

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques de l'Environnement
Filière : Sciences de l'environnement
Option : Science Naturelle de l'Environnement



Réf :.....

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

MASTER

Thème

**Contribution à l'étude de l'hydrogéochimie
des eaux de deux sources karstiques : cas de
Toudja et des Aiguades – Bejaia - Algérie**

Présenté par :

BENABDELHAK Amira Chahrazad

Soutenu le : **14 Juin 2015**

Devant le jury composé de :

M. HASSISENE M.

MAA

Président

M. BENHAMICHE N.

MAA

Encadreur

M.RAMDANE Z.

MCA

Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

Remerciements

Je remercie DIEU, le tout puissant de m'avoir donné la force nécessaire et la patience qui m'a permis de mener à bien ce modeste travail ;

Je tenais à remercier, comme il se doit les personnes qui ont partagé avec moi l'aventure de ce travail :

Ma première pensée va tout naturellement à mon promoteur, Mr. BENHAMICHE N. qui a suivi ce travail dans tous ces détails, avec une rigueur scientifique exceptionnelle. Je tiens à le remercier pour son encadrement et son soutien. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée en me confiant ce travail. Merci pour sa grande chaleur humaine et pour sa disponibilité quotidienne. Grâce à lui, les moments de découragement connus de tous, furent rares et brefs ;

Il m'est agréable de remercier Mr. HASSISSENE M. qui me fait le grand honneur de présider le jury et évaluer ce mémoire, et a Mr. RAMDANE Z. qui a accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Ma gratitude va également à Mr. MAZA, Mr. SAOU, Mr. LAISSAOUI, et Mr. MEGHERFI pour le temps qu'ils nous ont consacré et pour leur conseils précieux, ainsi que Melle RABHI du laboratoire génie des procédés ;

Sans oublier l'ensemble des enseignants ayant contribué a ma formation durant mon cycle d'études ;

Je remercie également tout le personnels du musée géologique (PNG), musée de l'eau a Toudja, la DHW ainsi que l'APC de Toudja en particulier Mr. BENKHENICHE.

Merci a Melle AZEGAGH Hakima et Melle CHAABNA Kamir, avec qui j'ai partagée cette belle aventure,

Je remercie Melle BELKASMI Damia, pour son aide, son soutien et son encouragements ;

Enfin je tien a exprimer ma gratitude et ma reconnaissance a toute les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

B. Amira Chahrazad

Dédicaces

A la mémoire de amou smail ;

A ma très chère mère, Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement, qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi ;

A mon très chère Papa ,Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi,

Je vous doit ce que je suis ! Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur ;

A mes sœurs : Meriem Chahinez ,Fadila et Amina ;

A ma soeurette BELKASMI Damia , et toute sa famille, merci pour tout ;

A mes cousins et cousines ;

A mes oncles et tantes ;

A tous mes amis ;

A toute la promotion sciences naturelle de l'environnement 2014 /2015.

Amira Chahrazad

sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale----- 1

Chapitre I : synthèse bibliographique

| | |
|---|----|
| I.1.Avant-propos----- | 4 |
| I.2.Définitions----- | 4 |
| I.3.La formation du karst----- | 5 |
| I.3.1.Les conditions de formation du karst----- | 5 |
| I.3.2.Les Processus de formations----- | 6 |
| I.3.3.les facteurs de développement----- | 8 |
| I.3.4.La formation des paléokarsts----- | 8 |
| I.4.Morphologie karstique----- | 8 |
| I.5.Structure et fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques----- | 10 |
| I.6. Particularités des aquifères karstiques----- | 12 |
| I.7. Les différents types d'aquifères karstique----- | 13 |
| I.8.Etudes des Karsts----- | 15 |
| I.8.1.Approche fonctionnelle et approche structurelle----- | 15 |
| I.8.2.Méthodes d'étude des systèmes karstiques----- | 16 |
| I.8.2.1. Caractérisation de la structure des aquifères karstiques----- | 16 |
| I.8.2.2. Etude de chroniques de sortie----- | 16 |
| I.8.2.3.Les traçages----- | 17 |
| I.8.2.4. Modélisation des aquifères karstiques----- | 18 |
| I.8.3.Hydrogéochimie du système karstique----- | 18 |
| I.8.3.1.L'hydrogéochimie en domaine carbonate fissuré : concepts et méthodes d'après Bakalowicz----- | 19 |
| I.8.3.2.Particularités des eaux karstiques----- | 20 |
| I.9.Exploitation des sources karstiques----- | 23 |
| I.10.Vulnérabilités des aquifères karstique----- | 23 |

Chapitre II : Matériel et méthodes

| | |
|---|----|
| II.1.Présentation de la région d'étude----- | 25 |
| II.1.1.Introduction----- | 25 |
| II.1.2.Situation et limites----- | 25 |
| II.1.3.Géologie----- | 26 |
| II.1.3.1.Aperçu géologique de l'Algérie du nord----- | 26 |
| II.1.3.2.Géologie de la région de Bejaia----- | 27 |
| II.1.4.Orographie et caractéristiques morpho-métriques----- | 29 |
| II.1.5. Hydrographie----- | 30 |
| II.1.6.Climatologie----- | 31 |
| II.1.6.1.Les précipitations----- | 31 |
| II.1.6.2.Température----- | 32 |
| II.1.6.3. Synthèse des données climatiques----- | 32 |
| II.1.7.Végétations----- | 34 |
| II.1.8.caractéristiques socioéconomiques----- | 35 |
| II.1.8.1.Populations----- | 35 |
| II.1.8.2.Agriculture----- | 36 |
| II.2.Echantillonnage----- | 36 |
| II.2.1. Géo-localisation des deux sources----- | 36 |
| II.2.2. Lieux et dates de prélèvement----- | 37 |
| II.2.3. Méthodes d'échantillonnage----- | 38 |
| II.3. Méthodes d'analyses----- | 39 |
| II.3.1.Paramètres physique----- | 39 |
| II.3.1.1.Mesure de la température----- | 40 |
| II.3.1.2.Mesure du pH----- | 40 |
| II.3.1.3.Mesure de la conductivité électrique----- | 40 |
| II.3.1.4.Mesure de la salinité----- | 40 |
| II.3.1.5.Total des solides dissous (TDS) ----- | 41 |
| II.3.2.les paramètres chimiques----- | 41 |
| II.3.3.Le Système d'Information Géographique----- | 42 |
| II.3.4.Le logiciel Diagrammes----- | 43 |

Chapitre III : résultats et discussion

| | |
|----------------------|----|
| III.1.Préambule----- | 44 |
|----------------------|----|

| | |
|---|----|
| III.2.Géo-localisation des sources----- | 44 |
| III.2.1.Coordonnées géographiques des deux sources----- | 44 |
| III.2.3.Carte de localisation des sources----- | 45 |
| III.3.Présentation des résultats d'analyse----- | 46 |
| III.4.Traitement des données d'analyse par le logiciel Diagramme (Simler, 2011) ----- | 47 |
| III.5.Discussion des résultats----- | 48 |
| III.5.1.les paramètres physiques----- | 48 |
| III.5.2.Discussion des paramètres chimiques----- | 50 |
| III.5.2.1.Les éléments traces métalliques (ETM) analysés----- | 50 |
| III.5.2.2.Les éléments majeurs----- | 52 |
| III.4.3.Détermination des faciès chimiques----- | 54 |
| III.4.4. Les rapports caractéristiques----- | 56 |
| III.4.5. Dureté de l'eau----- | 57 |
| III.4.6.Analyse du système calco-carbonique----- | 58 |
| III.5.Conclusion partielle----- | 59 |
| Conclusion ----- | 60 |
| Références bibliographique ----- | 62 |
| Annexes | |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau N°I : Solubilité de la calcite en fonction de la pression partielle en CO2 (Bakalowicz, 1986)----- | 6 |
| Tableau N°II : les moyennes mensuelles des précipitations en mm de la région de Bejaïa de 1978 à 2012 (source station météorologique de Bejaia-aéroport) ----- | 31 |
| Tableau N°III : Températures moyennes mensuelles de la région de Bejaia (1978-2012) -- | 32 |
| Tableau N°IV : Répartition des populations dans les deux commune «Bejaia et Toudja» (DPAT 2012)----- | 35 |
| Tableau N°V : Coordonné de localisation des sources de Toudja et des Aiguades----- | 44 |
| Tableau N°VI : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimique de la première campagne en date du 25/03/2015----- | 46 |
| Tableau N°VII : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimique de la deuxième campagne : 28/03/2015----- | 46 |
| - | |
| Tableau N°VII : Résultats des paramètres chimiques----- | 47 |
| Tableau N°IX : Résultats calculé par le logiciel Diagramme----- | 47 |
| Tableau N°X : Normes pour la dureté des eaux de boisson (OMS, 1972) in Rodier et al., 2009----- | 57 |
| Tableau N°XI : Significations hydrogéologique de la pCO2 et du taux de saturation de l'eau (Bakalowicz, 2004) ----- | 58 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure N°01: Représentations du karst dans le monde (en noir) d'après Ford et Williams (2007)----- | 4 |
| Figure N°02: Morphologie du Karst (Bakalowicz, 2002) ----- | 9 |
| Figure N°03: Les écoulements en milieux karstique (Charmoille, 2005) ----- | 11 |
| Figure N°04: Schématisation d'un système karstique (Dorfliger, 2010) modifié à partir de (Mangin, 1975)----- | 12 |
| Figure N°05: Typologie des systèmes karstique : système unaire et binaire (Marsaud, 1997) ----- | 14 |
| Figure N°06: Typologie des systèmes karstique : système jurassien et vauclusien (Marsaud, 1997)----- | 14 |
| Figure N°07: Carte de localisation de la wilaya de Bejaia (Google image----- | 26 |
| Figure N°08: Carte géologique de la région de d'étude (extrait de la carte géologique nord Constantine 1/200.000) ----- | 27 |
| Figure N°09: Coupes géologiques montrant la double vergence dans la région Cap Carbone-Aiguades (Medaouri et al, 2010) ----- | 28 |
| Figure N°10: Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausse pour la région de Bejaia période (1978-2012) ----- | 33 |
| Figure N°11: Etage bioclimatique de la région de BEJAIA sur le Climagramme d'Emberger modifié par Stewart (1969) ----- | 34 |
| Figure N°12: Le GPS (eltrex /GARMIN/1JZ049472can310) ----- | 37 |
| Figure N°13: Source El Ainsar (vue de l'extérieur)-Toudja----- | 37 |
| Figure N°14: Robinet prêt de la source El Ainsar----- | 37 |
| Figure N°15: Sources El Ainsar vue de l'intérieur----- | 38 |
| Figure N°16: Source El Qaa N'temri –Toudja----- | 38 |
| Figure N°17: Source des Aiguades----- | 38 |
| Figure N°18: Multi paramètres de terrain (EXTECH Instrument EC510) ----- | 40 |
| Figure N°19: Le spectromètre d'absorption atomique en flamme (AA6501F/SHIMADZU)(Laboratoire Génie des procédés, Université de Bejaia) ----- | 41 |
| Figure N°20 : Schéma de principe de la SAA en flamme (laboratoire d'hydrauliques, université de Bejaia) ----- | 42 |
| FigureN°21: Interface de commande du logiciel Diagrammes----- | 43 |

| | |
|---|----|
| Figure N°22: Localisation des sources Aiguades et Toudja sur la carte géologique de Bejaia 1/50.000----- | 45 |
| Figure N°23: Représentation des eaux des systèmes karstiques des Aiguades et de Toudja sur le diagramme de Piper pour les campagnes de mars (a) et avril (b) 2015----- | 55 |
| Figure N°24: Diagramme de Schoëller-Berkaloff des eaux des Aiguades et Toudja pour les campagnes de Mars (a') et Avril (b') 2015----- | 55 |

Liste des abréviations

CNEPRU : Commission Nationale Et de la Prospective de la Recherche Universitaire

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

E.D.P : Equations aux Dérivées Partielles

FEPS : Fondation de l'Eau Potable Sure

GIEC : Groupe D'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

OMS : Organisation Mondiale de la Sante

ONM : Office National de la Météorologie

ORGM : Office National de Recherche Géologiques et Minière

pH : potentiel d'hydrogène

PNG : Parc National de Gouraya

Introduction
générale

Le besoin en eau continue de croître ; le 21^{ème} siècle est aussi appelé « ère de la pénurie d'eau ». Selon le GIEC, 20 % des problèmes globaux de l'eau résultent du réchauffement climatique. Le cycle normal de l'eau est rompu et compromet la distribution et l'utilisation des ressources en eau. De ce fait, plusieurs millions de personnes luttent au quotidien pour survivre aux caprices du climat (Baimey, 2012).

La croissance démographique a également accentué les pressions. Les ressources en eau sont fortement touchées, tant en termes quantitatif que qualitatif, par l'activité humaine, à savoir l'agriculture et les changements d'affectation des terres. L'irrigation représente environ 70 % de la totalité des prélèvements d'eau dans le monde et plus de 90 % de la consommation.

L'utilisation de l'eau est donc principalement liée aux changements démographiques (la consommation d'aliments, la construction et la gestion des réservoirs), à la politique économique, à la technologie, et au mode de vie (GIEC, 2008).

Malgré toute l'importance que nous reconnaissons à l'eau, pour notre santé et pour celle de l'environnement, nous continuons, par toutes ces activités, à la polluer et à en dégrader la qualité. À l'échelle mondiale, l'absence d'accès à l'eau potable et à l'assainissement constitue une des premières causes de mortalité.

Alors que les nappes alluviales et les aquifères profonds commencent à présenter des indices de surexploitation et/ou de contamination, et dans un contexte de besoin en eau toujours croissant, les sollicitations des réserves en eau des aquifères karstiques, deviennent de plus en plus importantes. Le karst est présent sur tous les continents. Les principales régions karstiques connues se trouvent en Europe et le bassin méditerranéen avec 3 millions de km² ; vient ensuite l'Asie du Sud-ouest avec plus de 2 millions de km² et l'extrême Orient avec 1.2 millions de km², ainsi que l'Amérique du nord représentée par les Etats-Unis avec 1.4 millions de km² et enfin l'Amérique centrale et le golfe du Mexique avec une superficie de 0.5 million de km² (Chalikakis, 2006).

Les aquifères karstiques sont des aquifères singuliers de par leur genèse, leur structure et leur fonctionnement (Dörfliger, 2010). Ils constituent une ressource principale pour l'alimentation en eau potable. Environ 25% de la population mondiale est alimentée entièrement ou en partie par les eaux souterraines karstiques. Dans certains pays européens, les eaux karstiques couvrent 50% des besoins en alimentation en eau potable (Goldscheider, 2002), alors que dans certaines régions elles sont les seules eaux de bonne qualité (Bensaoula *et al.*, 2007).

L'augmentation des besoins en eau amène à envisager le développement de l'exploitation de ces ressources pour l'alimentation des populations, exploitation actuellement modeste en regard des volumes en jeu. Toutefois, l'occupation croissante des zones karstiques, conjuguée à leur vulnérabilité, impose la mise en place de politiques de protection adaptées (Cadilhak et Dugleux, 2006).

La protection et la gestion des eaux dans les aquifères karstique nécessitent la connaissance, tant dans l'espace que dans le temps, des systèmes d'écoulement. Cette connaissance représente d'ailleurs l'objectif de la majorité des études hydrogéologiques. De part la très forte hétérogénéité du milieu, les systèmes d'écoulement ont des caractéristiques particulières, qu'il convient de reconnaître avec précision (Jeannin, 1996). Ces aquifères présentent de fortes potentialités mais le manque de connaissances hydrogéologiques et géologiques limite leur exploitation.

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). Le Nord-est Algérien, avec une superficie de 42 000 km², s'étend depuis Bejaïa jusqu'à la frontière Algéro-tunisienne jusqu'à 200 km au sud. Les formations carbonatées, généralement karstifiées affleurent sur une superficie de 7 200 km², soit un peu plus de 17% de la superficie totale. La plupart des systèmes karstiques sont hydrothermaux, du fait de la structuration des carbonates. Par exemple, la source Ain Hammam Zouaoui (Constantine), Ain N'gaous (Batna), Ain Zergua (Guelma), Ain Dhalaa (Oum El Bouagui)...etc. (Bouroubi, 2009). Faute de spécialistes, le karst n'a pas encore divulgué tous ces secrets. Les quelques travaux réalisés concernent l'Ouest du pays, particulièrement les monts de Tlemcen et Mascara (Bensaoula *et al.*, 2007).

Notre thématique entre dans le cadre d'un projet CNEPRU sur la caractérisation des eaux karstiques de la région de Bejaïa. Ce projet a été soumis à avalisation et devrait normalement débiter en janvier 2016. Sur cette base, et conjointement à ce présent travail, un autre travail est mené par un binôme d'étudiants en vue de recenser et de géo-localiser ces sources karstiques au niveau de la zone côtière de Bejaïa. Parmi ces sources, nous en avons choisi deux, à savoir : les sources de Toudja et des Aiguades. L'objectif de notre travail consiste en une caractérisation des eaux des ces sources. Pour cela, nous avons, grâce à plusieurs campagnes de prélèvements, collecté des échantillons d'eaux des sources de Toudja, dite «El

Ainsar», ainsi que la source des Aiguades. Ces échantillons ont fait l'objet de mesures in situ et d'analyses au laboratoire afin de caractériser ces eaux.

Ce mémoire comporte, en plus d'une introduction et d'une conclusion, trois chapitres :

- Le premier consiste en une synthèse bibliographique des travaux récents qui présentent les connaissances actuelles de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques ;
- Le second chapitre comporte le matériel et méthodes consistant en un descriptif du site d'étude et une présentation des méthodes expérimentales utilisées pour l'obtention des résultats physico-chimiques ;
- Enfin, le troisième et dernier chapitre contient les résultats et discussions.

Synthèse
bibliographique

I.1. Avant-propos

L'Homme a su s'adapter aux particularités des régions karstiques et en tirer le meilleur parti. D'abord, il utilisa les grottes comme abri et refuge, voir comme lieu de culte et de culture. Puis il sut mettre en valeur ces terrains et en tirer quelques ressources minières. Enfin, de nos jours, il utilise pleinement les multiples possibilités de celui-ci : construction, ressource en eau, tourisme . . . etc. (Baali, 2007).

Dans ce milieu, mythes et légendes sont nés pour lui donner une signification, « tantôt zone de transition vers l'au-delà, tantôt lieu de communication avec les défunts ou les forces supérieures ». Il a fallu attendre le XX^{ème} siècle, avec les progrès de la chimie minérale, et les explorations du spéléologue Martel (1921) pour mettre en place les prémisses de la Karstogenèse et l'étude du comportement des karsts. Vers les années 1970, le karst est reconnu comme un aquifère à part entière, différent des aquifères poreux et des aquifères fissurés classiques : un système complexe très particulier, fortement hétérogène, sur une grande gamme d'échelles d'observation (Baily, 2009).

A l'échelle mondiale le karst représente 10 à 15% de la surface des continents (Ford et Williams, 2007).

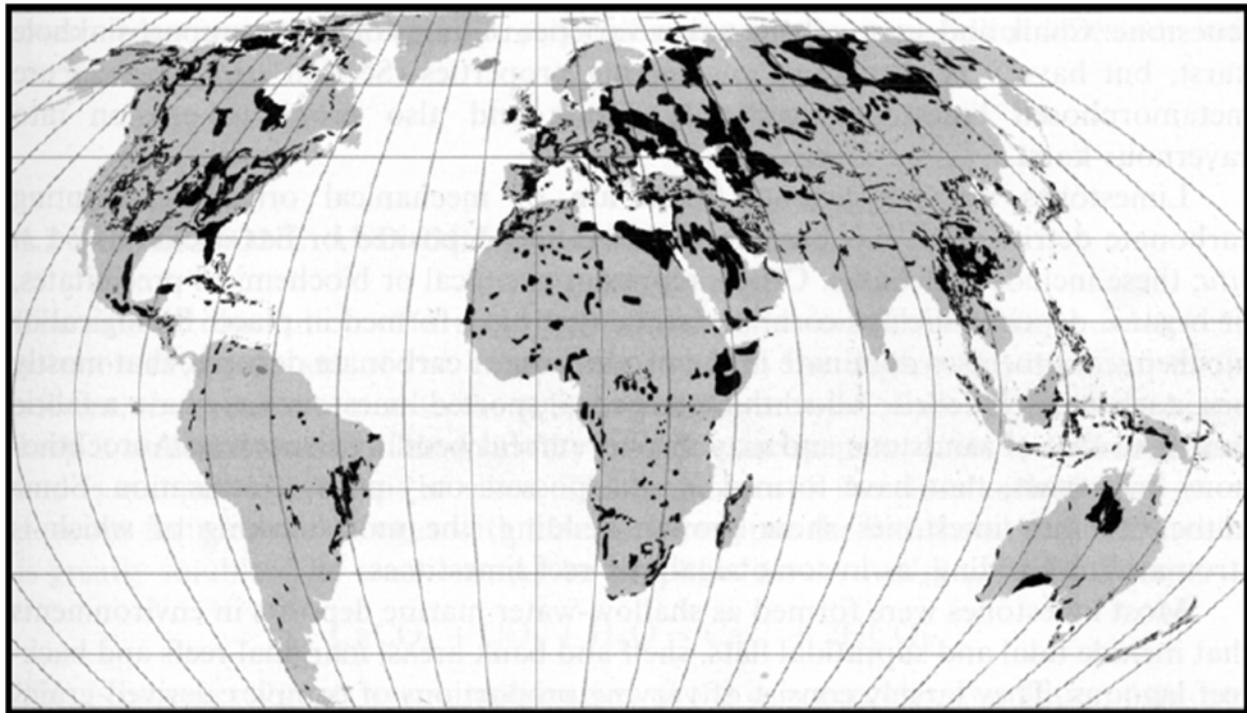


Figure N°01 : Représentations du karst dans le monde (en noir) d'après Ford et Williams (2007).

I.2. Définitions

Le mot karst provient du terme allemand, « Kars », désignant un plateau calcaire de Slovénie. Par dérivation, il est devenu le terme scientifique pour définir « un système hydrogéologique affectant principalement les pays calcaires, par la dissolution de leurs roches, par les eaux météoriques

chargées en CO₂ » (Gilli, 1999). Par extension, toute région comprenant de tels phénomènes de dissolutions est considérée comme karstique.

