

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences biologiques de l'environnement
Filière : Sciences de l'Environnement
Option : Sciences Naturelles de l'Environnement



Réf :

Mémoire de fin de cycle
En vue de l'obtention du diplôme
Master

Thème

**Contribution à l'étude des qualités physiques
des sources karstiques de la région Nord-Ouest
de Bejaia**

Soutenu le 12 juin 2016

Présenté par :

- BELLIL Meriem
- BENHAMANA Zara

Devant le jury composé de :

Mr. KHEMOUDJ K.	MCA	Président
Mr. BENHAMICHE N.	MCB	Encadreur
Mr. LAISSAOUI M.	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2015/2016

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

*Nous tenons particulièrement à remercier notre promoteur, **Mr. BENHAMICHE**, pour avoir accepté la charge d'être rapporteur de ce mémoire, on le remercie pour sa disponibilité, ses pertinents conseils et pour les efforts qu'il a consenti durant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury **Mr. LAISSAOUI M.** et **Mr. KHEMOUDJ K.** qui nous ont honoré par leurs présence, et d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*On voudrait également remercier **Mr. SAOU**, pour son aide, sa disponibilité, son soutien sans faille et sa sympathie.*

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon père qui ma encourager durant mes études, et son affection qui ma amener à finir mon projet.

A ma mère pour ses sacrifices en témoignage de tout mon affection au long de mes études.

A mes chers frères Saïd et Mehdi.

A ma collègue BENHAMANA pour sa contribution à ce travail et sa patience durant cette période.

A tous les amis(es) de ma promotion (2016)
et tous ceux qui mon aidé.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon cher et regretté père qui m'a toujours encouragé durant mes études.

A ma mère pour ses sacrifices et son affection qui ma amener à finir mon projet.

A mon cher époux Sid Ali, qui a su me réconforter, me redonner du courage et m'épauler lors des moments difficiles.

A mes chers frères Farid, Sofiane et Hamza et mes sœurs Hadjer et Lamia, ainsi que leurs familles respectives.

A ma collègue BELLIL pour sa contribution à ce travail et sa patience durant cette période.

A tous les amis(es) de ma promotion (2016)

et tous ceux qui mon aidé.

Liste des tableaux

Tableau I. Les précipitations moyennes mensuelles en mm période (1978-2014)	20
Tableau II. Températures moyennes mensuelles pour la région de Bejaia (1978 - 2014)	20
Tableau III. Répartition et évolution de la population au niveau des plus grands bassins de la Wilaya de Bejaia	22
Tableau IV. Disponibilité des ressources hydrauliques au niveau de la Wilaya de Bejaia	23
Tableau V. Mobilisation et l'exploitation des ressources hydrauliques au niveau de la Wilaya de Bejaia	23
Tableau VI. Goût de l'eau avec les différentes concentrations de TDS.....	33
Tableau VII. Résultats d'analyse des eaux de sources et calcul des statistiques descriptives	35
Tableau VIII. Qualité des eaux de sources analysée conformément aux normes de l'OMS.....	41
Tableau IX. Classement de quelques sources selon leurs débits.....	46

Liste des figures

Figure 1. Répartition eau salée/eau douce sur Terre	1
Figure 2. Disponibilité en eau douce et pénurie dans les pays de la rive Sud de la méditerranée.....	2
Figure 3. Global distribution of major outcrops of carbonate rocks (except Evaporites)	4
Figure 4. Les principaux karsts d'Algérie.....	5
Figure 5. Bloc diagramme représentant un paysage karstique en surface et le milieu karstique souterrain	7
Figure 6. Représentation schématique d'un aquifère karstique.....	9
Figure 7. Les différents compartiments hydrauliques d'un aquifère karstique.....	10
Figure 8. Représentation schématique des systèmes karstique unaire et binaire	11
Figure 9. . Schéma général de la karstification.	12
Figure 10. Mise en place d'un réseau de conduits suite à une chute du niveau de base	13
Figure 11. Transgression marine et submersion des sources karstiques	14
Figure 12. Intrusion saline dans un aquifère poreux.....	15
Figure 13. Localisation de la zone d'étude.....	16
Figure 14. Carte lithostratigraphique de la vallée de la Soummam 1/200 000° (extraite de la carte géologique du Nord de Constantine 1/200 000°).....	19
Figure 15. Diagramme Ombrothermique de la région de Bejaia durant la période (1978-2014).	21
Figure 16. Les différentes zones de prospection.....	24
Figure 17. Délimitation exacte de la zone d'étude et quelques illustrations des sources analysées.....	24
Figure 18. Illustrations de quelques sources karstiques au niveau de la région de Toudja.....	25
Figure 19. Illustrations de quelques sources karstiques au niveau du littoral Ouest de Béjaia.....	25
Figure 20. Illustrations de quelques sources karstiques au niveau la région PK17 et environs.....	26
Figure 21. Interprétation des données GPS sur Google Earth (1/400 000°)	27
Figure 22. Matériel utilisé	29
Figure 23. Carte de géolocalisation des sites de prélèvement.....	37
Figure 24. Variation spatiale de la température	38
Figure 25. Variation spatiale du potentiel d'Hydrogène.....	39
Figure 26. Variation spatiale de la conductivité électrique.	40
Figure 27. Variation spatiale du TDS.....	40
Figure 28. Variation spatiale de la salinité.	42
Figure 29. Courbe de régression du pH en fonction de la température.....	42
Figure 30. Courbe de régression de la salinité en fonction de la conductivité électrique.....	43
Figure 31. Courbe de régression du TDS en fonction de la température	43
Figure 32. Courbe de régression de la conductivité électrique en fonction du pH.....	44
Figure 33. Courbe de régression du TDS en fonction de la salinité.....	44
Figure 34. Courbe de régression TDS en fonction de la conductivité électrique	45
Figure 35. Variation spatiale du débit.....	46

Liste des abréviations

SAD: Systèmes Annexes au Drainage

pCO₂: Pression partielle du carbone

ORGM: Office National de Recherche Géologiques et Minière

ONM: Office National Météorologique

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

Hm³: Hectomètre cube

ANDI: Agence National du Développement et de l'Investissement

GPS: Global Positioning System

SIG: Système d'Information Géographique

SGBD: Système de Gestion des Bases de Données

OMS: Organisation Mondiale de la santé

µS: Microsiemens

TDS: Total des Solides Dissous

FEPS: Fondation de l'Eau Potable Sûre

UN : United Nations

ppm : Part per million

ADE : Algérienne Des Eaux

AEP: Adduction d'Eau Potable

WHO: World Health Organization

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

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale 1

Chapitre I. Synthèse bibliographique

I.1. Introduction.....	4
I.1.1. Les eaux karstiques souterraines dans le monde.....	4
I.1.2. Les eaux souterraines karstiques en Algérie.....	4
I.1.3. Les eaux souterraines karstiques dans la wilaya de Bejaia.....	5
I.1.3.1. Généralités.....	5
I.1.3.2. L'apport des ressources en eaux souterraines karstiques à l'alimentation de la région de Bejaia.....	5
I.2. Généralités sur les sources karstiques.....	6
I.2.1. Introduction.....	6
I.2.2. Etymologie et définition du karst.....	6
I.2.3. Les aquifères karstiques.....	7
I.2.3.1. Définition d'un aquifère karstiques.....	7
I.2.3.2. Caractéristiques des aquifères karstiques.....	7
I.2.4. Le système karstique.....	9
I.2.5. La karstification.....	11
I.2.5.1. Origine de la karstification.....	11
I.2.5.2. Définition et principe de la karstification.....	12
I.3. Aquifères karstiques côtiers.....	12
I.3.1. Le karst côtier.....	13
I.3.1.1. Diminution du niveau marin.....	13
I.3.1.2. Montée du niveau marin (transgression).....	14
I.3.2. Flux d'eau dans les aquifères karstiques côtiers.....	14
I.3.2.1. Diffusion et dispersion moléculaire.....	15

Chapitre II. Matériel et méthodes

II.1. Présentation de la zone d'étude.....	16
II.1.1. Introduction.....	16
II.1.2. Situation géographique et relief.....	16
II.3.1. Géologie, Hydrogéologie et Géomorphologie.....	17
II.3.1.1. Cadre géologique.....	17
II.3.1.2. Cadre Stratigraphique.....	18
II.3.1.3. Cadre hydrogéologique.....	19
II.1.4. Climatologie de la région.....	19
II.1.4.1. Précipitations.....	20
II.1.4.2. Températures.....	20
II.1.4.3. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен.....	21

II.1.5. L'aspect socioéconomique	21
II.1.5.1. Population	21
II.1.5.2. Agriculture	22
II.1.5.3. Industrie	22
II.1.6. Ressources en eaux	22
II.1.7. Description des lieux de prélèvement	23
II.2. La géolocalisation	26
II.2.1. Objectifs de la géolocalisation.....	26
II.2.2. Outils de la géolocalisation	26
II.2.2.1 Présentation du GPS	26
II.2.2.2. Importation de données de géo-positionnement par satellite (GPS) dans Google Earth.....	27
II.3. Présentation du SIG	27
II.3.1. Définition.....	27
II.3.2. Fonctionnalités du SIG	28
II.3.3. Composantes d'un SIG	28
II.3.4. MapInfo.....	28
II.4. Echantillonnage	29
II.4.1. Matériels utilisés.....	29
II.4.2. Méthodes d'échantillonnage	30
II.4.2.1. les informations à préciser au moment de l'échantillonnage	30
II.4.2.2. Mesure des débits par méthode captative ou volumétrique	30
II.4.3. Difficultés rencontrées sur le terrain	30
II.5. Méthodes d'analyses	31
II.5.1. Les paramètres physiques.....	31
II.5.1.1. Température.....	31
II.5.1.2. Potentiel d'Hydrogène	31
II.5.1.3. Conductivité électrique.....	32
II.5.1.4. Total des Solides Dissous.....	32
II.5.1.5. Salinité.....	33
II.5.2. Corrélation entre les paramètres physiques.....	33

Chapitre III. Résultats et discussion

III.1. Elaboration de la carte de situation des différentes sources karstiques	34
III.1.1. Présentation du SIG des sites de prélèvement	34
III.2. Interprétation des résultats d'analyse	38
III.2.1. Les paramètres physiques	38
III.2.1.1. Température.....	38
III.2.1.2. Potentiel d'Hydrogène.....	38
III.2.1.3. Conductivité électrique	39
III.2.1.4. Total des Solides Dissous	40
III.2.1.5. Salinité	41

III.2.2. Corrélations entre les paramètres physiques.....	42
III.2.2.1. Température et potentiel d'Hydrogène	42
III.2.2.1. Conductivité électrique et salinité	43
III.2.2.3. Total des Solides Dissous et température	43
III.2.2.4. Conductivité et potentiel d'Hydrogène.....	44
III.2.2.5. Total des solides dissous et salinité.....	44
III.2.2.6. Total des solides dissous et conductivité électrique.....	45
III.3. Procédure de mesure des débits	45
III.3.1. Introduction	45
III.3.2. Interprétation des résultats.....	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques.....	49

Introduction générale

Introduction générale

Partout dans le monde, les ressources en eau disponibles s'amenuisent en raison des activités humaines et des facteurs naturels. Même si la population a pris davantage conscience au cours des dix dernières années de la nécessité de mieux gérer et protéger l'eau, les critères économiques et les considérations politiques ont toujours tendance à déterminer la politique de l'eau à tous les niveaux. La recherche scientifique et les meilleures pratiques ne reçoivent que très rarement une attention suffisante. Les pressions qui pèsent sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, principalement en raison des activités humaines - notamment l'urbanisation, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie, la concurrence croissante pour les ressources en eau et la pollution. De plus, le changement climatique et les variations des conditions naturelles viennent aggraver ces pressions. On peut cependant noter certains progrès. En effet, de plus en plus, les autorités évaluent à la fois la quantité et la qualité de l'eau et coordonnent les efforts de gestion au-delà des frontières (Water, U.N., 2006).

D'après les estimations de Shiklomanov et Rodda, 2003 cité dans UNESCO 2006, la quantité d'eau sur Terre est gigantesque : environ 1,4 milliards de km³. Cependant, 97,5 % de cette quantité se trouve sous forme d'eau salée et 2,5 % sous forme d'eau douce. 69,5 % de l'eau douce se présente sous forme de glace et de neige permanente, 30,1 % sous forme d'eau souterraine, 0,27 % sous forme d'eau dans les lacs et rivières, 0,13 % sous une autre forme (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.). La Figure 1 ci-après récapitule cette répartition.

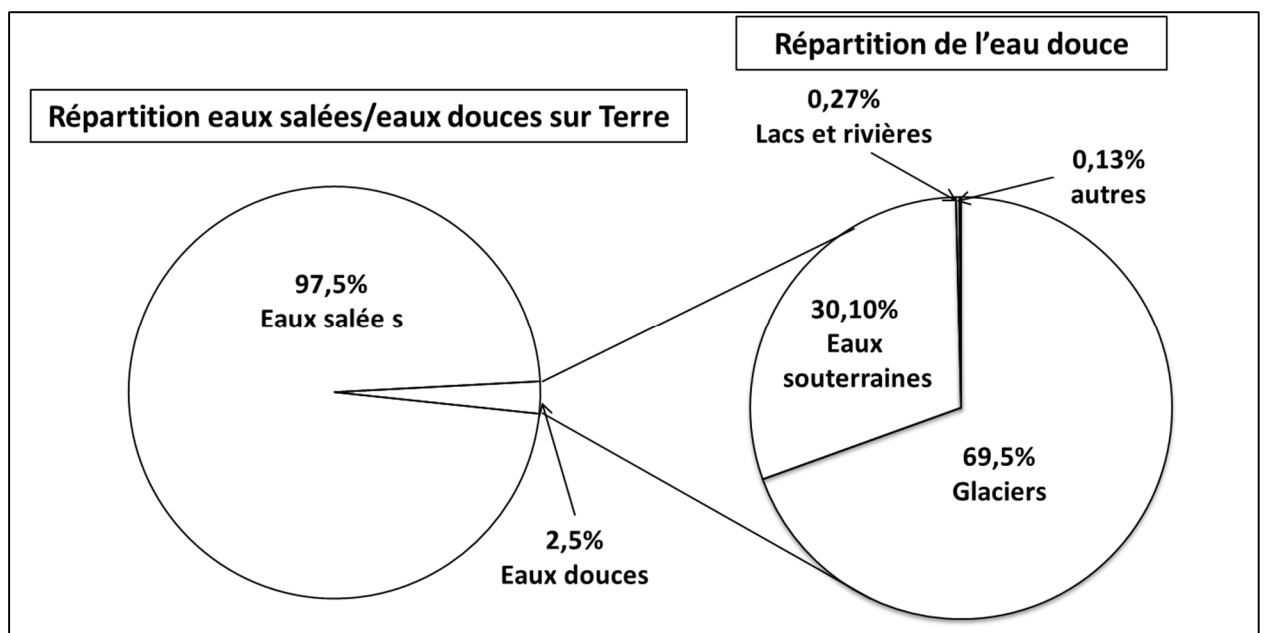


Figure 1. Répartition eau salée/eau douce sur Terre (UNESCO, 2006).

Au final, l'homme ne peut utiliser que moins d'un pour cent du volume total d'eau douce présent sur Terre. Ceci englobe les cours d'eau, les réservoirs naturels ou artificiels (lacs, barrages...) et les nappes souterraines dont la faible profondeur permet l'exploitation à des coûts abordables (cieau.com).

L'eau est un des problèmes majeurs propres aux pays de la rive sud de la méditerranée car elle représente un facteur limitatif clé du développement durable, de l'amélioration de la qualité de la vie et de la paix (Fig.2). La gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines et superficielles est actuellement une nécessité, compte tenu d'une part de l'accroissement continu des besoins, et d'autre part de la dégradation constatée durant ces dernières décades de la qualité de l'eau dans ces pays en voie de développement. De surcroit, lorsque les ressources sont limitées et que la sécheresse qui touche l'ensemble du pays devient conjoncturelle, cette nécessité devient urgence (Amraoui, 2005).

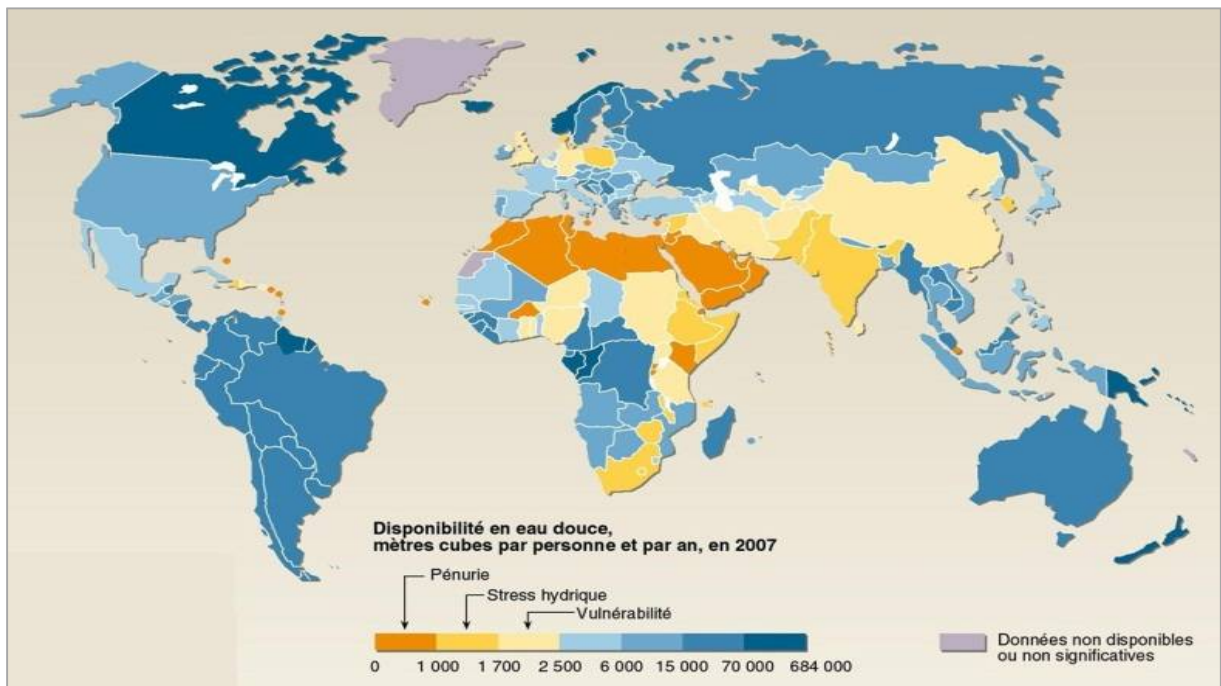


Figure 2. Disponibilité en eau douce et pénurie dans les pays de la rive Sud de la méditerranée (Rekacewicz, 2008).

