet, 1992).

- Une base de données décrivant les objets spatiaux (cartes) ;
- Une base de données alphanumérique (attributs) définissant les caractéristiques thématiques (profondeur de l'eau, cote du substratum, productivité...) des objets spatiaux.

Autour de cette base de données gravite un ensemble de systèmes informatiques avec lesquels elle est en interaction. Chaque système a une fonction précise au sein du SIG (Didon, 1990).

Les logiciels de SIG sont relativement nombreux (Arc Info, Arc View, MapInfo, Idrisi, Synergis..). Le logiciel MapInfo a été choisi en raison de sa relative facilité d'utilisation et pour le fait qu'il soit opérationnel sur des ordinateurs du type PC

II.11 Présentation du logiciel de cartographie « MapInfo »

II.11.1 Définition et utilité de MapInfo

MapInfo est un logiciel permettant d'exploiter un SIG. Un logiciel SIG permet l'acquisition, le stockage, la mise à jour, la manipulation, et le traitement de données géographiques. De plus, il permet de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise en fonction de l'échelle désirée.

Le principe directeur d'un SIG est le suivant : nous avons d'un coté les données géométriques et de l'autre les données attributaires. Ces données sont stockées sous format numérique et organisées par couches (appelées « Tables » dans MapInfo) (Guerreiro, 2009).

- **Etapas à suivre**

Pour l'utilisation du « SIG » dans cette recherche nous avons suivies les étapes ci-dessous :

- **Calage de l'image raster**

Cette étape consiste à ouvrir l'image raster de la zone d'activité dans le logiciel MapInfo et lui introduire les coordonnées (x, y) afin de la géo-référencier et faire les calculs désirés. Le calage doit se faire selon un système de projection précis. Pour notre travail nous avons utilisé le système suivant :

- Catégorie : longitude / latitude
- Projection: longitude / latitude (WGS 84)
- Echelle : 1/200.000

Ainsi que les coordonnées des 4 points que nous avons comme données pour réaliser le calage.

II.12. Méthode d'analyse

Les mesures ont été effectuées sur des prélèvements au cours de la période allant des mois Février à Mai 2017. Les sites où ont eu lieu des prélèvements d'eau sont au nombre de 22 et sont situés dans les zones de Melbou ; Souk El Tenine ; Tamridjet Derguina et Taskriout

A chaque prélèvement, la température, la salinité, la conductivité électrique, le pH et TDS ont été mesurés in situ.

Les paramètres physiques ont été mesurés par un multi paramètre à terrain

Pour chaque paramètre, il consiste à tromper la sonde dans le flacon de l'échantillon, attendre la stabilisation de l'affichage

II.12.1 les informations à préciser au moment de L'analyse

Les détails suivants sont précisés à chaque prélèvement :

- La date et heure du prélèvement ;
- Le nom du site, du lieu ou de la région ;
- Le nom de la source si disponible ;
- Mesure du débit d'écoulement de l'eau par minute ;
- Les coordonnées GPS (La latitude, la longitude et l'altitude) ;
- Les cinq paramètres physiques de l'eau à mesurer (Température, pH, CE, TDS et Salinité).

II.12.2 Matériels utilisés

Le matériel suivant a été nécessaire pour la réalisation du travail :

- Un moyen de transport personnel ;
- Un GPS ;
- Un multi-paramètre de terrain ;
- Un flacon ;
- Un chronomètre ;
- Un récipient calibré ;
- Un appareil photo

Dans notre cas nous avons utilisé un GPS (Garmin) qui nous a permis d'avoir les coordonnées de localisation des sources.

Les paramètres physiques, quant à eux, ont été mesurés sur le terrain, à l'aide d'un multi-paramètres de type Extech Instrument EC510.



Figure 14 - Matériels utilisés sur le terrain

II.12.3 Difficultés rencontrées et solutions mises en œuvre

Vu la complexité du travail de terrain et l'étendu de l'espace fixé pour la réalisation de l'inventaire des sources d'eaux, ainsi que la situation géographique complexe de la totalité de la zone d'étude, nous avons fait face à beaucoup de difficultés et d'obstacles afin de pouvoir accomplir ce travail et le mener à bout.

En effet, afin de nous rendre aux sites de prélèvement, non seulement le problème du déplacement est posé, mais aussi les dangers encourus à cause de l'isolation de ces sites.

Parmi les difficultés rencontrées, nous citons :

- Il faut être véhiculé et accompagné pour se déplacer;
- Avoir un papier administratif pour accéder à certains endroits ou à quelques informations.
- L'immensité de la zone de prospection qui nécessite une longue durée afin de pouvoir réaliser le travail ;

Malgré toutes les difficultés rencontrées, la collecte des données s'est déroulée de manière satisfaisante. Nous avons pu mener à bien notre travail et accomplir nos objectifs fixés au départ.

II.12.4. Mesure des débits par méthode volumétrique

La méthode volumétrique permet une réelle mesure du débit. Elle consiste à mesurer le temps de remplissage par l'écoulement de la source d'un volume donné, et d'en déduire le débit selon l'équation ci-dessous. Le matériel requis est simple : un récipient calibré, et un chronomètre. Cette méthode est simple, rapide et peu coûteuse. Vu le matériel utilisé, elle n'est applicable que pour les faibles débits ou les rivières de petites sections (Hauet, 2009).

$$Q = V/t \qquad \text{Eq 05}$$

Où :

- **Q**: Débit, exprimé en l/s;
- **V**: Volume (l) ;
- **t**: Temps (s).

II.13. Corrélation entre les paramètres physiques

Cet exercice consiste à évaluer le caractère répétitif d'une série temporelle. Pour ce faire, une opération consiste à comparer cette série avec elle-même en la décalant progressivement. Le degré de ressemblance est déterminé au moyen de la fonction d'autocorrélation définie comme la valeur de la corrélation linéaire entre les valeurs des deux séries. Le coefficient de corrélation pour chaque décalage est reporté dans un corrélogramme. L'allure du corrélogramme renseigne sur la structure de la série temporelle. Ainsi, une chronique présentant un caractère aléatoire sera représenté par un corrélogramme plat, pour lequel la fonction d'autocorrélation ne montre aucun caractère cyclique, mais oscille autour de zéro de manière aléatoire.