Geze propose en 1973 la définition suivante : « Région constituée par des roches carbonatées compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques ». Cette définition, quelque peu influencée par la vision géomorphologique du karst, a été reprise et complétée par Bakalowicz en 1999 : « Le Karst est l'ensemble des formes superficielles et souterraines, résultant de la dissolution des roches carbonatées (calcaire, dolomie) par l'eau rendue acide par le carbone ; par extension l'ensemble des formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, Halite) ». Ainsi, une région est dite karstifiée « Lorsqu'elle présente une morphologie et une hydrologie particulières, dues à la dissolution hétérogène d'une roche modérément soluble » (Quinif, 1998). La karstification se produit dans toute roche soluble : calcaire, marbre, dolomies, gypse...etc. (Baali, 2007). L'étude de ses phénomènes est appelée « karstologie ». Le karst se distingue par des paysages souvent étranges (parcs naturels). Ces derniers sont caractérisés par les disparitions de rivières, les grottes, les arches naturelles, de grosses sources, des dépressions fermées et des roches sculptées (Baali, 2007).

I.3.La formation du karst

I.3.1.Les conditions de formation du karst

Le karst apparaît comme un véritable système en constante interaction avec son environnement. Il est le fruit de multiples échanges d'énergie entre divers éléments internes et externes. Quinif (1998) définit ce système comme une « machine thermodynamique ». Trois conditions fondamentales sont nécessaires à l'existence d'un système karstique ; en reprenant les termes de Quinif, nous pouvons les citer comme suit (Guy, 2008):

- **Une lithologie** : c'est-à-dire une roche soluble pour qu'un « transfert de matière d'une phase solide à une phase liquide » puisse se former, ainsi qu'une cohérence mécanique afin que les formes souterraines se conservent.
- **Une énergie mécanique** : L'eau pour circuler utilise des voies constituées par une série de discontinuités : les fractures en détente (diaclasses, failles et joints de stratification) induites par la tectonique, permettent la pénétration de l'eau grâce à des vides interconnectés.
- **Une énergie hydrodynamique** : laquelle correspond d'une part à la quantité d'eau disponible pour la karstification, car, sans eau, la karstification ne peut s'opérer. D'autre part, elle correspond à l'énergie induite par le gradient hydraulique, soit « la différence d'altitude entre la zone d'alimentation et la zone de sortie ». Ainsi, pour pouvoir fonctionner, la karstification exige une force à la fois motrice (pesanteur et dénivelée) et

hydrologique (débit de l'écoulement). Le point bas vers lequel convergent les eaux est appelé niveau de base. S'il correspond au niveau de la plaine ou d'une large vallée de faible pente, on le dit « régional ». Si la source pérenne la plus basse domine légèrement le niveau régional, c'est un niveau « local » ou « karstique ».

Ces trois conditions représentent le « potentiel de karstification ».

I.3.2. Les Processus de formations

Les aquifères karstiques résultent d'un processus particulier d'évolution des massifs calcaires: « la karstification ». Ce processus, a pour effet de transformer une formation carbonatée fracturée, en un aquifère karstique (Tassy, 2012).

La karstification est responsable de la formation de vides, parfois de grandes dimensions, qui modifient profondément les caractéristiques initiales de la roche. Il s'agit d'un processus évolutif, d'érosion physico-chimique des formations carbonatées, qui élargit les vides originels et établit progressivement une structure de drainage organisée (Delbart, 2013).

La dissolution des roches carbonatées n'est pas possible dans l'eau pure. Il faut alors invoquer un paramètre supplémentaire pour expliquer l'action dissolvante des eaux en milieu karstique : le CO₂. En effet, le CO₂ dissous dans l'eau accroît fortement les possibilités de dissolution. Dans les eaux karstiques, il a pour origine ; la pédosphère, les circulations d'air dans les milieux souterrains, où le dégazage d'origine profonde ou volcanique (Mathevet, 2002).

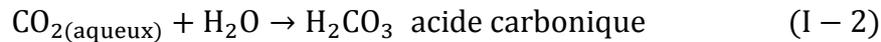
L'activité biologique au niveau du sol, joue un rôle fondamental en augmentant la pression partielle de CO₂ (pCO₂) du milieu ; l'eau infiltrée va alors s'équilibrer avec ce milieu et s'enrichir en CO₂. Ce qui lui confère un caractère acide qui favorise la dissolution des carbonates. Ces eaux infiltrées sont dites « agressives » vis-à-vis de la calcite compte tenu de leur fort pouvoir de dissolution. La karstification dépend aussi du faciès chimique de l'eau qui est véhiculée, et en particulier de son pouvoir de dissolution. Celui-ci diminue au fur et à mesure que l'eau s'éloigne de la zone de recharge et que l'eau s'équilibre avec la calcite (Baily-Comte, 2008).

Tableau N° I : Solubilité de la calcite en fonction de la pression partielle en CO₂ (Bakalowicz, 1986).

| pCO ₂ (atm) | Concentration en CaCO ₃ d'une eau à l'équilibre avec la calcite (mg/l) |
|---|---|
| 0 | 5 |
| 0,03.10 ⁻² (atmosphère) | 50 |
| 0,1.10 ⁻² (sol de montagne) | 115 |
| 1.10 ⁻² (sol, climat tempéré) | 215 |
| 3.10 ⁻² (sol, climat méditerranéen) | 315 |
| 10.10 ⁻² (production de CO ₂ profond) | 650 |

Les réactions sont les suivantes (Charmoille, 2005) :

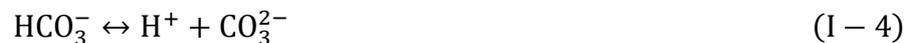
Les réactions de dissolution (conversion) du CO₂ :



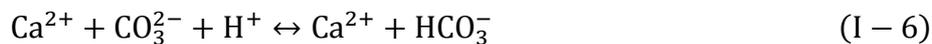
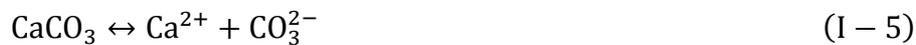
Cette mise en solution du dioxyde de carbone est suivie d'une dissociation du CO₂ dissous en ions H⁺ et en HCO₃⁻ :



Les ions bicarbonates peuvent alors être dissociés (réaction I - 4). Il en découle que toutes les eaux en contact avec l'atmosphère contiennent différentes espèces de carbone inorganique, que ces eaux soient en contact ou non avec les roches carbonatées :



La dissolution de la calcite CaCO₃ est le résultat des réactions de mise en solution du dioxyde de carbone. Les ions H⁺ produits (réaction I - 3) vont réagir avec l'espèce solide CaCO₃. Les ions CO₃²⁻ ou Ca²⁺ vont être dissociés de la surface du minéral par combinaison d'un H⁺ avec un CO₃⁻ pour le déloger (réactions I - 5 et I - 6) :



L'ensemble des réactions décrites ci-dessous est le plus souvent résumé par la réaction (I - 7) :



La dissolution karstique est un processus dynamique en évolution permanente qui dépend de plusieurs paramètres, par exemple la composition minéralogique et les propriétés réservoirs (porosité, perméabilité) des roches calcaires, la morphologie de la topographie aérienne, la température, l'altitude ou le temps de contact eau-roche. Il résulte de la multiplicité de ces paramètres et de leurs interactions, une grande variabilité des caractéristiques des karsts comme l'architecture et les dimensions (Tassy, 2012).

L'activité karstique concerne toutes les roches solubles ; les calcaires « CaCO₃ » en priorité, mais aussi les dolomies « MgCO₃ », le gypse ou encore le sel « Na Cl » (Bakalowicz, 1999).

I.3.3. Les facteurs de développement

Le développement du réseau karstique dépend de plusieurs facteurs (Dorfliger, 2010) :

- Le potentiel de karstification (quantité d'eau et de CO₂ disponible, gradient hydraulique, nature de la surface...);
- la structure interne du massif (géologie, fracturation...);
- le temps de séjour de l'eau dans le massif .

La karstification sera ainsi plus ou moins importante, suivant les caractéristiques du massif et les conditions extérieures. Si aucun de ces facteurs ne change, l'organisation du réseau karstique dans un massif se poursuivra jusqu'à atteindre un équilibre (De La Bernardie, 2013).

Si les conditions évoquées sont présentes, la formation d'un réseau karstique peut être très rapide à l'échelle des temps géologiques, soit 10 000 à 20 000 ans (Bakalowicz, 1979).

I.3.4. La formation des paléokarsts

D'après Camus (2003), « Le terme de paléokarst est employé pour définir tout type de formes ou de sédiments karstiques ou intrakarstiques, scellés au sein des couches géologiques ». La formation d'un paléokarst modélise le comblement et la fermeture d'un système karstique. La notion de niveau de base est fondamentale pour comprendre ce phénomène, car ces variations sont à l'origine même de la formation des paléokarsts. Lors de la baisse du niveau de base, la karstification s'encaisse plus profondément dans le massif. Lors de la remontée, les cavités créées par l'épisode de karstification antérieur se recouvrent. Il existe des paléokarsts dans de nombreux endroits au monde. L'intérêt de leur étude est maintenant reconnu pour de nombreuses raisons. Ils ont attiré l'attention des géologues miniers car ils présentent souvent des gisements de bauxites, de phosphates, et peuvent constituer des réservoirs pétroliers. Ils sont de plus en plus considérés comme des réservoirs aux potentiels hydrogéologiques (Husson, 2011).

I.4. Morphologie karstique

Une grande morphologie et hydrographie est constatée dans les différentes régions karstiques. Certaines formes très développées dans une région manquent complètement dans une autre ; la composition chimique de la roche et le climat, sa couverture sédimentaire, la tectonique des régions, la présence et l'épaisseur de couches imperméables intercalés ; sont des facteurs qui peuvent déterminer des différences morphologiques considérables entre les régions karstiques (Chalikakis, 2006).

La morphologie karstique se distingue des autres paysages par (Baali, 2007) :

- Ensemble de formes de surface (exokarst) et de formes souterraines (endokarst) intégrées les unes aux autres ;
- En surface, il n'y a pas de vallées, sinon des formes démantelées et sèches, mais des dépressions fermées plus ou moins profondes et étendues, de 10 m à plusieurs km de diamètre.

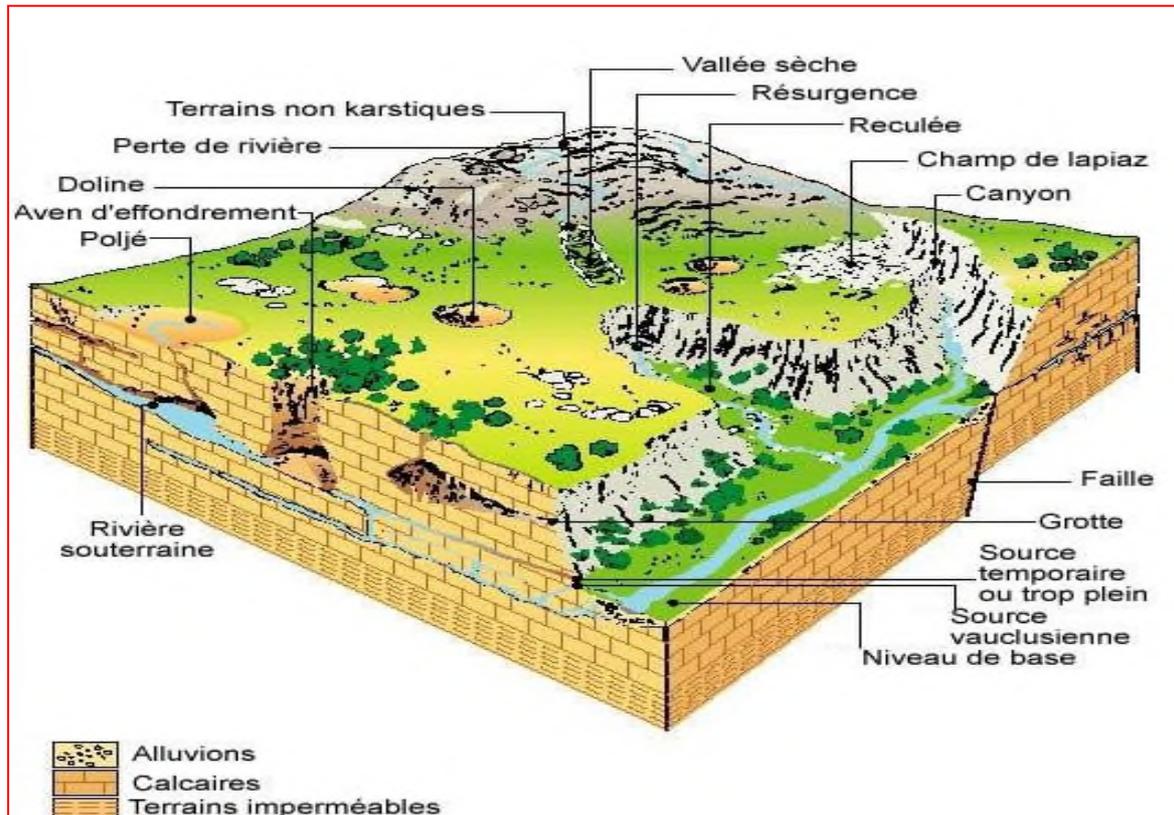


Figure N° 2: Morphologie du Karst (Bakalowicz, 2002).

En surface, des formes d'érosion spécifiques témoignent du drainage des eaux vers le milieu souterrain (effondrement, dolines, gouffres). Il est de plus fréquent d'observer des vallées sèches, qui témoignent d'un abandon des structures d'écoulement de surface, au profit d'un drainage souterrain, au fur et à mesure que la karstification s'est développée. L'orientation de ces vallées, ainsi que la distribution spatiale des manifestations karstiques, sont des indices de l'organisation de la karstification passée ou actuelle, qui peuvent donc être utilisées pour comprendre le fonctionnement du karst pour différentes conditions hydrogéologiques (Bailly-Comte, 2008).

La grande spécificité des paysages karstiques est l'absence ou la rareté des écoulements de surface. Les cours d'eau, issus de terrains non karstiques en amont, s'infiltrent rapidement au niveau de pertes, puis transitent en profondeur par des rivières souterraines atteignant ainsi la nappe avant de réapparaître à l'air libre sous forme de sources (Tassy, 2012).

Les sorties d'eau du karst sont toujours des sites extraordinaires, ne serait-ce que parce que les massifs et les plateaux qui les dominent sont dépourvus d'eau. On distingue (Bakalowicz, 1999) :

- Les résurgences, qui sont des sources de systèmes karstiques binaires ;
- Les exurgences, sont celles de systèmes karstiques unaires ;
- Les émergences, ce sont celles dont l'origine n'est pas connue.

I.5. Structure et fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques

Le système karstique est défini par Mangin (1975) comme « L'ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage ».

a. L'épikarst :

L'épikarst, lorsqu'il est présent, est la partie la plus superficielle du karst, et paradoxalement la moins bien identifiée, généralement défini comme une zone à forte porosité : 5 à 10%, et pouvant mesurer jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur. Le transfert de l'eau y est essentiellement vertical. Il alimente la zone non-saturée puis la zone saturée. L'épikarst correspond à une zone d'échanges privilégiés entre la surface, le sol et le karst lui-même. C'est la que pourra être produit le CO₂ permettant l'acidification de l'eau qui s'infiltre dans le karst. Il peut également être capable de stocker de l'eau ; et ainsi constituer une nappe disponible pour l'évapotranspiration, ou encore constituer un intermédiaire entre la surface et le stockage souterrain (zone saturée). Enfin, dans certains cas, le stockage dans l'épikarst peut même être prépondérant devant le stockage dans la zone saturée (Siou, 2011).

b. La zone non-saturée :

Elle est encore appelée zone d'infiltration. La porosité est généralement moins importante que dans l'épikarst : 1 à 2% environ. Dans le cas général, cette zone est une zone de transition entre la surface, ou l'épikarst s'il existe, et la zone noyée. Cette zone est le siège, à la fois, d'écoulements monophasiques et d'écoulements diphasiques. Les premiers sont des écoulements de type ruissellement, opérant dans les fissures et les conduits. L'écoulement diphasique (écoulement d'un mélange d'eau et d'air) quant à lui s'opère dans les microfissures. À ce niveau, une évacuation de l'eau sous forme gazeuse est possible. De plus, ceci implique de fortes variations de la perméabilité, en fonction de la variation de la proportion air-eau dans ces fissures. Dans de rares cas, la zone non saturée peut jouer un rôle important dans le stockage de l'eau et donc pour le soutien des étiages (Siou, 2011).

c. La zone saturée :

Elle est encore appelée zone noyée. C'est généralement, la zone pour laquelle l'organisation des écoulements et des vides est la plus forte, avec une porosité pouvant aller jusqu'à 15%. La circulation de cette eau se fait généralement, non plus majoritairement verticalement, mais de façon subhorizontale, permettant ainsi le drainage de l'eau vers l'exutoire, une source ou un groupe de sources karstiques. Les drains peuvent s'organiser à un niveau proche du niveau piézométrique dans le cas d'un karst de type jurassien, ou bien à grande profondeur dans le cas d'un karst de type vauclusien (Siou, 2011).

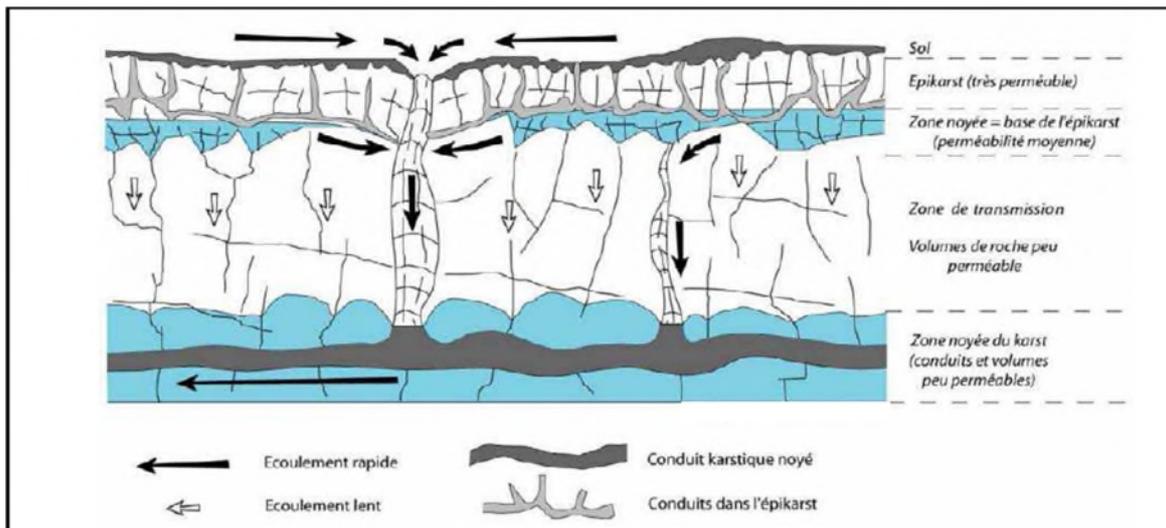


Figure N°03: Les écoulements en milieu karstique (Charmoille, 2005).

Les systèmes karstiques, présentent des modalités d'infiltration et d'écoulement des eaux souterraines particulières, qui n'existent pas dans les autres aquifères. De ce fait, plusieurs types d'infiltration existent (Le Roux, 2010) :

- **infiltration différée**, par un stockage à proximité de la surface dans l'épikarst, où l'eau est soumise aux processus biochimiques intervenant dans les sols ;
- **infiltration lente**, par laquelle un mélange d'air et d'eau, parcourt les fines fissures et la porosité de la roche. Elle est à l'origine de la dissolution de la roche carbonatée près de la surface, et est responsable du transport du CO₂ dissout et gazeux dans l'ensemble de la zone d'infiltration ;
- **infiltration rapide**, véritable ruissellement souterrain parcourant les fractures les plus larges, elle est responsable de la dissolution en profondeur ;
- **une infiltration concentrée et rapide**, alimentée par des rivières s'écoulant sur des terrains non karstiques, se perdant en général au contact des calcaires et formant des résurgences.

Dans la zone noyée, les écoulements sont assurés par des éléments distincts de la structure :

- **le drainage**, assuré par un réseau de conduits hiérarchisés, permet aux eaux stockées dans la zone noyée, ainsi que celles reçues directement de la surface, d'être évacuées rapidement vers la source ;
- **le stockage**, assuré par des vides karstiques, parfois importants, et par des zones fissurées, il alimente le réseau de drainage et reçoit des eaux d'infiltration rapide. Mais il est aussi alimenté par le drainage, en fonction des conditions de charge hydraulique entre les zones de stockage et les conduits.

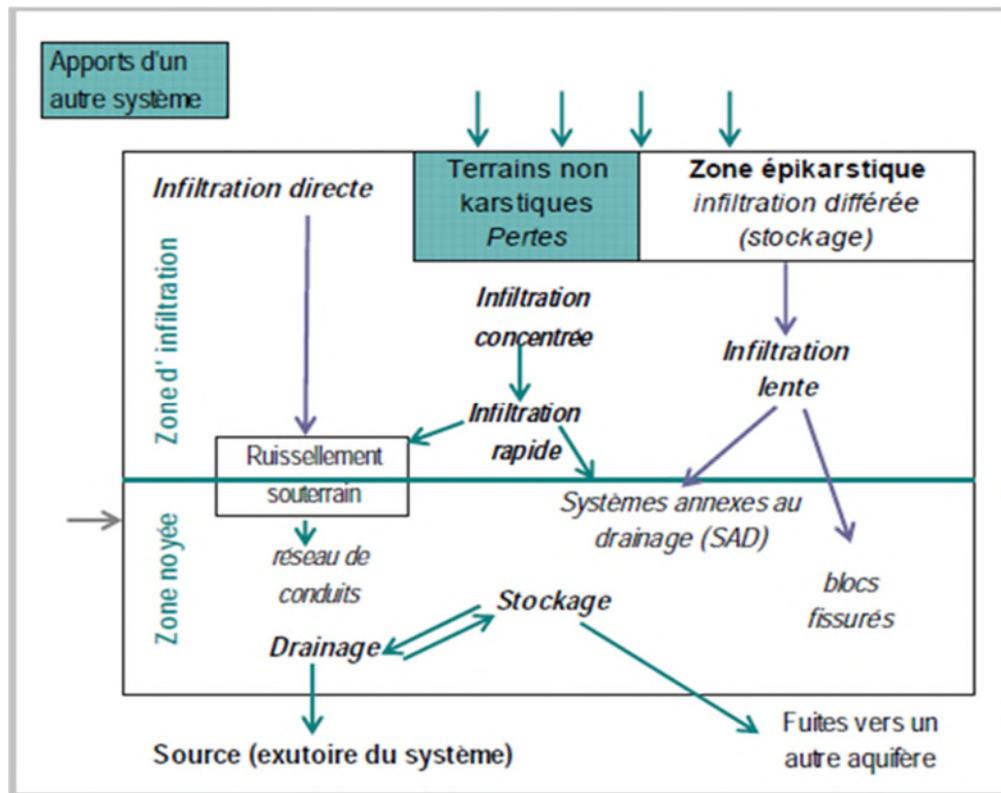


Figure N°04 : Schématisation d'un système karstique (Dorfliger, 2010) modifié à partir de (Mangin, 1975).