La recherche et l'exploitation des eaux souterraines et leurs protections contre tous types de contamination, par les effets anthropiques et industriels, reste le souci primordial de toute l'humanité. De nombreuses recherches se concentrent actuellement sur l'étude des ressources en eaux dans les zones semi-arides, où les contraintes climatiques imposent une gestion intelligente et approfondie de ces ressources (Baali, 2007).

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 sources karstiques et leurs rivières souterraines ont ensuite été plus récemment l'objet d'attentions particulières d'explorateurs aux motivations variées. Parmi eux Martel, 1921 a été l'un des premiers à conceptualiser les écoulements souterrains des régions calcaires. Avec lui sont apparues les polémiques sur la nature du milieu souterrain.

Dans ce contexte, le présent travail rentre dans le cadre d'un projet de recherche CNEPRU intitulé « Evaluation et caractérisation des eaux karstiques de la région de Bejaia » devant débiter en 2016. L'objectif de notre travail est d'inventorier les sources karstiques de la région Nord-Ouest de Bejaia, les localiser et mesurer les caractéristiques physiques de leurs eaux (température, potentiel d'hydrogène, conductivité électrique, total des solides dissous et salinité). Un premier travail d'inventaire a été réalisé par un binôme d'étudiants durant l'année universitaire 2014/2015 et a concerné les communes de Bejaia et de Toudja. Cette contribution représente un complément de données relatif à d'autres sources situées dans la région littorale allant de Bejaia à Toudja.

Le manuscrit comprend, en plus de l'introduction générale, un premier chapitre, qui contient une synthèse bibliographique des travaux relatifs aux karsts et aux sources karstiques. Le deuxième chapitre comporte une présentation de la zone étudiée ainsi que les méthodes utilisées pour la réalisation de ce travail. Le troisième chapitre présente les résultats et les discussions obtenus à partir de l'utilisation des différentes méthodes citées auparavant. Enfin la conclusion générale récapitule les résultats obtenus ainsi que les perspectives de l'étude.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

I.1.1. 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 (Kaid Rassou, 2009). 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, Drew et Hotzl, 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.

Les aquifères karstiques sont caractérisés par des particularités géomorphologiques, des phénomènes hydrauliques tels que l'existence d'importante sources, de pertes, l'absence de réseaux de drainage de surface, l'existence de réseaux karstiques et d'hydrogrammes typiques de sources (Doerfliger et Zwahlen 1997).

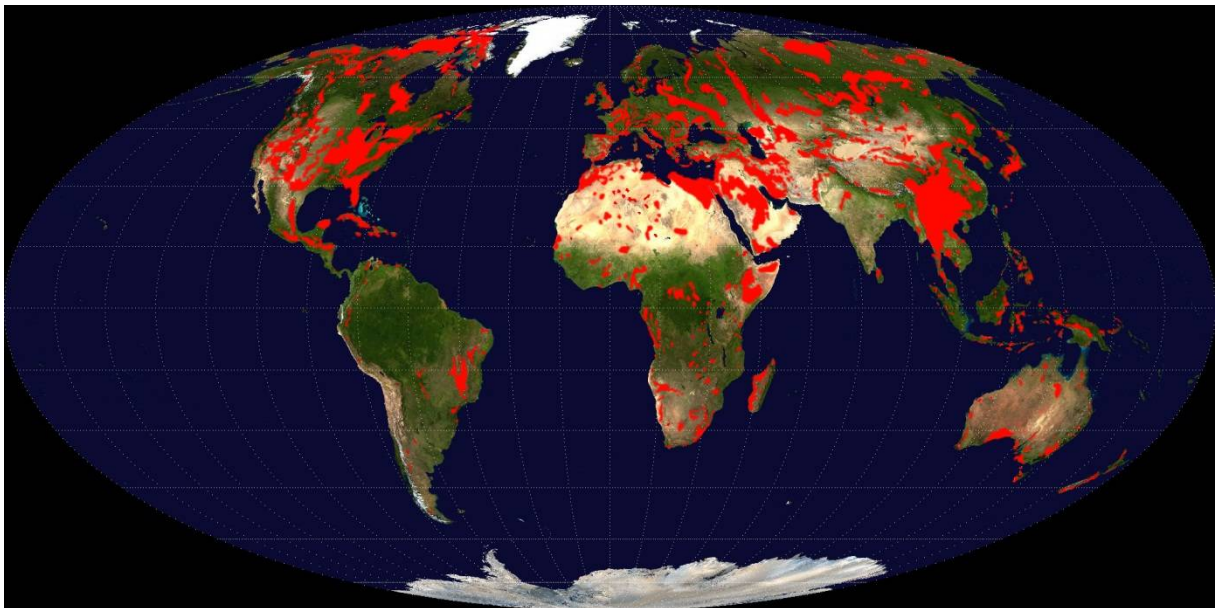


Figure 3. Global distribution of major outcrops of carbonate rocks (except Evaporites) (Wikipedia).

I.1.2. 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 in Bensaoula, 2007). Ce sont des formations d'âges qui s'étalent sur toute l'échelle géologique des temps les plus anciens, du carbonifère (dans la

Chapitre I. Synthèse bibliographique sur les karsts

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 Chellif).

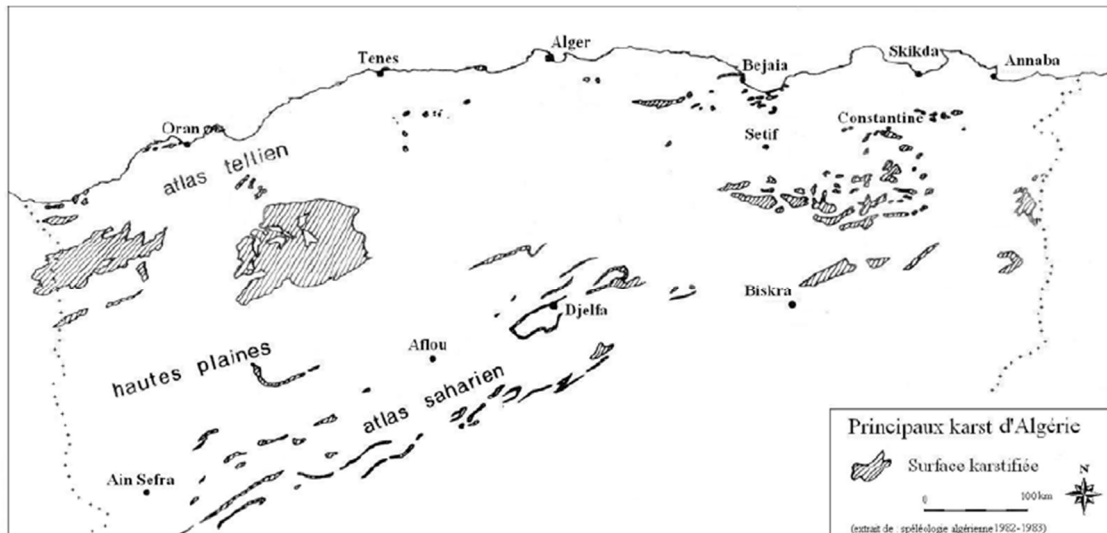


Figure 4. Les principaux karsts d'Algérie (Bensaoula, 2006)

I.1.3. Les eaux souterraines karstiques dans la wilaya de Bejaia

I.1.3.1. Généralités

La ville de Bejaïa se trouve au bord de la méditerranée, elle s'inscrit dans la petite Kabylie. Il s'agit de l'une des villes les plus anciennes de l'Algérie et de l'Afrique du nord, sa fondation datant de l'époque de l'occupation de cette région par les légions romaines (ANDI, 2013).

I.1.3.2. L'apports des ressources en eaux souterraines karstiques à l'alimentation de la région de Bejaia

Pour alimenter Saldae (Béjaïa), les romains captèrent Les sources de Toudja en l'an 152, qui se trouvent sur le versant méridional de Takalats, l'un des pics les moins élevés de cette chaîne de montagnes, et forment l'Oued Ghir qui se jette dans la Soummam. La plus importante est celle que l'on appelle *Ainseur* (la source) et qui coule à côté de la Mosquée du village. Cette eau a pu alimenter la ville pendant des siècles jusqu'à ce qu'elle ne soit plus suffisante et qu'elle ait été préservé pour les besoins de la commune de Toudja.

Actuellement, le réseau hydrographique de la région de Bejaia est essentiellement composé des 4 oueds suivants : oued Djema qui est à Tichy (1959), Zitouna à Aokas (1978), oued Agrioun situé à Souk Tenin (1992), et Soummam. À l'exception de ce dernier, ces oueds permettent l'alimentation en eau potable de la ville de Bejaïa par l'intermédiaire de forages permettant le captage de l'eau présente dans leurs alluvions.

Chapitre I. Synthèse bibliographique sur les karsts

N'ayant pas été suffisants à couvrir la demande de la région, la source bleu de Kherrata a été exploitée en 1995 afin de satisfaire la demande en eau potable.

Malgré une pluviométrie moyenne élevée les précipitations sont souvent irrégulières (en moyenne 50 jours de pluie par an), du coup, de façon à pouvoir au mieux utiliser les apports pluviométriques importants existants dans la région et ainsi pouvoir garantir une alimentation en eau potable constante aux populations même durant les périodes d'étiage, il s'est donc avéré nécessaire de régulariser les débits superficiels écoulés par les oueds. Ainsi, un barrage a été construit en 2010 sur l'oued Bousselam, l'un des principaux affluents de l'oued Soummam le barrage de Tichy Haf (ADE, 2008).

I.2. Généralités sur les sources karstiques

I.2.1. 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 messinienne 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.2.2. 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).

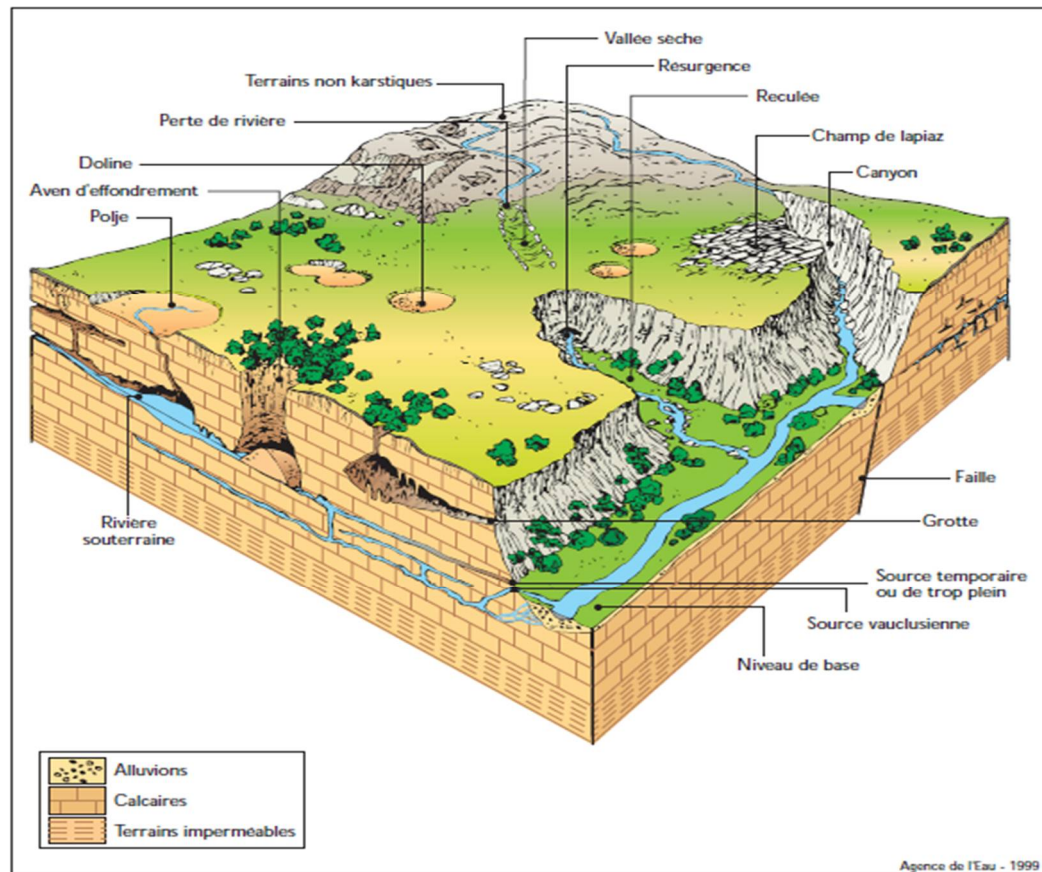


Figure 5. Bloc diagramme représentant un paysage karstique en surface et le milieu karstique souterrain (Bakalowicz, 1999).

I.2.3. Les aquifères karstiques

I.2.3.1. 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, ...) (Dörfliker *et al.*, 2004).

I.2.3.2. 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 d'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.6), 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).

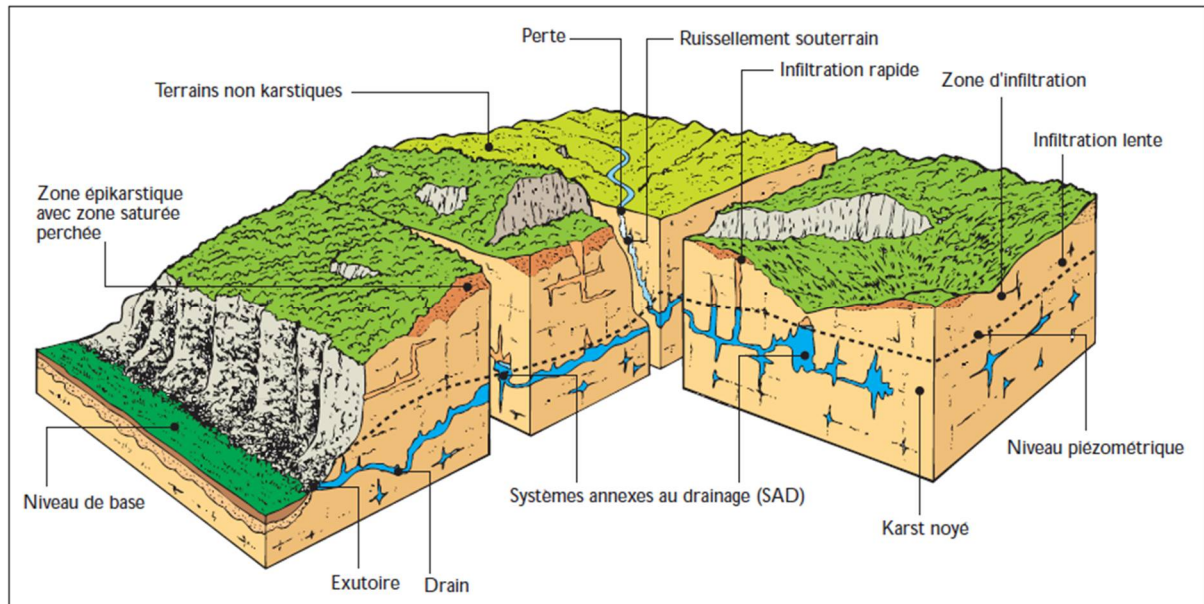


Figure 6. Représentation schématique d'un aquifère karstique (Mangin, 1975)

I.2.4. 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'épikarst 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'épikarst 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'épikarst. 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'épikarst 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.7).

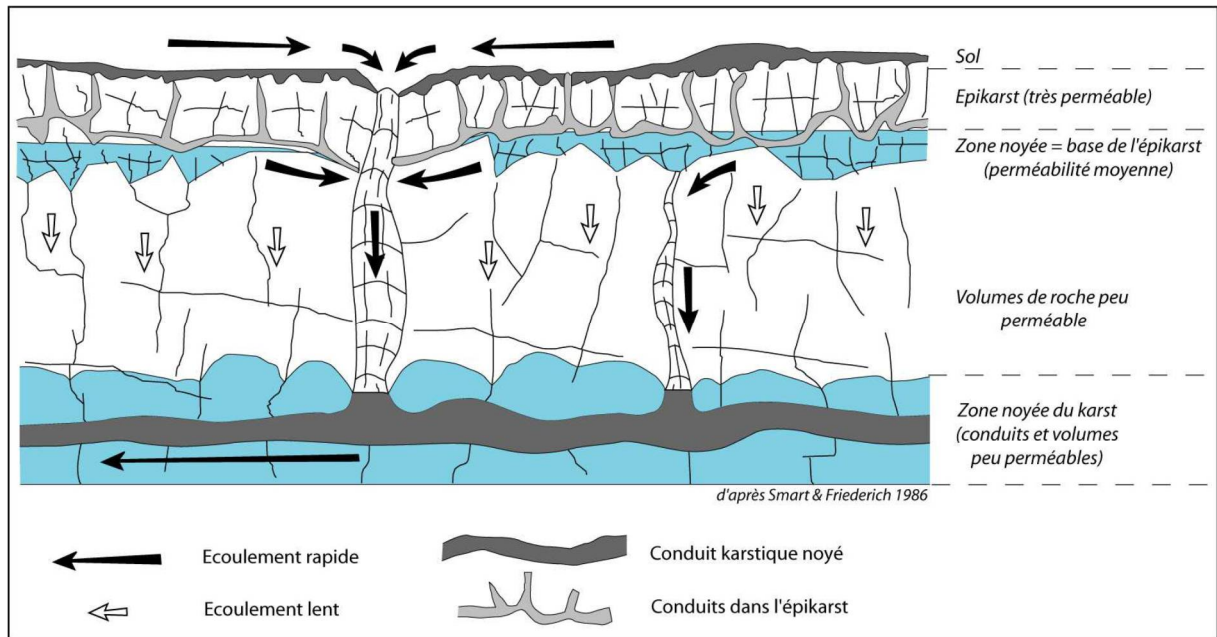


Figure 7. Les différents compartiments hydrauliques d'un aquifère karstique (Smart et Friedrich, 1986).

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).

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'épikarst 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, N 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. 8).

- **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).

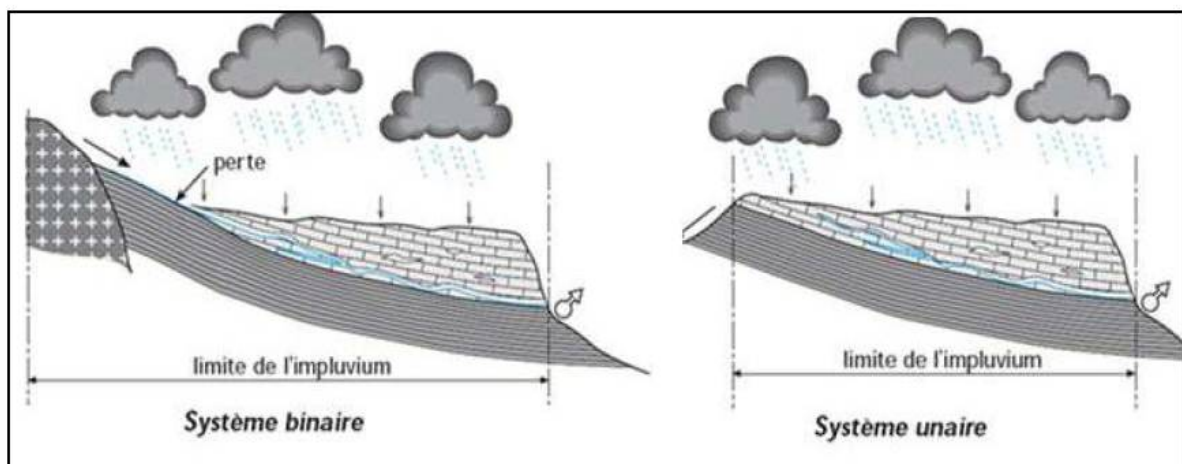


Figure 8. Représentation schématique des systèmes karstique unaire et binaire (Marsaud, 1996).