Chapitre III

*Résultats et
Discussions*

III Résultats et Discussion

III.1 Elaboration de la carte de situation des différentes sources karstiques

Les données géographiques sont importées dans l'outil SIG MapInfo à partir de la carte établie à l'aide du logiciel Google Earth, qui va servir d'image Raster afin d'obtenir les coordonnées (X, Y) de chaque site. Puis vient la superposition des informations (image Raster – carte topographique). MapInfo procédera au croisement des données pour enfin obtenir la carte de géolocalisation des 22 sources (Fig.15).

Les sites des prélèvements sont représentés dans la carte avec des points bleus. Ces derniers portent le nom de chacune des sources.

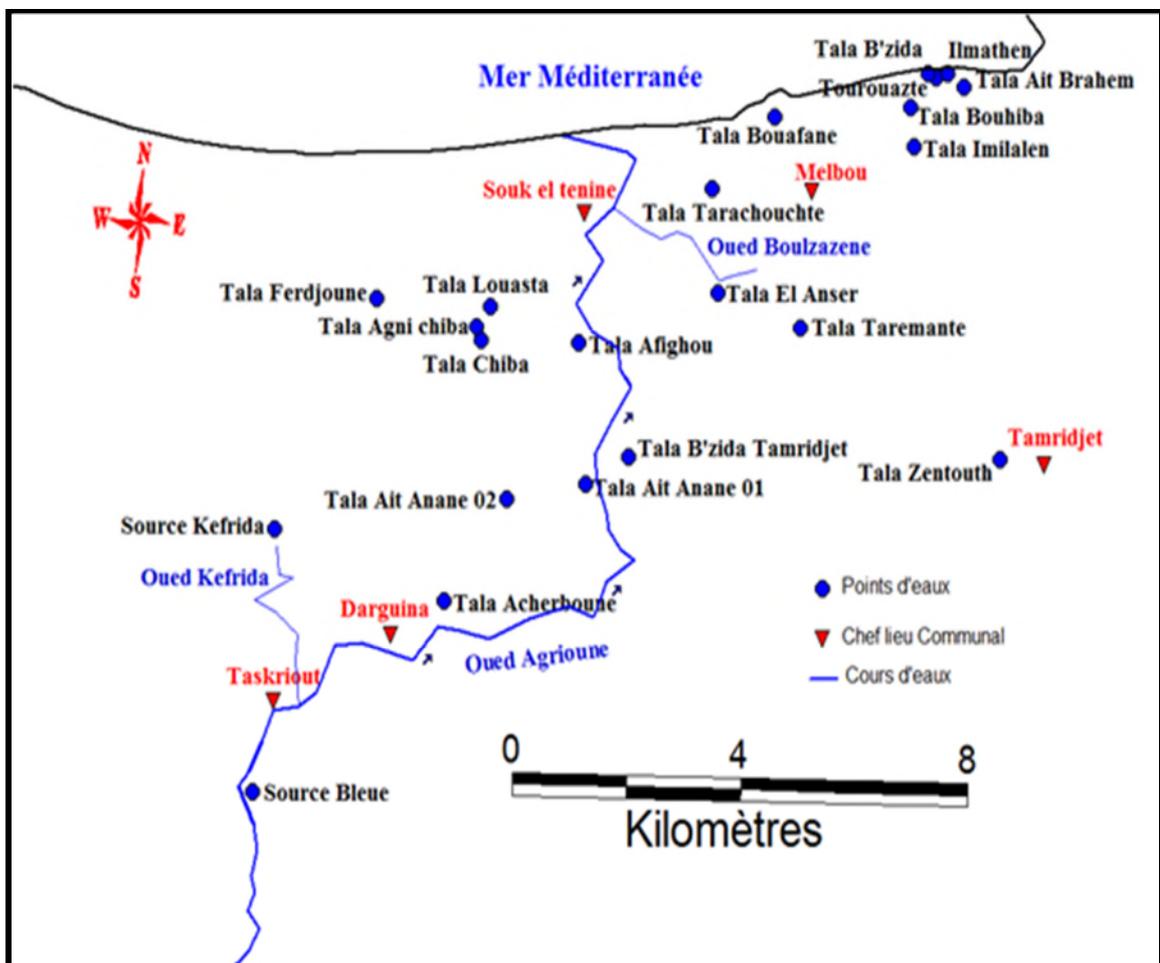


Figure 15 - Localisation des points d'eaux (sources).

III.2. Interprétations des résultats d'analyse

Les résultats obtenus lors des prélèvements sont présentés dans le tableau VI ci-dessous. Celui-ci comporte également une statistique descriptive des résultats.

Tableau VI - Résultats d'analyse des eaux de sources et calcul des statistiques descriptives