I.6. Particularités des aquifères karstiques

Les aquifères karstiques sont caractérisés par (Fournillon, 2012) :

- **Une évolution** : l'eau circulant dans les grands vides, fait évoluer son propre système de drainage. Les hydrosystèmes tendent, à l'échelle géologique, vers la maturité. Ce qui correspond à un équilibre avec le niveau de base local ;
- **Une hétérogénéité** : les grands vides sont responsables d'une très grande hétérogénéité, il n'existe pas de plus petit volume représentatif de ces aquifères. Au contraire, il peut exister des volumes représentatifs à l'échelle de bassins ;
- **Une anisotropie** : du fait de la distribution des conduits, les écoulements suivent des directions difficilement prédictibles sans leur cartographie. Les écoulements ont donc de

nombreuses directions préférentielles. La concentration des écoulements au sein de ces conduits amène une grande variabilité spatio-temporelle de la piézométrie.

I.7. Les différents types d'aquifères karstiques

Selon le processus de genèse (la karstgenèse), on peut distinguer différents types de karst (Bakalowicz, 1996 ; Plagnes, 1997) :

- les karsts classiques, qui ont pour origines des écoulements gravitaires et du CO₂ d'origine pédologique ;
- les karsts profonds ou hydrothermaux, qui sont d'origine hydrothermale. Les moteurs de la karstification sont le dégagement de CO₂ d'origine profonde et les gradients thermiques élevés ;
- les karsts sulfuriques, qui ont pour origine des écoulements gravitaires ou sont liés à des gradients de température, et la présence d'acide sulfurique (H₂S) ;
- les karsts littoraux, qui sont formés par l'interaction eau douce –eau salée sur la roche carbonatée. Les écoulements sont produits en partie par gradient de densité, avec la possibilité de dissoudre grâce au mélange. Ils ne doivent pas être confondus avec les sources karstiques d'eau douces sous-marines.

Il est possible de classer les karsts en fonction de leur impluvium d'une part et de la position de leur drain principal d'autre part. Les travaux de synthèse de Marsaud (1996) donnent pour les différents types de karst une très bonne illustration.

Au regard de l'impluvium, on distingue (Peyraube, 2011) :

- le karst unaire : l'impluvium est constitué de terrain karstique,
- le karst binaire : l'impluvium est constitué de terrains karstiques et de terrains non karstiques moins perméables voire imperméables.

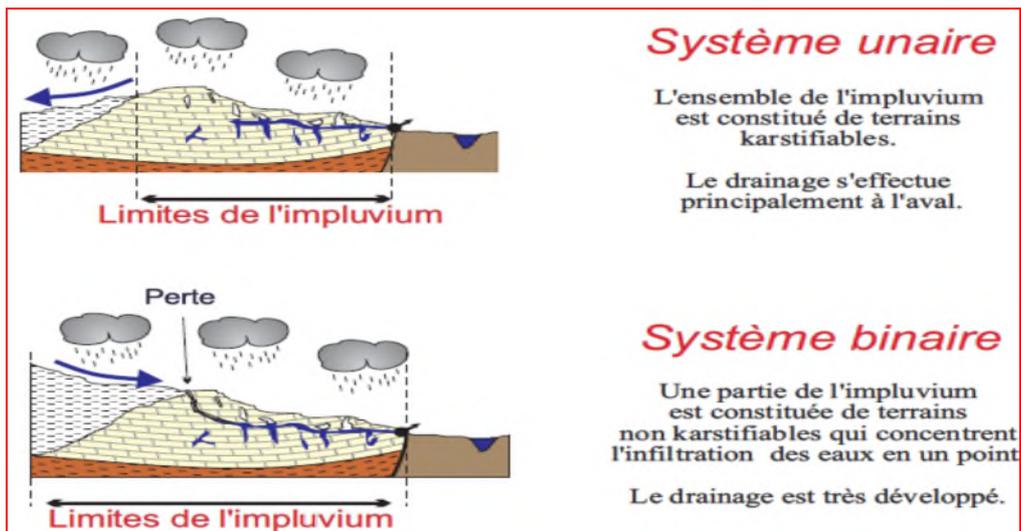


Figure N°05: Typologie des systèmes karstique : système unaire et binaire (Marsaud, 1997).

En fonction de la position du drain principal, on parle de (Peyraube, 2011) :

- karst jurassien, lorsque le drain principal est à la hauteur du niveau de base et de l'émergence.
- Karst vaclusien, lorsque le drain principal se situe sous le niveau de base

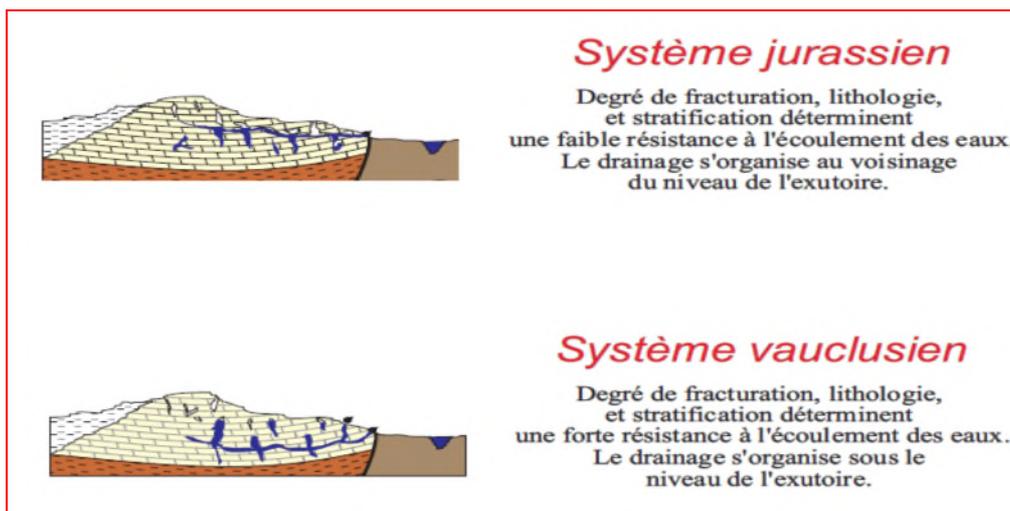


Figure N°06 : Typologie des systèmes karstique : système jurassien et vaclusien (Marsaud, 1997).

Le même auteur propose une classification des karsts en trois types, qui se basent sur le degré de karstification et la fonctionnalité des aquifères karstiques (Peyraube, 2011) :

- **Type 1** : karsts pour lesquels le développement de la karstification n'est pas suffisant, pour que les écoulements se démarquent de ceux d'un système fissuré. L'absence d'organisation des écoulements, se traduit par l'absence d'un exutoire principal individualisé au profit d'un nombre important de petites sources ;
- **Type 2** : karst classique, comportant une organisation des écoulements et un étage des différents compartiments bien identifié ;

- **Type 3** : karst non fonctionnel, pour lequel la structure karstique, bien que présente et développée, n'est plus active. La faiblesse du potentiel hydraulique et de la vitesse des écoulements, entraîne une homogénéisation des fonctions capacitatives et transmissives. Le système se comporte comme un milieu poreux homogène et continu. Ce type correspond notamment aux karsts profonds, dans les bassins sédimentaires et aux karsts fortement colmatés.

I.8. Etudes des Karsts

I.8.1. Approche fonctionnelle et approche structurelle

Deux types de démarche ont été développés pour l'étude des systèmes karstiques (Delbart, 2013) :

- Les approches structurelles, qui reposent sur la description de la structure de l'aquifère et de l'application de lois physiques d'écoulements ou d'hydraulique. Dans le cas d'application de lois physiques d'écoulements, elles se basent classiquement sur la notion de « volume élémentaire homogène » qui consiste à affecter à un point, la valeur moyenne d'un paramètre hydrologique mesuré pour un certain volume de terrain. Deux grandes difficultés apparaissent dans l'adaptation de ces approches en milieux karstiques : la détermination des paramètres hydrauliques en tout point de l'aquifère, compte tenu de la forte hétérogénéité des aquifères karstiques et l'adaptation de lois d'hydrodynamiques aux écoulements turbulents, caractéristiques des aquifères karstiques.
- les approches globales ou fonctionnelles, où l'aquifère est considéré comme une boîte noire dont on étudie le comportement par des fonctions mathématiques (Mangin, 1975). Ces approches reposent sur l'analogie existante entre l'organisation d'un karst et celle d'un bassin versant de surface. Elles s'appuient principalement sur l'étude de la relation entre la fonction d'entrée du système (pluie), et la fonction de sortie du système (source), en supposant que l'eau d'une source est imprimée (quantitativement et qualitativement) de tout ce qu'elle a pu subir en traversant le système. Ces approches ne font pas intervenir de processus physiques des écoulements et du transport, elles apportent une description du fonctionnement du système à travers l'étude de ses réponses, à divers forages qui permet ensuite d'approcher indirectement la structure.

Il ressort de ce qui précède, qu'aucune des deux approches n'est parfaite et que pour toute étude du karst, il convient, en fonction des objectifs visés, d'alterner les deux approches (fonctionnelle et structurelle) de façon à obtenir le plus d'informations possible (Jeannin, 1996).

I.8.2.Méthodes d'étude des systèmes karstiques

I.8.2.1. Caractérisation de la structure des aquifères karstiques

➤ Approche morphologique et spéléologique

L'approche morphologique, ne repose que sur la description de la morphologie de surface et notamment de la localisation de structures karstiques, ou de points d'infiltration préférentielle tels que des dolines, des lapiazs ou des gouffres. L'approche spéléologique repose sur des descriptions souterraines, réalisées par des spéléologues lors d'explorations de grottes ou de formations souterraines. Cette approche ne s'intéresse donc qu'au système karstique dont la karstification est très avancée et permet le passage d'un homme. Elle ne fournit pas d'information hydrogéologique au sens strict mais donne des renseignements sur la karstification, l'organisation, la forme et les dimensions du réseau de drainage principal (Delbart, 2013).

➤ Investigations géophysiques

La géophysique permet de caractériser le sous-sol, d'identifier sa géométrie (localisation des cavités ou vides). Elle peut également fournir des informations sur les propriétés physiques du sol telles que la teneur en eau, la fracturation, la porosité, la présence d'argile. Ces méthodes sont appliquées soit en surface, soit au niveau de forages (diagraphie), soit au niveau de conduits. De nombreuses méthodes existent: les méthodes électriques ou électromagnétiques, les méthodes sismiques, les méthodes gravimétriques et les méthodes à résonances magnétiques de protons, donnent la distribution de la teneur en eau en fonction de la profondeur (Delbart, 2013).

I.8.2.2. Etude de chroniques de sortie

Basé sur des analyses statistiques (Mathevet, 2002) :

- **Analyse des débits classés :** L'analyse des débits classés permet d'identifier des événements particuliers (fuite, trop-plein) à partir des modifications qu'ils induisent sur l'hydrogramme. La méthode proposée par Mangin (1971) consiste à ranger les débits par classes, pour mettre en évidence les valeurs de débits anormalement représentées. Ensuite la courbe obtenue est représentée par une loi statistique.
- **Analyse des courbes de récession :** L'analyse des courbes de récession a été proposée par Mangin (1970), dans le but d'estimer l'importance des ressources en eau et certaines caractéristiques d'un système karstique.
- **Analyses en ondelettes :** L'objectif principal de la transformée en ondelette est de mettre en évidence les relations de type temps – échelle, d'événements localisés temporellement.

L'analyse en ondelettes fournit donc un regard sur le non stationnarité des phénomènes, leur intensité et leur impact sur le court terme ou sur le long terme.

I.8.2.3. Les Traçages

Le terme traceur a été défini par Molinari (1976) : « Une substance, par définition identifiable, au moyen de la quelle on cherche à appréhender le devenir du milieu marqué ».

a. Le traçage naturel

Les traçages naturels sont basés sur la mesure passive et l'interprétation des concentrations des composants de l'eau (Peyraube, 2011).

b. Le traçage artificiel

Le traçage artificiel est un outil très utilisé pour la délimitation des zones de recharge, et des liens entre les pertes et les résurgences. Il repose sur l'injection active d'un composé dans le système. De nombreux traceurs existent en fonction des contraintes spécifiques, on site : teinture dans le spectre visible ou non, microbilles, spores, éléments chimiques. Le traçage, en tant que moyen de délimitation des bassins versants, reste contraint par la limite de détection du traceur injecté et l'atténuation ou la rétention du traceur dans l'aquifère (Peyraube, 2011).

Si le traceur est bien conservatif dans l'eau, un traçage permet de caractériser les écoulements, ainsi que le système karstique dans lequel il transite. Il existe deux catégories (De La Bernardie, 2013) :

- Le traçage exploratoire, est utilisé dans un premier temps pour déterminer la ou les sources reliées au point d'injection. Il permet de caractériser et délimiter les bassins d'alimentation des sources ;
- Le traçage de simulation, est utilisé dans un deuxième temps pour déterminer les caractéristiques du transit du traceur entre un point d'injection et un point d'exsurgence connu.

Le karst est une formation très vulnérable aux pollutions. Pour cela le traçage artificiel est le meilleur moyen pour simuler le transport de polluant dans un système karstique.

c. Les traceurs de datation :

Afin d'étudier l'écoulement des eaux souterraines dans les milieux karstiques, et estimer les temps de résidence de celles-ci, des traceurs de datation peuvent être utilisés. Il s'agit principalement de traceurs de datation des eaux récentes (moins de 50 ans). Les plus utilisés sont les CFCs, le SF6, le

^3H et le rapport $^3\text{H}/^3\text{He}$. Ces traceurs de datation fournissent une information sur le temps de résidence moyen des eaux souterraines. Ils permettent de décomposer ces eaux souterraines et de mettre en évidence certains processus d'écoulements, tels que les transferts par effet piston ou la présence de mélange d'eau d'âge différents (Delbart, 2013).

I.8.2.4. Modélisation des aquifères karstiques

La simulation numérique, est un outil indispensable d'analyse des hypothèses résultant de l'analyse des hydrogrammes. Toutefois, il se pose le problème délicat de représentation spatiale du réseau karstique (Bakalowicz, 2008).

➤ Les modèles réservoirs conceptuels

Il est possible de concevoir ces systèmes comme une succession de réservoirs conceptuels spatialisés, et communiquant entre eux par des lois de vidange. Ces réservoirs bien soumis à des processus physiques comme l'évapotranspiration, ne sont pas attachés à la physique des processus, et nécessitent un calage empirique. Les entrées du modèle sont constituées de données topographiques, pluviométriques et de température (Baily, 2009).

➤ Modélisations tridimensionnelles à paramètres distribués:

Cette méthodologie d'étude consiste à utiliser des modèles tridimensionnels à paramètres distribués, fondés sur la résolution d'E.D.P. (Equations aux Dérivées Partielles). Kiraly (1978) est le précurseur de cette approche en hydrogéologie karstique, où les phénomènes 3D sont essentiels. Pour la résolution des écoulements, un champ de perméabilité équivalente doit être construit, de manière à prendre en considération l'influence des différentes unités morphologiques. Cependant, l'ensemble des entités contrôlant les écoulements vont de l'échelle métrique à kilométrique (Baily, 2009).

I.8.3. Hydrogéochimie du système karstique :

L'hydrogéochimie d'un système karstique consiste à étudier le système calco-carbonique, à partir des paramètres $p\text{CO}_2$ (pression partielle de CO_2), pH_{sat} et ISc (indices de saturation vis-à-vis de la calcite, ISd (Indice de saturation vis-à-vis de la dolomite) ; car la minéralisation de l'eau en découle. Elle fournit un ensemble d'outils et de méthodes permettant de comprendre le fonctionnement du système karstique, à travers la dynamique de l'état d'un système chimique (Bouroubi, 2009).

I.8.3.1.L'hydrogéochimie en domaine carbonate fissuré : concepts et méthodes d'après Bakalowicz :

Dans les aquifères karstiques l'eau joue un double rôle ; celui de vecteur d'informations, mais aussi celui de créateur d'informations en réagissant avec la roche. Cette double information pose un problème à l'hydrogéologue qui s'intéresse principalement aux modalités de circulation de l'eau. Les données hydrochimiques recueillies, doivent être analysées de façon à dégager les informations purement hydrogéologiques, de celles propres au comportement propre des traceurs. Le recours à l'hydrogéochimie pour l'étude des systèmes karstiques présente d'après les informations suivantes, un intérêt particulier (Bouroubi, 2009) :

- Il existe un large éventail de variables d'identification : éléments majeurs, mineurs, en traces, isotopes stables de la molécule d'eau, isotopes stables du soluté, isotopes radioactifs, gaz dissous. Toutes ces variables peuvent être de plus complémentaires entre elles ;
- Les différentes variables chimiques peuvent apporter des informations concernant les diverses parties du système karstique (zone d'infiltration, zone noyée.), les temps de séjour de l'eau dans l'aquifère, les conditions d'écoulement dans le milieu (vitesse de circulations, conditions d'aération), l'existence d'un colmatage argileux, et les phénomènes de mélange d'eaux d'origines différentes au sein d'un même aquifère ou provenant de plusieurs sous-systèmes ;
- Les données hydrogéochimiques peuvent être obtenues en tous points des systèmes karstiques. En effet, bien que l'information acquise à l'exutoire principal soit préférable, il suffit de pouvoir prélever de l'eau au sein de l'aquifère ; les prélèvements peuvent alors être effectués en des points accessibles du système (piézomètre, forage, grotte, rivière souterraine...). Dans ce cas, il est souhaitable de connaître la position du lieu de prélèvement par rapport à la structure d'ensemble du système karstique ;
- Certaines variables chimiques, les isotopes en particulier, peuvent aider à faire la part des diverses modalités d'infiltration (rapide ou différée). Il faut noter que ces différents modes d'infiltration, qui peuvent avoir une influence prépondérante sur le fonctionnement de l'aquifère, ne sont pas distinguables par les données hydrodynamiques seules ;
- L'approche géochimique permet d'étudier les systèmes karstiques à long temps de réaction. L'approche indirecte, fondée sur la géochimie, doit, de préférence, être effectuée dans le cadre d'une analyse systémique, c'est à dire de l'analyse globale du système à partir de son fonctionnement. L'hydrogéochimie devient alors un élément complémentaire de l'hydrodynamique, et de la thermique des eaux souterraines. C'est la confrontation de toutes ces approches qui permet de reconstituer les modalités de transfert dans l'aquifère.

I.8.3.2.Particularités des eaux karstiques :

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

a. Caractéristiques des éléments majeurs :

Les éléments majeurs correspondent aux anions et cations qui constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux, ils sont classiquement représentés par les espèces suivantes (Bouroubi, 2009):

➤ Le calcium et les bicarbonates (Ca^{2+} et HCO_3^-)

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

- l'agressivité de l'eau qui entre dans le système, régie par sa teneur en CO_2 dissous et son pH ;
- le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère ;
- l'état du système calco-carbonique par rapport à l'équilibre de cette réaction. Si l'eau est sursaturée par rapport à la calcite, elle aura tendance à précipiter des carbonates. Par contre, elle tendra à dissoudre les calcaires si elle est sous-saturée par rapport à la calcite.

➤ Les sulfates (SO_4^{2-}) :

L'ion sulfate est généralement l'anion le plus abondant après les bicarbonates dans les eaux d'origine karstique. Il a des origines diverses :

- Météorique ;
- Origine interne au système, par oxydation des minéraux sulfurés présents dans les calcaires (pyrite) ou par dissolution du gypse ou d'anhydrite dans les terrains traversés. Dans ce cas, l'ion sulfate caractérise essentiellement les eaux de la zone noyée à cause de son acquisition lente dans l'aquifère. Il caractérise alors des eaux à temps de séjour long (plusieurs semaines à plusieurs mois) ;
- Origine biologique à partir de la dégradation de la matière organique dans le sol ;
- Anthropique (origine agricole, engrais) ;

Cet ion peut aussi marquer des eaux superficielles ayant lessivé des marno-calcaires. Seule une bonne connaissance géologique du système étudié, permet d'attribuer une origine interne ou externe à ce traceur.

➤ **Le magnésium (Mg^{2+}) :**

Les apports du magnésium par la pluie sont négligeables. La présence de Mg^{2+} dans les eaux karstiques a donc toujours une origine interne au système. Elle témoigne de la dissolution de dolomies, de calcaires ou éventuellement de marnes dolomitiques (Muet, 1985). L'acquisition de cet élément est lente (la cinétique de dissolution est longue, supérieur à celle de la calcite). Le magnésium est donc un bon indicateur d'eaux à temps de séjour prolongé dans l'aquifère. Toutefois, Mg est aussi associé aux évaporites fournissant Cl^- et surtout SO_4^- . Dans ce cas, la cinétique de sa mise en solution est rapide.

➤ **Les chlorures (Cl^-) :**

Les chlorures sont généralement peu abondants dans les eaux carbonatées. La charge électrique négative des ions chlorures n'est pas propice aux phénomènes d'adsorption. Les ions chlorures sont généralement considérés conservatifs et peuvent, à ce titre, être utilisés pour caractériser les phénomènes de mélange d'eau de qualités différentes. Les chlorures sont globalement peu présents dans les eaux d'origine karstique, leur origine est exclusivement météorique; ils sont associés à la présence de minéraux évaporitiques ($NaCl$, KCl , $MgCl$,...) qui requièrent d'importantes saturations avant précipitation. Les concentrations en chlorures inférieurs à 10 mg/l dans les eaux des milieux karstiques sont généralement expliquées par le processus d'évapotranspiration, qui conduit à une augmentation des concentrations en chlorures des eaux de pluie.

A l'exception de ce phénomène, les concentrations élevées (> 10mg/l) dans les aquifères peuvent être attribuées à:

- des apports d'eaux usées (pollution anthropique) ;
- des intrusions d'eau marine ;
- au lessivage de formation évaporitique.