I.2.5. La kartification

I.2.5.1. 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

Chapitre I. Synthèse bibliographique sur les karsts

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.2.5.2. 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 CO_2 ($p\text{CO}_2$) du milieu ; l'eau infiltrée va alors s'équilibrer avec ce milieu et s'enrichir en CO_2 , 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 $p\text{CO}_2$ 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 CO_2 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.9) (Palmer, 2003).

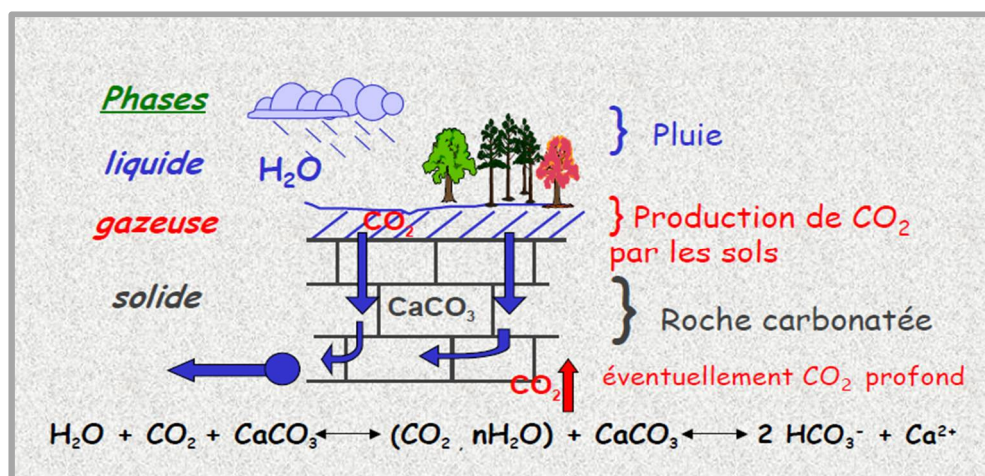


Figure 9. Schéma général de la karstification. Création de vides dans la roche = karstification (Bakalowicz, 2002).

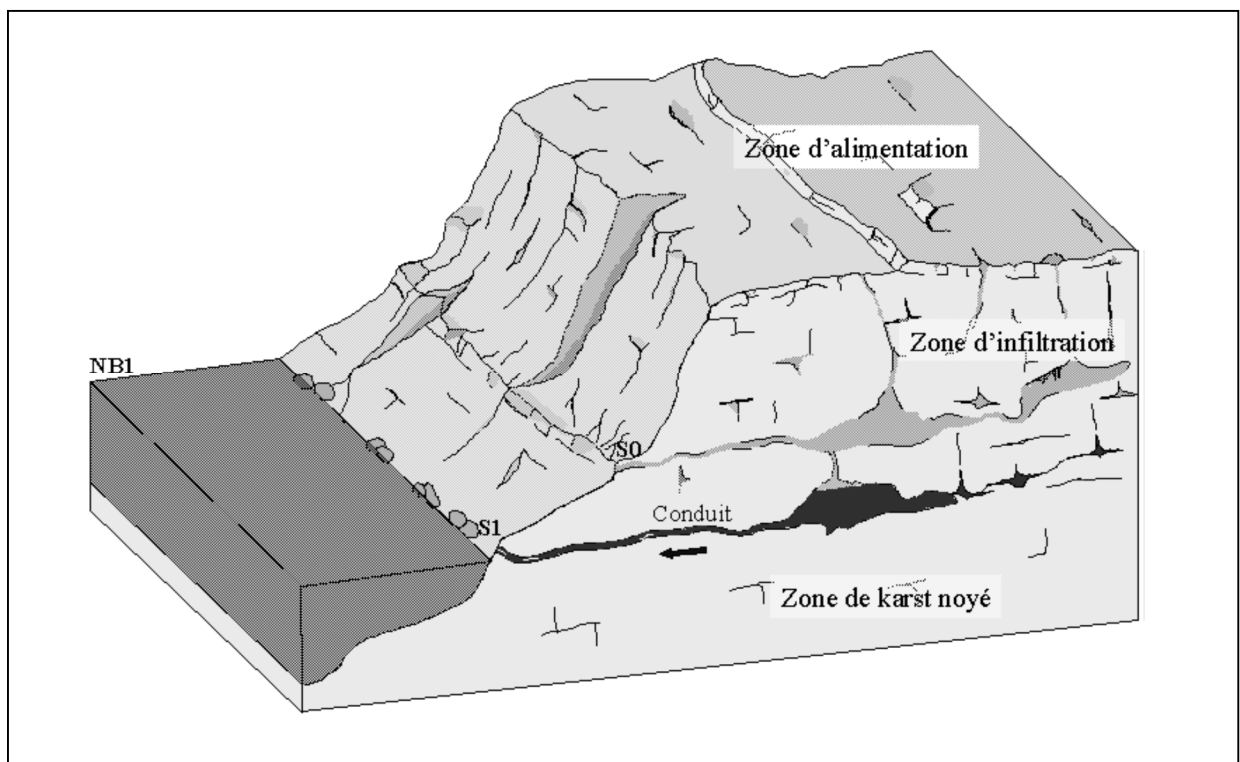
I.3. Aquifères karstiques côtiers

I.3.1. 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.3.1.1. 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.10). 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).

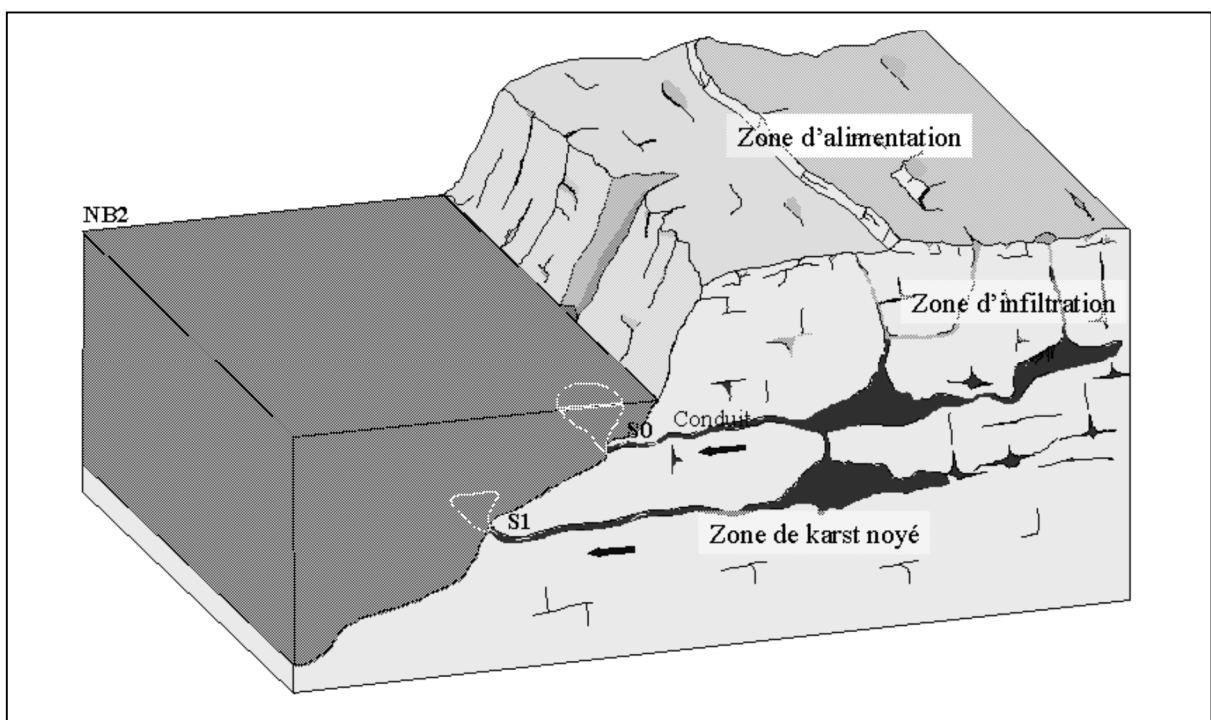


NB1 : Niveau de Base à t_1
S0 : Source à t_0
S1 : Source à t_1

Figure 10. 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)

I.3.1.2. Montée du niveau marin (transgression)

Dans ce cas, les sources se retrouvent submergées (Fig.11). 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).



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

Figure 11. Transgression marine et submersion des sources karstiques (Cooper *et al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988).

I.3.2. 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.3.2.1. 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.12) est une zone de mélange due à la dispersion hydrodynamique (Cooper et *al.*, 1964 in Reilly et Goodman, 1985).

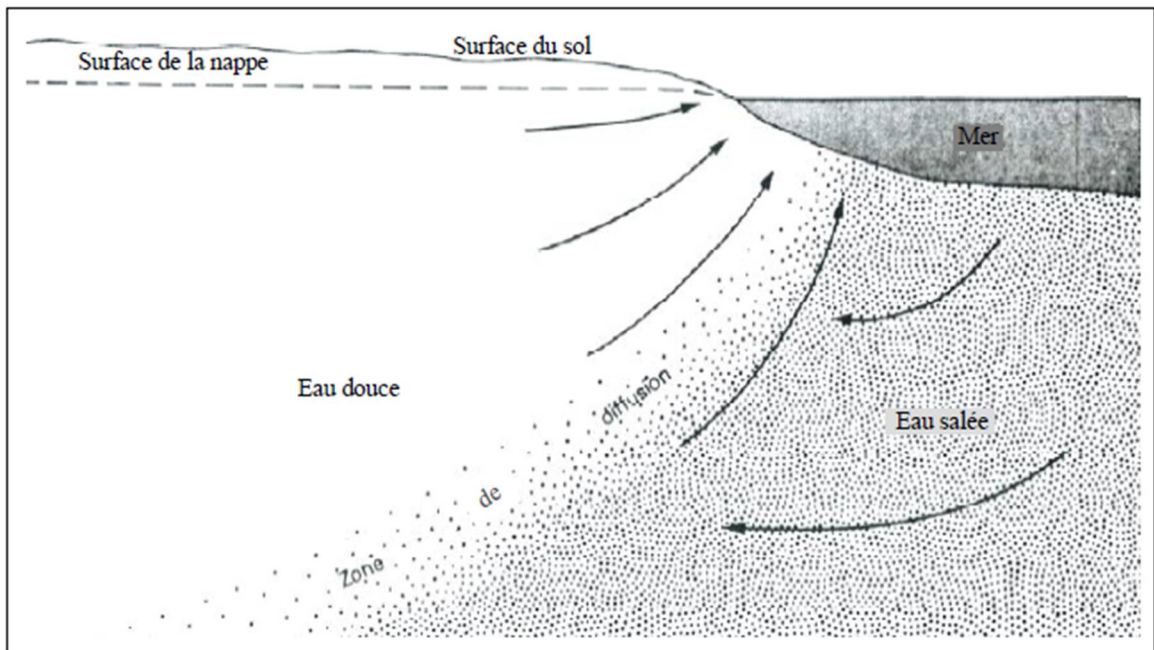


Figure 12. Intrusion saline dans un aquifère poreux (Cooper et *al.*, 1964 d'après Reilly et Goodman, 1985, 1988).

Chapitre II

Matériel et méthodes

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Introduction

La région d'étude se situe dans la frange littorale Ouest de Bejaia (de Toudja à Béni K'sila). Par conséquent, le massif primaire de Bou Hattem, qui affleure à la faveur d'une faille verticale, a joué jusqu'au Crétacé, le rôle de horst, limitant au Nord et à l'Ouest la transgression des mers liasiques et jurassiques. Ainsi le Lias et le Jurassique localisés à la partie orientale du synclinorium, forment le cœur des anticlinaux du Gouraya et du djebel Aghbalou (Duplan, 1952).

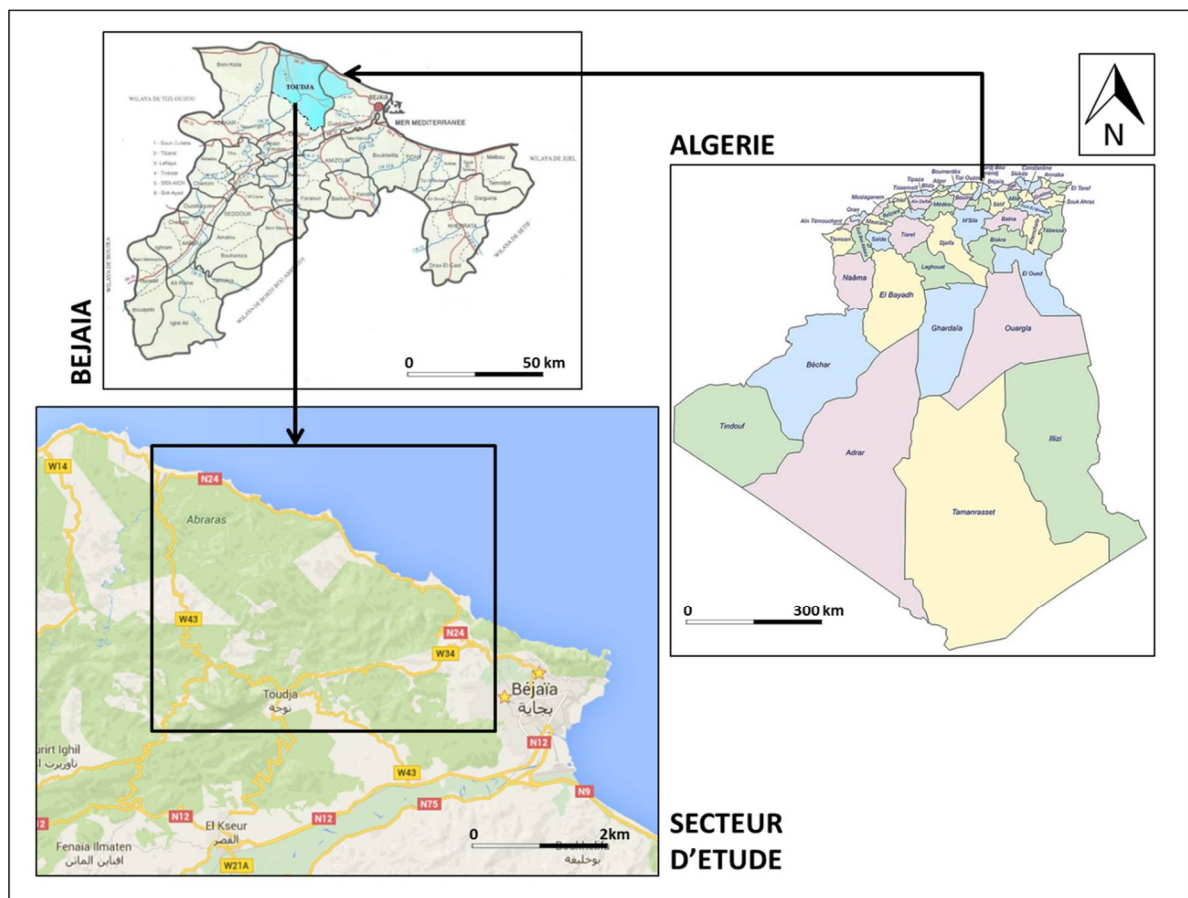


Figure 13. Localisation de la zone d'étude.

II.1.2. Situation géographique et relief

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 méditerranée avec une façade maritime de plus de 100 Kms, alternant criques rocheuses et plages de sable fin d'Est en Ouest, le territoire de la wilaya de Bejaia s'étend sur une superficie de 322 348 ha.

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 Tizi Ouzou et Bouira à l'ouest (ANDI, 2013).

Le territoire de la Wilaya de Bejaia se présente comme une masse montagneuse compacte et bosselée, traversée par le couloir formé par la vallée de la Soummam. On peut distinguer trois ensembles de reliefs:

- **L'ensemble des montagnes:** Il occupe 75% soit 3/4 de la superficie totale de la Wilaya. Il est constitué des chaînes des Bibans, des Babors et du Djurdjura.
- **L'ensemble des piémonts:** Il a une morphologie ondulée constituée d'une succession de collines. Il apparaît moins accidenté que la zone de montagne. Il représente la zone intermédiaire entre la plaine et la montagne.
- **L'ensemble des plaines:** Il est composé des plaines de la vallée de la Soummam qui apparaît comme une bande sinueuse de 80 Km de long sur une largeur maximale de 04 Km. La plaine côtière, séparant la mer et la chaîne des babors, se présente comme une bande étroite qui s'étend de l'embouchure de l'Oued Soummam à celui de l'Oued Agrioun, soit une trentaine de Kilomètres (DPAT, 2012).

II.1.3. Géologie, Hydrogéologie et Géomorphologie

II.1.3.1. Cadre géologique

- **Géologie de la région de Bejaia**

La région de Bejaïa fait partie du domaine tellien ; elle se situe entre les massifs intermédiaires de la grande et la petite Kabylie constitués d'anciennes roches métamorphiques. Les dépôts mésozoïques et cénozoïques participent à la construction géologiques de la région qui se trouve réduite à l'état d'une tectonique plissant et disjonctive des plus complexes (ORGM, 1999).

- **Géologie de la zone d'étude**

Le site d'étude comporte la région de Toudja, grand accident cassant qui cisaille les deux anticlinaux du djebel Aghbalou et du Gouraya. La direction de cet accident a amené les auteurs à la considérer dans la région de Bougie et à la rattacher au domaine des chaînes littorales Kabyles (Duplan, 1952). Celle de Toudja reçoit une grande quantité d'eau et le ruissellement continu a donné sa forme particulière à la contrée (Rousseau, 1907). Cette dernière est formée d'unités structurales comprenant : un socle cristallophyllien affleurant dans la région de Bouhatem (Schistes à séricite, Quartzites, Cipolins et pegmatites) et des formations sédimentaires composées du Jurassique, de flyschs créacés et tertiaires respectivement massylliens, mauritaniens et numidiens, du Miocène et du Plio-Quaternaire. Plusieurs contacts anormaux soulignent les grandes structures plissées et sont en majorité à regard Nord, chevauchant, avec une composante latérale dextre, délimitant des lanières (ou pop-up) d'échelle cartographique. Des failles normales à regard Nord se développent parfois à l'arrière des chevauchements induisant l'affaissement de la partie Nord. Des décrochements senestres à composante normale affectent tardivement l'ensemble des structures (Medaouri *et al.*, 2010).