Lieux	N	Noms des sources	Date du prélèvement	X* (°)	Y* (°)	Z** (m)	T°C	PH	CE (µs/cm)	Salinité (mg/l)	TDS (mg/l)	
Melbou	01	Source Bouhiba	25/05/2017	E005°24'.373"	N36° 34'.460"	219	17,60	8,08	685	341	408	
	02	Source B'zida(Sahel)	25/05/2017	E005° 24'.599"	N36° 38'.906"	103	18	7,32	950	473	570	
	03	Source Ilmathen	25/05/2017	E005° 24'.688"	N36° 38'.757"	214	16,70	7,76	710	354	438	
	04	Source Tourouazete	25/05/2017	E005° 24'.814"	N36° 38'.924"	08	17,60	8,20	875	444	540	
	05	Source Bouafane	24/05/2017	E005° 22'.617"	N36° 38'.393"	211	19,40	7,80	1010	480	595	
	06	Source Tarachoucht	12/03/2017	E005° 21'.832"	N36° 37'.669"	134	16,70	6,64	746	361	442	
	07	Source Ait Brahem	15/04/2017	E005° 25'.015"	N36° 38'.633"	124	16,80	8,50	495	243	295	
	08	Source Imilalen	15/04/2017	E005° 24' 302"	N36° 37'. 969"	470	15,50	7,20	464	243	291	
	09	Source El Anser	15/04/2017	E005° 21'.881"	N36° 36'.571"	265	17,50	7,90	265	220	275	
Tamridjet	10	Source Taremate	17/04/2017	E005° 22'. 864"	N36° 36'. 282"	74	18 ,00	7,66	430	220	256	
	11	Source B'zida	14/03/2017	E005° 20'.845"	N36° 35'.105"	230	17,00	6,39	460	226	273	
	12	Source Zentouth	14/03/2017	E005° 25'.071"	N36° 35'.063"	240	14,70	5,46	449	256	320	
Souk El	13	Source Afighou	17/04/2017	E005° 20'.204"	N36° 36'.119"	212	17,6	7,18	390	320	390	
	14	Source Louasta	19/04/2017	E005° 19'.156"	N36° 36'.400"	281	17,50	7,12	630	390	370	
Tenine	15	Source Chiba	19/04/2017	E005° 19'.059"	N36° 36'.181"	430	17,00	7,59	510	248	300	
	16	Source Agni chiba	19/04/2017	E005° 19'.107"	N36° 36'.045"	476	16,50	7,59	400	165	240	
	17	Source Ferdjoune	19/04/2017	E005° 17'.957"	N36° 36'.234"	355	16,10	7,99	344	164	207	
	18	Source Kefrida	07/03/2017	E05° 16'.101"	N36° 34'.388"	737	17,05	7,22	469	231	280	
Dégraina	19	Source Bleue	07/03/2017	E05° 16'.945"	N36° 32'.455"	166	16,30	7,59	784	400	484	
	20	Source Ait Anane 01	17/04/2017	E005° 20'.390"	N36° 34'.920"	92	17,60	7,18	390	320	390	
	21	Source Ait Anane 02	17/04/2017	E005° 19'.507"	N36° 33'.979"	135	23,00	7,10	1055	516	615	
	22	Source Acherboune	22/04/2017	E005° 18'.827"	N36° 33'.941"	2	18,30	7,14	819	405	480	
							Maximum	23,00	8,50	1176	516	615
							Minimum	14,70	5,46	265	164	207
							Moyenne	17,38	7,39	605,90	321,13	384,5
							Ecart-type	1,55	0,64	226,42	106,70	119,53
							CV	0,08	0,08	0,73	0,33	0,31

*X et Y: longitude et latitude en degrés-minutes-secondes, **Z : altitude en mètres

III.2.1 Discussion des résultats des paramètres physiques

III.2.1.1 Température

La température des eaux des sources analysées varie entre 14,70°C et 23,00°C. La moyenne est de 17,38°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 1,55 et 0,08 respectivement. Ces deux valeurs sont inférieures à la moyenne. La dispersion des valeurs de températures autour de la moyenne est très faible.

En rapport avec les normes de potabilité de l'eau fixées par l'OMS (2003), l'eau est : excellente lorsque la température varie entre 20 et 22°C ; passable lorsque la température oscille entre 22 à 25°C ; médiocre lorsqu'elle est comprise entre 25 et 30°C. Les températures mesurées dans les 22 sources sont jugées excellentes, sauf celle d'Ait Anane 02 qui est jugée passable (23°C). Comparées aux normes algériennes du JORA (2011) fixant les températures des eaux souterraines qui ne doivent pas dépasser 25°C, nos résultats sont également conformes.

III.2.1.2 Potentiel d'hydrogène

Le potentiel d'hydrogène des eaux des sources analysées oscillent entre 5,46 et 8,50. La moyenne est de 7,39. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0,64 et 0,08, respectivement. Ces deux valeurs sont en dessous de la moyenne. La dispersion des valeurs du pH autour de la moyenne est très faible.

Selon le JORA (2011) et l'OMS (2003) les normes édictées par la réglementation locale et international en matière de potabilité de l'eau recommandent un pH situé entre 6,5 et 8,5 et les textes réglementaires locaux exigent que ce paramètre, dans le cas des eaux souterraines, ait la valeur suivante: pH : 6,5 à 9. Selon FEPS (2008) le pH d'une source peut varier naturellement.

Certains types de roches et de sols, comme le calcaire, peuvent neutraliser l'acide plus efficacement que d'autres types de roches et sols, comme le granite.

D'après Rodier *et al.*, (2009), le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. D'une façon générale, les eaux très calcaires ont un PH élevé et celles provenant des terrains pauvres en calcaires ou siliceux ont un PH voisin de 7 et quelques fois légèrement inférieur (≈ 6).

III.2.1.3 La conductivité électrique

La conductivité électrique des eaux des sources analysées est comprise entre 265 et 1055 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La moyenne est de 605.90 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'écart type et le coefficient de variation sont de 226.42 et 0.37 respectivement. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. La dispersion des valeurs de la conductivité électrique, autour de la moyenne, est très faible. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées sont tous proches de la moyenne.

La conductivité est liée aux degrés de minéralisation, si elle est entre 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la minéralisation est importante (Rodier *et al.*, 2009).

- Conductivité < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$: minéralisation très faible ;
- 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$: minéralisation faible ;
- 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$: minéralisation moyenne ;
- 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$: minéralisation moyenne accentuée ;
- 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$: minéralisation importante ;
- Conductivité < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$: minéralisation élevée.

L'OMS indique pour la conductivité un niveau guide de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C pour les eaux destinées à la consommation humaine

Selon les textes réglementaires locaux qui exigent que les valeurs de ce paramètre dans le cas des eaux souterraines soit $\leq 2800 \mu\text{S}/\text{cm}$. En rapport avec ce dernier la conductivité électrique des eaux de différentes sources analysées sont dans les normes.

III.2.1.4 Salinité

La salinité des eaux des sources analysées varie entre 164 et 516 mg/l. La moyenne est de 321,13 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 106,70 et 0,33. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. Les valeurs de salinité mesurées pour les sources analysées sont tous proches de la moyenne et conformes aux normes.

III.2.1.5 Total des solides dissous

Le total des solides dissous des eaux des sources analysées est compris entre 207 et 615 mg/l. La moyenne est de 401,5 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 119,53 et 0.31 respectivement. Ces deux valeurs sont petites par rapport à la moyenne. La dispersion des valeurs totales des solides dissous est faible autour de la moyenne. Les valeurs du TDS mesurées oscillent autour de la moyenne.