➤ **Le sodium (Na^+) :**

Dans les milieux karstiques, étant donné les basses températures (< 20°), les temps d'interaction rapides et les faibles pourcentages en minéraux silicatés (feldspath, plagioclases) contenus dans les carbonates, la production de sodium par dissolution est un phénomène de faible importance. De manière similaire aux chlorures, le sodium est généralement peu présent dans les eaux d'origine karstique, il provient essentiellement d'apport météoriques, (leur origine est externe au système) ; il peut aussi être fournie par des échanges de cations avec les minéraux argileux présents dans la formation. À l'inverse des chlorures, les phénomènes d'évapotranspiration provoquent une

diminution des teneurs en sodium, prélevé par les systèmes des plantes. Les variations des concentrations dans les eaux karstiques peuvent donc être attribuées à des interactions avec la matrice argileuse (échanges de cations).

➤ **Le potassium (K^+) :**

Le potassium peut être apporté par les engrais. Il constitue donc un indicateur de pollution anthropique. Le potassium est généralement peu présent dans les eaux d'origine karstique (concentration voisine de 1 mg/l, voire inférieure). Les concentrations élevées en potassium dans les eaux peuvent être également attribuées à des intrusions d'eau marine.

➤ **Les nitrates (NO_3^-) :**

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

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

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

➤ **La silice (SiO_2)**

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

b. Les éléments à l'état de traces :

Les éléments à l'état de traces sont essentiellement les métaux. On distingue trois groupes :

- les alcalins et les alcalino-terreux : Rb, Sr, Cs, Ba ;
- les métaux de transition : Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, As, Sb ;
- les métaux lourds : Zn, Cd, Pb, Ti, U.

Parmi ces métaux, le plus couramment utilisé pour l'étude des eaux souterraines est le Strontium (Sr). En milieu karstique, les teneurs en Sr sont de quelques dizaines à plusieurs centaines de $\mu\text{g/l}$. Le Sr peut remplacer le Ca dans la structure cristalline des minéraux carbonatés car ces deux éléments possèdent des rayons ioniques très voisins. Cet élément est donc utilisé comme traceur des circulations souterraines (Bouroubi, 2009).

I.9. Exploitation des sources karstique :

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

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

I.10. Vulnérabilités des aquifères karstique :

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

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

Ne pas pouvoir accéder aux écoulements contraints à développer des méthodes originales, et multicritère, en particulier pour la cartographie de la vulnérabilité :

- a. **Méthode «E.P.I.K»** : La méthode prend en compte quatre critères: l'**E**pikarst, la couverture **P**rotectrice, les conditions d'**I**nfiltration et le développement du réseau **K**arstique. Ces critères correspondent à quatre caractéristiques spécifiques, responsables de l'organisation des écoulements, au sein d'un aquifère karstique .Cette méthode permet d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines des régions karstiques, de manière globale et rigoureuse. Après avoir déterminé les limites du bassin d'alimentation des sources (Baali, 2007).

b. Méthode « RISK » : La méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK et de la méthode RISKE, dérivée de cette dernière, en raison de leur spécificité envers les aquifères karstiques. 4 critères caractéristiques du fonctionnement et de la structure des aquifères karstiques ont été retenus (Metteal, 2005):

- R pour la roche aquifère ;
- I pour les conditions d'infiltration ;
- S pour le sol et la couverture protectrice ;
- K pour le degré de développement de la karstification.

c. Méthode «PaPRIKa» : Cette méthode utilise un modèle conceptuel de l'aquifère karstique pour déterminer 4 critères (Muet et Vier, 2011) :

- P pour couverture Protectrice : Correspond à la structure la plus protectrice, résultant de la combinaison du critère Sol, des caractéristiques de la zone non saturée (lithologie, épaisseur, fracturation) et le fonctionnement épikarstique;
- R pour nature du réservoir souterrain : Caractérise la potentialité de la roche à être karstifiée ;
- I pour la nature de l'infiltration : caractérise les conditions d'infiltration diffuse et ponctuelle à partir des pentes et de la cartographie des pertes, dolines et avens, ainsi que la distance aux cours d'eau alimentant la perte ;
- K pour degré de karstification et de fonctionnement du système karstique : tient compte du degré d'organisation des écoulements et souligne la position des axes de drainage, connus à partir des études hydrogéologiques et/ou reconnus par exploration directe.

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

- Elimination rapide des pollutions accidentelles touchant le réseau de drainage ;
- Effets retardateurs généralement réduits (adsorption, dispersion) ;
- Effets cumulatifs d'un cycle à l'autre très réduits du fait des temps de séjour globalement courts ;
- Une amélioration rapide de la qualité des eaux après réduction à la source des causes de pollution.

Dans le détail, ces généralités doivent être modulées en fonction de la particularité de chaque aquifère karstique.

Matériels et méthodes

II.1.Présentation de la région d'étude

II.1.1.Introduction

Plusieurs éléments importants lient l'eau à Toudja. Parmi ces éléments, il y a bien sûr ces nombreuses sources 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 Ainsar (la source).

Par ailleurs, aux abords immédiats de Bejaia, le massif calcaire du Gouraya est soumis à un abondant régime de pluies, alors que la ville demeure mal alimentée en eau. Il paraissait normal à un groupe d'hydrogéologues, à leur tête Alexis Lambert, de penser que ce massif calcaire renfermait des réserves d'eau pouvant être utilisées comme complément d'alimentation (PNG, 2008).

Les sources, faisant l'objet de ce travail, se trouvent à Toudja et dans la baie des Aiguades. De par l'importance et la qualité de leurs eaux atypiques, due à leur caractère karstique, elles font l'objet d'une description dans ce qui suit.

II.1.2.Situation et limites

La wilaya de Bejaia est située sur la partie orientale de l'Algérie septentrionale, à environ 200 km à l'est de la capitale (ORGM, 1999). Elle s'ouvre sur la mer Méditerranée avec une façade maritime de plus de 100 km, Elle est limitée par (DPAT, 2012) :

- ✓ La mer Méditerranée au Nord ;
- ✓ La Wilaya de Jijel à l'Est ;
- ✓ Les Wilaya de Tizi Ouzou et de Bouira à l'Ouest ;
- ✓ Les Wilaya de Bordj Bou Arreridj et Sétif au Sud.

Elle s'étend sur une superficie de 3 223.5 km² répartie comme suit (Anonyme, 2005):

- Superficie agricole utile : 129.848 ha ;
- Pacages et parcours : 29.859 ha ;
- Terres improductives des exploitations : 3.587 ha ;
- Superficie forestière : 122.500 ha ;
- Terres non agricoles : 36.554 ha.

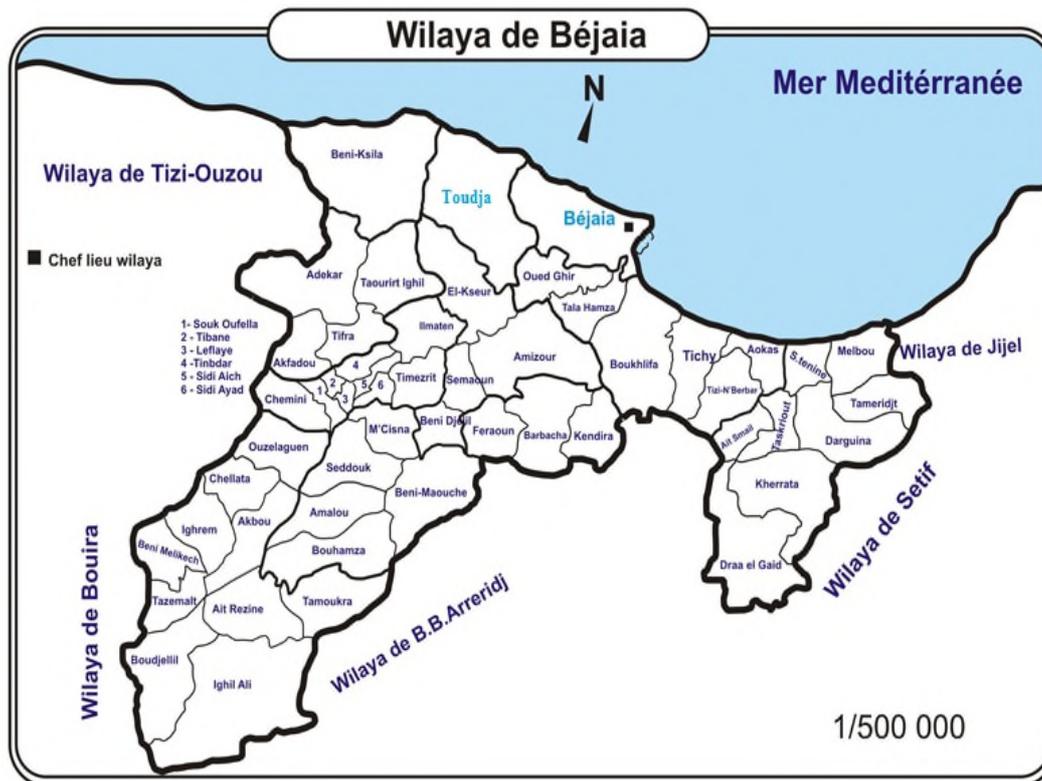


Figure N° 07 : Carte de localisation de la wilaya de Bejaia (Google image).

La Wilaya de Bejaia est composée de 19 Dairas et 52 Communes, dont la commune de Toudja, située dans la partie Nord centre du territoire de la wilaya .Administrativement, elle fait partie de la daïra d'El kseur, elle est limitée comme suit (Anonyme, 2008) :

- ◆ Au Nord par la mer Méditerranée ;
- ◆ Au Sud par la commune d'EL kseur ;
- ◆ Au Sud-est par la commune d'Oued Ghir ;
- ◆ A l'Est par la commune de Bejaia ;
- ◆ A l'Ouest par la commune de BéniKsila.

Le territoire de la commune de Toudja s'est, en grande partie, développé dans le domaine des reliefs montagneux de la wilaya de Bejaia. Il est axé au Nord par une bande littorale sur une longueur d'environ 16km, et s'étend sur une superficie de 167.13 km² équivalent à 5.18% de la superficie totale de la wilaya de Bejaia (Anonyme, 2008).

II.1.3.Géologie

II.1.3.1.Aperçu géologique de l'Algérie du nord

Dans le nord d'Algérie, on distingue deux grands ensembles (Duplan ,1952) :

- ✓ le domaine kabyle ou domaine des chaînes littorales kabyles. Il est localisé aux deux massifs anciens de grande et petite Kabylie et à leur couverture sédimentaire. Cette couverture forme à leur bordure un certain nombre de plis plus au moins continus ;
- ✓ le domaine tellien ou domaine des chaînes telliennes. Il englobe les régions plissées, comprises entre les chaînes littorales kabyles et les hauts plateaux.

Ces deux régions présentent de nombreuses différences stratigraphiques, relatives aux sédiments du trias, du jurassique supérieur, du crétacé et de l'oligocène.

II.1.3.2. Géologie de la région de Bejaia

La wilaya de Bejaia fait partie du domaine tellien. Elle se situe entre les massifs intermédiaires de la grande et petite Kabylie, constitués d'anciennes roches métamorphiques. Les dépôts mésozoïque et cénozoïque participent à la construction géologique de la région, qui se trouve à l'état d'une tectonique plissantes et disjonctive des plus complexe (ORGM, 1999).

La région 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 flysch crétacés et tertiaires respectivement massylliens, mauritaniens et numidiens, du Miocène et du Plio-Quaternaire (Medaouri *et al.*, 2010).

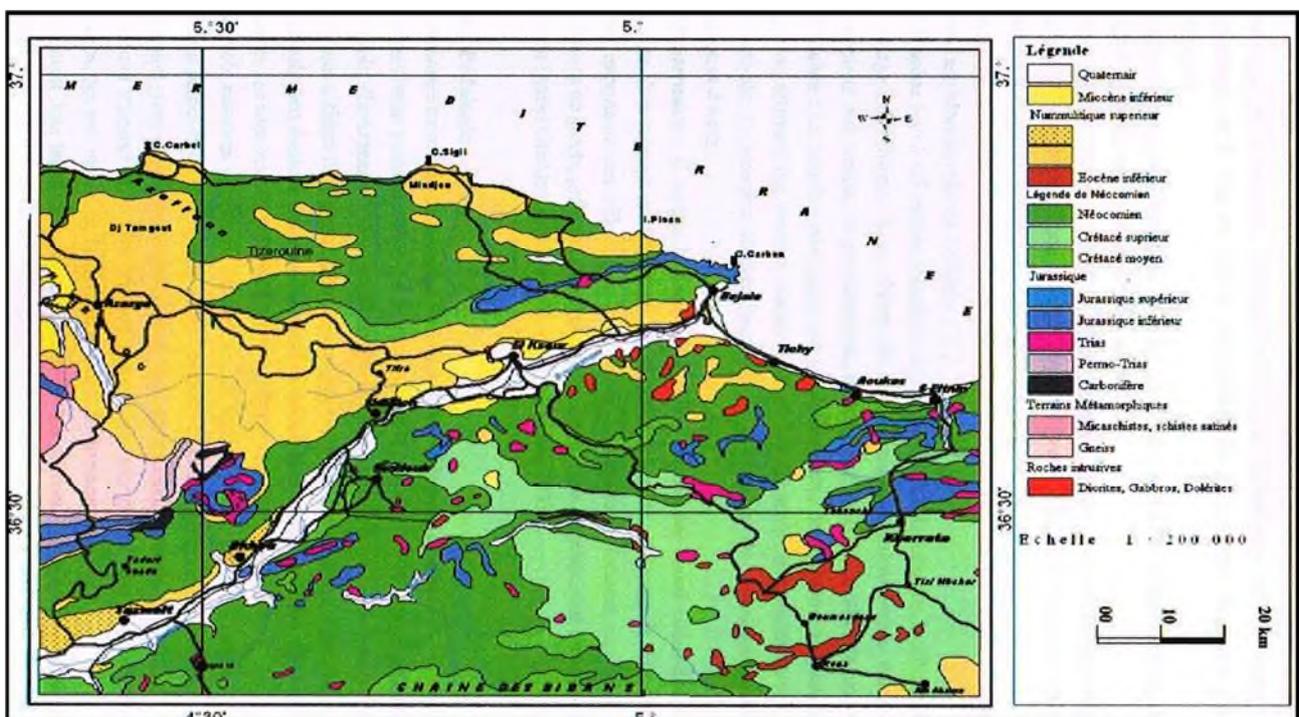


Figure N°08 : Carte géologique de la région de d'étude (extrait de la carte géologique nord Constantine 1/200.000).

✓ Cap Carbone – Aiguades

La structure d'ensemble montre un système de plis dans les niveaux tendre (Jurassique et Crétacé) et des écailles fracturées des niveaux compétant (Lias) (fig. 09). Elle montre également une série d'accidents délimitant plusieurs écailles : Ecaille de Cap Carbone, de la Pointe Noire – Gouraya et des Aiguades. La pointe noire qui correspondant au mont Gouraya domine la région de Bejaia. Elle est constituée par deux écailles formées de dolomies massives et calcaires lités du Lias. La première écaille, chevauchant vers le Sud une série flyschöide du Crétacé, alors que l'écaille septentrionale se superpose aux alternances marno-calcaires du Jurassique Supérieur par l'intermédiaire d'un contact chevauchant à regard Sud.

La vergence des structures dans cette région est double (Nord et Sud). Plusieurs retro chevauchements ont été notés. Nous relevons également celui qui fait chevaucher les dolomies massives et calcaire lités du Lias des Aiguades sur les schistes du Crétacé (Medaouri *et al.*, 2010).

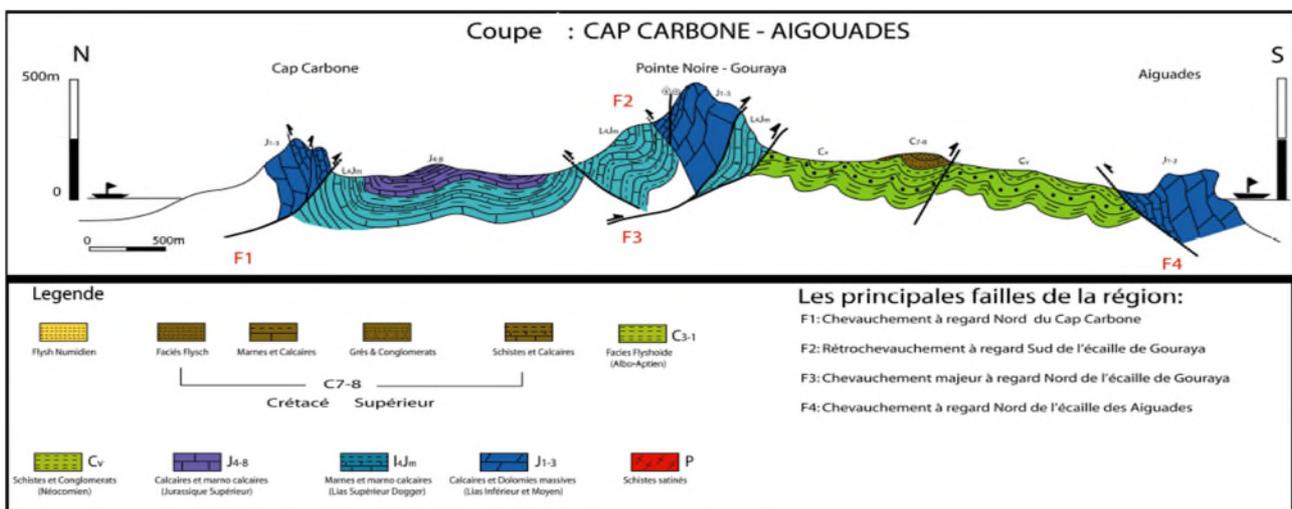


Figure N°09: Coupes géologiques montrant la double vergence dans la région Cap Carbone-Aiguades (Medaouri *et al.*, 2010).

✓ Toudja

Le territoire de Toudja est inscrit dans une partie Nord-Est de la wilaya de Bejaia, dans le domaine de la marge littorale et le prolongement naturel de la chaîne de montagne du Djurdjura. L'examen de la carte géologique de Bejaia a permis de déterminer dans le détail, les différents faciès géologiques correspondants au territoire communal de Toudja. Il s'agit de (Anonyme, 2008):

- Plage marine du niveau inférieur du Tyrrhénien ;
- Eboulis de lias consolidés du Pliocène ;
- Oligocène inférieur (numidien supérieur) ;
- Zones schisteuse et argileuse (numidien Inférieur) ;
- Flysch à conglomérats et Quartzites de la formation Albien ;

- Marno-calcaire et conglomérats du cénonanien ;
- Calcaire lithographiques marneux, rubanés et marbres radiolarites et couches violacées, bréchets et conglomérats des formations de séquanien, callovien et bajocien ;
- Marne calcaire et de calcaire ;

II.1.4. Orographie et caractéristiques morpho-métriques

Situé en plein atlas tellien, 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 (DPAT, 2012) :

-L'ensemble de montagnes: occupe 75% soit 3/4 de la superficie totale de la Wilaya. Elle est constituée des chaînes des Bibans, Babors et Djurdjura.

-L'ensemble de piémonts: d'une morphologie ondulée constitué 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 de plaine: 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 et la plaine côtière qui sépare la mer et la chaîne des bords, elle se présente comme une bande étroite, qui s'étend de l'embouchure de Oued Soummam à celui de Oued Agrioun, soit une trentaine de Kilomètres.

✓ Localité « Aiguades »

Les Aiguades (sources) sont situées dans le périmètre du Parc National de Gouraya, occupant le massif montagneux qui domine, au Nord-ouest, la ville de Bejaia. Il part du bord même de la mer et s'étend sur toute l'arête rocheuse du Djebel Gouraya dont le point culminant, marqué par le Fort Gouraya, est de 672 m. Le territoire du Parc s'étend également sur le Djebel Oufarnou : petit massif calcaire culminant à 384 m et le versant Sud-est d'Ighil Izza qui culmine à 359 m. Le Parc National de Gouraya se caractérise par un relief très accidenté, où les pentes sont partout supérieures à 25 %. Ce qui atteste la nature géologique des roches résistantes à l'érosion malgré la très forte inclinaison. Les faibles pentes, c'est-à-dire de 3 à 12,5 % apparaissent dans un seul endroit : la partie Nord-ouest du Parc, où le relief est moins escarpé. Cette zone correspond à la plage située au Sud-est de la pointe Mezaña, et du lit de l'oued d'Ighzer-n'Sahel. Quand aux zones ayant des pentes moyennes; c'est-à-dire de 12,5 à 25 %, elles correspondent soit à des replats inclinés le long des versants tel que le plateau des ruines, soit à des sommets de montagnes arrondis (PNG, 2008).

✓ **Localité « Toudja »**

Son territoire présente généralement un relief accidenté, et raviné par un réseau hydrographique important et parcourant des terrains de faibles à moyennes potentialités agricoles. C'est une zone montagneuse insérée entre la mer au Nord et la vallée de la Soummam au Sud. En effet, les points culminants dans ces reliefs sont représentés par les Djebels d'Aghbalou (1353m), d'Ifri ou Wayzen (1219m) et d'Ibarissene (1126m). Les principaux ensembles de cette commune, en allant du Nord au Sud, sont (Anonyme, 2008) :

- ❖ **les reliefs littoraux** : les reliefs littoraux se succèdent suivants trois dispositifs : une bande de plages dunaires succédées et très découpées par des pointes rocheuses formants des caps. Les altitudes, dans ce secteur, ne dépassent pas les 50 m. Ensuite les versants falaises qui forment l'essentiel des systèmes littoraux. Ce dispositif concerne tous les reliefs mitoyens aux plages où l'altitude atteint une valeur de 200 m. Enfin le troisième, à caractère montagnard, concerne les premières lignes de reliefs qui contrôlent directement la façade littorale avec ses plages, ses falaises ou ses versants falaises, Les altitudes sont plus ou moins importantes ; elles varient de 200 à 400 m.
- ❖ **les reliefs montagneux de l'arrière pays** : la ligne de crête joignant djebel Gouraya à l'Est au djebel Aghbalou à l'Ouest, coupe le territoire de Toudja en deux zones naturelles distinctes : la zone Nord exposée au vent du Nord humide couvre les 2/3 du territoire de la commune. Les reliefs constituent des massifs aux pentes abruptes, culminant respectivement à 563 m au Takarouit N'charah et 860 m à Adrar Abraes. Au Sud de la ligne orographique d'Aghbalou, les reliefs retombants en deux falaises déchiquetées séparées par le replat d'Ibarissene. Cette zone s'étale jusqu'aux reliefs du Djebel Manchar. En effet, les points culminants dans ces reliefs sont représentés par les Djebels d'Arbalou (1353m) et d'IfriouWayzen (1219m).