II.1.3.2. Cadre Stratigraphique

Les roches métamorphiques et éruptives très souvent altérés sont représentées par des schistes et gneiss avec des lentilles de cipolin et des filons de pegmatites. Ces formations sont datées du Paléozoïque. Ces terrains anciens affleurent très peu autour du village de Bouhatem situé Nord du massif d'Aghbalou. Discordantes sur ce socle, des formations tertiaires constituent un recouvrement d'âge Oligo-Miocène. Ces formations sont représentées par un niveau conglomératique de base, des marnes micacées, des grès, des silexites, des calcaires marneux et des argiles. A tous les niveaux de ces formations peuvent s'intercaler des roches volcaniques (ORGM, 1999).

- **Trias**

Les dépôts triasiques sont représentés par un faciès gypso-salin et des amas gypseux sous forme d'olistolites d'argiles et de grès rouges (ORGM, 1999).

- **Jurassique**

Les dépôts du jurassique sont représentés par des roches essentiellement carbonatées constituant les parties axiales des plis anticlinaux complexes. Les dépôts du jurassique inférieur sont représentés par des dolomies et calcaires ; tandis que les dépôts du jurassique moyen et supérieur sont représentés par des calcaires et des marnes. La puissance moyenne de ces dépôts est de 500 à 600 m (ORGM, 1999).

- **Crétacé**

Les formations du crétacé inférieur sont largement développées dans la partie Sud de la région. Elles sont représentées par des sédiments flyschoides argileux et calcaires, des schistes noirs et des conglomérats. Leur puissance peut atteindre 1500 m. Les dépôts du crétacé supérieur affleurent dans la partie Nord-Est et sont représentés par des schistes marneux noirs. Leur épaisseur atteint 500 m (ORGM, 1999).

- **Paléogène**

Les plus largement répartis sont les dépôts oligocènes représentés par des grès quartzeux, par des argilites et des argiles d'une puissance totale de 600–700 m (ORGM, 1999).

- **Quaternaire**

Il est représenté par des formations du Quaternaire supérieur (Terrasse de l'Oued Soummam et plage maritime) et des dépôts récents très diversifiés qui peuvent se rencontrer en discordance sur tous les terrains cités précédemment. On y rencontre des brèches de pente (1-10 m d'épaisseur), des alluvions récentes, des alluvions anciennes représentées par des sables et des cônes de déjections anciens (ORGM, 1999).

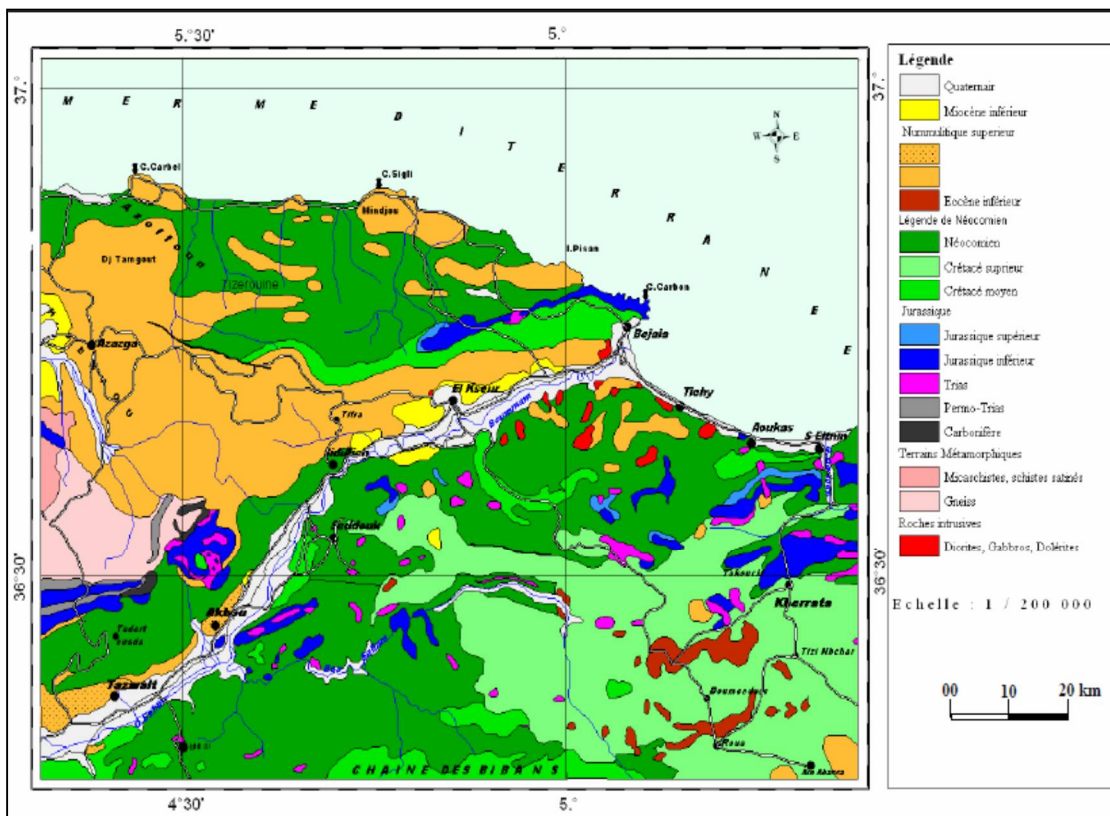


Figure 14. Carte lithostratigraphique de la vallée de la Soummam 1/200 000^e (extraite de la carte géologique du Nord de Constantine 1/200 000^e).

II.3.1.3. Cadre hydrogéologique

Un rappel du contexte géomorphologique est cependant nécessaire afin de mieux comprendre l'aspect hydrogéologique de la région.

- **La région d'étude** : le relief s'individualise en trois zones distinctes :
 - Une plaine côtière d'une longueur de 30 km
 - Une zone montagneuse constituée des massifs de l'Akfadou, Gouraya au Nord et des Chaines des Bibans-Bâbord au Sud.
 - La vallée de la Soummam qui est une dépression intra-montagneuse de 80 km de longueur et 04 km de largeur au maximum.

Le réseau hydrographique est constitué de cours d'eau temporaires, alimentés par de nombreux torrents le long des pentes montagneuses (ORG, 1999).

II.1.4. Climatologie de la région

Appartenant au domaine méditerranéen, le climat de la wilaya de Bejaia varie d'une zone à une autre, la zone littorale et la vallée de la Soummam jouissent d'un climat pluvieux et doux en hivers, sec et chaud en été. Tandis que le climat des zones de montagnes se caractérise par un été sec et chaud et un hiver pluvieux et froid, la température atteint parfois 1°C et moins, ce qui s'accompagne par la chute de neige (DSPW, 2013).

II.1.4.1. Précipitations

La répartition des précipitations joue un rôle régulateur des activités biologiques. Selon Seltzer (1946) cité par Zougaghe (2003) les précipitations augmentent avec l'altitude, mais elles sont plus élevées sur les versants exposés aux vents humides. Elles augmentent d'Ouest en Est et diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne du littoral. De par son altitude et sa position par rapport à la mer, la région de Bejaia est une région assez arrosée elle reçoit en moyenne entre 600 et 900 mm de pluie par an d'où l'existence d'un réseau hydrographique important.

La répartition des précipitations moyennes mensuelles de la région de Bejaia durant la période entre 1978 et 2014 sont reportés dans le tableau I.

Tableau I. Les précipitations moyennes mensuelles en mm. Période (1978-2014) (Station ONM de Bejaia, 2015)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIT	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
P (mm)	109.3	113.4	96.8	47.4	52.0	28.2	5.6	26.6	36.4	62.5	99.2	165.3

La lecture des valeurs des précipitations permet de conclure que les maximas des précipitations moyennes mensuelles sont observés en mois de Novembre, Décembre et Janvier avec respectivement 99.2, 165.3 et 109.3 mm. Par contre, les précipitations diminuent très fortement durant la période de Juin à Aout. La valeur minimale est enregistrée au mois de Juillet avec 5.6 mm.

II.1.4.2. 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 de Bejaia pour la période comprise entre 1978 et 2014 est représentée dans le tableau II :

Les valeurs mentionnées dans ce tableau sont relevées au niveau de la Station Météorologique de Bejaia.

Tableau II. Températures moyennes mensuelles pour la région de Bejaia (1978-2014) (Station ONM de Bejaia, 2015).

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIT	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
T °C	12	11.7	12	16.4	17.2	20.2	24.4	25.3	23.8	21.6	16.5	12.4

Ce tableau nous montre que le maximum des moyennes des températures est atteint au mois d’Aout (25.3°C), et le minimum en mois de Janvier avec (12°C).

Les données de température du tableau II, nous montrent que cette région côtière a un climat doux et tempéré.

II.1.4.3. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson est une méthode graphique permettant de définir les périodes sèche et humide de l’année. Nous portons en abscisses les mois et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), en respectant la relation $P=2T$ (Benseghir, 2006).

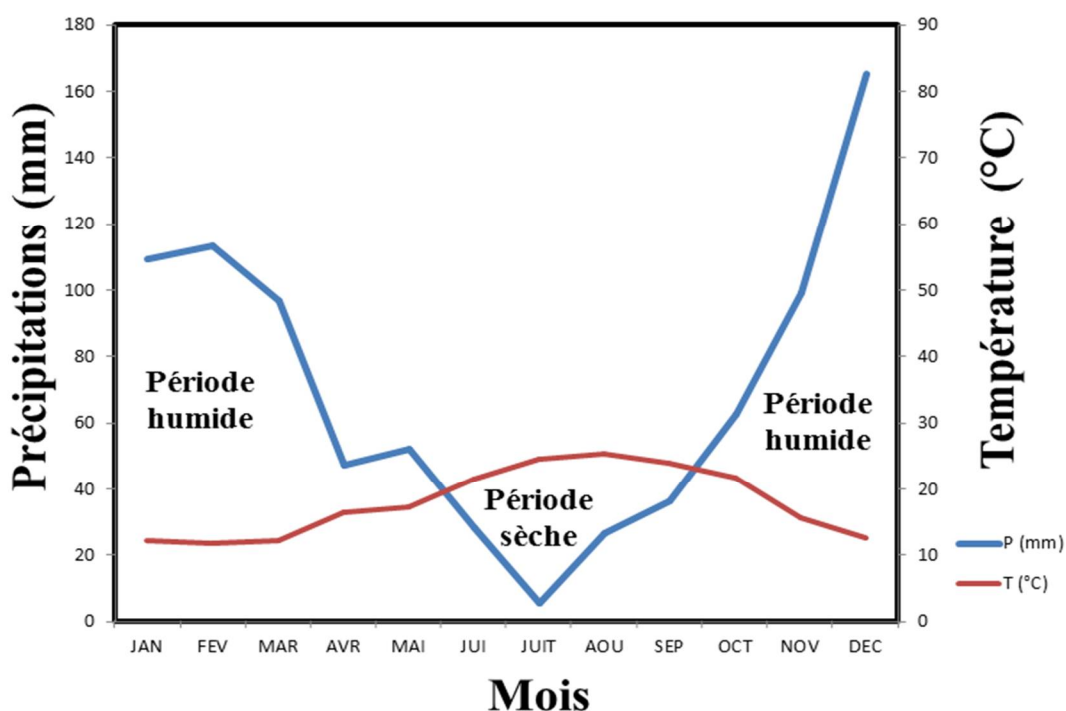


Figure 15. Diagramme Ombrothermique de la région de Bejaia durant la période (1978-2014).

Ce diagramme Ombrothermique, réalisé à partir des données de la période 1978 à 2014 enregistrées au niveau de la Station de l’Office National de Météorologie de Bejaia, montre:

- Une période humide, du mois de janvier à Avril et du mois d’Octobre à Décembre,
- Une période sèche durant les cinq autres mois de l’année (Mai–Septembre).

II.1.5. L’aspect socioéconomique

II.1.5.1. Population

D’après le recensement national de 2014, la population de l’ensemble de la Wilaya est de : 953 050 habitants. La population de la région de Bejaia s’élève à 185 882 habitants environs, dont 10 263 habitants sont situés dans la commune de Toudja (DSPW, 2014). L’évolution de la population résidente par commune au niveau de notre région d’étude ainsi que les bassins les plus importants est représentée dans le tableau suivant :

Communes	population 1998 RGPH	population 2008 RGPH	Evolution population (1998-2008)	Taux A.A.M %	population Fin 2014
Bejaia	150 195	177 988	27 793	1.71	185 882
Toudja	10 659	9 827	-832	-0.81	10 263
Akbou	44 854	53 282	8 428	1.74	55 645
Amizour	34 217	37 563	3 346	0.94	39 230
Kherrata	31 743	35 077	3 334	1.00	36 633
El Kseur	26 886	29 843	2 957	1.05	31 166
Draa El Kaid	27 900	29 222	1 322	0.46	30 518
Tazmalt	25 974	28 891	2 917	1.07	30 172
Timezrit	22 392	25 853	3 461	1.45	27 000
Ouzellaguen	21 547	22 719	1 172	0.53	23 727

Tableau III. Répartition et évolution de la population au niveau des plus grands bassins de la Wilaya de Bejaia (DSPW. Bejaia, 2014).

II.1.5.2. Agriculture

La wilaya de Bejaia dispose d'une surface agricole utile de 130 348 Ha dont 6,24% sont irriguées. (DPAT, 2012).

Dans les zones montagneuses, nous trouvons principalement une agriculture n'utilisant pas de produits phytosanitaires. Dans les zones de piémont, on pratique la céréaliculture ainsi que les cultures fourragères, associées à un élevage extensif. Dans les zones de plaines où se localisent la majorité des fermes de l'état, à proximité de l'oued Soummam (Oued Ghir, El Kseur, Sidi Aich, Akbou) ainsi que les zones côtières, l'agriculture intensive irriguée est pratiquée en plein champ et sous serres. C'est dans ces zones qu'on rencontre l'utilisation des produits phytosanitaires (Zouggaghe, 2003).

II.1.5.3. Industrie

La wilaya Bejaia dispose d'un tissu industriel important et diversifié. On dénombre 220 unités en activité couvrant presque toutes les branches d'activités, mais avec une dominante manufacturières et de transformation agroalimentaire.

- Secteurs d'activités :
 - L'agroalimentaire, avec d'importantes capacités dans les corps gras, le sucre, les produits laitiers, les produits céréaliers.
 - Les textiles et cuirs, avec 6 grands complexes (Bejaia ville, R'Mila, Kherrata et Akbou).
 - Projets locaux inscrits :
 - Création de deux nouvelles zones industrielles (El Kseur et Béni Mansour) (ANDI, 2013).

II.1.6. Ressources en eaux

Les ressources hydriques prouvées s'élèvent à près de 426 Hm³ (106 Hm³ en eaux souterraines et 320 Hm³ en eaux superficielles) dont près de 212 Hm³ sont effectivement mobilisées et concernent surtout les eaux superficielles du barrage de Kherrata (109 Hm³).

Les tableaux IV et V résument la disponibilité, la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau au niveau de la Wilaya.

Nature de la ressource	Potentialités mobilisables (Hm ³)	Volume mobilise (Hm ³)
Eaux souterraines	106	102
Eaux superficielles	320	110
Totaux	426	212

Tableau IV. Disponibilité des ressources hydrolyques au niveau de la Wilaya de Bejaia (ANDI, 2013).

Mobilisation de la ressource	Prélèvements
A.E.P : 113 Hm ³ / An	85,8 Hm ³ / An
Industrie : 11,5 Hm ³ / An	3,5 Hm ³ / An
Irrigation : 30 HM ³ / An	08 Hm ³ / An

Tableau V. Mobilisation et l'exploitation des ressources hydrauliques au niveau de la Wilaya de Bejaia (ANDI, 2013).

L'exploitation des barrages :

- Le barrage de Kherrata :
 - Capacité initiale = 154 Hm³
 - Capacité actuelle = 102 Hm³
- Le barrage de Tichy-Haf (nouveau barrage) :
 - Capacité utile= 75 Hm³
 - Volume régularisé= 150 Hm³

Autres sources :

- 957 réservoirs avec une capacité de 171 015 m³ ;
- 07 retenues collinaires en exploitation avec capacité de 0,34 Hm³/An;
- 09 de retenues prévues en réhabilitation d'une capacité totale de 0,5 Hm³ /An;
- forages en exploitation d'un Volume exploité : 151 700 m³/j (AEP + Irrigation) ;
- 16 200 puits avec un Débit de 750 Litre l/s;
- sources captées avec un Débit de 880 l/s (ANDI, 2013).

II.1.7. Description des lieux de prélèvements

Notre zone d'étude se situe au niveau du versant Nord-Ouest de la région de Bejaia, plus précisément, le flan Ouest de la commune de Bejaia ainsi que la commune de Toudja jusqu'au littoral. Et selon la situation géographique des zones prospectées et la méthodologie suivie pour la réalisation de notre travail, nous avons divisé notre région d'étude en 3 zones bien distinctes :

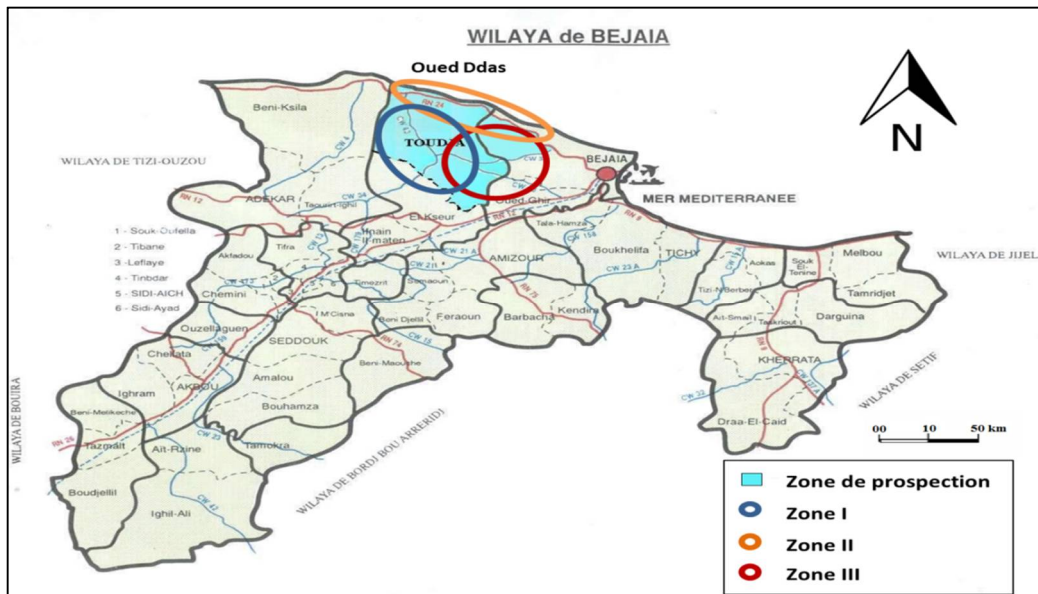


Figure 16. Les différentes zones de prospection.