Dans une étude réalisée par l'OMS (2003), un jury de dégustateurs sont arrivés à la conclusion sur la quantité du TDS préférable dans l'eau :

- Moins de 300 mg/l : excellente ;
- 300-600 mg/l : bien ;
- 600-900 mg/l : passable ;
- 900-1200 mg/l: faible ;
- Plus de 1200 mg/l : inacceptable ;

D'après les normes données par la grille des classes de qualité de l'eau, les mesures de TDS de l'ensemble des sources sont classées dans le tableau VII.

Tableau VII- Description de la qualité des eaux des sources analysées (TDS comparée aux normes de l'OMS (2003))

Noms des sources	Les normes (mg/l)	Qualité de l'eau
Ait Brahem-Imilalen-El Anser-Taremante-B'zida(Tamridjet)-Agni chiba-Fardjoune-Kefrida	< 300	excellente
Tarachoucht-Zentouth-Afighou-Louasta-Chiba-Source Bleue-Ait Anane 01-Acherboune-Bouhiba-B'zida(sahel)-Ilmathen-Tourouazte-Bouafane	300-600	bien
Source Ait Anane 02	600-900	passable

III.2.2 Corrélation entre les paramètres physiques

III.2.2.1 Températures et Potentiel d'hydrogène

La représentation graphique du T°C vs pH (Fig.16) montre un nuage de points dispersé. Le coefficient de détermination R^2 est faible ($R^2= 0,028$). Il n'y a pas une bonne relation entre ces deux éléments. La variation de la température n'influe pas sur les variations du pH. Les points sont répartis autour de la droite d'ajustement et ils sont très dispersés. Ce qui explique la mauvaise corrélation.

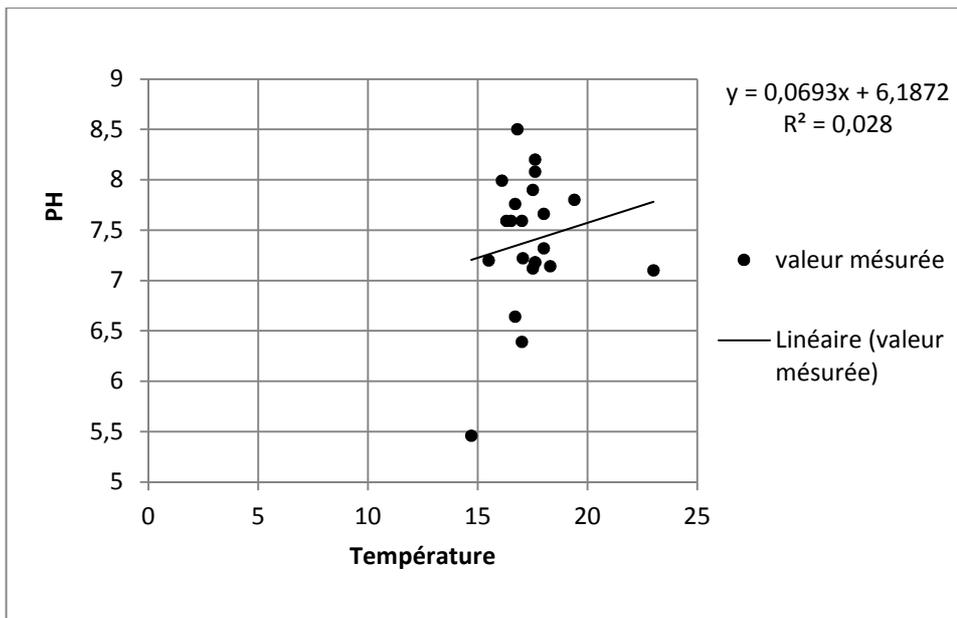


Figure 16- Représentation graphique T° C vs pH.

III.2.2.2 Température et Total des solides dissous

La représentation graphique de T°C vs TDS (Fig17) montre un nuage de points très dispersé autour de la droite avec aucune forme particulière. Le coefficient de détermination R^2 est très faible ($R^2 = 0.026$). Ce qui explique l'absence de relation entre ces deux éléments. Les variations de la température n'influent pas sur le total des solides dissous.

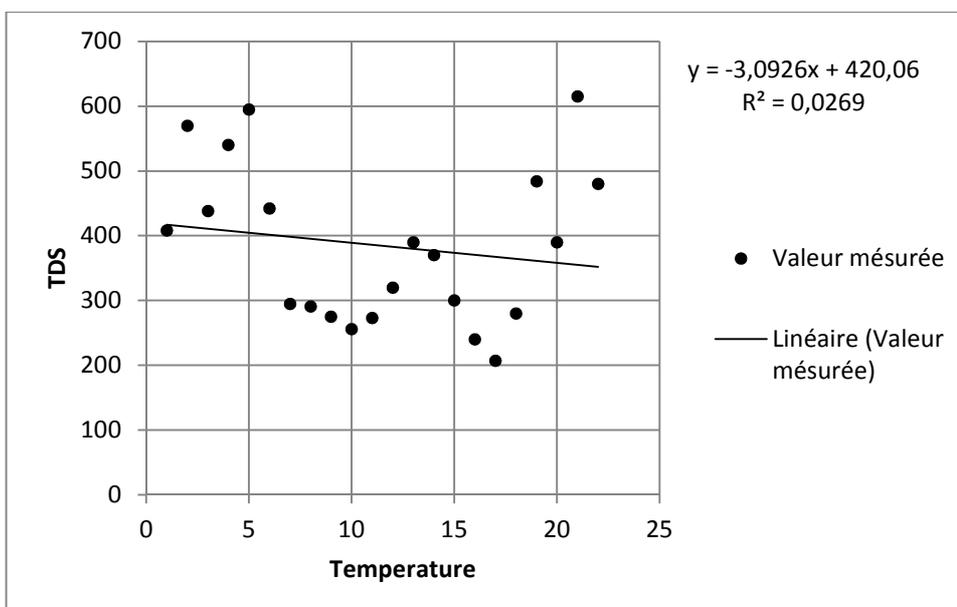


Figure 17 - Représentation graphique T°C vs TDS.

III.2.2.3 Salinité et Total des solides dissous

La représentation graphique (fig.18) nous montre que plus la salinité augmente, plus le TDS augmente et le coefficient de détermination R^2 est très proche de 1 ($R^2 = 0.96$). La variation de la salinité influe sur les variations du TDS, les points sont répartis autour de la droite de régression. Ils ne sont pas dispersés. Ce qui explique une bonne relation.