II.1.5.Hydrographie

Faisant partie d'une région assez arrosé, la wilaya de Bejaia est traversée par plusieurs oueds drainant les eaux superficielles de ruissellement vers la mer. Les plus important sont : oued Soummam, oued Agrioun, oued Djemaa et oued Zitouna, ainsi que plusieurs lacs dont les plus importants sont le lac Mezaia, le lac Noir d'Akfadou et le lac Tamelaht (Anonyme, 2004).

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

II.1.6.Climatologie

Le climat est un ensemble de conditions naturelles qui caractérisent l'atmosphère en un lieu donné. Parmi les facteurs climatiques qu'on peut distinguer, nous trouvons (Ramade, 1984) :

- ✓ les facteurs énergétiques : lumière et température ;
- ✓ les facteurs hydrologiques : précipitations et hygrométrie ;
- ✓ les facteurs mécaniques : vent et neige.

Dans notre étude, les données climatiques utilisées sont recueillies au près de la station météorologique de l'ONM située à l'aéroport de Bejaia. La période d'observation s'étale 34 ans (1978 à 2012).

II.1.6.1.Les précipitations

La pluviométrie constitue un facteur écologique d'importance fondamentale, non seulement pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres et aquatiques, mais aussi pour la répartition des êtres vivants (Ramade, 1984).

D'après Seltzer (1946) in Lounaci (2005), la pluviométrie en Algérie est sous l'influence des facteurs géographiques : l'altitude, la latitude, la longitude et l'exposition. En effet, la pluviosité augmente avec l'altitude, mais elle est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides. Elle augmente de l'Ouest en Est, et diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

Tableau N°II : les moyennes mensuelles des précipitations en mm de la région de Bejaïa de 1978 à 2012 (source station météorologique de Bejaia-aéroport)

| Mois | Jan. | Fév. | Mars | Av. | Mai | Juin | Juil. | Aout | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. | Total |
|---------------|------|------|------|------|-----|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| P (mm) | 110 | 88.9 | 79.5 | 71.3 | 42 | 15.1 | 5.3 | 9.6 | 58.1 | 75.4 | 103.2 | 143.6 | 793 |

D'après le tableau :

- La moyenne annuelle des précipitations de la période 1978-2012 à Bejaia est de 793 mm ;
- les maximas des précipitations moyennes mensuelles sont observés au mois de novembre, décembre et janvier avec respectivement 103.2, 143.6 et 110 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 5.3 mm.

II.1.6.2. Température

La température est un facteur écologique limitant de première importance car elle intervient, d'une part, dans l'étude hydroclimatique d'une région et d'autre part, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne, de ce fait, la répartition des espèces animales et végétales (Ramade, 1984).

Tableau N°III: Températures moyennes mensuelles de la région de Bejaia (1978-2012)

| Mois | Jan | Fév. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | Aout | Sep | Oct. | Nov. | Déc. |
|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| M | 16.5 | 16.9 | 18.6 | 20.3 | 22.9 | 26.4 | 29.5 | 30.2 | 28.1 | 25.3 | 20.8 | 17.5 |
| m | 7.7 | 7.8 | 9 | 12 | 14.4 | 18 | 20.9 | 21.7 | 19 | 16.4 | 12.2 | 9 |
| M+m/2 | 12.1 | 12.3 | 13.8 | 16.1 | 18.6 | 22.2 | 25.2 | 25.9 | 23.5 | 20.8 | 16.5 | 13.2 |

- M : température maximale ;
- m: température minimale ;
- M+m /2 : température moyenne.

A la lecture de ce tableau, nous remarquons que les mois de janvier et février sont les plus froids avec 7.7 et 7.8 °C. Par contre les mois de juillet et août sont les plus chauds avec 29.5 et 30.2 °C, respectivement.

II.1.6.3. Synthèse des données climatiques

➤ Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Ce diagramme nous renseigne sur la saison sèche d'une région donnée. On porte sur un même graphe les températures ($T^{\circ}\text{C}$) et les précipitations (P mm) sur l'axe des ordonnées et les mois sur l'axe des abscisses. Il est conçu de telle sorte que la pluviométrie est égale au double de la température moyenne mensuelle ($P = 2T$).

D'après Bagnouls et Gaussen in Dajoz (1985), la période de sécheresse apparaît lorsque la courbe des précipitations passe en dessous de celle des températures.

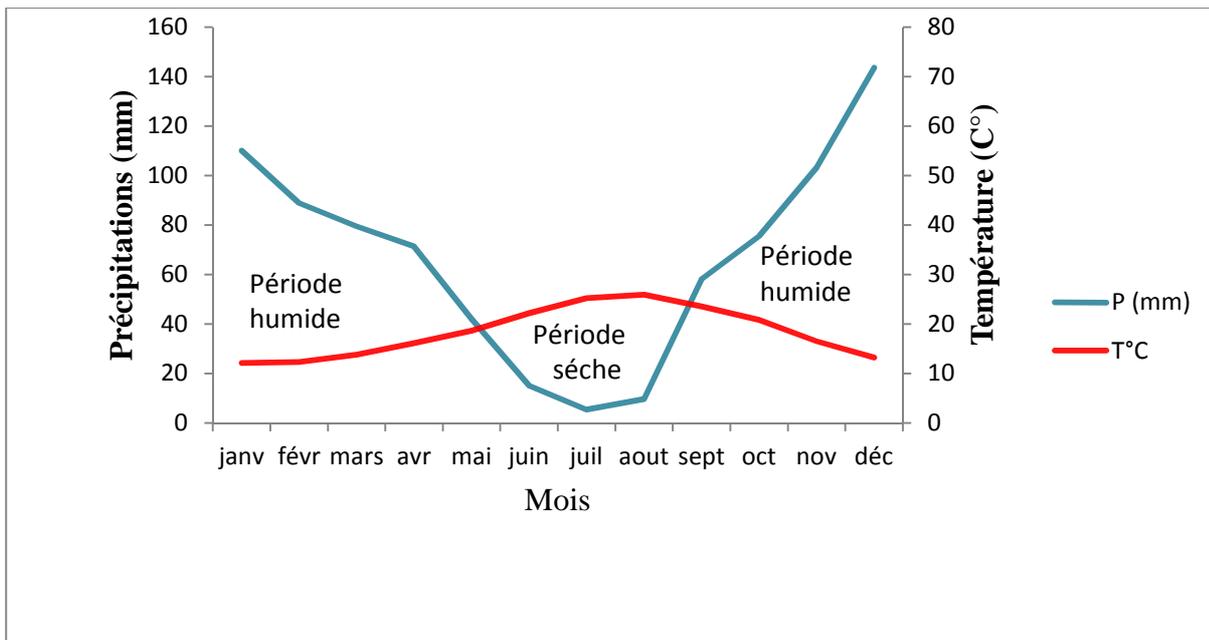


Figure N°10 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen pour la région de Bejaia période (1978-2012).

La figure montre que la saison sèche de la région de Bejaia compte environ quatre mois. Elle s'étale de la fin du mois de mai jusqu'à fin septembre. En revanche, la saison humide s'étend de la fin septembre jusqu'à la fin du mois de mai.

➤ Le quotient pluviométrique et le climagramme d'Emberger

Le climagramme d'Emberger permet de classer une région donnée sur des étages bioclimatiques ; en tenant compte du quotient pluviométrique d'Emberger (Q2). Stewart en 1969 a modifié et simplifié ce quotient. Cette formule, plus élaborée et adaptée aux climats méditerranéens, tient compte aussi de la variation annuelle de la température. Le quotient Q₂ se calcule selon la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{3,43P}{(M - m)}$$

Où :

- **P** : précipitations annuelles exprimées en mm ;
- **M** : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (°C) ;
- **m** : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid (°C).

Pour notre région d'étude :

$$Q_2 = \frac{3,43 \times 793}{30,2 - 7,7} \quad Q_2 = 120,9 \approx 121$$

En projetant ces données (Q2 et m) sur le climatogramme d’Emberger, il en résulte que la région de Bejaia appartient à l’étage bioclimatique sub-humide à hiver chaud (Fig. 11).

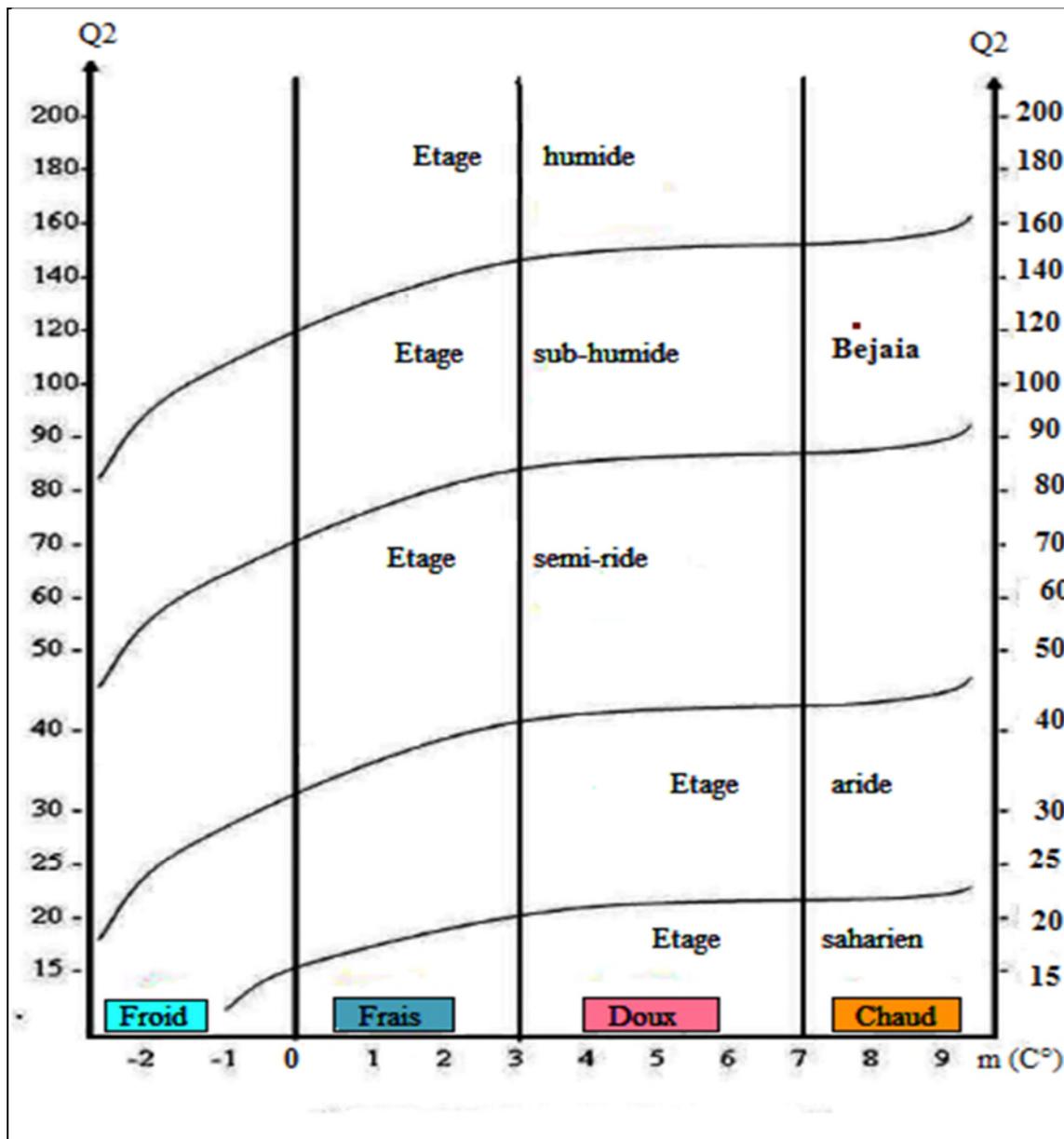


Figure N°11 : Etage bioclimatique de la région de Bejaia sur le Climatogramme d’Emberger modifié par Stewart (1969).

II.1.7. Végétations

La région de Bejaia est d’une richesse floristique importante. En effet, étant donnée que la wilaya reçoit une pluviométrie importante variant entre 600 et 1100mm, le développement de la végétation se fait dans les meilleures conditions (Anonyme, 2005).

Le massif forestier couvre 122 500 ha de l'espace de la wilaya (58 700 ha de forêts soit 47.92% et 63800 ha de maquis soit 52.08%). Les espèces dominantes couvrent une superficie de 62 368 ha dont (Anonyme, 2004) :

- Chêne liège : 41 774 dont 11 771 ha en bon état ;
- Chêne zéne : 6611 ha ;
- Pin d'Alep : 9767 ha ;
- Chêne vert : 2924 ha ;
- Autre : (peuplier, cèdre, sapin de Numidie) : 1292 ha.

La flore du Parc National du Gouraya est riche et diversifiée; environ 526 espèces, dont (PNG, 2008) :

- 123 médicinales et deux espèces non citées dans la flore d'Algérie: (à savoir *Cheiranthuscheiriet Cheilanthescroastica*) ;
- Espèces rares (*Euphorbiadendroides*, *Bupleurumplantaginum*, *Lithon spermum - rosmarinifolium...*) ;
- Espèces communes (*Pinushalepensis*, *Quercus coccifera...*) ;
- Espèces caractérisant les zones humides (*Phragmites communis*, *Typha angustifolia...*).

II.1.8. caractéristiques socioéconomiques

II.1.8.1. Populations

Le total de la population pour la wilaya de Bejaia est de 941.110 habitants, répartie sur une superficie de 3223 km². Elle représente une densité de 292 habitants /km². La répartition des deux communes de Toudja et Bejaia est représenté dans le tableau N° IV (DPAT, 2012) :

Tableau N°IV: Répartition des populations dans les deux commune «Bejaia et Toudja » (DPAT, 2012).

| Commune | Bejaia | Toudja |
|----------------------------------|---------|--------|
| Pop.fin 2012 (habitants) | 183 554 | 10 134 |
| +60 ans | 16 060 | 668 |
| 16-59 ans | 27 188 | 1388 |
| 6-15ans | 124 130 | 6940 |
| Moins de 6 ans | 16 177 | 1139 |
| Féminin | 90 291 | 4930 |
| Masculin | 93263 | 5204 |
| Superficie (km ²) | 120 | 167 |
| Densité (hab. /km ²) | 1527 | 61 |

II.1.8.2.Agriculture

La superficie agricole utile de la wilaya de Bejaia est de 129 848 ha dont 6600 ha irriguée, soit 5.08% (Anonyme, 2004).

Dans les zones montagneuses, nous trouvons principalement une agriculture sans intervention phytosanitaire. Dans les zones de piémont, on pratique la céréaliculture ainsi que les cultures fourragères, associées à un peu d'élevage. 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.2.Echantillonnage

II.2.1.Géo-localisation des deux sources

❖ Le GPS (Global Positioning System)

Le GPS est un système de positionnement par Satellites, qui utilise la triangulation pour se localiser. C'est le récepteur qui calcule la position à partir des données que fournissent les satellites.

Le GPS calcule la position par triangulation :

- le satellite émet une onde électromagnétique de vitesse connue ;
- le récepteur calcule le temps mis par cette onde pour l'atteindre ;
- le récepteur sait alors qu'il se trouve sur une sphère centrée sur le satellite. En recoupant les informations de 2 satellites, le lieu géométrique du récepteur devient un cercle avec 3 satellites, l'intersection se réduit à un (ou 2) points. Avec 3 satellites, l'intersection se réduit à un (ou 2) points. Il faut un 4eme satellite pour figer la position exacte.

Dans la pratique, le détecteur utilise entre 4 et 12 satellites pour calculer sa position. Plus il y en a, plus sa position est contrainte. C'est un problème d'optimisation complexe (Dudok, 2007).

Dans notre cas nous avons utilisé un GPS de marque eltrex (GARMIN), qui nous a permis d'avoir les coordonnées de localisation des nos deux sources.



Figure N°12 : Le GPS (eltrex /GARMIN/1JZ049472can310).

II.2.2 Lieux et dates de prélèvement

Dans le cadre de notre travail, les stations de prélèvement choisies sont : la source El Ainsar de Toudja où nous avons effectué le prélèvement sur trois points ; et la source des Aiguades.

Nous avons effectué deux campagnes de prélèvement :

La première campagne : le 25/03/2015

La seconde campagne : le 28/04/2015



Figure N°13 : Source El Ainsar (vue de l'extérieur)
-Toudja-



Figure N°14 : Robinet près de la source
El Ainsar –Toudja-



Figure N°15 : Sources El Ainsar vue de l'intérieur



Figure N°16: Source El Qaa N'temri –Toudja-



Figure N°17 : Source des Aiguades

II.2.3. Méthodes d'échantillonnage

L'objectif de l'échantillonnage, est de prélever un échantillon d'eau dont le volume est assez petit, pour être transporté facilement, mais suffisamment représentatif, pour que son analyse démontre les caractéristiques de l'ensemble où l'échantillon est tiré. L'échantillon doit être manipulé de manière à ce que sa composition ne soit pas modifiée pendant le transport, et toutes les précautions possibles doivent être prises, afin d'éliminer la contamination ou un changement de composition de l'échantillon, causé par la température ou les manipulations inadéquates (Brais, 2009).

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. Il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physicochimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.) (Rodier *et al.*, 2009).

Pour cela l'échantillonneur doit respecter certaines recommandations qui sont :

- les échantillons doivent être prélevés de préférences dans des flacons en verre ou des flacons en polyéthylène ;
- les bouteilles utilisées pour l'échantillonnage doivent être rincées au moins trois fois avec de l'eau à prélever ;
- les prélèvements se font à une profondeur de 5 à 10 cm de la surface de l'eau, en évitant la pénétration de l'air, et de ne pas touché le fond de la source avec les bouteilles, afin d'éviter de mettre en suspension des particules de sédiment qui risquent de contaminer l'échantillon ;
- les bouteilles sont remplies jusqu'au bord. Le bouchon est placé de telle manière à ce qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport ;
- après la mise en flacons et l'étiquetage, l'échantillon doit être placé dans une glacière a 4°C, qui permet de le maintenir au frais ;
- Au laboratoire, les échantillons sont mis au réfrigérateur pour leur conservation.

II.3.Méthodes d'analyses

II.3.1.Paramètres physique

Les paramètres physique on été mesurés sur le terrain, à l'aide d'un multi paramètre de type EXTECH Instrument EC510. Pour chaque paramètre, il consiste à tremper la sonde, dans le récipient de l'échantillon, laissé stabiliser un moment, puis noter les résultats.



Figure N° 18 : Multi paramètres de terrain (EXTECH Instrument EC510).

II.3.1.1.Mesure de la température

Le paramètre température, exprimée en degré Celsius, joue un rôle très important dans la solubilité des sels, la dissociation des sels dissous et par conséquent la conductivité et le pH. Il a aussi une influence sur l'activité biologique des organismes vivant dans l'eau. Ce paramètre est influencé à la fois par la profondeur à laquelle se fait l'écoulement souterrain et également par la température de l'air du jour d'échantillonnage et de mesure (Mihoubi, 2008).

II.3.1.2.Mesure du pH

Le pH est, par définition, une mesure de l'activité des ions H^+ contenus dans une eau. C'est une caractéristique qui témoigne à la fois de l'acidité et de la basicité d'une solution. La composition chimique et l'état d'équilibre dans lequel se trouvent les composantes de cette solution (Mihoubi, 2008).C'est un élément important pour la détermination de la qualité de l'eau.

II.3.1.3.Mesure de la conductivité électrique

Par définition, c'est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface, séparées l'une de l'autre de 1 cm. Donc ce paramètre traduit une aptitude de l'eau à laisser passer le courant électrique, exprimé en micro siemens/cm et corrigé à une température de 20°C . Ce paramètre permet de donner une estimation sur la minéralisation totale de l'eau (sels dissous, matière organique) (Mihoubi, 2008).

II.3.1.4.Mesure de la salinité

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

II.3.1.5. Total des solides dissous (TDS)

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

Ils proviennent de sources naturelles, ou de l'activité anthropique. L'influence la plus importante qu'exercent les solides dissous sur la qualité de l'eau est l'altération du goût.

II.3.2. les paramètres chimiques

❖ Le spectromètre d'absorption atomique en flamme (SAA)

La SAA fait partie des méthodes classiques d'analyse en chimie analytique. Basée sur des méthodes optiques, elle conduit aussi bien à des résultats qualitatifs qu'à des données quantitatives. L'absorption est utilisée généralement pour faire un dosage. L'élément est connu, on détermine une concentration. Les analyses élémentaires sont très sensibles et largement utilisées pour plus de 70 éléments. Elle convient pour le dosage des éléments prédominants dans l'eau, comme Ca, Mg, K, Na, ainsi que les éléments traces métalliques.



Figure N°19 : Le spectromètre d'absorption atomique en flamme (AA-6501F/SHIMADZU)
(Laboratoire Génie des procédés, Université de Bejaia).

✓ Le principe de fonctionnement

Repose sur l'absorption par les éléments à l'état atomique, d'un rayonnement issu d'une lampe à cathode creuse ou à décharge. Compte tenu de la nature discrète des niveaux d'énergie des atomes, la source lumineuse doit contenir l'élément à analyser ; ainsi son spectre d'émission correspond exactement au spectre d'absorption de l'élément à analyser. Les photons issus de la lampe

remplissent les conditions de résonance pour les atomes « cible », donc induisent des transitions électroniques ce qui provoque l'absorption (Galez, 2011).

Autrement dit, en SAA, on fournit à l'atome à doser, la radiation qu'il est capable d'absorbé, celle-ci est émise par le lampe à cathode creuse, avec une intensité bien défini. Elle traverse la flamme où se trouve l'élément à doser, dispersé à l'état atomique, et prêt a absorbé toute radiation de même fréquences.