- **Zone 1** : Le chef-lieu de la commune de Toudja et la région desservie par la W41 (route de Toudja à Oued Das) ;
- **Zone 2** : La littoral Ouest de Bejaia (de Bejaia à Oued Das) ;
- **Zone 3** : De la sortie de la ville de Bejaia à l'Ouest jusqu'à PK17 en empruntant la RN24 puis la W34. Les voies empruntées, la zone précise prospectée ainsi que certaines sources inventoriées sont illustrées dans la (Fig. 17).



Figure 17. Délimitation de la zone d'étude et illustrations de quelques sources analysée.

Sur toute cette superficie, nous avons pu dénombrer 36 sources sur lesquels les prélèvements ont eu lieu. Les paramètres physiques ont été mesuré in-situ sur chaque site.

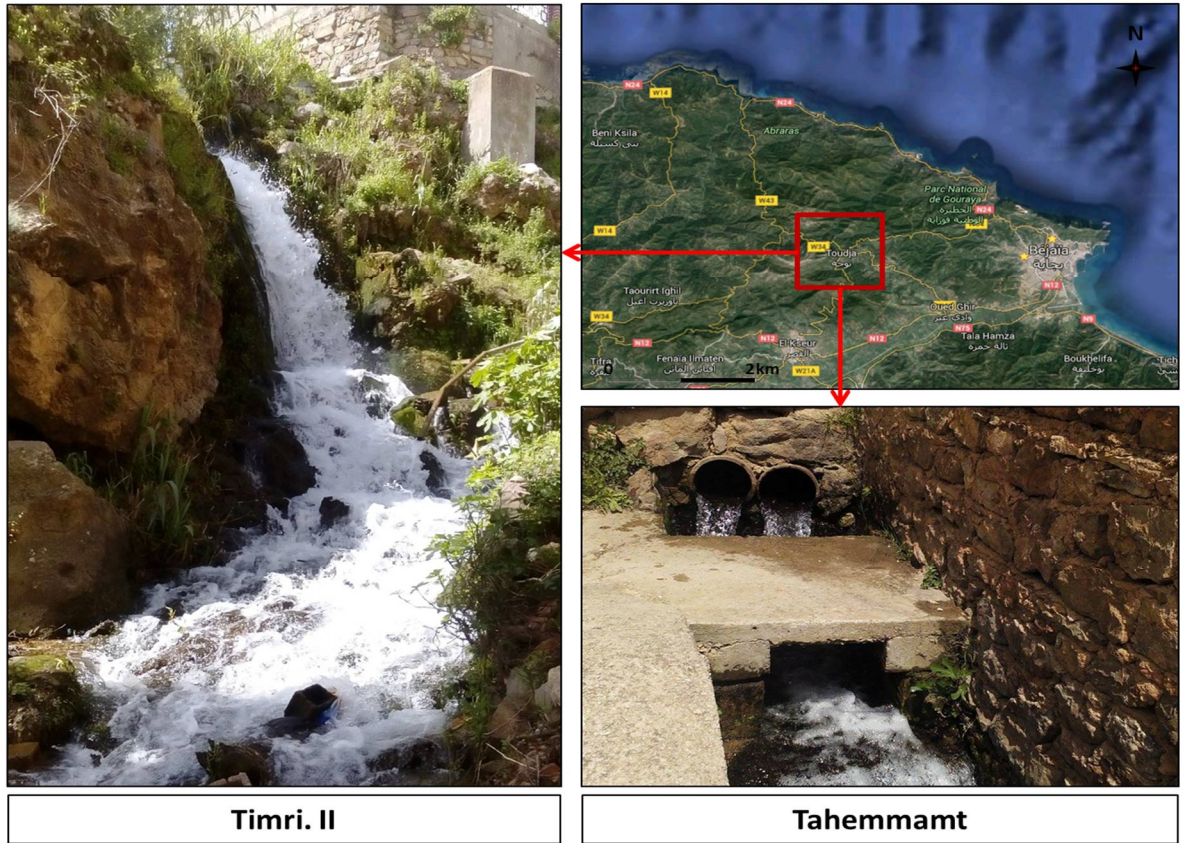


Figure 18. Illustrations de quelques sources karstiques au niveau de la région de Toudja (14/04/2016 – Original)

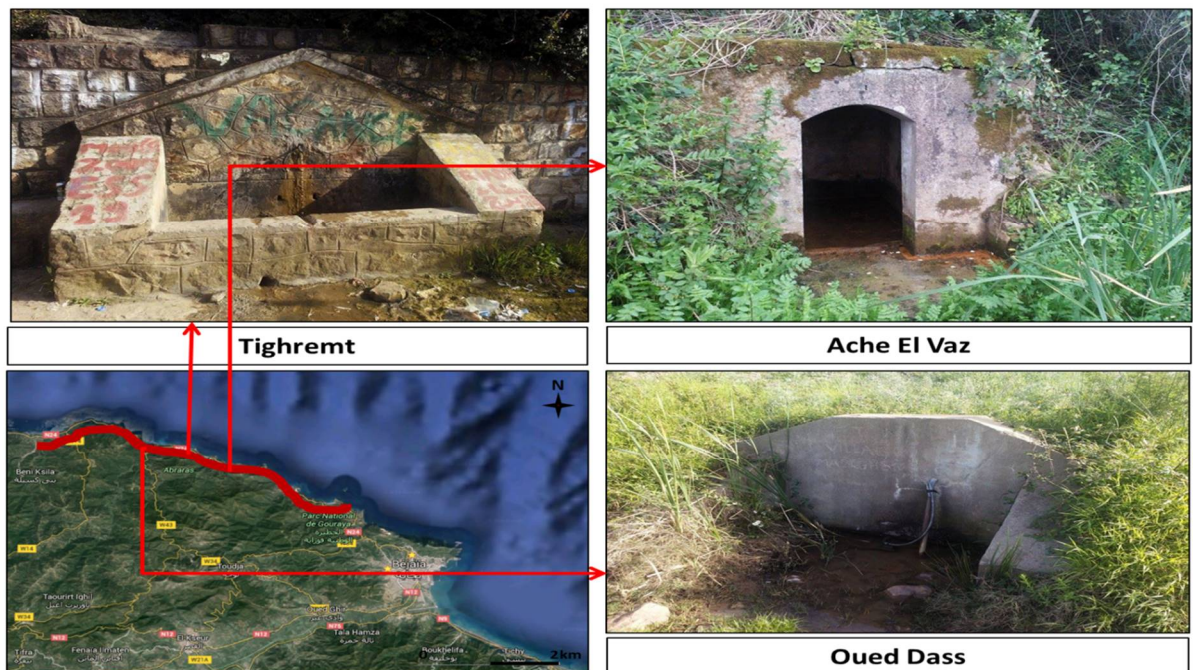


Figure 19. Illustrations de quelques sources karstiques au niveau du littoral Ouest de Bejaia (15/04/2016 – Original).

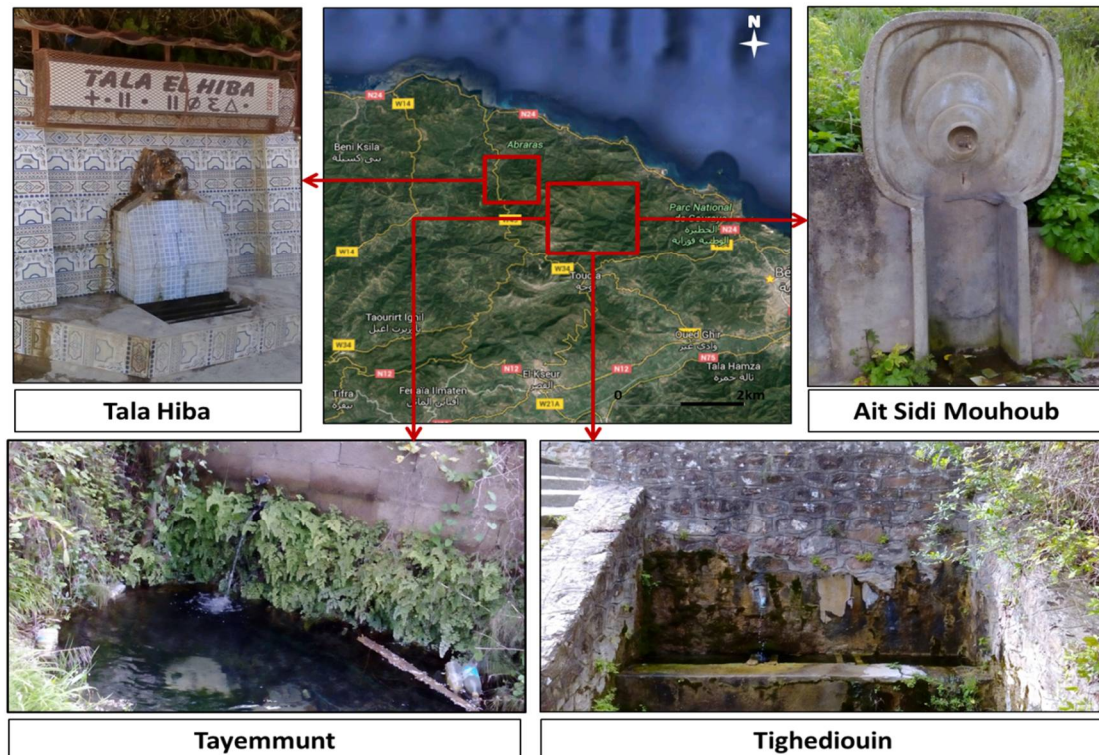


Figure 20. Illustrations de quelques sources karstiques au niveau la région PK17 et environs (21/03/2016 – Original).

II.2. La géolocalisation

II.2.1. 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.2.2. Outils de la géolocalisation

II.2.2.1. Présentation du GPS

Le système GPS (Global Positioning System) est un système basé sur une constellation de 24 satellites d'observation de la terre émettant en permanence des signaux datés vers le globe et sur un réseau de stations de surveillance de ces satellites au sol. Le GPS a pour rôle de fournir via un récepteur approprié des données spatio-temporelles (latitude, longitude, élévation,..) de navigation quel que soit la position géographique sur le globe terrestre. La

localisation est possible si au moins quatre satellites sont visibles avec la possibilité de déterminer quatre inconnues : les trois coordonnées spatiales, ainsi que le temps (Tatso, 2011).

II.2.2.2. Importation de données de GPS par satellite dans Google Earth

Google Earth est un excellent 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 36 sites relevés par le GPS, nous avons obtenu la carte ci-dessous :

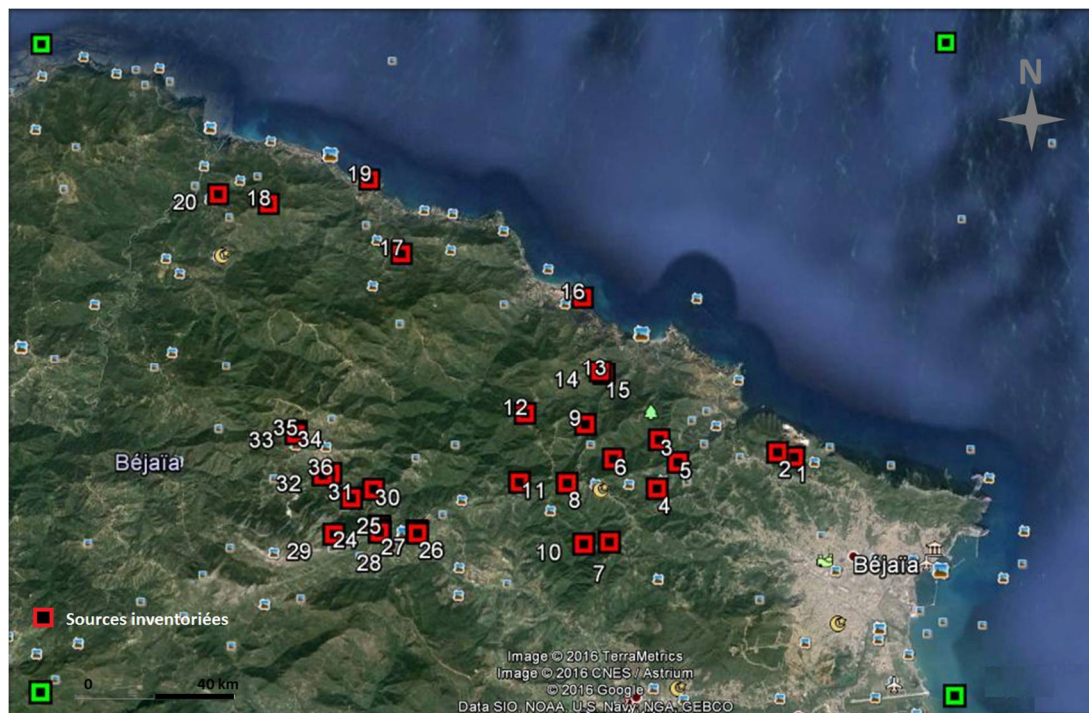


Figure 21. Insertion des données GPS sur Google Earth (1/400 000^e).

II.3. Présentation du SIG

II.3.1. Définition

Un SIG peut se définir comme un système informatique d'acquisition, de stockage, de gestion, d'analyse, de représentation et de mise à jour des données géo-référencées. Au sens large, le SIG comprend aussi bien l'ensemble des données géographiques numérisées relatives à une région, que le logiciel qui les manipule. Au sens restreint du terme, le SIG désigne le seul outil informatique utilisé (Didon, 1990).

Le SIG est une technologie relativement nouvelle apparue au début des années 1980 et a connu un développement rapide du fait de ses performances. Il constitue en fait un outil puissant d'aide à la prise de décision par la qualité et la rapidité des réponses qu'il fournit aux requêtes formulées par l'utilisateur. L'utilité du SIG dans le cadre de la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine a été discutée par Vassilos et al. (1996), Sakho (1998), Sinan (2000).

II.3.2. Fonctionnalités du SIG

Bien que les SIG soient adaptés à chacun des objectifs fixes, ils ont en commun des fonctionnalités que l'on retrouve dans chaque système, regroupées en 5 familles sous le terme des « 5A » comme le précise LONGLEY *et al.* (2005) :

- L'abstraction par des fonctions rendant compte de la modélisation de la réalité ;
- L'acquisition pour la collecte des données grâce à des fonctions de saisie des données sous forme numérique ;
- L'archivage grâce à un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) ;
- L'affichage pour la restitution des résultats par des fonctions de mise en forme et de visualisation ;
- L'analyse par des fonctions de manipulation, croisement et transformation des données spatiales au moyen de requêtes dans le SGBD et quelques fois ;
- L'anticipation (lorsqu' on parle de « 6A ») (Longley, 2005).

II.3.3. 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.3.4. MapInfo

D'après Wikipedia, MapInfo est un Système d'information géographique (SIG) à l'origine Bureautique créé dans les années 1980 aux États-Unis. C'est un logiciel qui permet de réaliser des cartes en format numérique. MapInfo est conçu autour d'un moteur d'édition de cartes qui permet la superposition de couches numériques. Il permet de représenter à l'aide d'un système de couches des informations géo-localisées : points, polygones, image raster ... Il incorpore un grand nombre de formats de données, de fonctions cartographiques et de gestion de données... Un système de requêtes cartographiques adapté permet la conception des cartes et bases de données cartographiques. MapInfo est ouvert vers le Web et les globes virtuels ; il

permet de publier sur le web des cartes réalisées sur un PC, de faire de la cartographie interactive, d'incorporer des informations des globes virtuels...

MapInfo est un logiciel destiné aux chargés d'étude et d'aménagement territorial, aux chargés d'études d'implantation, de géomarketing, aux analystes des réseaux physiques et commerciaux. (Wikipédia).

II.4. Echantillonnage

II.4.1. 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 ;
- Des flacons ;
- Un chronomètre ;
- Un récipient calibré ;
- Un appareil photo.



Figure 22. Matériel utilisé – Original.

Dans notre cas, nous avons utilisé un GPS d'une marque ELTREX (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. Pour chaque paramètre, il consiste à

tremper la sonde, dans le récipient de l'échantillon, laisse stabiliser un moment, puis noter les résultats.

II.4.2. Méthodes d'échantillonnage

Les mesures ont été effectuées sur des prélèvements au cours de la période allant de Mars à Mai 2016.

Les prélèvements sont effectués au niveau de 34 sources et 2 forages de la région Nord-Ouest de Bejaia.

La valeur de toute analyse dépend de la méthode d'échantillonnage utilisée. Pour cela, un maximum de soins et de précaution est exigé afin d'obtenir des résultats significatifs et exacts.

II.4.2.1. les informations à préciser au moment de l'échantillonnage

Les détails suivants sont précisés in-situ 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 ;
- La température de l'air ;
- 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.4.2.2. Mesure des débits par méthode captative ou volumétrique

La méthode capacitive, ou 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).

$$Q = V/t$$

Où :

- **Q**: Débit, exprimé en $m^3 s^{-1}$ dans le système international ;
- **V**: Volume (m^3) ;
- **t**: Temps (s).

II.4.3. Difficultés rencontrées sur le terrain

Vue 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.

Parmi les maintes difficultés, nous citons :

- L'immensité de la zone de prospection, qui nécessite une longue durée afin de pouvoir tout réaliser ;
- Un véhicule personnel est totalement indispensables afin d'accéder aux zones voulues ;
- Les longues distances, la complexité et la difficulté d'accès de la plupart des lieux non accessibles par transport ;
- L'isolement de la grande majorité des sites qui nécessite un accompagnateur ;
- Non connaissance des lieux exacts ou bien des situations précises des sources qui nous a valu une perte de temps ainsi que des ressources physiques et matériels considérables ;
- Etre tout le temps accompagné par des personnes connaissant parfaitement les lieux ;
- Difficultés pour avoir les coordonnées exactes de quelques sites cause de la densité de feuillage des lieux ;
- Avoir des autorisations d'accès de la part des personnes occupants les lieux de quelques sources privées ;
- Avoir un papier administratif pour accéder à certains endroits ou à quelques informations ;
- Mauvaise orientation de la part de certains organismes.

Malgré tous ces obstacles rencontrés, nous avons pu mener à bien notre travail et accomplir nos objectifs fixés au départ.

II.5. Méthodes d'analyses

II.5.1. Les paramètres physiques

Les paramètres physiques sont en relation avec la structure 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).

II.5.1.1. Température

La température de l'eau est un facteur écologique qui entraîne d'importantes répercussions écologiques (Leynaud, 1968).

Elle agit sur la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, ainsi que 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).