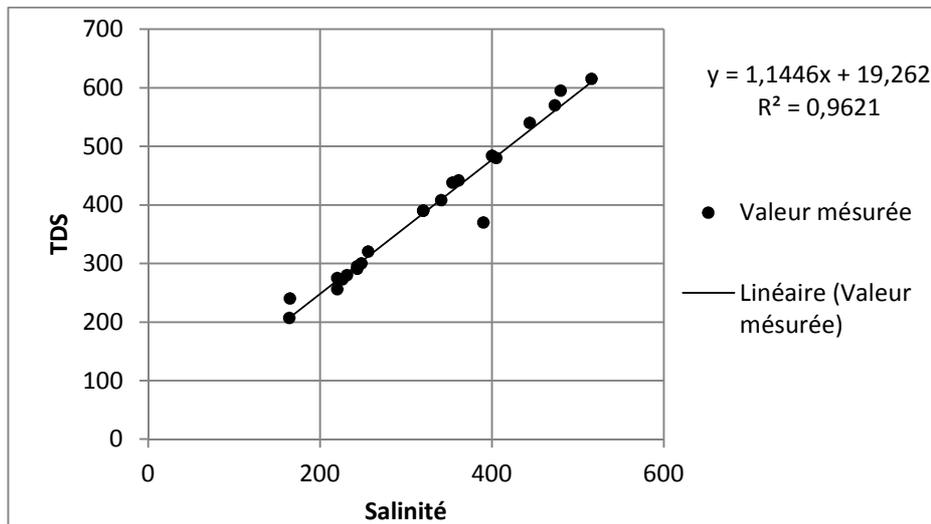


Figure 18 - Représentation graphique salinité vs TDS

III.2.2.4 Conductivité électrique et Total des solides dissous

Le graphe de CE en fonction du TDS (Fig. 19) montre que plus la CE augmente plus le TDS augmente. Le coefficient de détermination R^2 est très élevé ($R^2 = 0.86$). Il y'a une bonne relation entre ces deux éléments. La variation de CE influe sur les variations du TDS. Les points sont bien répartis autour de la droite

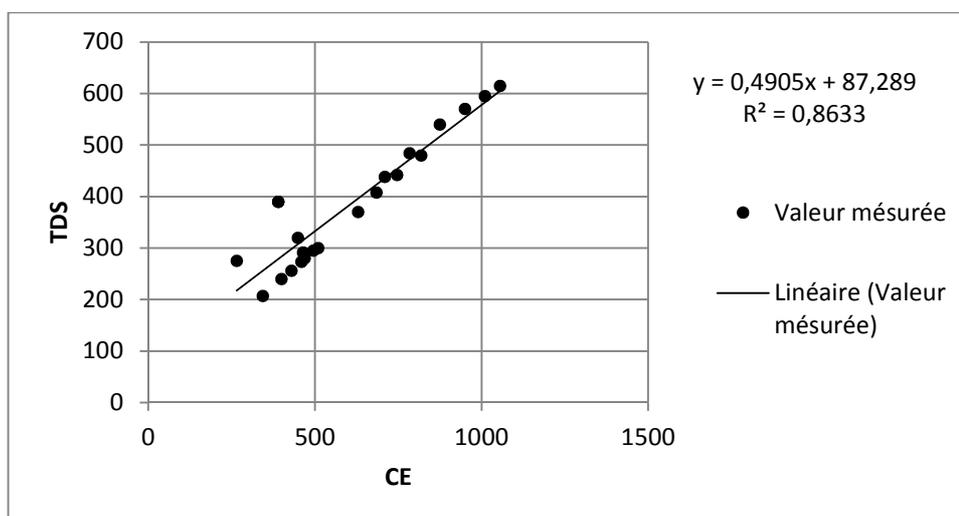


Figure 19 - Représentation graphique CE vs TDS.

III.2.2.5 Potentiel d'hydrogène et Conductivité électrique

La corrélation graphique de pH vs CE (Fig. 20) montre que les points sont dispersés autour de la droite de régression et le coefficient de détermination R^2 est très faible ($R^2 = 0,0047$). Ce qui explique une absence totale de corrélation entre PH vs CE. Les variations de pH n'influent pas sur les variations de la conductivité électrique. Aucune relation n'existe entre ces deux paramètres.

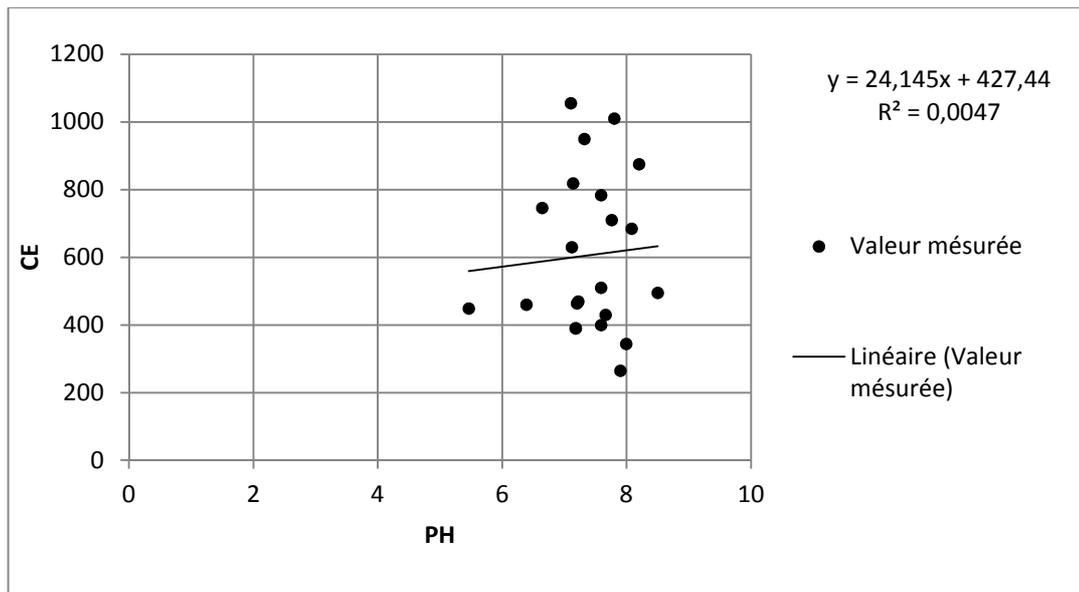


Figure 20 - Représentation graphique pH vs CE

III.3 Interprétation des résultats des débits

D'après le tableau VIII, Les valeurs obtenues lors des mesures de débit varient entre 0.01 l/s et 0.31 l/s. La moyenne est de 0.12. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.06 et 0.54 respectivement. la valeur du CV est forte par rapport à la moyenne, La dispersion des valeurs du débit, autour de la moyenne, est très forte. Ce qui dénote la variabilité des débits selon l'emplacement des sources.