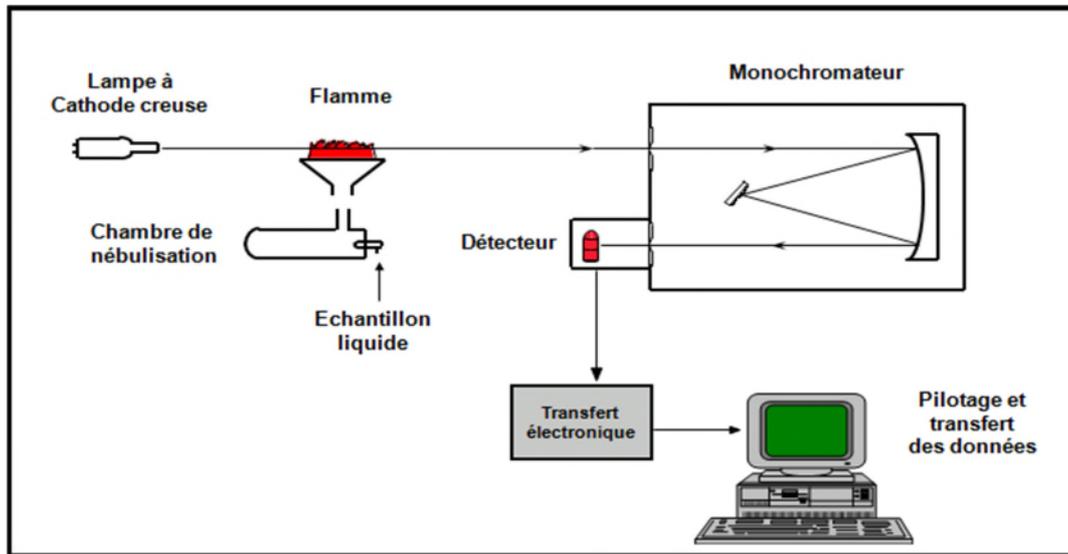


Figure N° 20 : Schéma de principe de la SAA en flamme

II.3.3. Le Système d'Information Géographique

Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées. Il intègre toutes les fonctionnalités d'un système de gestion de bases de données (analyses statistiques, requêtes...) et s'applique dans un environnement géo référencé, pour la visualisation (sous la forme d'image assimilée le plus souvent à une carte) et L'analyse .On distingue quatre fonctionnalités de base d'un SIG (Thierno, 2008) :

- Saisir des données (numérisation) ;
- Stocker des données (base de données graphique et tabulaire) ;
- Analyser des données (requêtes, modélisations, simulations) ; et
- “ Sortir ” des données (cartes, tableaux, graphiques, exportation et transferts de fichiers).

Le Mapinfo est un logiciel permettant d'exploiter un système d'information géographique, que nous allons utiliser afin de saisir nos données de localisations dans une carte.

II.3.4. Le logiciel Diagrammes :

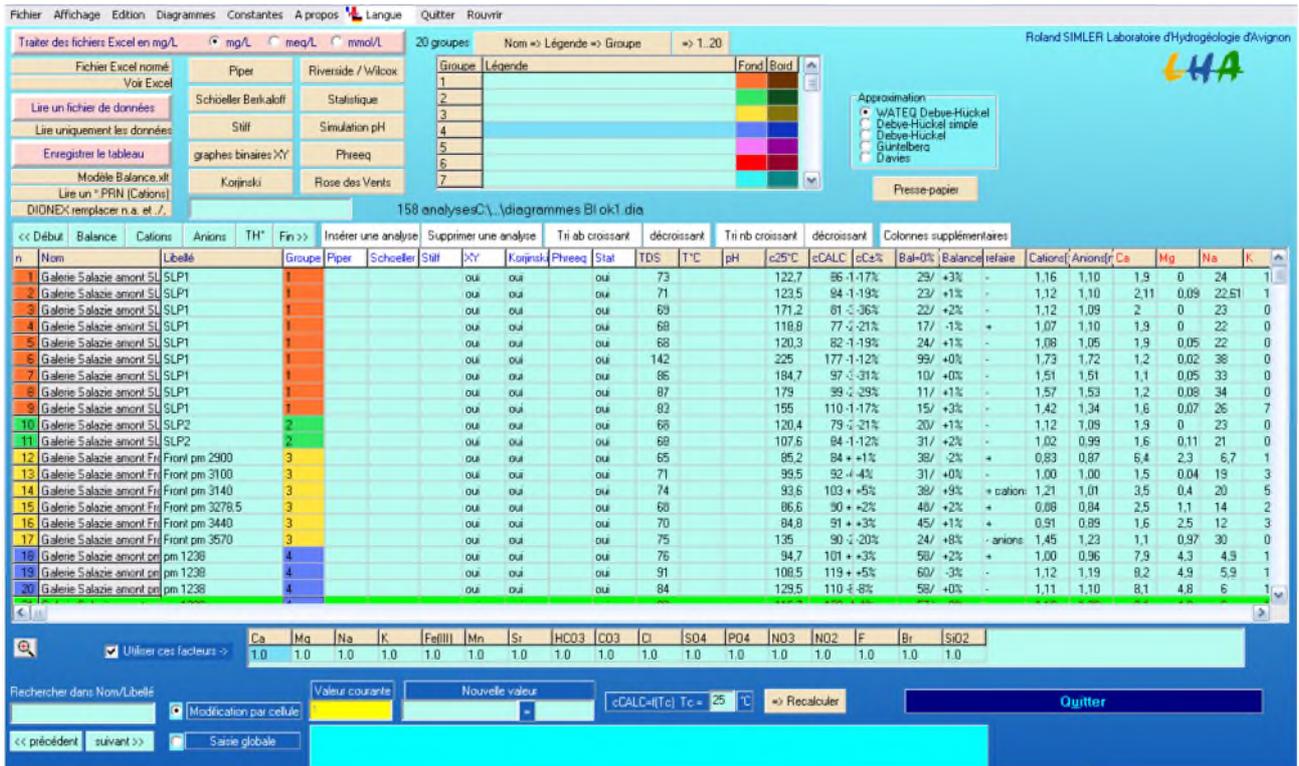


Figure N°21:Interface de commande du logiciel Diagrammes

Pour pouvoir analyser nos données physico-chimique, et en faire ressortir le plus d'information en peu de temps, Le principal outil utilise est le logiciel Diagrammes, crée par Roland Simler (2011) du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre, facilitant l'exploitation des données d'analyse d'eau. Ces fonctions sont variées et complètes, en voici quelques une (Dominique, 2009):

- Les diagrammes : Piper, Stiff, Schoeller-Berkalov – Binaire, Kojinski - Rose des vent ;
- Les paramètres calculés : balances ionique - teneurs en cations, dureté, teneurs en anions, Indice de saturation.

Toutes les fonctionnalités n'ont pas été utilisées, mais ce logiciel s'avère être simple d'utilisation. De ce fait les diagrammes de Piper, de Schoeller et le calcul des équilibres calco-carboniques ont été établis grâce à ce logiciel.

Résultats et discussion

III.1.Préambule

Pour la réalisation de ce travail, nous avons procédé au choix de deux sources karstiques (Toudja et Aiguades) parmi les nombreuses sources qui existent dans la région, et qui font l'objet, dans le cadre d'un projet de recherche soumis, d'un autre travail réalisé par un binôme d'étudiants de la même promotion. Ces deux sources ont été choisies sur la base de leur importance pour la région, leur accessibilité et leur situation dans des lieux sécurisés. Deux campagnes de prélèvements d'échantillons d'eau ont été réalisées. Des mesures de paramètres physiques (T° , pH, CE et TDS) ont été faites in situ. Les échantillons d'eau, transportés au laboratoire dans les conditions adéquates, ont fait l'objet d'analyse par spectrophotométrie à absorption atomique (SAA). Au vu du nombre élevé de demandeurs d'analyse sur SAA, les mesures effectuées concernent uniquement les paramètres chimiques suivant : Zn, Cu, Ni, Cd et le Pb, Afin de compléter nos mesures, nous avons utilisé les résultats de mesures des éléments majeurs (anions et cations) réalisées, durant une précédente campagne, par l'équipe de recherche de l'université de Bejaia, chargée du projet. Tous les résultats obtenus, comparés aux normes de l'OMS, ont servi à la réalisation de cette présente contribution sur l'hydrochimie des deux sources karstiques : Toudja et les Aiguades.

III.2.Géo-localisation des sources

III.2.1.Coordonnées géographiques des deux sources

Tableau N°V : Coordonnés géographiques des sources de Toudja et des Aiguades.

| Sources | | | Coordonnées Lambert | | |
|----------|-----------------|------------------------|---------------------|--------------|--------|
| Localité | Nom commun | Désignation des points | X (°)* | Y (°)* | Z (m)* |
| Toudja | El Ainsar | S1 | E004°53'.698" | N36°45'.164" | 380 |
| | Le Robinet | S2 | E004°53'.717" | N36°45'.127" | 377 |
| | El Quaa N'temri | S3 | E004°53'.732" | N36°45'.106" | 346 |
| Aiguades | - | S4 | E005°06'.148" | N36°45'.863" | 22 |

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

III.2.3. Carte de localisation des sources

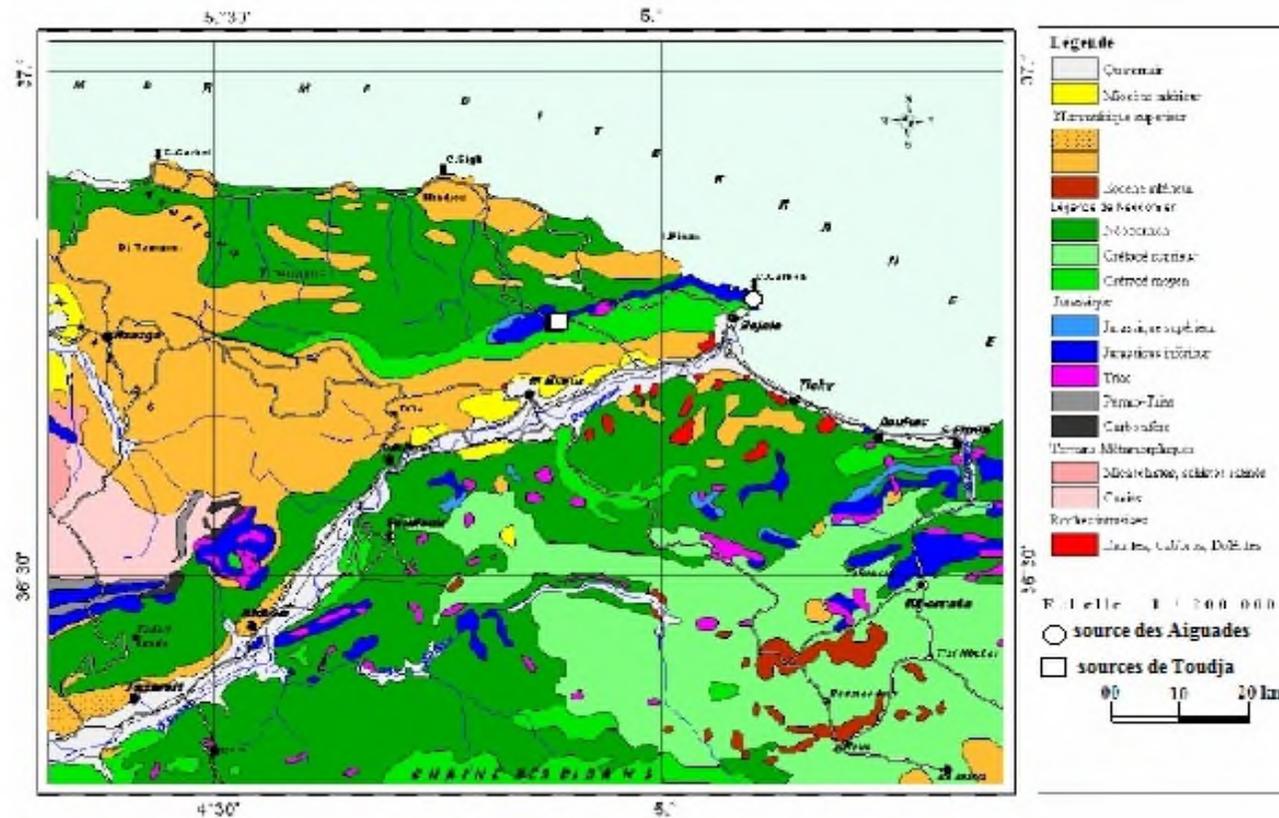


Figure N°22: Localisation des sources Aiguades et Toudja sur la carte géologique de Bejaia1/200.000

III.3.Présentation des résultats d'analyse

Tableau N°VI : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimique de la première campagne en date du 25/03/2015.

| Paramètres physico-chimiques | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------|----------------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|----------|-------------|--------------|
| | T | pH | CE | Salinité | TDS | Cu | Ni | Zn | Pb | Cd |
| Unités | °C | - | µs/cm | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| Normes | <25 | 6.5-9.5 | 2500 | 50 | 1200 | 1-2 | 0.02 | 3 | 0.01 | 0.003 |
| S1 | 19.7 | 8.36 | 636 | 321 | 508 | 0.0643 | 0.1361 | 0.0350 | 0.0203 | 0.0110 |
| S2 | 19.9 | 8.39 | 618 | 309 | 492 | 0.0653 | 0.1355 | 0.0524 | 0.0428 | 0.0130 |
| S3 | 18.5 | 8.67 | 620 | 317 | 503 | 0.0681 | 0.1498 | 0.0544 | 0.0503 | 0.0113 |
| Moyenne | 19,3 | 8.47 | 625 | 316 | 501 | 0,0659 | 0,1398 | 0,0473 | 0,0378 | 0,0117 |
| S4 | 13.3 | 7.60 | 724 | 378 | 579 | 0.0485 | 0.0827 | 0.0463 | 0.0428 | 0.0054 |

Tableau N°VII : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques de la deuxième campagne en date du 28/04/2015.

| Paramètres physico-chimiques | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------|----------------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|----------|-------------|--------------|
| | T | pH | CE | Salinité | TDS | Cu | Ni | Zn | Pb | Cd |
| Unités | °C | - | µs/cm | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| Normes | <25 | 6.5-9.5 | 2500 | 50 | 1200 | 1-2 | 0.02 | 3 | 0.01 | 0.003 |
| S1 | 22.4 | 8.75 | 630 | 319 | 510 | 0.0356 | 0.1721 | 0.0578 | 0.0332 | 0.0050 |
| S2 | 21.9 | 6.50 | 693 | 344 | 428 | 0.0240 | 0.1755 | 0.0505 | 0.0214 | 0.0025 |
| S3 | 23.9 | 8.85 | 735 | 368 | 443 | 0.0289 | 0.1796 | 0.0594 | 0.0375 | 0.0056 |
| Moyenne | 22.7 | 8.03 | 686 | 344 | 460 | 0,0295 | 0,1757 | 0,0559 | 0,0307 | 0,0044 |
| S4 | 20.2 | 7.00 | 646 | 324 | 384 | 0.0357 | 0.1675 | 0.0560 | 0.0161 | 0.0065 |

Tableau N°VIII : Résultats des paramètres chimiques.

| Eléments | | | Unités | Sources | |
|----------------|--------------|-------------------------------|--------|----------|----------|
| | | | | Aiguades | Toudja |
| Anions | Bicarbonates | HCO ₃ ⁻ | mg/l | 390.53 | 447.89 |
| | Sulfates | SO ₄ ⁻ | mg/l | 86.2406 | 212.0849 |
| | Chlorures | Cl ⁻ | mg/l | 118.9341 | 271.5209 |
| | Nitrates | NO ₃ ⁻ | mg/l | 15.1223 | 30.8763 |
| Cations | Calcium | Ca ²⁺ | mg/l | 120.1114 | 179.3405 |
| | Magnésium | Mg ²⁺ | mg/l | 31.9081 | 50.2035 |
| | Sodium | Na ⁺ | mg/l | 88.1931 | 182.3889 |
| | Potassium | K ⁺ | mg/l | 0.7403 | 2.6834 |

III.4 Traitement des données d'analyse par le logiciel Diagramme (Simler, 2011)

Tableau N° IX: Quelques résultats obtenus par le logiciel Diagramme.

| | | Aiguades | | Toudja | |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | 1 ^{er} campagne | 2 ^{eme} campagne | 1 ^{er} campagne | 2 ^{eme} campagne |
| Indice Saturation Calcite | ISC | 0.58 | 0.09 | 1.72 | 1.34 |
| Indice Saturation Dolomite | ISD | 0.77 | 0.10 | 3.17 | 2.45 |
| Indice Saturation Gypses | ISG | -1.37 | -1.36 | -0.87 | -0.87 |
| Indice Saturation Aragonite | ISArag | 0.43 | 0.05 | 1.57 | 1.19 |
| Indice Saturation Anhydrite | ISAnhy | -1.62 | -1.60 | -1.11 | -1.10 |
| Pression partielle de CO ₂ | pCO ₂ (atm) | 0.00902 | 0.03942 | 0.00148 | 0.00433 |
| pH a saturation Calcite | pHsat C | 7.02 | 6.91 | 6.75 | 6.69 |
| pH a saturation Dolomite | pHsat D | 7.22 | 7.05 | 6.88 | 6.81 |
| pH a saturation Aragonite | pHsatArag | 7.17 | 7.05 | 6.90 | 6.84 |
| Mg ⁺⁺ /Ca ⁺⁺ | | 0.438 | | 0.462 | |
| Ca ⁺⁺ /Mg ⁺⁺ | | 2.283 | | 2.166 | |
| Na ⁺ /k ⁺ | | 202.600 | | 115.600 | |
| Cl ⁻ /Na ⁺ | | 0.874 | | 0.965 | |
| Dureté (TH °F) | | 43 | | 65 | |

III.5. Discussion des résultats

III.5.1. les paramètres physiques

❖ La température

Lors de la première campagne, la température est de 13.3 C° aux Aiguades. Elles varient entre 18.5C° et 19.9C° pour Toudja. Quant à la deuxième campagne, la température est de 20.9 C° au Aiguades et entre 21.9 C° et 23.9C° à Toudja. Cette augmentation pourrait être expliquée par la variation saisonnière. En effet, nous constatons que les températures de l'eau à Toudja sont plus élevées par rapport aux Aiguades. Plusieurs facteurs peuvent en être à l'origine : il y a les effets de grotte que présentent cette source et la maritimité. Le gradient géothermique (profondeur de l'aquifère) et le degré de karstification peuvent aussi influencer ce paramètre (Chabour, 2006). La température de l'eau gouverne la solubilité, en particulier celle des gaz mais aussi celle des sels (Boeglin, 2000) ayant des conséquences sur la conductivité (Dib, 2009)

L'OMS ne recommande pas de valeur précise. Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme. La température maximale de l'eau alimentaire est de 25 °C.

❖ Le pH

Pendant la première campagne, le pH est de 7.60 aux Aiguades. Il fluctue entre 8.36 et 8.67 à Toudja. Alors que les valeurs de la deuxième campagne sont de 7.00 aux Aiguades et oscillent de 6.50 - 8.85 à Toudja. La faible valeur enregistrée en S2 pourrait être expliquée par le traitement effectué par chloration au niveau du réservoir d'eau (le robinet).

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 goût. Elle recommande un pH inférieur à 8 pour une bonne désinfection par le chlore. L'eau ne doit pas être agressive et indiquer comme niveau guide : $6,5 < \text{pH} < 9,5$.

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 de terrains pauvres en calcaires ou siliceux ont un pH voisin de 7 et quelquefois un peu inférieur (environ 6). Les eaux naturelles ont un pH qui est fonction des concentrations en gaz carbonique dissous et en hydrogénocarbonates (Boeglin, 2000).

❖ La conductivité électrique

Les conductivités mesurées montrent des valeurs qui varient entre 618 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 735 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durant les deux périodes, avec une légère diminution pour la source des Aiguades dans la deuxième campagne. L'OMS indique pour la conductivité un niveau guide de 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C pour les eaux destinées à la consommation humaine.

Si la conductivité est entre 600 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la minéralisation est importante (Rodier et *al.*, 2009). Toutes les valeurs de conductivité obtenues au cours de la présente étude indiquent une minéralisation moyenne accentuée à importantes.

Rodier et *al.* (2009) signalent que la variation de conductivité est induite par la présence dans le milieu, d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Cette mobilité dépend de la nature des ions dissous et de leur concentration, tels que les ions de calcium (Ca^{2+}), de sodium (Na^+), de chlorure (Cl^-), des bicarbonates (HCO_3^-)...etc. La conductivité électrique augmente avec la concentration des ions en solution et la température (Dib, 2009). Elle ne reflète qu'une minéralisation globale et ne permet pas d'identifier les éléments chimiques mis en cause.

❖ Total des solides dissous (TDS)

Les valeurs de TDS enregistrées lors des deux campagnes oscillent entre 384 mg/l et 579 mg/l. Ces valeurs sont conformes avec celle de l'OMS qui recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine, une eau dont la minéralisation est inférieure à 600 mg/l; au-delà de 1 200 mg/l, elle devient, sauf accoutumance, assez désagréable. Pour des considérations gustatives, une teneur limite de 1 000 mg/l est fixée. Le total des solides dissous est fonction de la géologie des terrains traversés.

❖ La salinité

Les valeurs obtenues, lors de nos deux campagnes, varient entre 309 mg/l et 378 mg/l. Elles ne sont pas très variables entre elles. Ces valeurs sont supérieures à la norme de l'OMS qui est de 50 mg/l. Cette salinité est probablement liée à la libération des ions des sédiments ou à leur concentration. La salinité correspond à la quantité de sels dissous qui sont le chlorure de sodium (NaCl), chlorure de magnésium (MgCl_2)...etc. L'augmentation de la salinité reflète une augmentation en ions sodium (Na^+), magnésium (Mg^{2+}), chlorures (Cl^-)... après dissociation des sels. Elle est fonction de la géologie des terrains traversés (Rodier et *al.*, 2009).

III.5.2. Discussion des paramètres chimiques

III.5.2.1. Les éléments traces métalliques (ETM) analysés

❖ Le Cuivre

Lors de la première campagne, les valeurs enregistrées varient entre 0.0485 mg/l et 0.0681 mg/l avec la valeur minimale aux Aiguades. Tandis que pour la deuxième campagne, les valeurs fluctuent entre 0.0240 mg/l et 0.0357 mg/l avec la valeur minimale à Toudja. Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur guide provisoire de 2 mg/l compte tenu des incertitudes de la toxicité du cuivre pour l'homme, et comme référence de qualité 1 mg/l.

Le cuivre est présent dans la nature sous forme de minerais de cuivre natif, de minerais oxydés ou sulfurés. Il peut se rencontrer dans certaines eaux naturelles généralement à des teneurs inférieures à 1 mg/l (Rodier et al., 2009).