II.5.1.2. Potentiel d'Hydrogène :

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 (Meybeck et *al.*, 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 :

$$\text{pH} = \log[\text{H}^+]$$

log : Logarithme décimal

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

II.5.1.3. 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 a, 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 µS/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 µS/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).

II.5.1.4. Total des solides dissous :

Le TDS représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau incluent le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium qui sont tous des cations et des carbonates, nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates qui sont tous des anions. Les cations sont des ions chargés positivement et les anions sont des ions chargés négativement.

Ces minéraux peuvent provenir d'un certain nombre de source naturelle 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 dissouts 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.

La plupart des 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 :

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

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

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

II.5.1.5. Salinité

Salinité de l'eau ou minéralisation totale est la somme des ions dissous dans l'eau. Il existe un rapport direct entre la salinité totale et la conductivité de l'eau (Adam et al., 2003).

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).

II.5.2. 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 (Jenkins et Watts, 1968 ; Box et Jenkins, 1970 ; Mangin, 1984). 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.1. Elaboration de la carte de situation des différentes sources karstiques

III.1.1. Présentation du SIG des sites de prélèvement

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

- **Base de données spatiales**

Cette base est composée d'un document cartographiques digitalises directement sur l'écran de l'ordinateur à partir de documents préalablement existants. Il s'agit des documents :

- Carte de Localisation des Sites des Prélèvements, réalisée à partir de Google Earth
- Fonds topographiques au 1/400 000 ; carte topographique détaillée ;

- **Base de données thématiques**

Cette base de données repose sur un inventaire de 36 sources situées sur le versant Nord-Ouest de la région de Bejaia. Les informations ont été organisées et stockées dans le tableau VII Les données suivantes ont été classées par colonnes :

- Noms des sources ;
- Date des prélèvements ;
- Coordonnées : X, Y et Z ;
- Température de l'eau en °C ;
- pH de l'eau ;
- Conductivité de l'eau en $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Salinité de l'eau en g /l ;
- TDS de l'eau en mg/l ;
- Débit de quelque source en l/s.

Les données géographiques sont importées dans l'outil SIG MapInfo, à partir de la carte établie à l'aide du logiciel Google Earth (voir figure. II.21), qui va servir d'image Raster afin d'obtenir les coordonnées (X, Y) de chaque site. Puis vient la superposition d'information (image Raster – carte topographique). MapInfo procédera au croisement des données pour enfin obtenir la carte de géolocalisation des 36 sources (Fig. 23).

III.2. Interprétation des résultats d'analyse

III.2.1. Les paramètres physiques

III.2.1.1. Température

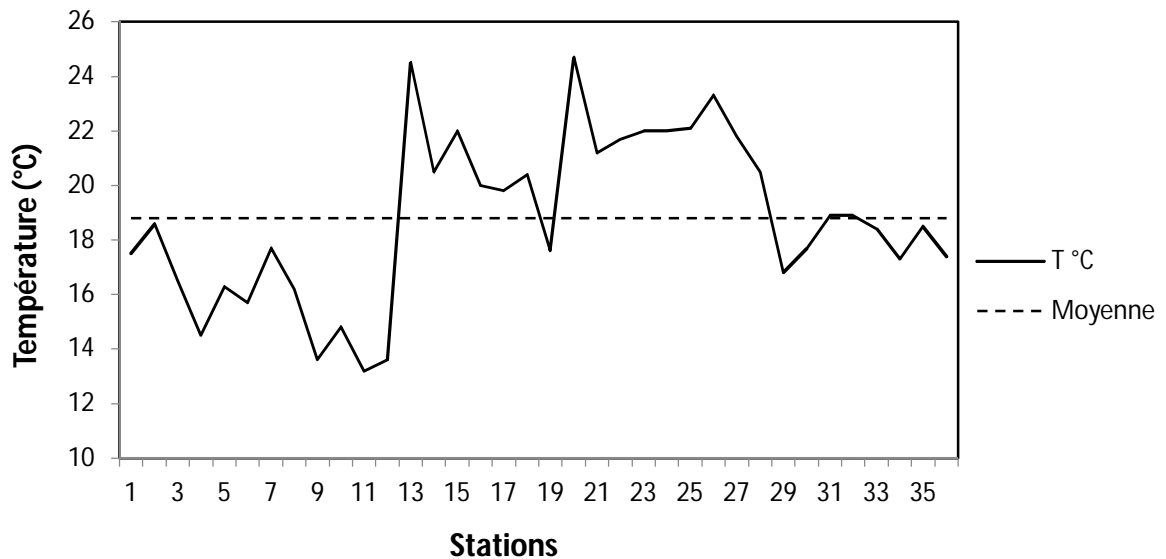


Figure 24. Variation spatiale de la température.

Lors des prélèvements des eaux souterraines, la valeur maximale des échantillons atteint 24.7°C au niveau de Oued Das, et la valeur minimale de 13.2°C est enregistrée au niveau d'un forage à Ibouchtawen (PK17). La moyenne est de 18.8°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 3.0.1 et 0.16, respectivement. Ces deux valeurs sont plus petites par rapport à la moyenne. La dispersion des valeurs de températures, autour de la moyenne, est très faible. Les températures mesurées sont toutes proches de la moyenne.

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. 61% des valeurs de températures mesurées sont inférieures aux normes de l'OMS, et le 39% restant varie entre 20 et 22.

III.2.1.2 Potentiel d'Hydrogène

Le potentiel d'hydrogène des eaux des sources analysées oscillent entre 5.53 et 8.18. La moyenne est de 7.96. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.83 et 0.10, respectivement. Ces deux valeurs sont en dessous de la moyenne. La dispersion des valeurs du pH, autour de la moyenne, est très faible. Les valeurs de pH mesurées tournent autour de la moyenne.

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS précise qu'un faible pH peut causer des problèmes de corrosion et un pH élevé entraîne des problèmes de gout. L'eau ne doit pas être agressive et indiquent comme niveau guide : $6 < \text{pH} < 8.5$. 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 un peut inférieur (environ 6).

Le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé (Dussart, 1966; Bermond et Vuichard, 1973). En régions granitiques, schisteuses ou forestières, les eaux ont un pH acide (<7). En régions calcaires, les eaux ont un pH basique (> 7) (Ali Abbou, 2014).

78% des valeurs enregistrées lors des prélèvements sont légèrement au-dessus de 7, ce qui donne à l'eau une nature carbonatée.

D'après la figure. 25 on constate que les valeurs obtenues ne dépassent pas les normes de l'OMS, sauf pour la source de « Tala Waaraven » au niveau de Tighremt qui a un pH au-dessous de la norme (5.53).

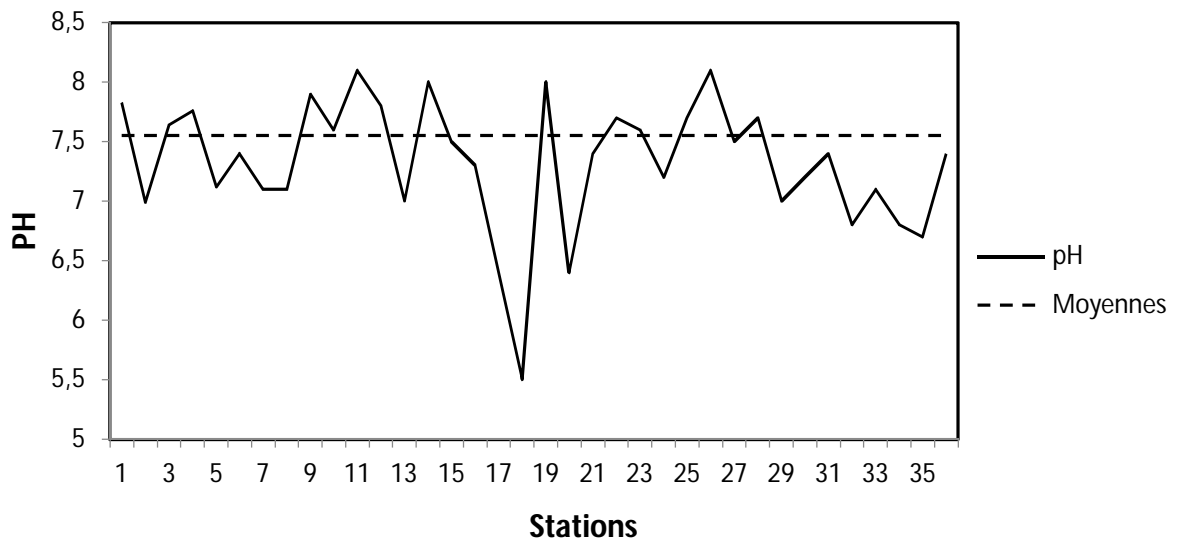


Figure 25. Variation spatiale du potentiel d'Hydrogène.

III.2.1.3. La conductivité électrique

Les conductivités mesurées montrent des valeurs qui varient entre 409 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1526 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La moyenne est de 751.36 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'écart type et le coefficient de variation sont de 275.71 et 0.36 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 toutes 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

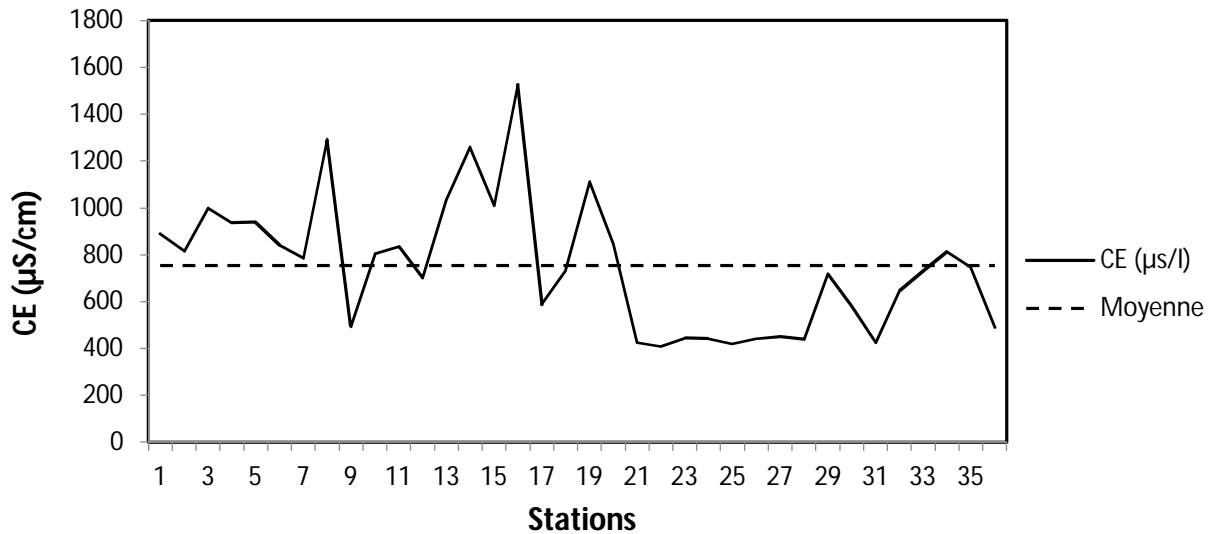


Figure 26. Variation spatiale de la conductivité électrique.

III.2.1.4. Total des solides dissous

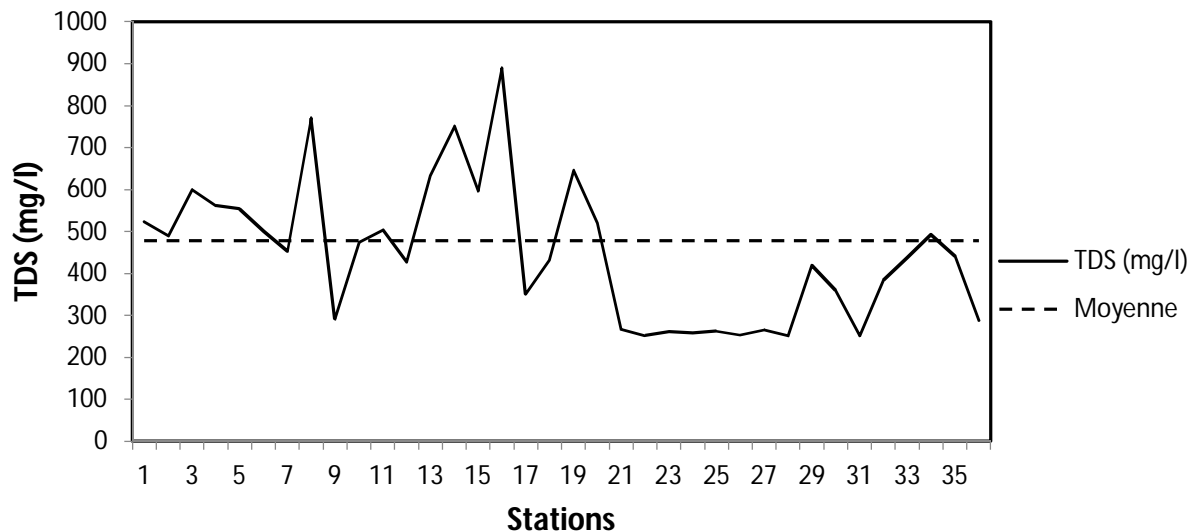


Figure 27. Variation spatiale Du TDS.

Le TDS des eaux de sources analysées oscille entre 251 mg/l et 889 mg/l. la moyenne est de 477.31 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 115.96 et 0.24 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 de TDS mesurées oscillent autour de la moyenne. L'OMS recommande une minéralisation inférieure à 600mg/l pour une eau destinée à la consommation humaine, au de la de 1200 mg/l, elle devient, sauf accoutumance, assez désagréable. Pour des considérations gustatives, une teneur limite de 1000 mg/l est fixée. Le total des solides dissous est en fonction de la géologie des roches traversées.

Noms des sources/sites	CLASSES DE TDS (mg/l)	Qualité de l'eau
- Zone I : El Ainser. 1 – Tahemmamt – Aawin - Timri. 2 - Timri. 3 - Aawin. 2 - El Ainser. 2 – Laâzib. 3 (Forage) – Samta ; - Zone III : Izeghran.	< 300	Excellente
- Zone I : Laâzib. 1 - Tala N'Bijou (Laâzib. 2) – Achelouf - Tala Hiba. 1 - Tala Hiba. 2 - Tala Hiba. 3 ; - Zone II : Ache-El-Vaz. 2 – Tighzerth - Tala Waaraven (Tighremt) - Oued Das ; - Zone III : Haboura (Ighil El- Bordj) – Oussama - Iyer Wacif. 2 - Iyer Wacif. 3 – Isumar – Tayemmunt - Ait Sidi El-Mouhoub - Ibuchtawen (forage) - Bouziadi (Ibouchtawen) (Zone III).	300 - 600	Bien
- Zone II : Imesmuden - Ache-El-Vaz. 1 - Tala Yilef - Tighremt. 2 ; - Zone III : Tabikoust (Iyer Wacif) – Tigheddiwin.	600 - 900	Passable

Tableau VIII : Qualité des eaux de sources analysée conformément aux normes de l'OMS.

III.2.1.5. Salinité

Les valeurs obtenues lors des prélèvements varient entre 202 et 758 g/l. La moyenne est de 369.4 g/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 133.4 et 0.36. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. Les valeurs de salinité mesurées pour les sources analysées sont toutes proches de la moyenne. Elles ne sont pas très variables entre elles.

Ces valeurs sont supérieures à la norme de l'OMS qui est de 50 g/l. Cette salinité est probablement liée à la libération des ions des sédiments ou à la concentration des sels dissous.

- **Infiltration d'eau de mer dans les milieux continus**

Dans les aquifères côtiers, les rapports entre l'eau douce et l'eau salée sont très particuliers. Il existe des phénomènes d'intrusion d'eau de mer dans ces aquifères, mais aussi des sorties d'eau douce ou saumâtre au niveau ou parfois sous le niveau de la mer. L'intrusion saline est en général assez difficile à préciser, puisqu'elle peut avoir des origines diffuses ou localisées (Fleury, 2005).

D'après la figure 28, on constate que les valeurs de salinité enregistrées à partir de la station 21 jusqu'à la station 36, qui se situent au niveau de la commune de Toudja sont, sans exception au-dessous de la moyenne, avec une baisse considérable au niveau du Chef- lieu de

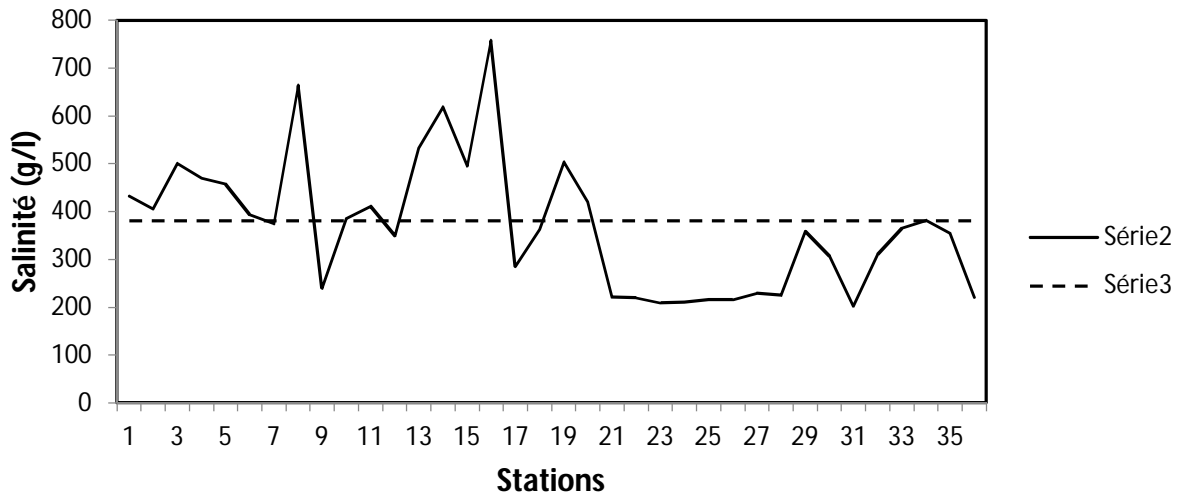


Figure 28. Variation spatiale de la salinité.

Toudja (stations 21 à 28). Ces valeurs assez faibles sont traduites par leur éloignement du littoral, contrairement aux valeurs de la salinité obtenues au niveau de la région côtière, qui sont près ou au-dessus de la moyenne. Ce qui expliquerait l'intrusion saline au niveau des sources côtières par l'eau de mer, excepté pour la source N°9 (Izeghrane) dont la valeur présente une anomalie (Salinité au-dessous de la moyenne).

III.2.2. Corrélations entre les paramètres physiques

III.2.2.1. Température et potentiel d'Hydrogène

D'après la représentation graphique du pH en fonction de la température, on distingue un nuage de points très dispersés. Le coefficient de détermination R^2 est faible ($R^2 = 0,0573$). 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.