Tableau VIII - Mesure des débits de quelques sources et calcul des valeurs caractéristiques.

Nom des sources	Débit des sources En l/s
Source Bouhiba	0,10
Source B'zida(Sahel)	0,05
Source Ilmathen	0,14
Source Tourouazete	0,11
Source Bouafane	0,01
Source Tarachoucht	0,10
Source Ait Brahem	0,10
Source Imilalen	0,16
Source El Anser	0,25
Source Taremante	0,11
Source B'zida	0,13
Source Zentouth	0,31
Source Afighou	0,14
Source Louasta	0,09
Source Chiba	0,08
Source Agni chiba	0,13
Source Ferdjoune	0,08
Source Ait Anane 01	0,07
Source Ait Anane 02	0,15
Source Acherboune	0,07
Maximum	0,31
Minimum	0,01
Moyenne	0,12
Ecart-Type	0,06
CV	0,54

Selon les résultats obtenus par la mesure de débit, nous pouvons distinguer des sources importantes et d'autres moins importantes. Quelques exemples sont cités dans le tableau VX

Tableau VX - Classement de quelques sources selon leurs débits.

Exemples	Classes de débits	Caractéristiques
Source Louasta-Source Bouafane Source Ferdjoune-Source Chiba	< 0,1	Moins importantes (secs en été)
Source El Anser-Source Imilalen- Source Bouhiba-Source Ait Anane 02-Source Zentouth	> 0,1	Plus importante (courantes en été)

**Conclusion
générale et
Recommandation**

Conclusion

Conclusion

Les aquifères karstiques sont abondants dans le Bassin méditerranéen et particulièrement à Bejaia où les sources karstiques constituent une des principales ressources en eau souterraine. Dans notre inventaire des sources souterraines karstiques au Nord-est de la Wilaya de Bejaia nous avons pu dénombrer et localiser 22 sources souterraines au niveau de quatre zones différentes (Souk el tenine, Melbou, Tamridjet, Derguina). Nous avons procédé à la mesure des caractéristiques physiques de leurs eaux (température, potentiel d'hydrogène, conductivité électrique, total des solides dissous et salinité). Une carte de situation des sources karstiques a été élaborée en utilisant un système d'information géographique via le logiciel MapInfo.

L'interprétation des résultats d'analyses des cinq paramètres physiques des eaux de ces sources nous donne :

- La température des eaux des sources varie entre 14.17°C et 23.00°C. La moyenne est de 17.38°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 1.55 et 0.08, respectivement. Ces résultats sont conformes aux normes algériennes JORA (2011)

- Le potentiel d'hydrogène oscille entre 5.46 et 8.50. La moyenne est de 7.39°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.64 et 0.08, respectivement. Ces résultats sont conformes aux normes de l'OMS

- La conductivité électrique est comprise entre 265 et 1055 µS/cm. La moyenne est de 605.90 µS/cm. L'écart type et le coefficient de variation sont de 226.42 et 0.37 respectivement. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées sont toutes proches de la moyenne et conformes aux normes.

- La salinité varie entre 164 et 516 mg/l. La moyenne est de 321.31 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 106.70 et 0.33. Les valeurs de salinité mesurées pour les sources analysées sont toutes proches de la moyenne et conformes aux normes.

- Le total des solides dissous est compris entre 207 et 615 mg/l. La moyenne est de 401.5 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 119.53 et 0.31 respectivement. Les valeurs de TDS mesurées sont conformes aux normes.

En plus de ces cinq paramètres physiques, nous avons mesuré le débit des eaux de chaque source. Les résultats obtenus varient entre 0.01 l/s et 0.31 l/s. La moyenne est de 0.12 l/s, l'écart type et le coefficient de variation sont de 0.06 l/s et 0.54 l/s respectivement.

Conclusion

La corrélation établit entre les paramètres physiques mesurés montre une bonne liaison entre la salinité, la conductivité électrique et le TDS avec un R^2 de 0.86 et 0.96 respectivement. Pour les autres paramètres (T° /TDS, T° /pH, pH/CE), le coefficient de détermination est faible. Ce qui traduit la faible liaison entre eux.

Nos résultats nous ont permis de nous renseigner que les eaux de sources analysées à de bonnes caractéristiques physiques. Donc une bonne qualité de l'eau souterraine de cette région. Nous pouvons donc déduire que cette eau peut être consommée.

Plus aux analyses physiques, il serait intéressant de compléter ce travail par des analyses chimiques et bactériologiques afin d'avoir un aspect qualitatif plus complet.

Afin de pouvoir bénéficier durablement de cette richesse naturelle quelques recommandations que nous jugeons utiles sont mentionnées ici-bas :

Recommandations

Les ressources en eau souterraine des karsts méditerranéens présentent, par rapport aux autres ressources en eau, des particularités qui doivent être prises en compte afin de pouvoir bénéficier durablement de cette richesse naturelle pour cela nous recommandons :

- La réalisation de travaux pour leur bonne connaissance, leur bonne gestion et leur protection efficace ;
- Certains axes de recherche pourraient apporter un complément intéressant pour la compréhension du système : les mesures de la pluviométrie et des débits permettraient de mieux définir la relation pluie-débit, et donc l'installation d'un poste pluviométrique, dans un site adéquat prêt de ces sources, est indispensable ;
- Leur exploitation devrait nécessairement s'inscrire dans des plans d'aménagement concertés permettant la meilleure protection possible contre les pollutions et la surexploitation.