❖ Le Nickel

Les concentrations en nickel enregistrées oscillent d'une moyenne de 0.1398 mg/l à Toudja et une valeur de 0.0827 mg/l aux Aiguades. De la première à la deuxième campagne, une légère augmentation est observée avec une moyenne de 0,1757 mg/l à Toudja et une valeur de 0.1675 mg/l aux Aiguades. Ces valeurs sont élevées par rapport à la norme. Dans l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur guide de 0.02 mg/l.

D'une façon générale, les sols riches en silice ont une teneur en nickel moins élevée que les sols pauvres en silice. La teneur de cet élément dépend des conditions de pH et d'oxydoréduction du milieu. Le Ni est abondant surtout dans les roches basaltiques (Kaid-Rassou, 2009). Le fait que le Nickel ne soit généralement pas retrouvé dans les eaux souterraines, ou en quantités très faibles, pourrait indiquer que la présence de ce métal soit, principalement, liée aux activités humaines.

❖ Le Zinc

Les teneurs en zinc obtenues sont de 0.0350 à 0.0544 mg/l pour la première campagne, et de 0.0505 à 0.0594 mg/l pour la deuxième campagne, avec des valeurs minimales aux Aiguades. Pour l'eau destinée à la consommation humaine, en raison de problèmes particuliers susceptibles d'introduire une gêne pour le consommateur (aspect, goût), l'OMS recommande comme valeur limite pour le zinc de 3 mg/l.

Le zinc se retrouve dans les roches généralement sous forme de sulfure. Le minerai le plus répandu est le sulfure de zinc qui contient également du fer, du cadmium, du manganèse et de l'arsenic. Dans

les eaux, la solubilité du zinc est contrôlée par la solubilité du carbonate, qui est relativement soluble et de l'hydroxyde qui l'est peu. D'une façon générale, les eaux à pH faible ont des teneurs en zinc plus importantes. En présence des teneurs élevées en zinc, il faut se souvenir que ce métal peut contenir 1 % de cadmium (Rodier et *al.*, 2009).

❖ Le cadmium

Les teneurs en cadmium lors de la première campagne sont légèrement élevées à Toudja où la moyenne est de 0.0117 mg/l. Aux Aiguades, elle est dans les normes avec 0.0054 mg/l. Pendant la deuxième campagne, elles sont, respectivement, de 0,0044 mg/l et 0.0065 mg/l, pour Toudja et Aiguades. Pour les eaux destinées à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur limite de 0.003 mg/L. Nos valeurs restent plus proches de la norme Algérienne qui est de 0.01 mg/l.

Le Cadmium enregistre de faibles teneurs dans les eaux, ce qui serait en relation avec son état dans la nature où il ne se présente qu'à de très faible quantité (Desbordes, 2000). Dans la nature (minerais, sols) le cadmium est généralement associé au zinc ; D'une façon générale, les eaux ne contiennent que quelques microgrammes de cadmium par litre. Lorsque les teneurs sont plus élevées, l'origine du cadmium devrait être recherchée dans les effluents industriels. Le cadmium peut aussi être entraîné par les pluies à partir des fumées industrielles (Rodier et *al.*, 2009).

❖ Le plomb

Les concentrations en plomb pour la première campagne fluctuent de 0.0203 mg/l comme valeur minimale à Toudja et 0.0428 mg/l comme valeur maximale aux Aiguades. Tandis qu'à la deuxième campagne, les valeurs maximales sont de 0.0214 mg/l à Toudja et 0.0161 mg/l comme valeur minimale aux Aiguades. L'OMS, dans ses dernières recommandations, indique comme valeur guide 0,01 mg/l et précise que toutes les eaux ne pourront certes satisfaire à cette valeur immédiatement mais qu'en attendant, toutes les mesures visant à réduire l'exposition totale au plomb devraient être mises en œuvre.

Le plomb est un constituant naturel, largement réparti dans la croûte terrestre. Les sols acides sont généralement moins riches en plomb que les sols alcalins. La présence de plomb à des teneurs plus élevées doit être reliée à une cause externe. Cet élément peut être associé aux sulfates et aux carbonates, mais aussi aux argiles et à la matière organique suivant le pH. Cet élément a beaucoup d'affinités avec Cd et Zn. Lors de l'altération de minéraux primaires, le Pb peut être fixé par des argiles comme la kaolinite (Kaid-Rassou, 2009).

III.5.2.2. Les éléments majeurs

A. Les Anions

❖ Les Bicarbonates (HCO_3^-)

Les concentrations varient entre 390.53 mg/l au Aiguades et 447.89 mg/l à Toudja. Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique. La dissolution des roches carbonatées présentes au niveau du secteur étudié, liée à la grande superficie couverte par les calcaires, forme la source principale des bicarbonates contenus dans l'eau.

❖ Sulfates (SO_4^{2-})

La concentration des sulfates varie autour de 86.2406 mg/l aux Aiguades, et atteint une valeur qui tourne autour de 212.0849 mg/l à Toudja. Les normes de potabilité Algériennes sont fixées à 500 mg/l (JORA, 2000).

Les sulfates sont présents dans l'eau en teneurs très variables, et leur présence est liée en premier lieu à la dissolution des terrains du Mio-Pliocène, suite à la légère solubilité des sulfates de calcium (Mihoubi, 2008). Ces concentrations peuvent être largement dépassées dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevée (DIB, 2009).

❖ Chlorures (Cl^-)

Les concentrations en chlorures montrent des valeurs variables, 118.9341 mg/l aux Aiguades et une valeur de 271.5209 mg/l à Toudja. Cette dernière dépasse légèrement les normes fixées par l'OMS à 250 mg/l. Les normes de potabilité Algériennes sont fixées à 200 mg/l et comme concentration maximale admissible 500 mg/l (JORA, 2000).

Ils sont rencontrés en grandes quantités dans les eaux souterraines. Elles peuvent provenir de la dissolution des sels naturels par le lessivage des terrains salés. Le Cl^- est aussi un bon traceur des activités anthropiques (Bakalowicz, 1996). Pour Rodier et al., (2005), les teneurs en chlorures des eaux, sont extrêmement variées et sont liées principalement à la nature des terrains traversés. L'inconvénient majeur des chlorures est la saveur désagréable qu'elle communique à l'eau à partir de 250 mg/l, surtout lorsqu'il s'agit de chlorure de sodium. Pour une quantité équivalente de chlorures, la saveur peut être moins marquée en présence de calcium et de magnésium (Rodier et al., 2009).

❖ Nitrates (NO_3^-)

La concentration en nitrates aux Aiguades est de 15.1223mg/l ; elle est deux fois plus élevée à Toudja avec une valeur de 30.8763mg/l. Le seuil admissible est fixé par l'OMS à 50 mg/l. Toutes les formes d'azote sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Dans les eaux naturelles non polluées; le taux de nitrate est très variable suivant la saison et l'origine des eaux. Il peut varier de 1 à 15 mg/l et de même, une concentration de 2 ou 3 mg/l peut être considérée comme normale (Rodier et *al.*, 2009).

B. Les Cations

❖ Calcium (Ca^{2+})

Les teneurs du calcium oscillent entre 120.1114 mg/l et 179.3405 mg/l. Les normes Algériennes de potabilité pour le calcium sont fixées à 200 mg/l (JORA, 2000).

Le calcium est l'élément présent dans toutes les eaux naturelles (Benamar et *al.*, 2011). C'est un métal alcalino-terreux, extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. C'est un composant majeur de la dureté de l'eau. Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrain traversé. Il existe surtout à l'état d'hydrogénocarbonates et en quantité moindre sous forme sulfate, chlorure...etc. (Rodier et *al.*, 2009). Le calcium est fréquent dans les roches sédimentaires. Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères qui sont facilement solubles (Dib, 2009).

❖ Magnésium (Mg^{2+})

C'est le deuxième élément de la dureté totale, qui présente une origine semblable à celle du Calcium. Les valeurs varient entre 31.9081 mg/l aux Aiguades et 50.2035mg/l à Toudja. La norme de potabilité Algérienne le concernant est de 150 mg/l.

Le magnésium est un élément présent dans toutes les eaux naturelles (Benamar et *al.*, 2011). La variation du magnésium dans les eaux souterraines est due à l'influence des formations carbonatées telles que les calcaires, d'une part, et les formations salifères d'autre part, comme les argiles et les marnes qui sont riches en Mg^{2+} (Dib, 2009). La plupart des sels de magnésium sont très solubles dans l'eau, même le carbonate peut être dissous jusqu'à 300 mg/l à 20°C. Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau. Il est présent sous forme de carbonates et d'hydrogénocarbonates (Rodier et *al.*, 2009).

❖ Sodium (Na^+)

Les valeurs du sodium fluctuent entre 88.1931 au Aiguades et 182.3889 àToudja. Le sodium est un élément constant de l'eau. Toutefois, les concentrations peuvent être extrêmement variables, allant de quelque dizaine de milligrammes à 500 mg/l. Dans l'état actuel des connaissances, il n'existe pas d'argument suffisant pour justifier la fixation d'une valeur indicative pour le sodium dans l'eau, pour la base d'un risque sanitaire (Rodier et *al.*, 2009). Toutefois, les normes Algériennes sont de 200 mg/l (JORA, 2000).

Le sodium est beaucoup plus abondant que le potassium et est toujours présent dans les eaux naturelles avec des proportions très variables. Il provient du lessivage des formations riches en NaCl (argile et marne).

❖ Potassium (K^+)

Les teneurs en potassium sont de 0.7403 mg/l aux Aiguades et de 2.6834mg/l àToudja. Les limites des normes de potabilité Algériennes sont dans les 20 mg /l (JORA, 2000).

Le potassium à faible dose ne représente pas de risques significatifs. Même des variations importantes de ces teneurs dans l'eau n'auraient que des effets négligeables sur les concentrations dans l'organisme (Rodier et *al.*, 2009). Sa présence dans les eaux naturelles ne dépassent pas habituellement 10 à 15 mg/l. Le seuil de perception gustative du chlorure de potassium se situe à environ 20 fois cette valeur (Fall, 2008).

III.4.3. Détermination des faciès chimiques

Une eau souterraine n'est jamais chimiquement pure. La composition chimique des eaux des sources est majoritairement acquise lors de la traversée du sol et de son séjour dans le réservoir. L'eau, au contact de l'encaissant, acquiert une charge minérale caractéristique des roches traversées. Les éléments qui s'y trouvent en solution sont informatifs sur la nature de l'aquifère traversé (Chemseddine et *al.*, 2009)

Pour mieux déterminer le faciès chimique des eaux de la région d'étude, une représentation graphique sur le diagramme triangulaire de Piper, ainsi que celui de Schoëller a été effectuée à partir des résultats analytiques obtenus pour les deux campagnes. Ces diagrammes permettent d'évaluer les pourcentages des éléments chimiques ainsi que leur classification. Ils permettent, en outre, de suivre l'évolution spatiale et temporelle du chimisme entre les différentes campagnes (Chabour, 2006).

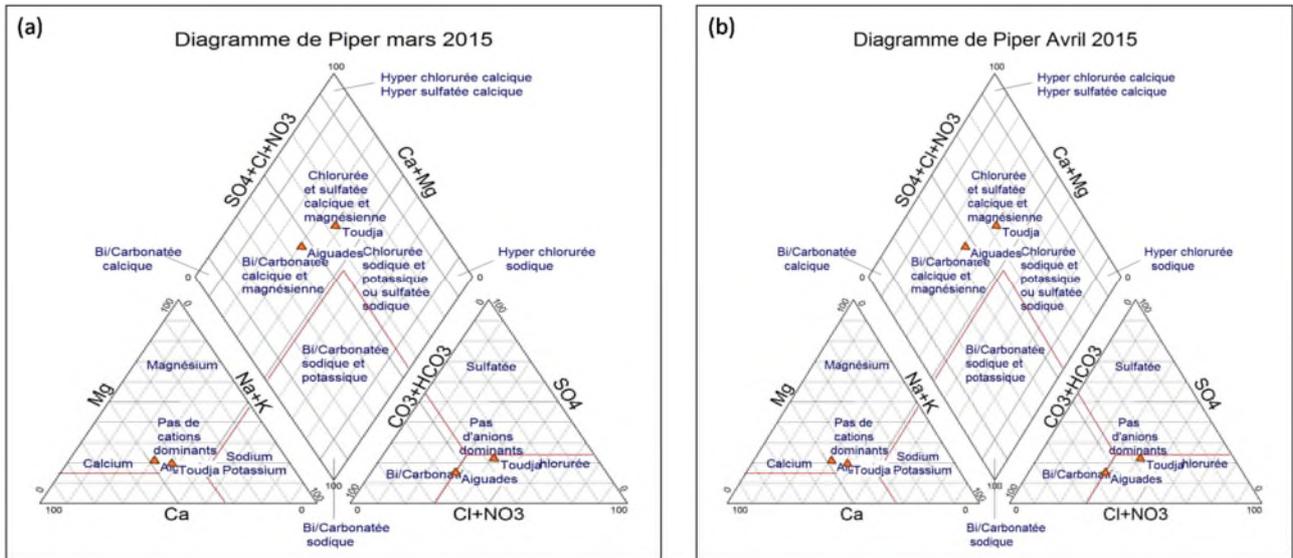


Figure N°23 : Représentation des eaux des systèmes karstiques des Aiguades et de Toudja sur le diagramme de Piper (pour les campagnes de mars (a) et avril (b) 2015).

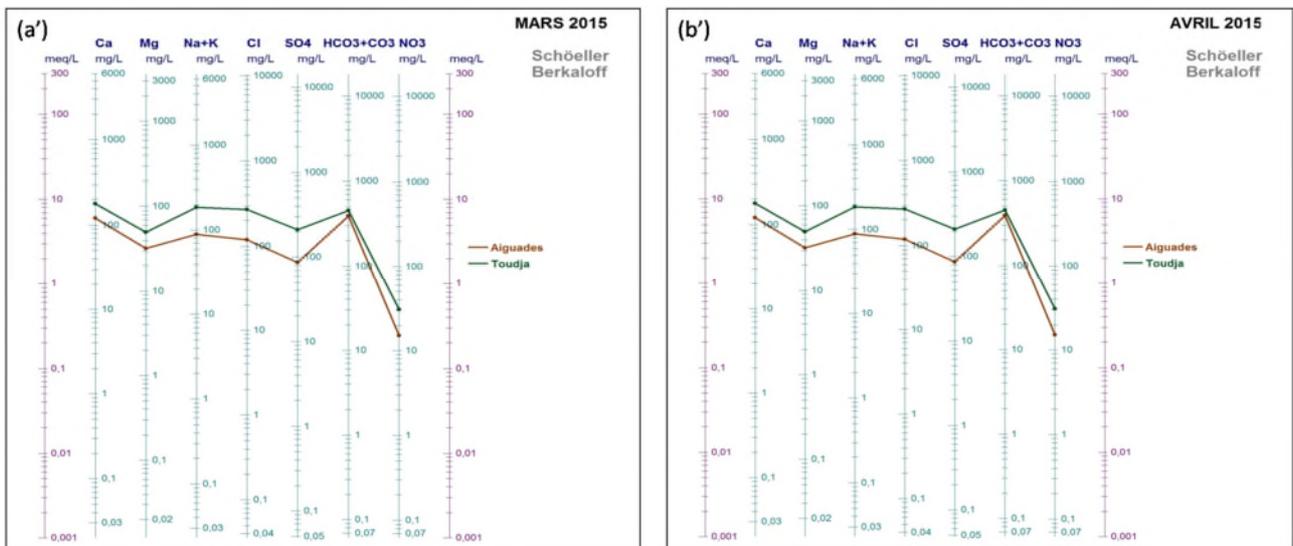


Figure N°24: Diagramme de Schoëller-Berkaloff des eaux des Aiguades et Toudja (les campagnes de Mars (a') et Avril (b') 2015)

Cette représentation a montré que :

- ◆ Les eaux des Aiguades sont caractérisées, dans l'ensemble, par un faciès chimique mixte de type bicarbonaté calcique et magnésien. En effet, le triangle des anions, montre un faciès qui tend vers le bicarbonaté, par contre le triangle des cations montre un faciès vers le pôle calcique.
- ◆ En revanche, les eaux de Toudja ont un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, ou le triangle des anions tend vers le chloruré et celui des cations tend plus vers le calcique.

Les résultats d'analyses chimiques sur le diagramme Schoeller-Berkaloff, permettent de confirmer l'abondance des faciès précédemment cités.

Les diagrammes montrent qu'il n'y a pas de variation temporelle concernant les faciès chimiques. Les eaux des sources karstiques ont une faible diversité entre les campagnes. Par contre, nous avons décelé une variation spatiale. Les faciès chimiques des deux sources sont différents.

D'après la carte géologique, le faciès bicarbonaté calcique et magnésien pourrait être influencé par les formations carbonatées environnantes (Aiguades). Le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien est probablement lié à la présence des formations argileuses et marneuses du Mio-Pliocène. Les sulfates sont généralement liés à la présence des formations évaporitiques (Trias), c'est le cas de Toudja. La présence du faciès chloruré et bicarbonaté magnésien montre que les eaux sont influencées par les formations dolomitiques du Crétacé inférieur dans les eaux de la région, connues par une présence abondante de la roche carbonatée (calcaire maestrichtien et éocène).

III.4.4. Les rapports caractéristiques :

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimé en quantité et en réaction. Ces rapports donnent de précieuses indications sur l'alimentation et le sens d'écoulement (Mihoubi, 2008).

❖ Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} :

Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} des eaux des deux sources donne des valeurs inférieures à l'unité (0.438 aux Aiguades et 0.462 à Toudja). Ce qui laisse supposer la dominance des ions Ca sur les ions Mg qui traduit en général l'abondance des faciès calcaires sur le faciès dolomitique dans la lithologie des aquifères.

Il peut renseigner sur l'origine de l'eau (précipitation, eau de surface, zone non saturée, réserve noyée...) et sur son temps de séjour dans le réservoir (perméabilité) (Lastennet, 1994). Une augmentation du rapport Mg/Ca est attribuée à la participation d'une eau ayant séjourné longtemps dans l'aquifère (Lepillier, 1980), mais ce n'est pas toujours vrai : une forte augmentation de ce rapport, pourrait résulter de l'arrivée d'une nouvelle eau qui aurait lessivé la marno-calcaires et chassé une eau par l'encaissant argileux. Donc l'évolution du rapport Mg/Ca n'a pas toujours la même explication (temps de séjours) et qu'il convient de contrôler les interprétations par d'autres facteurs comme la géologie du terrain (présence de calcaires dolomitiques, des calcaires magnésiens ou d'argiles et les conditions de dissolution de la roche (pCO₂, indice de saturation).

❖ Le rapport Ca²⁺/Mg²⁺ :

Les rapports Ca²⁺/Mg²⁺ des Aiguades et Toudja sont supérieurs à 1, avec respectivement 2.283 et 2.166. Ce qui confirme la dominance de l'ion Ca²⁺.

❖ Le rapport Cl⁻/Na⁺ :

Le rapport Cl⁻/Na⁺ montre que les valeurs sont inférieures à l'unité, avec 0.438 pour les Aiguades, et 0.462 à Toudja, signifiant une dominance du sodium.

❖ Le rapport Na⁺/K⁺ :

Le rapport Na⁺/K⁺ montre que les valeurs aux Aiguades et à Toudja, sont supérieures à l'unité, avec respectivement 202.600 et 115.600, Ce qui suppose une dominance du sodium.

III.4.5. Dureté de l'eau :

Tableau N° X: Normes pour la dureté des eaux de boisson (OMS, 1972) in Rodier *et al.*, 2009.

| Titre hydrotimétrique (TH °F) | 0-7 | 7-22 | 22-32 | 32-54 | >54 |
|-------------------------------|-------|------------------|-------------|-------|-----------|
| Dureté de l'eau | Douce | Modérément douce | Assez douce | Dure | Très dure |

Selon le tableau, les eaux des Aiguades sont classées «eaux dures », avec une valeur de 43 TH °F. Par contre, les eaux de Toudja, sont de types « très dures », avec une valeur de 65 TH °F.

La dureté d'une eau, constitue un risque notable dans l'entartrage des canalisations. Pour une eau d'adduction, une dureté élevée contribue également à accroître la consommation de

savon (Rodier et *al.*, 2005). Les eaux dures peuvent limiter le transfert intestinal des ions métalliques toxiques (comme le cadmium, le cuivre, le plomb... etc.), contrairement aux eaux douces (Rodier et *al.*, 2005).

III.4.6. Analyse du système calco-carbonique

Les relations calco-carboniques s'articulent autour de trois paramètres liés entre eux : la température, le pH et la concentration en bicarbonates. Elles conduisent au calcul de paramètres couramment utilisés tels l'indice de saturation (IS), la pCO_2 équilibrante (pCO_{2eq}) et le pH à saturation vis-à-vis de la calcite. D'après Bakalowicz (2004), les seuils des teneurs en pCO_2 et des valeurs de l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite permettent d'obtenir la vitesse de circulation des eaux dans l'aquifère.

Tableau N°IX : Significations hydrogéologique de la pCO_2 et du taux de saturation de l'eau (Bakalowicz, 2004).

| $0.03 \cdot 10^{-2} < pCO_2 < 0.1 \cdot 10^{-2}$ | $0.1 \cdot 10^{-2} < pCO_2 < 2 \cdot 10^{-2}$ | $2 \cdot 10^{-2} < pCO_2 < 10 \cdot 10^{-2}$ | $10 \cdot 10^2 < pCO_2$ | |
|---|---|---|---|--|
| Eau de surface en milieu non Carbonaté Eau karstique à écoulement Rapide depuis une perte, dans un conduit bien ouvert | Eau karstique Circulant rapidement | Eau karstique probablement enrichie en CO_2 d'origine profonde au voisinage de La source | Eau karstique enrichie en CO_2 d'origine profonde au voisinage de La source | IS calcite < 0 Eau sous-saturée |
| Eau de surface Eau karstique ayant circulé en écoulement libre dans un conduit très aéré pendant Assez longtemps | Eau karstique ayant circulé dans un milieu Aéré (zone d'infiltration, conduit ouvert) | Eau karstique s'écoulant en milieu Aéré, enrichie en CO_2 non pédologique (CO_2 profond, CO_2 provenant de fermentations de pollution) | | IS calcite > 0 Eau sursaturée Par dégazage du CO_2 |

Les eaux des Aiguades et de Toudja, présentent des indices de saturation élevés vis-à-vis de la calcite $IS > 0$, et des pressions partielles en CO_2 (pCO_2) qui diminuent lorsque l'indice de saturation de la calcite augmente. Ce phénomène indique que les processus de dégazage sont favorisés, car l'eau commence à perdre une partie de son CO_2 dissous. De façon simultanée, le carbonate de calcium peut commencer à précipiter. Ce phénomène se produit lorsque l'écoulement des eaux se fait en partie à surface libre dans des conduits potentiellement pénétrables.