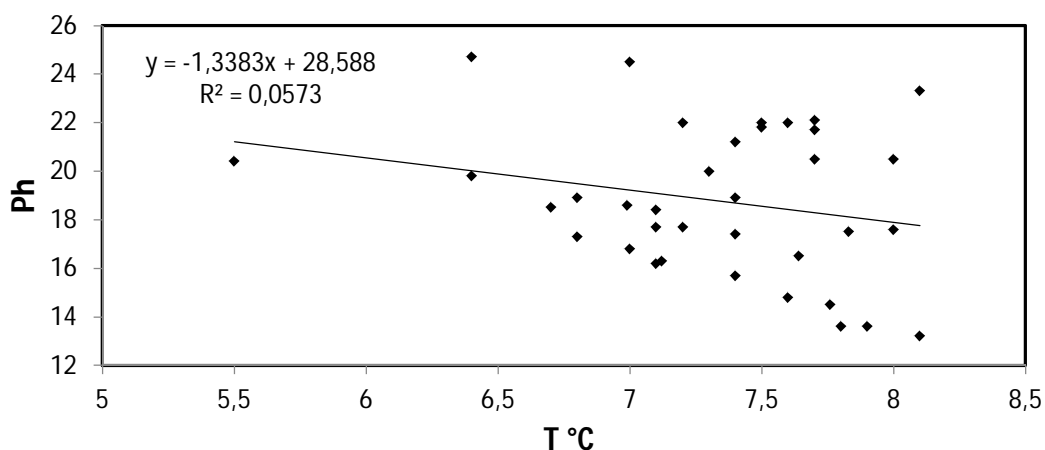


Figure 29. Courbe de régression du pH en fonction de la température.

III.2.2.2. Conductivité électrique et salinité

La figure 30 montre que les points s'ajustent bien autour de la droite de régression. Le coefficient de de détermination R^2 est très fort ($R^2 = 0.9901$). Ce qui explique une très bonne liaison entre ces deux paramètres. La conductivité électrique influe sur la salinité.

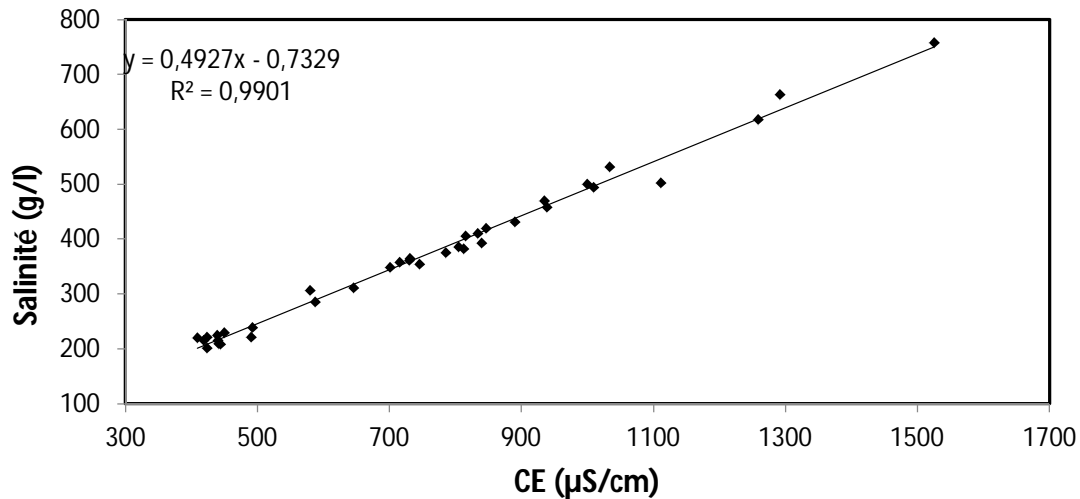


Figure 30. Courbe de régression de la salinité en fonction de la conductivité électrique.

III.2.2.3. TDS et température

D'après la représentation graphique du TDS en fonction de la température, on distingue un nuage de points dispersés autour de la droite, il n'a aucune forme particulière. Le coefficient de de détermination R^2 est faible ($R^2 = 0.0365$). Ce qui explique l'absence de relation entre ces deux éléments. Les variations de température n'influent pas sur le Total des Solides Dissous.

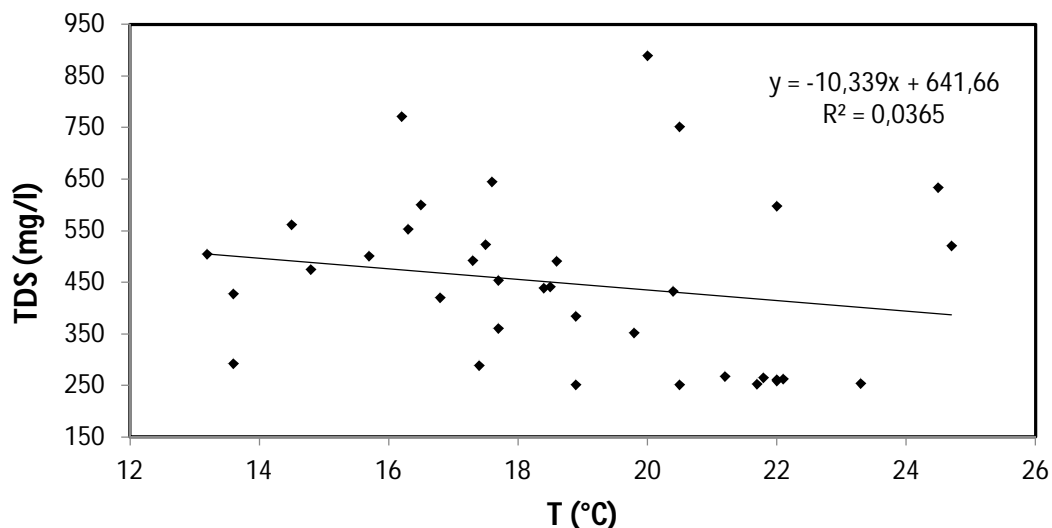


Figure 31. Courbe de régression du TDS en fonction de la température

III.2.2.4. Conductivité électrique et le potentiel d'Hydrogène

La corrélation graphique de la conductivité électrique en fonction du pH (fig. 32) montre que les points sont dispersés autour de la droite de régression et le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0007$) est très faible, ce qui explique une absence totale de corrélation entre la conductivité électrique en fonction du pH. Les variations de pH n'influent pas sur les variations de la conductivité électrique. Aucune relation n'existe entre ces deux paramètres.

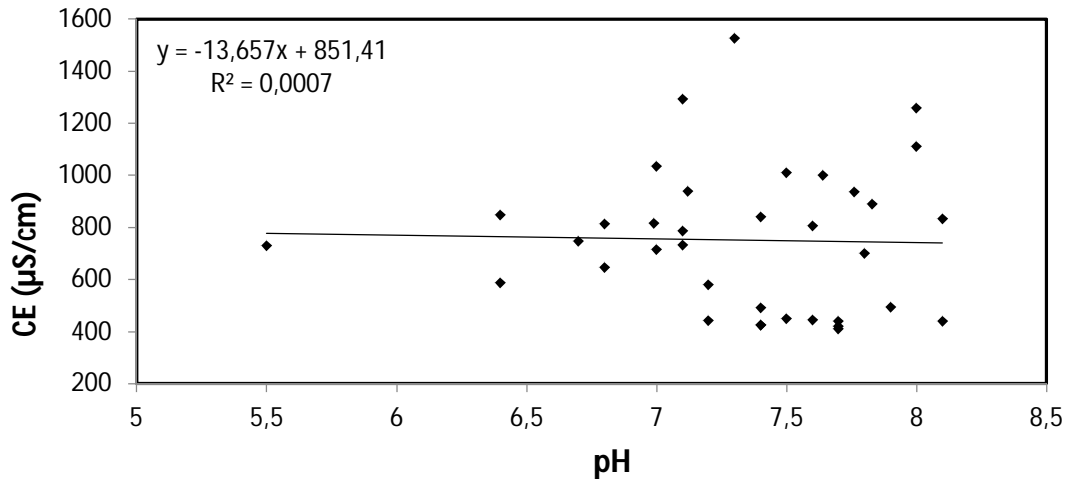


Figure 32. Courbe de régression de la conductivité électrique en fonction du pH.

III.2.2.5. Total des solides dissous et salinité

La figure 33 montre que plus le TDS augmente, plus la salinité augmente et le coefficient de détermination R^2 est très proche de 1 ($R^2 = 0,9929$). La variation du TDS influe sur les variations de la salinité, les points sont répartis autour de la droite de régression. Ils ne sont pas dispersés. Ce qui explique une bonne relation.

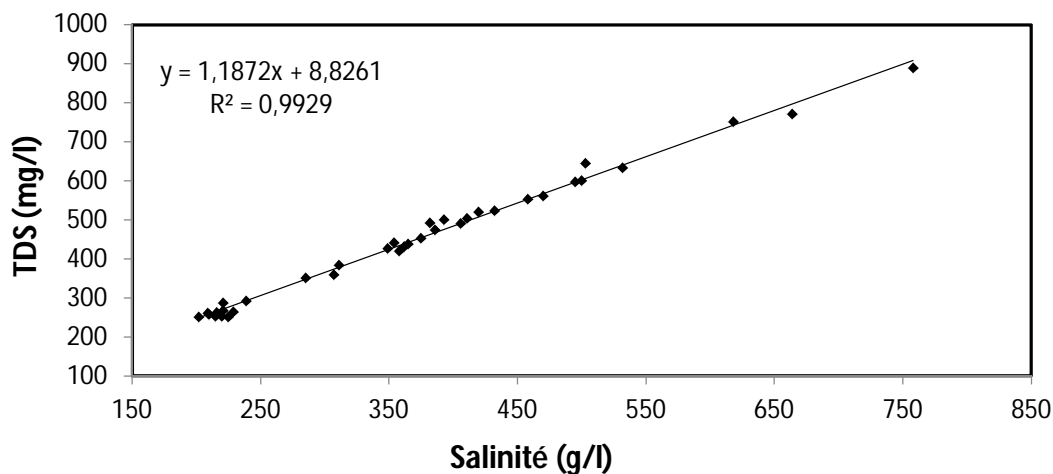


Figure 33. Courbe de régression du TDS en fonction de la salinité.

III.2.2.6. Total des solides dissous et conductivité électrique

Le graphe du TDS en fonction de CE (Figure 34) montre que plus le TDS augmente plus la conductivité électrique augmente. Le coefficient de détermination R^2 est très proche de 1 ($R^2=0.9972$). Il y'a une bonne relation entre ces deux éléments. La variation de TDS influe sur les variations de la CE. Les points sont bien répartis autour de la droite.

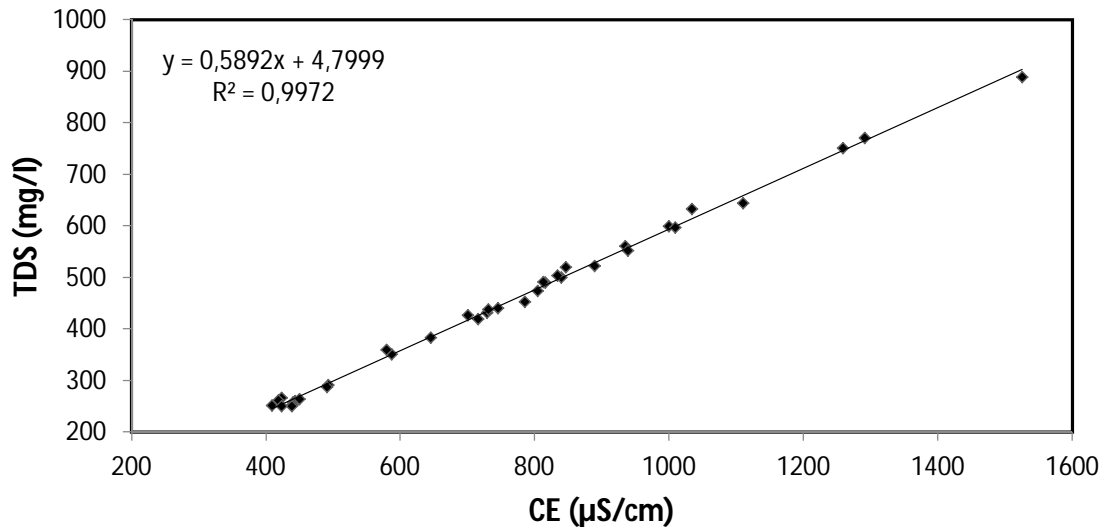


Figure 34. Courbe de régression du TDS en fonction de la conductivité électrique.

III.3. Procédure de mesure des débits

III.3.1. Introduction

Les sources sont caractérisées par des débits différents et variables. La mesure de débit nous permet de déduire le niveau d'importance de chaque source. Nous avons donc procédé à la détermination de ce paramètre pour les 36 sources analysées.

III.3.2. Interprétation des résultats

Le débit des eaux a été mesuré de la même manière pour la totalité des sources (méthode volumétrique) qui consiste à mesurer le temps de remplissage d'un récipient d'un volume connu, et d'en déduire le débit selon l'équation ci-dessous :

$$Q = V / t$$

Avec :

- Q : est le d' débit, exprimé en m^3s^{-1} dans le système international ;
- V : le volume (m^3) ;
- t : le temps (s).

Le model de récipient a été choisit selon le débit de chaque source, pour cela nous avons utilisé trois sortes de formats :

- Très faible débit : Récipient de 0.5 l ;
- Faible débit : Récipient de 1.5 l ;

- Débit moyen : Récipient de 5 l;
- Fort débit : Récipient de 20 l.

Les valeurs obtenues lors des mesures de débit varient entre 0.01 l/s et 1 l/s. La moyenne est de 0.16 l/s. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.22 et 1.37 Ces deux valeurs sont plus 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.

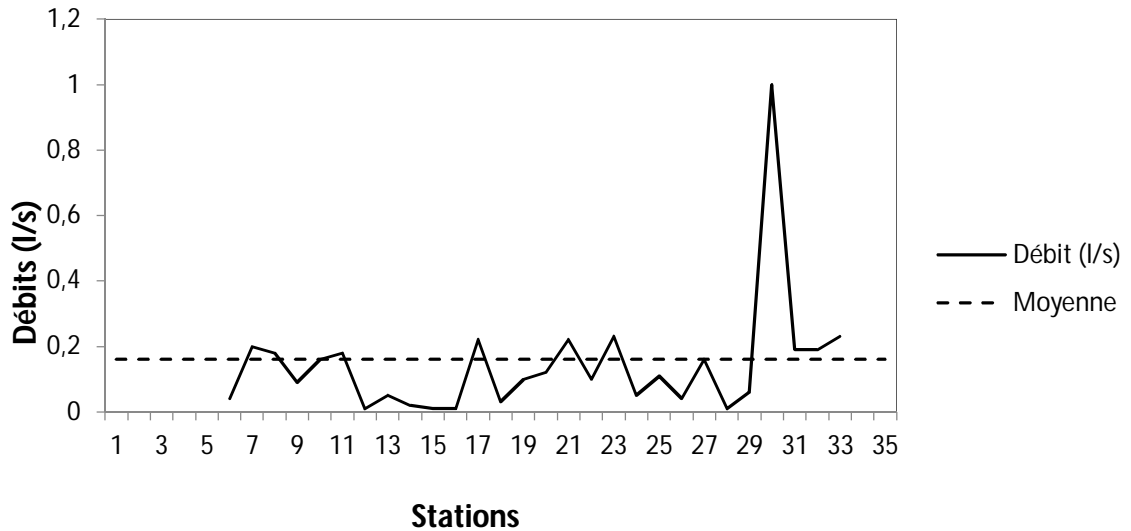


Figure 35. Variation spatiale du débit.

Selon les résultats obtenus par la mesure de débit (Tableaux IX), on peut distinguer des sources importantes et d'autres moins importantes. La source la plus importante (31) a été aménagée en forage vu l'intensité de son débit. D'autres sources moins importantes (9 – 15 – 29) ont des valeurs de débits faussées par le détournement de leur eau (exploitation par des particuliers). Quelques exemples sont cités ci-dessous :

Exemples	Classes de débit (l/s)	Caractéristiques
Ighil El Bordj - Ach El Vaz. 1 – El Ainseur. 2	< 0.1	Moins importantes (secs en été)
Samta – Tala Hiba. 2 – Tala Waaraven	> 0.1	Plus importante (courantes en été)

Tableau IX. Classement de quelques sources selon leurs débits.