Références Bibliographiques

Références bibliographique

- ADAM, P., & Baptiste, P., (2003).** Hydrogéologie & forage d'eau. In Agua Segura y Ambiente Sano, Impulsadores del Progreso (pp. 1-16). AIDIS.
- Ali Abbou, S. (2014).** Caractéristique physico-chimiques des eaux embouteillées algérienne et vérification d'étiquetage. Mémoire master université Mohamed Boudiaf, Oran, 66p.
- ANDI, (2013).** Agence Nationale du Développement et de l'Investissement, Invest in Algeria, Wilaya de Bejaia, 28p.
- Anonyme (2007).** Protection du couloir KHERRATA Souk EL Tenine contre les crues de l'Oued Agrioun, Mission C : Etude hydrologique. Bureau d'ingénieurs conseils, 55p.
- Azegagh, H., Chaabna, K., (2015).** Géo localisation et mesure des paramètres physiques des sources Karstiques de la zone cotière Ouest de bejaia. Master, Université de Bejaia, 51p
- Bailly D., (2009).** Vers une modélisation des écoulements dans les massifs très fissurés de type karst : étude morphologique, hydraulique et changement d'échelle, Th DOCT, Université de Toulouse, Toulouse. p.189.
- Bakalowicz M.,(1979).** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie.) 257 p.
- Bakalowicz M., (1999).** Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée - Corse. Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, Lyon, 40 p.
- Bakalowicz M.,(2002).** Hydrogéologie karstique : Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active, Cours DEA H.H.G.G., Université Paris-6, France. p. 234.
- Bakalowicz M., (2008).** Le milieu karstique : études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource, Liban, Montpellier. p. 17.
- Bakalowicz M., (2010).** Karst et ressources en eau souterraine : un atout pour le développement des pays méditerranéens, Sécheresse vol. 21, n° 1e, Université Montpellier 2, Montpellier. p.10.
- Benhamiche. N., Maza M., (2013).** Rapport d'activité projet Oued Agrioun. p.08.

- Bensaoula, F., (2006).**Karstification, hydrogéologie et vulnérabilité des eaux karstiques. Mise au point d'outils pour leur protection (Application aux Monts de Tlemcen – Ouest Oranais), Université de Tlemcen, Tlemcen, 203p
- Bensaoula F., Adjim M., Bensalah M. (2007).**L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. LARHYSS Journal ISSN 1112-3680, (6).8p.
- Boeglin J.C., (2000).**Contrôle des eaux douces et de consommation humaine. Ed. Techniques de l'ingénieur.24 p
- Bouroubi M. Y., (2009).**Etude hydrogéologique du synclinal de la taoura : fonctionnement et évaluation des ressources en eaux souterraines. Thèse de magister, université Mentouri Constantine ,182p.
- Canada., (2000).**Introduction au GPSS et DGPS. p. 29.
- Chalikakis M., (2006).**Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques, Th DOCT, Université Paris 6, France. p. 223.
- Chapman, D.Kimstach V., (1996).**Selection of water quality variables.Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
- CharmoilleA., (2005).** Traçage hydrochimique des interactions hydrauliques et mécaniques entre les volumes perméables et peu perméables au sein des aquifères fractures carbonates Aquifère karstique de Fourbanne (Avant-pays jurassien, 25). Laboratoire naturel de Coaraze (Alpes M Eridionales, 06). Hydrologie. Université de Franche-Comt, 322p.
- Christine C., (2012).** SIG : définition. p. 08.
- Collectif, (2006).** Aquifères & eaux souterraines en France. Collection scientifique et technique, éditions BRGM, sous la direction de J.-C Roux, Tome 1: 479.
- Collet C., (1992).**Systemes d'information géographique en mode image. Presses polytechniques et universitaires romandes – Lausanne, 183p.
- Derwich E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O., &Belghity D., (2013).**Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès, pp. 101-112.
- Didon E., (1990).**Systemes d'information géographique : concepts, fonctions, applications. CEMAGREF / ENGREF, 44 pages.
- Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (DPAT), (2012).**

Contribution à l'étude Hydrogéologique de l'Oued Agrioun Annuaire Statistiques de la Willaya de Bejaia, 203p.

Djilali C., (2012). Effets de l'extraction des granulats sur la nappe Alluviale d'Oued El-Harrach (Mitidja amont)-Wilaya de Blida (Doctoral dissertation, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef), 157p.

Dörfliger N., Pinault JL., Petit V., Jauffret D., avec la collaboration de Ladouche B., Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire(DPAT). (2012)., Contribution a l'étude Hydrogéologique de la Vallée de l'Oued Sahel-Soummam. Annuaire Statistiques de le Willaya de Bejaia. p. 203.

(FEPS) Fondation de l'Eau Potable Sûr (2008). Le Bulletin FEPS de Nouvelles pour les jeunes- volume 1, Numéro 8. p. 06.

FEPS (Fondation de l'Eau Potable Sure). (2014). TDS et pH.6p.

Fleury P., (2005). Sources sous-marines et aquiferes karstiques côtiers mediterraneens. Fonctionnement et caracterisation. environmental sciences. Universit_e Pierre et Marie Curie - Paris VI, 288p.

Fournillon A., (2012). Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (Var et Bouches-du-Rhône, SE France), Th DOCT, Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement, Marseille. p. 426.

Ford D.C., Williams P., (1989).Karst geomorphology and hydrology.London UnwinHyman 1989.

Gherieb, A., (2011).L'acquisition de la salinité des eaux souterraines en zone semi-aride. Cas de la nappe du bassin d'effondrement de Tébessa dans le Nord Est algérienMémoire de master Univ. De Tébessa, 87p.

Goldsheider, N., (2002).Hydrogeology and vulnerability of karst systems-Examples from the Northern Alps and Swabian Alb. Thesis of the universty of Karlsruhe; 236p.

Guerreiro., (2009).Fiche d'aide à MapInfo version 6 à 8.p. 42.

Hauet, A., (2009). Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-ScaleParticle Image Velocimetry. La Houille Blanche, (1), p80-85.

Jeannin, P.Y., (1996).Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, 298 p.

Jenkins, G.M. et Watts D.G.,(1968).Spectral analysis and its applications.Ed. Holden Day, San Francisco, CA 525 p.