Tableaux VII. Résultats d'analyse des eaux de sources et calcul des statistiques descriptives

Nbre	Nom des sources	Date de prélèvement	X (°)	Y (°)	Z (m)	T°C	pH	CE (µs/l)	Salinité (g/l)	TDS (mg/l)	Débit (l/s)
1.	Haboura (Ighil El- Bordj)	15/04	N36°46'.444"	E004°02'.758"	88	17.5	7.83	890	432	523	0.03
2.	Oussama	26/04	N36°46'.489"	E004°01'.455"	256	18.6	6.99	816	406	490	-
3.	Tabikoust (I. Wacif)	21/03	N36°46'.577"	E004°59'.861"	233	16.5	7.64	1000	500	600	0.10
4.	Iyer Wacif. 2	21/03	N36°46'.615"	E004°59'.758"	195	14.5	7.76	935	470	561	-
5.	Iyer Wacif. 3	21/03	N36°46'.345"	E004°59'.341"	214	16.3	7.12	939	458	553	-
6.	Isumar	21/03	N36°46'.355"	E004°58'.880"	338	15.7	7.40	840	393	500	0.04
7.	Tayemmunt	21/03	N36°45'.897"	E004°58'.736"	326	17.7	7.14	786	375	453	0.20
8.	Tigheddiwin	21/03	N36°46'.838"	E004°57'.920"	343	16.2	7.07	1292	664	771	0.18
9.	Izeghran	21/03	N36°47'.111"	E004°57'.304"	306	13.6	7.93	493	239	292	0.09
10.	Ait Sidi El-Mouhoub	21/03	N36°45'.606"	E004°57'.520"	276	14.8	7.63	805	386	474	0.16
11.	Ibuchtawen (forage)	21/03	N36°46'.754"	E004°56'.664"	543	13.2	8.18	834	411	504	1.00
12.	Bouziadi (Ibouchtawen)	21/03	N36°47'.203"	E004°56'.997"	452	13.6	7.83	701	349	427	0.18
13.	Imesmuden	15/04	N36°48'.621"	E004°57'.530"	214	24.5	7.00	1034	532	633	0.01
14.	Ache-El-Vaz. 1	15/04	N36°48'.846"	E004°57'.473"	127	20.5	7.97	1259	618	751	0.05
15.	Ache-El-Vaz. 2	15/04	N36°48'.615"	E004°57'.521"	225	22	7.46	1010	495	597	0.02
16.	Tala Yilef	15/04	N36°49'.288"	E004°57'.201"	37	20	7.29	1526	758	889	0.01
17.	Tighzerth	15/04	N36°50'.992"	E004°53'.124"	43	19.8	6.36	588	285	351	0.01
18.	Tala Waaraven (Tighremt)	15/04	N36°52'.001"	E004°50'.680"	69	20.4	5.53	730	362	432	0.22
19.	Tighremt. 2	15/04	N36°51'.318"	E004°52'.218"	21	17.6	8.02	1111	503	645	0.03
20.	Oued Das	15/14	N36°51'.896"	E004°48'.568"	39	24.7	6.38	847	420	520	0.10
21.	El Ainser. 1 (Toudja)	17/04	N36°45'.164"	E004°53'.702"	318	21.2	7.37	424	221	267	0.12
22.	Tahemmamt	17/04	N36°45'.168"	E004°53'.678"	363	21.7	7.73	409	220	252	0.22
23.	Aawin	17/04	N36°45'.133"	E004°53'.559"	388	22	7.58	444	209	261	0.10
24.	Timri. 2	17/04	N36°45'.111"	E004°53'.743"	364	22	7.23	441	210	258	0.23
25.	Timri. 3	17/04	N36°45'.103"	E004°53'.733"	362	22.1	7.73	419	216	262	0.05
26.	Aawin. 2	17/04	N36°45'.108"	E004°53'.569"	380	23.3	8.17	440	215	253	0.11
27.	El Ainser. 2	11/04	N36°45'.128"	E004°53'.722"	336	21.8	7.75	450	229	265	0.04

28.	El Quaâ n'timri	11/04	N36°45'.112"	E004°53'.731"	316	20.5	7.73	439	225	251	0.16
29.	Laâzib. 1	26/04	N36°45'.654"	E004°52'.808"	498	16.8	6.98	716	358	420	0.01
30.	Tala N'Bijou (Laâzib. 2)	26/04	N36°45'.546"	E004°52'.558"	487	17.7	7.17	580	307	360	0.06
31.	Laâzib. 3 (Forage)	26/04	N36°45'.444"	E004°52'.277"	491	18.9	7.45	424	202	251	1.00
32.	Achelouf	26/04	N36°46'.721"	E004°51'.482"	572	18.9	6.77	646	311	384	0.19
33.	Tala Hiba. 1	26/04	N36°46'.518"	E004°51'.848"	497	18.4	7.10	731	365	438	0.19
34.	Tala Hiba. 2	26/04	N36°46'.526"	E004°51'.837"	504	17.3	6.83	813	382	492	0.23
35.	Tala Hiba. 3	26/04	N36°46'.496"	E004°51'.858"	508	18.5	6.74	746	354	441	-
36.	Samta	26/04	N36°46'.960"	E004°51'.584"	619	17.4	7.40	491	221	288	0.11
Maximum						24.7	8.18	1526	758	889	1.00
Minimum						13.2	5.53	409	202	251	0.01
Moyenne						18.8	7.96	751.36	369.47	477.31	0.16
Ecart-type						3.01	0.83	275.71	133.82	115.96	0.22
CV						0.16	0.10	0.36	0.36	0.24	1.37

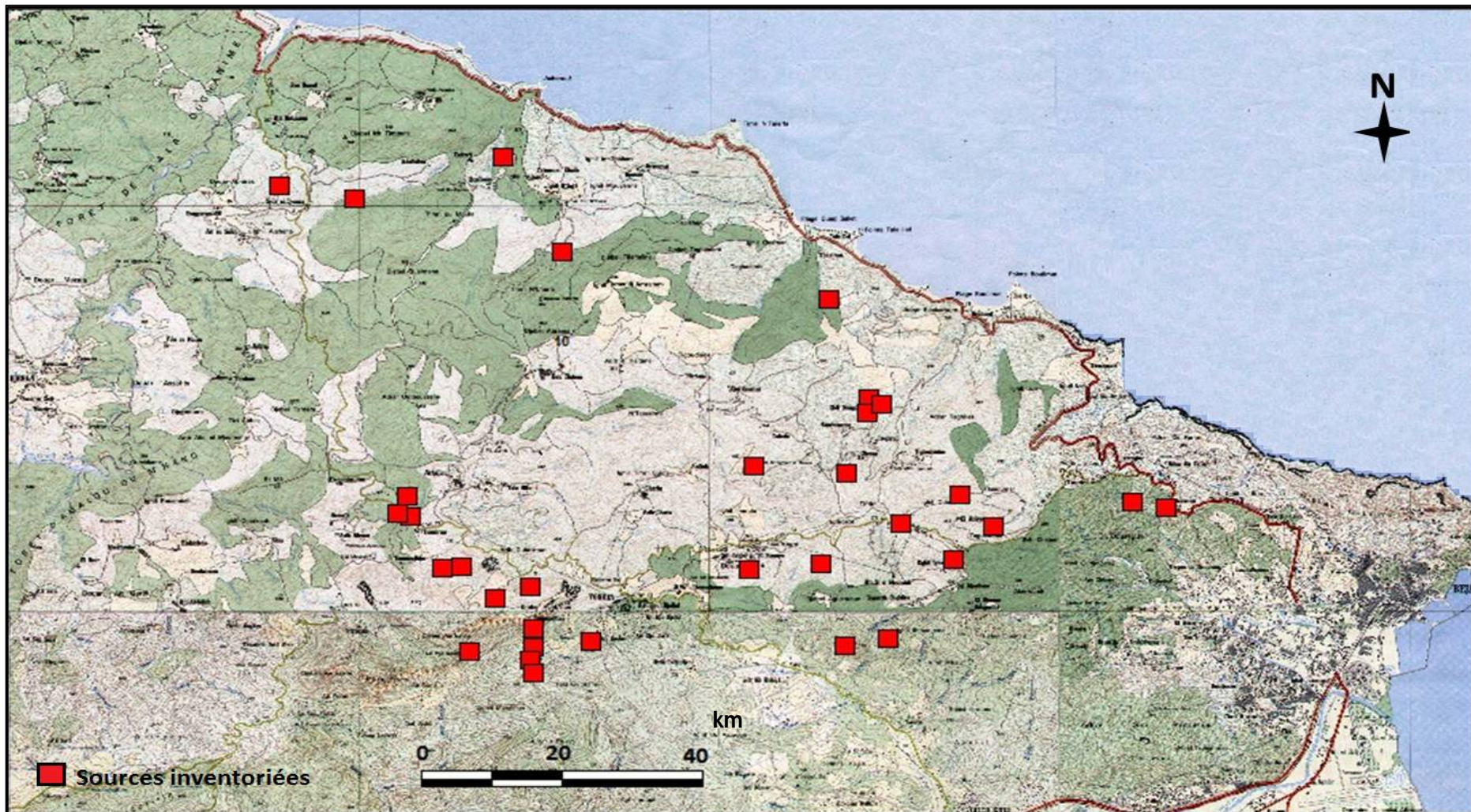


Figure 23. Carte de géolocalisation des sites de prélèvement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les eaux karstiques contribuent pour une large part à l'approvisionnement en eau de la population dans le monde en général, et dans la Wilaya de Bejaia en particulier. Ce travail visait à effectuer un inventaire des sources souterraines karstiques du versant Nord-Ouest de la région de Bejaia, les localiser et mesurer les caractéristiques physiques de leurs eaux (température, potentiel d'hydrogène, conductivité électrique, total des solides dissous et salinité).

Après avoir localisé les sources souterraines grâce à un GPS, nous avons pu élaborer la cartographie des sites des prélèvements en utilisant un système d'information géographique via le logiciel MapInfo.

Nous avons pu dénombrer trente-six sources souterraines localisées au niveau de trois zones différentes :

- Entre la commune de Bejaia à l'Ouest jusqu'à PK17 ;
- La littoral Ouest de Bejaia (de Bejaia à Oued Das) ;
- Le massif montagneux allant de Toudja jusqu'au littoral de la mer Méditerranée.

La mesure de cinq paramètres physiques des eaux de ces sources a donné les résultats suivants :

- La température des eaux de ces sources varie entre 13.2°C et 24.7°C. La moyenne est de 18.8°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 3.01 et 0.16, respectivement. Ces résultats sont conformes aux normes algériennes et de l'OMS.
- Le potentiel d'hydrogène oscille entre 5.53 et 8.18. La moyenne est de 7.96°C. Ces deux valeurs sont en dessous de la moyenne. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.83 et 0.10, respectivement.
- La conductivité électrique est comprise entre 409 et 1526 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La moyenne est de 751.36 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'écart type et le coefficient de variation sont de 275.71 et 0.36 respectivement. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées sont toutes proches de la moyenne et conformes aux normes.
- La salinité varie entre 202 et 758 g/l. La moyenne est de 369.47 g/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 133.82 et 0.36. 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 251 et 889 mg/l. La moyenne est de 477.31 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 115.96 et 0.24 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 1 l/s. La moyenne est de 0.16 l/s, l'écart type et le coefficient de variation sont de 0.22 l/s et 1.37 l/s respectivement.

La régression établit entre les paramètres physiques mesurés montre une bonne liaison entre la salinité, la conductivité électrique et le TDS. Pour les autres paramètres (T°/TDS, pH/CE), le coefficient de détermination est faible. Ce qui traduit la faible liaison entre eux.

Après avoir obtenue les résultats d'analyse des paramètres physiques de chaque source, nous avons procédé à l'évaluation des variations spatiale de ces paramètres, ainsi nous avons pu constater une large différence des valeurs enregistrées entre la commune de Toudja et le littoral. Ce qui expliquerait une influence de l'eau de mer sur les eaux souterraines.

Enfin, nos résultats nous ont permis de nous renseigner sur la qualité des eaux de sources analysées d'un point de vue physique: l'eau souterraine de cette région possède de bonnes caractéristiques physiques. Nous pouvons donc déduire que cette eau est bonne pour la consommation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **ADAM, P., & Baptiste, P. (2003).** Hydrogéologie & forage d'eau. In *Agua Segura y Ambiente Sano, Impulsadores del Progreso* (pp. 1-16). AIDIS.
- **ADE, (2008).** Etude de diagnostic et de réhabilitation des systèmes d'alimentation en eau potable des villes de Bejaia, Tizi Ouzou et Chlef, 230p.
- **Ali Abbou, S. (2014).** Caractéristique physico-chimiques des eaux embouteillées algérienne et vérification d'étiquetage. Mémoire master université Mohamed Boudiaf, Oran, 66p.
- **Amraoui, F. (2005).** Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du lias de la plaine du saïs et du causse moyen atlasique tabulaire (Maroc), thèse de doctorat, Univ. D'USTL-Montpellier, France, 249p.
- **ANDI, (2013).** Agence Nationale du Développement et de l'Investissement, Invest in Algeria, Wilaya de Bejaia, 28p.
- **Baali, F. (2007).** Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi-aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien, thèse de doctorat Univ. D'Annaba, 152p.
- **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. (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.01
- **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
- **Benseghir, A. (2006).** Contribution à l'étude de l'état nutritionnel par la méthode du diagnostic foliaire de trois variétés d'abricotier (*Prunus armeniaca* L.) en zone aride (commune de Doucen-w. Biskra). Mém. Ing. Agro., Univ. Biskra, 92p.
- **Bonnin, J. (1984).** L'eau dans l'Antiquité. L'hydraulique avant notre ère. Coll. Direction des études et recherches d'Electricité de France, Paris: Eyrolles. 451 p.
- **Box , G.P. et Jenkins G.M. (1970).** *Time series analysis, forecasting and control*. Ed. Holden Day, San Francisco ; 553 p.
- **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.
- **Charmoille, A. (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.
- **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).** Systèmes 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 la Vallée de l'Oued Sahel-Soummam. Annuaire Statistiques de la Wilaya 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. & Zwahlen, F. (1997).** EPIK Méthode de cartographie de la vulnérabilités aquifères karstiques pour la délimitation des zones de protection. Proceedings of the international congress of speleology. La chaux defonds Switzerland 10-17 August 1997. 6ème conf. Hydrologie et milieux fissurés p : 209.
- **Dörfliger, N. Jauffret D., Loubier S. (2004).** Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche Comté, avec la collaboration de V. Petit, rapport BRGM RP-53576-FR, 121 pages.
- **Dörfliger, N. Pinault, J.L., Petit, V. Jauffret, D. (2004).** Systèmes karstiques et crues du doubs, méthodologie de détermination de la contribution des systèmes karstiques aux écoulements de surface, hors crues et des étiages, Montpellier, France, 185p.
- **Drew, D. & Hotzl H. (1999a).** Conservation of karst terrains and karst waters: the future – In: DREW, D. & HÖTZL, H. [eds.] (1999): Karst Hydrogeology and Human Activities. Impacts, Consequences and Implications. – International Contributions to hydrogeology (IAH), 20: 275-280 p.; Rotterdam/Brookfield (Balkema).
- **Droque, C. (1996).** Groundwater discharge and freshwater saline water exchange in karstic coastal zone. In: R.W. Buddemeier (Ed.), Groundwater discharge in the coastal zone. LOICZ, Moscou, pp. 37-43.
- **DSPW, (2013).** Annuaire Statistiques Wilaya de Bejaia, 203p.
- **Duplan, L. (1952).** Monographies Régionales : la Région de Bougie, 1ère série, Algérie N°17.p. 20.
- **FEPS, Fondation de l'Eau Potable Sûr (2008).** Le Bulletin FEPS de Nouvelles pour les jeunes - volume 1, Numéro 8. p. 06.
- **Fleury, P. (2005).** Sources sous-marines et aquiferes karstiques côtiers mediterraneens. Fonctionnement et caractérisation. environmental sciences. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 288p.
- **Ford D.C. et Williams P. (1989).** Karst geomorphology and hydrology. London Unwin Hyman 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 algérien Mémoire 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 university of Karlsruhe; 236p.
- **Hauet, A. (2009).** Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle 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.
- **Kaid Rassou, K. (2009).** Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 224p.
- **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. Ministère de l'agriculture, 224-881.
- **Longley, P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., & Rhind D.W. (2005).** *Geographical Information System: Principles, Techniques; Management and Applications* (abridged edition). Hoboken, N.J.: Wiley, 29(1), 3-14.
- **Mangin, A. (1975).** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Annales de spéléologie*: 283-329.
- **Mangin, A. (1984).** *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales*. *Journal of Hydrology*, 67: p. 25-43.
- **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).
- **Martel, E.A. (1921).** *Nouveau traité des eaux souterraines*, Paris: O. Doin. 838 p.
- **Medaouri M., Aïdi, C., Bracène R., Yelles-Chaouche A., Ouabadi A., et Déverchère J. (2010).** Double vergence des structures de la marge algérienne dans la région de Bejaïa, résumé étendu, Geomag : first congress on the Maghreb Geology, November 10-12, Tlemcen, Algeria. p. 03.
- **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 sous-marines 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).
- **Nordon, M. (1991).** Histoire de l'hydraulique. L'eau conquise. Les origines et le monde antique, Paris: Masson. 181 p.
- **O.M.S. (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.
- **Palmer, A.N. (2003).** Dynamics of cave development by allogenic water. *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 la géochimie des eaux. Thèse, Université de Montpellier II, Montpellier, 372 p.

- **Ramade, F. (1998)**. Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau : biogéochimie et écologie des eaux continentales et littorales. Edition science internationale, 785p.
- **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.
- **Rekacewicz, P. (2008)**. World Resources Institute (WRI), United Nations Environment Programme Le Monde diplomatique : English edition, FAO, Nations unies, 28p.
- **Rousseau, R. (1907)**. Dans la basse vallée de l'Oued sahel [Notes sur les Mezaïas, les Toudja et les Beni Ourlis]. In: *Annales de Géographie*. t. 16, n°86. Nbr. P. 10.
- **Rodier J., Legube B., Merlet N. et coll. (2009)**. *L'Analyse de l'eau*. DUNOD. 9ème édition. Paris. p. 1579.
- **Sakho, M. A. (1998)**. Système d'information géographique (SIG), l'hydrologie et la gestion des ressources en eau, 40p.
- **Seltzer, p. (1946)**. Le climat d'Algérie. Inst. Méd. Phys. Du globe de l'Univ. D'Alger, 129p.
- **Sinan, M. (2000)**. Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique: Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Doctorat d'état, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc, 372p.
- **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 Environment problems of karst terranes and their solutions, Mendip Hills, England, pp. 59-87.
- **Station Office National Météorologique de Bejaia. (2015)**. La répartition des précipitations moyennes mensuelles en mm période 1978-2014. p.3.
- **Tatso, R. P. (2011)**. Intégration d'un observatoire urbain sur Google Maps: Cas des infrastructures de la santé de la ville de Douala Cameroun, Thèse de doctorat, Académie Internet, 78p.
- **UNESCO, (2006)**. The 2nd UN World Water Development Report: « Water a shared responsibility ». Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), New York: Berghahn Books. Chap. 4: The State of Resource 15p.
- **Vassilios A. T., Rizwan H., (1996)**. Use of Geographic Information System (GIS). in *Water Resources : A Review*. Water Resources Management, n 10, pour. 251-277
- **Water, U.N. (2006)**. Water, a Shared Responsibility, the United Nations World Water Development Report 2 pp- 309-311.
- **W.H.O. (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 Publications Fort Collins, Colorado, 276 p.
- **Zouggaghe, F. (2003)**. Etude des communautés animales aquatiques de l'oued Soummam : Cas des macro-invertébrés. Mémoire de magister. Univ. De Bejaia. 75p.

Résumé

L'inventaire et la localisation des sources souterraines karstiques dans la région Nord-Ouest de Bejaia a été élaboré dans le but d'évaluer les paramètres physiques de leurs eaux. Les paramètres physiques ont été mesurés sur 36 sources. La majorité des résultats obtenus montrent une conformité des paramètres physiques par rapport aux normes.

La moyenne de chaque paramètre mesuré est de 18.8°C pour la température, 7.96 pour le potentiel d'hydrogène, 757.36 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la Conductivité Electrique, 369.47 g/l pour la salinité et 477.31 mg/l pour le TDS. La moyenne des débits de la totalité des sources est de 0.16 l/s.

Les résultats obtenus à partir des mesures effectuées traduisent de bonnes caractéristiques physiques pour l'eau souterraine de cette région. Ainsi nous pouvons conclure qu'elle est bonne pour la consommation.

Mots clés : Karstique, aquifère, paramètres physiques, Toudja, Bejaia.

The inventory and location of underground karst springs in the northwest region of Bejaia has been developed to evaluate the physical parameters of their waters. The physical parameters were measured on 36 sources. The majority of results show compliance of the physical parameters from the standards.

The average of each measured parameter is 18.8 °C for temperature, 7.96 for the hydrogen potential, 757.36 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the Electrical Conductivity, 369.47 g/l for salinity and 477.31 mg/l for the TDS. The average rate of all sources is 0.16 l/s.

The results obtained from the measurements made reflect good physical characteristics for groundwater in this region. So we can conclude that it is ideal for consumption.

Keywords: Karst, aquifer, physical parameters, Toudja, Bejaia.