- Journal Officiel de la République Algérienne (JORA), (2011).** Décret exécutif n° 11-219, fixant les objectifs de qualité des eaux superficielle et souterraine destinées à l'alimentation en eau des populations. p. 23.
- Kiraly, L., (1969).**Statistical Analysis of fractures.Orientation density.Geol. Rundschau, 59:125-151.
- Leynaud, G., (1968).**Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique. B.T.I. Ministere de l'agriculture, 224-881.
- Mangin, A., (1975).** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Annales de spéléologie: 283-329.
- Marsaud, B., (1996).** Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats Expérimentaux. ; Document BRGM Thesis, Paris XI Orsay, 303 pp, (1996).
- Meybeck, M., Friedrich G., Thomas R., Chapman D., (1996).** Rivers Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
- Mijatovic, B.F., (1961).**Importance des recherches hydrogéologiques complexes des sources littorales et sousmarines dans le karst littoral. In: AIH Publ., Réunion de Rome. Consiglio Nazionale de Ricerche d'Italia et CNRS, Rome, IV: 76-79.
- Montavont, J., & Noel, T., (2006).**IEEE 802.11 handovers assisted by GPS information.In Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006.(WiMob'2006), International Conference on (pp. 166-172).
- OFEFP (2004).**Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 24P.
- OMS (Organisation Mondiale de la Sante) (2003).** L'eau pour les Hommes, l'eau pour la vie, Paris, Unesco-Wwap
- OMS (Organisation Mondiale de la Sante) (2004).**Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations, 3rd Ed., World Health Organization, Geneva 564p.
- ORGM (Office National de Recherche Géologiques et Minière) (1999).** Livret des substances utiles non métalliques de l'Algérie, édition du service géologique de l'Algérie. Boumèrdés. P. 5, 6.
- P. Seltzer, A. Lasserre, A. Grandjean, R. Auberty, (1946).** Le climat de l'Algérie. (Travaux de l'Institut de météorologie et de physique du globe de l'Algérie). Alger : Imprimerie « La Typo-litho » & J. Carbonel, 1946. 1 vol. (XXIII-219 p.) : ill. en noir, cartes, tabl. ; 32 cm + 1 carte pluviométrique de l'Algérie.
- Palmer, A.N., (2003).**Dynamics of cave development by allogenicwater.Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1(1): 11.

- Perrin, J., (2003).**A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers.PhD Thesis, University of Neuchâtel, Lausanne, 187 pp.
- Plagne, V., (1997).**Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par lagéochimie des eaux. Thèse, Université de Montpellier II, Montpellier, 372 p.
- Poidevin, D., (2014).** Manuel de Cartographie. Extrait de son ouvrage « la carte : moyen d'action » aux éditions Ellipses. p. 96.
- Provost, F. (2011),** Système d'Information Géographique (SIG): définition et principes de base. In : Compte-Rendu thématique «SIG». Séminaire de Rentrée – 6 Septembre 2011 L'embarcadère – Plélan le Petit. Marc Fraval. p. 13.
- Rejsek, F., (2002).**Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques. Série sciences et techniques de l'environnement. ISBN 2-86617-42-8. Bordeaux. Serveur web :crdp.ac-bordeaux.fr.
- Reilly, T.E., Goodman, A.S., (1985).**Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems - A historical perspective.Journal of Hydrology, 80: 125-160.
- Rodier, J., Legube,B., Merlet, N., et coll., (2009).** L'Analyse de l'eau. DUNOD. 9ème édition. Paris. p. 1579.
- Smart, P.L. and Friedrich, H., (1986).**Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonated aquifer. In: N.W.W. Association (Editor), Conference on Environnement problems of karst terranes and their solutions, Mendip Hills, England, pp. 59-87.
- Station Office National Météorologique de Bejaia. (2016).** La répartition des précipitations moyennes mensuelles en mm période 1978-2016. p.3.
- WHO (World Health Organization)(1987).**Global pollution and health results of related environmental monitoring.Global Environment Monitoring system, WHO, UNEP, 28p.
- Yevjevich , V., (1972).** Stochastic processes in hydrology. Water Resources PublicationsFort Collins, Colorado, 276 p.

Résumé

Les aquifères karstiques sont pour beaucoup de pays méditerranéens, dont l'Algérie en général et la région de Bejaia en particulier, une ressource en eau souterraine essentielle voire principale. Leurs caractéristiques sont déterminées par un climat particulier et surtout une histoire géologique récente marquée par la crise messénienne de salinité. Ce travail se veut comme objectif l'inventaire, la cartographie et la connaissance des caractéristiques physiques des eaux de quelques sources karstiques situées au Nord-est de Bejaia (Souk El Tenine, Melbou, Tamridjet, Derguina, Taskriout). Une évaluation des paramètres physiques (pH, CE, salinité, les TDS) des eaux ainsi qu'une mesure des débits ont été réalisés durant la période allant du mois de Février à Mai sur 22 sources. Les moyennes des paramètres mesurés sont de 17.4 C° pour la température, 7.4 pour le pH, 605,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité électrique, 321.3 mg/l pour la salinité et 401.5 mg/l pour le TDS. Les débits des sources varient entre 0.01 et 0.31 l/s. Les résultats des paramètres physiques obtenus sont conformes aux normes de l'OMS. Ce qui dénote une bonne qualité physique des eaux souterraines de cette région.

Mots clés : Eaux souterraines, karst, localisation, cartographie, caractéristiques physiques de l'eau, Nord-est Bejaia, Algérie

Abstract

Karstic aquifers are for many Mediterranean countries, including Algeria in general and the region of Bejaia in particular, an essential groundwater resource, even a main one. Their characteristics are determined by a particular climate and especially a recent geological history marked by the Messinian crisis of salinity. This work aims at the inventory, mapping and knowledge of the physical characteristics of the waters of some karstic sources located in the northeast of Bejaia (Souk el tenine, Melbou, Tamridjet, Derguina, Taskriout). An assessment of the physical parameters (pH, EC, salinity, TDS) of the waters and a flow measurement were carried out during the period from February to May on 22 sources. Means of the measured parameters are 17.4 ° C for temperature, 7.4 for pH, 605.9 $\mu\text{S} / \text{cm}$ for electrical conductivity, 321.3 mg / l for salinity and 401.5 mg / l for TDS. Average flows from sources vary between 0.01 and 0.31. The results of the physical parameters obtained are in accordance with WHO standards. This indicates a good physical quality of groundwater in this region.

Keywords: Groundwater, Karst, localization, mapping, physical characteristics of water, Northeast Bejaia, Algeria