D'après nos résultats, comparés au tableau précédent (tab. XI), les eaux de nos sources, sont des eaux karstiques ayant circulé dans un milieu aéré (zone d'infiltration, conduit ouvert).

Si lorsque :

- $IS < 0$, la solution est sous-saturée par rapport au minéral (dissolution du minéral).

- $IS=0$, la solution et la phase solide sont à l'équilibre (équilibre).
- $IS>0$, la solution est sursaturée par rapport au minéral (précipitation)

Nous observons pour l'intégralité des résultats de la modélisation géochimique pour les deux périodes (Tableau IX), une sursaturation vis-à-vis de la calcite qui s'explique, d'une part, par un dégazage de CO_2 au moment de l'échantillonnage (contact avec l'atmosphère) ou un dégazage dans les conduits à échelle spéléologique, et d'autre part, à une diminution du pouvoir de précipitation provoqué par les teneurs élevées en magnésium dissous, ainsi pour la dolomite et l'aragonite. Vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite, tous les échantillons présentent une sous saturation, Cette sous saturation traduit une phase de dissolution du gypse (Chabour, 2006).

L'expression de l'indice de saturation permet d'introduire la notion de pH à saturation (Tab.IX), nommé pH_{sat}. Il représente une valeur du pH pour lequel une eau serait à saturation vis-à-vis de la calcite ($IS=0$) ou un autre minéral. Dans la mesure où l'acidité de l'eau est due exclusivement aux réactions calco-carboniques (Peyraube, 2011).

Pour les Aiguades, le pH_{sat} est de 7.02 pour la calcite, 7.22 pour la dolomite, et 7.17 pour l'aragonite. Concernant Toudja, le pH_{sat} est de 6.91 pour la calcite, 7.05 pour la dolomite, et enfin 7.05 pour l'aragonite.

III.5. Conclusion partielle

L'étude des caractéristiques hydrogéochimique des eaux des deux sources karstique, a montré l'existence d'une famille d'eau bicarbonatée calcique et magnésienne pour les Aiguades ainsi qu'une famille d'eau chlorurée sulfaté calcique et magnésienne à Toudja.

La salinité est élevée pour les deux sources, ce qui est probablement du au formations géologiques traversé. La teneur des eaux en ETM est faible mais le plomb et le nickel restent légèrement plus élevés que la norme surtout au niveau de Toudja. Ces concentrations pourraient être d'origine naturelle, anthropique ou les deux à la fois. La richesse des eaux en éléments Na^+ , Cl^- , et SO_4^{2-} , pourrait être liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels, et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- sont liés à la dissolution des carbonates.

Ces eaux sont sursaturées vis-à-vis de la calcite, dolomite et l'aragonite. Ils sont de type dure aux Aiguades et très dure à Toudja. Mais sont sous-saturée pour les gypses et anhydrite. Grace au calcul de l'indice de saturation ainsi que le pCO_2 . Nous pouvons conclure que ce sont des eaux karstiques ayant circulé dans un milieu aéré.

Conclusion

Les aquifères karstiques jouent un rôle très important dans l’approvisionnement en eau. C’est une ressource qui a tendance à être de plus en plus exploitée. L’eau, au contact de l’encaissant, acquiert une charge minérale caractéristique des roches traversées. Les éléments qui s’y trouvent en solution sont informatifs sur la nature de l’aquifère traversé.

Les fluctuations des paramètres physico-chimiques des eaux karstiques, de Toudja et des Aiguades, sont dans les normes. Les teneurs anormales en ions dissous n’ont pas été détectées, sauf le cas du nickel, plomb et cadmium qui dépassent légèrement les normes admises. La qualité chimique des eaux peut être jugée relativement bonne. Seulement cette situation nous a conduits à penser à la vulnérabilité de ces systèmes vis-à-vis de la pollution.

Enfin, nos résultats nous ont permis de cerner l’influence des paramètres physico chimiques sur le chimisme des eaux, tout en apportant des renseignements sur l’origine probable des eaux, et par conséquent des faciès chimiques, qui sont bicarbonaté calcique et magnésien pour les Aiguades, et chloruré et sulfaté calcique et magnésien pour Toudja .

Les données hydrodynamiques actuellement disponibles sur les systèmes des Aiguades et de Toudja sont relativement limitées, et ne fournissent, en général, que des informations ponctuelles ne permettant pas d’avoir suffisamment d’information sur les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères, des calcaires et des structures cassantes traversées. Les résultats présentés constituent les premiers éléments sur le fonctionnement des deux systèmes. Une meilleure connaissance du chimisme de ces eaux a été acquise. Néanmoins, ce travail reste perfectible sur beaucoup de points.

Perspectives :

La mise à disposition de moyens supplémentaires, notamment d’investigation de terrain, d’échantillonnage et d’outils d’analyse et de traitement des données est indispensable. Les points suivants représentent des orientations de recherche qui pourraient être suivies et approfondies, en vue de compléter la réflexion sur le mode de fonctionnement de ce type d’aquifère :

- Le suivi hydrogéologique et la modélisation géologique 3D de ces aquifères karstiques ;
- Des travaux de recherche doivent être approfondis sur la vulnérabilité à la pollution des eaux karstiques pour permettre d’établir une carte de la vulnérabilité pour ces régions ;
- Certains axes de recherche pourraient apporter un complément intéressant pour la compréhension du système : les mesures de pluviométrie et de débit permettrait de

mieux définir la relation pluie-débit, et donc l'installation d'un poste pluviométrique, dans un site adéquat, prêt de ces sources est indispensable ;

- Les concentrations en silice et en carbone organique total amèneraient des précisions sur les temps de séjour dans le massif, un suivi hydrochimique des émergences sur plusieurs cycles hydrologiques, et l'analyse d'espèces supplémentaires telles que le strontium, le Bore et d'autres métaux est souhaitable ;
- Lancer des travaux de recherches très approfondie en géologie permettant d'établir la carte géologique de la région qui reste sommaire jusqu' a nos jours, ainsi qu'une carte structurale très bien détaillée ;
- Des suivis saisonniers de la qualité chimiques des eaux pour pouvoir éviter tout type de pollution naturelle ou accidentelle ;
- Convaincre les responsables des services de l'environnement d'instaurer dans la conception des captages de ces sources, la notion des périmètres de protection .Il est impératif de protéger ces ressources, tant du point de vue de la qualité que du point de vue de la quantité,
- Aménager ces sources, afin de protéger le patrimoine naturel et culturel de celle-ci.

*Références
bibliographiques*

- Anonyme. (2004).** Monographie de la wilaya de Bejaia. Direction de la planification et de l'aménagement du territoire (D.P.A.T) .22p.
- Anonyme. (2005).** Annuaire statistique de la wilaya de Bejaia, IMP, E.T.I.A.G Bejaia, 269p.
- Anonyme. (2008).** Schéma directeur de gestion des déchets solides urbains de la commune de Toudja.128p.
- 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 NE Algérien. Doctorale dissertation, Université BadjiMoktar de Annaba ,152p.
- Bailly D. (2009).** Vers une modélisation des écoulements dans les massifs très fissurés de type karst: étude morphologique, hydraulique et changement d'échelle.189p.
- Bailly-Comte V. (2008).** Interactions hydrodynamiques surface/souterrain en milieu karstique-Approche descriptive, analyse fonctionnelle et modélisation hydrologique appliquées au bassin versant expérimental du Coulazou, Causse d'Aumelas, France. Doctorale dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 288p.
- Baimey A. (2012).** L'eau face au changement climatique. 3p.
- Bakalowicz M. (1979).** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification (Contribution of water geochemistry to the understanding of karst aquifers and karst development). Doctorat ès Sciences naturelles, P. et M. Curie Paris-6 Université, Paris,269p.
- Bakalowicz M. (1986).** La karstification : processus, modèles et exemples. 9ième congr. Internat. Spéléologie, Barcelone, 3, pp. 59-63.
- Bakalowicz M. (1996).** Les processus de karstification et les différents types de karst associés. Mémoires de la Société géologique de France, 169pp, 363-371.
- 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. Cours DEA H.H.G.G. Université Paris-6. Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active. 278 p.
- Bakalowicz M. (2004).** Analyses et interprétations des données hydrochimiques. 61p.
- Bakalowicz M. (2008, May).** Le milieu karstique: études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource. In CFH–Colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller .17p.
- Benamar N., Mouadiah N., Benamar A. (2011).** Étude de la biodiversité et de la pollution dans les canaux de l'Ouest algérien: le cas de l'oued Cheliff. Colloque international. Usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée: quels enjeux pour quels services ? Université de Provence, Marseille, 20-21 janvier 2011. 6 p.
- Bensaoula F., Adjim M., Bensalah M. (2007).** L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. LARHYSS Journal ISSN 1112-3680, (6).8p.
- Boeglin J.C., (2000).** Contrôle des eaux douces et de consommation humaine. Ed. Techniques de l'ingénieur.24 p.
- Bouroubi M. Y. (2009).** Etude hydrogéologique du synclinal de la taoura : fonctionnement et évaluation des ressources en eaux souterraines. Thèse de magister, université Mentouri Constantine ,182p.
- Brais I. (2009).** Procédure d'échantillonnage de l'eau pour analyse en laboratoire.1p.
- Cadilhac L., Dugleux E. (2006).** Bilan et analyse de la mise en œuvre périmètres de protection des captages AEP en milieu karstique. Synthèse des préconisations en faveur de l'amélioration des démarches de protection .Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse.28p.
- Camus H. (2003).** Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud cévenole. Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. Doctorale dissertation Université Bordeaux III,675p.

- Chabour N. (2006).** Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire, Département des Sciences de la Terre Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Doctorat d'Etat en géologie université Mentouri Constantine, 177p.
- Chalikakis M. K. (2006).** Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. Doctoral dissertation, Université Paris 6, 223p.
- 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 Méridionales, 06). Doctorale dissertation, Université de Franche-Comté, 320p.
- Chemseddine F., Abderrahmane B., Abdelkader R., Elias S. (2009).** Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie. 15p.
- Collignon B. (1991).** Les principaux karsts d'Algérie, Quelques éléments de synthèse, actes du 9ème Congrès National de la SSS., Akten des 9. nationalen kongresses der SHG. Construction hydro-technique et environnement, faculté des sciences de l'ingénieur, département d'hydraulique, Université Hadj Lakhdar Batna. 127 p.
- Dajoz R. (1985).** Précis d'écologie, édition Dunod, Paris. 434p.
- De La Bernardie J. (2013).** Etude de la relation entre débits des sources karstiques et distributions des temps de séjour. Mémoire de stage de master 2, université Pierre et Marie Curie – Paris 6, 58p.
- Delbart C. (2013).** Variabilité spatio-temporelle du fonctionnement d'un aquifère karstique du Dogger: suivis hydrodynamiques et géochimiques multifréquences; traitement du signal des réponses physiques et géochimiques . Doctorale dissertation, Université Paris Sud-Paris XI, 234p.
- Desbordes A. (2000).** Pollutions des eaux souterraines en Picardie. Mémoire Maîtrise BG, Fac. Sciences, Amiens. 50 p.

- Dib I. (2009).** L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de laplaine de Gadaine- Ain Yaghout (Est Algérien). Mémoire de magister en hydraulique, construction hydro-technique et environnement, faculté des sciences del'ingénieur, département d'hydraulique, Université Hadj Lakhdar Batna, 127 p.
- Dominique V. (2009).** Etudes de données physico-chimiques des eaux du secteur Nord du Piton des Neiges Ile de La Réunion. Master1 géosphère Spécialité Transfert Sol Aquifère, université de la Réunion, 33p.
- Dörfliger N. (2010).** Influence du contexte méditerranéen sur la structure et le fonctionnement des aquifères karstiques De la gestion quantitative a la caractérisation de la vulnérabilité par approche multi-paramètres. Synthèse des travaux de recherche en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, université de Montpellier II, école doctorale : SIBAGHE ,212p.
- DPAT (Direction de Planification et de l'Aménagement du Territoire). (2012).** Annuaire statistique de la wilaya de Bejaia .203p.
- Dudok de Wit T. (2007).**GPS et localisation par satellites. (Cour : licence de chimie-physique). 53p.
- Duplan L. (1952).** Monographie régionale de la région de Bougie. XIXe Congrès Géologique International, Alger, 1^{ere} série, N°17,45.
- Fall C. (2008).** Etude de la qualité de l'eau de robinet et de celle de la nappe phréatique dans les différentes Communes d'Arrondissement du département de Guédiawaye, Dakar, Sénégal. Mémoire de maitrise, Université Cheikh AntaDiop Dakar, Faculté des lettres et scienceshumaines, Département de Géographie ,81 p.
- FEPS (Fondation de l'Eau Potable Sure). (2014).** TDS et pH.6p.
- Ford D., William P. (2007).**Karst hydrogeology and geomorphology, edition Wiley, 7th edition, ISBN: 978-0-470-84997-2, 562p.
- Fournillon A. (2012).** Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques: caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (SE France). Doctorale dissertation, Aix-Marseille Université,426p.

- Galez P. (2011).**Absorption atomique et émission de flamme. Techniques spectroscopiques d'analyse.18p.
- Geze B. (1973).**Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. Annales de Spéléologie, vol. 28 n°1.20p.
- GIEC. (2008).**Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, 236 p.
- Gilli E. (1999).** Eaux et rivières souterraines .Presses Universitaires de France-PUF.455p.
- Goldscheider N. (2002).** Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and the SwabianAlb .Doctoral dissertation, Karlsruhe, Univ., Diss.
- Guy C. (2008).** Le karst de la région de Grandpré (Ardennes) Etude des phénomènes karstiques développés au contact Jurassique-Crétacé. Rapport de stage Master. Université de Metz.52p.
- Husson E. (2011).** Remplissages karstiques et variations du niveau de base: Exemple des paléokarsts de la région de ganges (34). Mémoire master 2. Master'sthesis. Université de Montpellier, 2, 42.53p.
- Jeannin P.Y. (1996).** Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. PhDThesis, Université de Neuchâtel, 237p.
- JORA (Journal Officiel de la République Algérienne). (2000).** Les normes de potabilité d'une eau de consommation. Journal officiel de la République algérienne N°51, 20 août 2000, Alger, 4p.
- KaidRassou K. (2009).**Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia. Doctorale dissertation, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences Semlalia- Marrakech,214p.
- Kiraly L. (1978).** La notion d'unité hydrogéologique, essai de définition. Bulletin du centre hydrogéologique d'Université de Neuchâtel No 2 (1998). 83-220p
- Lastennet R. (1994).**Rôle de la zone non saturé dans le fonctionnement des aquifères karstique, Approche par l'étude physicochimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse). Thèse de doctorat, Université Avignon et pays de Vaucluse, 211p.

- Le Roux T. (2010).** Historique des recherches Contexte géologique et structural Localisation, spéléométrie et spéléogénèse (Première Partie-1/3). In Annales de la Société des sciences naturelles de la Charente-Maritime (Vol. 10, No. 1, pp. 77-106). Société des sciences naturelles de la Charente-Maritime.
- Lepillier M. (1980).** Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaire, Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute Savoie, France). Thèse de 3ème cycle, Université Grenoble, 478p.
- Lounaci A. (2005).** Recherche sur la faunistique, l'écologie et la biogéologie des macro-invertébrés des cours d'eau de kabyle (Tizi Ouzou, Algérie). Thèse de doctorat d'état en biologie. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 208p.
- Malard A., Jeannin P. Y. (2013).** Swisskars: aquifères karstiques de suisse: une approche pour une meilleure gestion et exploitation des eaux souterraines karstiques. aqua et gas.93 (7-8), 22-27.
- Mangin A. (1970).** Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et de tarissement, Annales de spéléologie25(3) :581-610.
- Mangin A. (1971).** Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. Annales de Spéléologie26(2) : 283-329.
- Mangin A. (1975).** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.3ème partie. Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Annales de Spéléologie 30 (1), 21–124.
- Marsaud B. (1996).** Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse Doctorat. En Sciences, Université de Paris XI Orsay, 303p.
- Marsaud B. (1997).** Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse de Doctorat, Université Paris XI, BRGM, Orléans, 301p.
- Martel E. A. (1921).** Nouveau traité des eaux souterraines. Librairie Octave Doin, Gaston Doin, éditeur. Paris.838p.

- Mathevet T. (2002).** Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'Eau Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France). Unpublished report of M. Sc. Thesis (DEA HHGG), Ecole supérieure des Mines de Paris, Paris, France.59p.
- Medaouri M., Aïdi, C., Bracène R., Yelles-Chaouche A., Ouabadi A., 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.03p.
- Metteal J.P. (2005).**Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en vue de la délimitation des périmètres de protection. Bull. BRGM,Franche-Comté.4p.
- Mihoubi N. (2008):**Fonctionnement et gestion hydrogéologique et hydrologique des ressources en eau du bassin de Hammam Grouz. Thèse de magister, université Mentouri, Constantine, 244p.
- Molinari J. (1976).** Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages. Actes 2nd Coll. Hydrol. Pays Calcaire, in Ann. Sc. Univ. Besançon, 25 : 275-306.
- Muet P. (1985).** Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du causse de Martel (Corrèze), thèses 3e cycle, université Bordeaux I. 2 vol., 397, 232p.
- Muet P., Vier E. (2011).** Guide pratique:stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable. Agence de l'eau Adour-Garonne.84p.
- OMS (Organisation Mondiale de la Sante). (2003).** L'eau pour les Hommes, l'eau pour la vie, Paris, Unesco.
- 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.
- Peyraube N. (2011).** Apports des équilibres calco-carboniques et du carbone 13 pour l'étude de l'air et des écoulements d'eau dans la zone non saturée du karst: application au système karstique perché de la grotte de Cussac (Dordogne, France). Doctorale dissertation, Bordeaux 1 ,350p.

- Plagnes V. (1997).** Structure et fonctionnement des aquifères karstiques: caractérisation par la géochimie des eaux .Doctorale dissertation, Montpellier 2, 372p.
- PNG (Parc National de Gouraya) (2008).** Plan de gestion du Parc National de Gouraya. Bejaia. 153p.
- Quinif Y. (1998).** Dissipation d'énergie et adaptabilité dans les systèmes karstiques. Karstologia.numéro.31.11p.
- Ramdane F. (1984).** Eléments d'écologie- écologie fondamentale. Edition Marc Graw-Hill, Paris. 397p.
- Rodier J., Bazin C., Broutin J. P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L. (2005).** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Ed. Dunod, Paris, 1384 p.
- Rodier J., Legube B., Merlet N. (2009).** L'Analyse de l'eau 9e édition. Entièrement mise à jour, Dunod, Paris.1579p.
- Seltzer R. (1946).** Le climat de l'Algérie .institut de météorologie de la physique du globe. Université d'Algérie.219p.
- Simler R. (2011).** Le logiciel Diagramme, version 5.5 du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon.
- Siou L. K. A. (2011).** Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). Doctorale dissertation, Université Montpellier II- Sciences et Techniques du Languedoc,231p.
- Stewart (1969).**Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. Bull. Soc. Hist. Natu., Afr. Nord, New York and London, T. 59, pp. 23 – 36.
- Tassy A. (2012).** Karsts côtiers et canyons sous-marins de la marge provençale au Cénozoïque: Contrôle géodynamique, eustatique, hydrologique et structural. Doctorale dissertation, Aix-Marseille Université ,417p.
- Thierno A.W. (2008).** Initiation à mapinfo professionnel : étape 1 cartographie élémentaire avec mapinfo professionnel. Support de formation master 2 cite mobilite modes de vie, lieux urbains et service.103p.

Zouggaghe F. (2003). Etudes des communautés animales de l'oued soummam : cas des macro-invertébrés. Mémoire de magister en biologie de la conservation et écodéveloppement université de Bejaia ,74p.

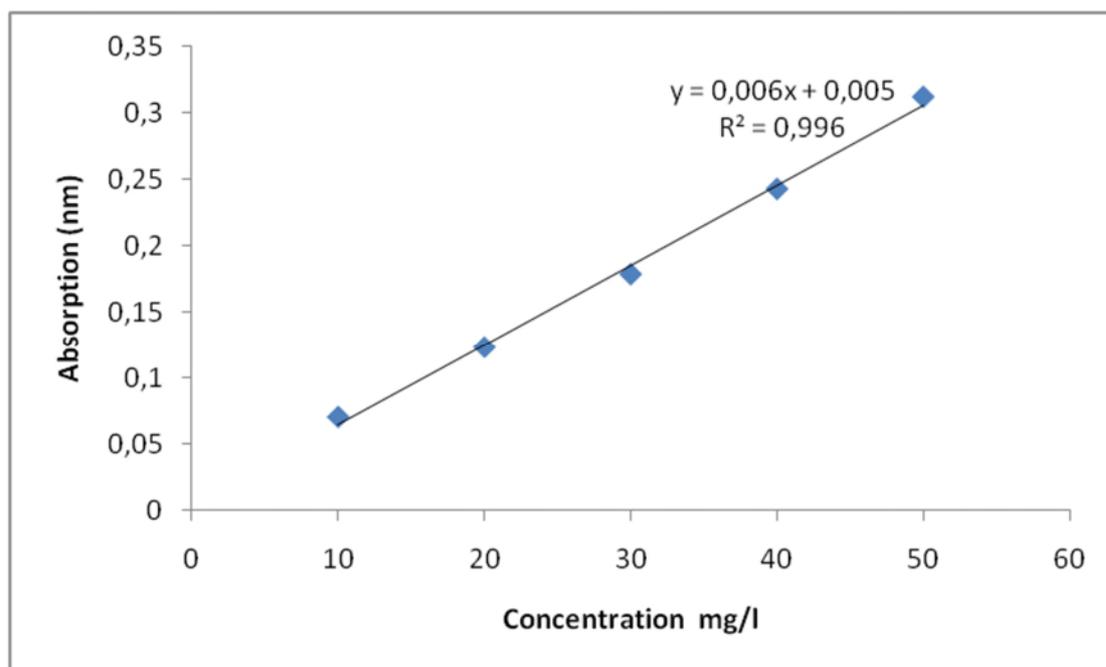
Annexes

Annexe I

- **Etablissement de la courbe d'étalonnage du calcium :**

Annexe I.1 : établissement de la courbe d'étalonnage.

| | | | | | |
|----------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Concentration (mg/l) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Absorption (nm) | 0.0708 | 0.1237 | 0.179 | 0.2431 | 0.3123 |

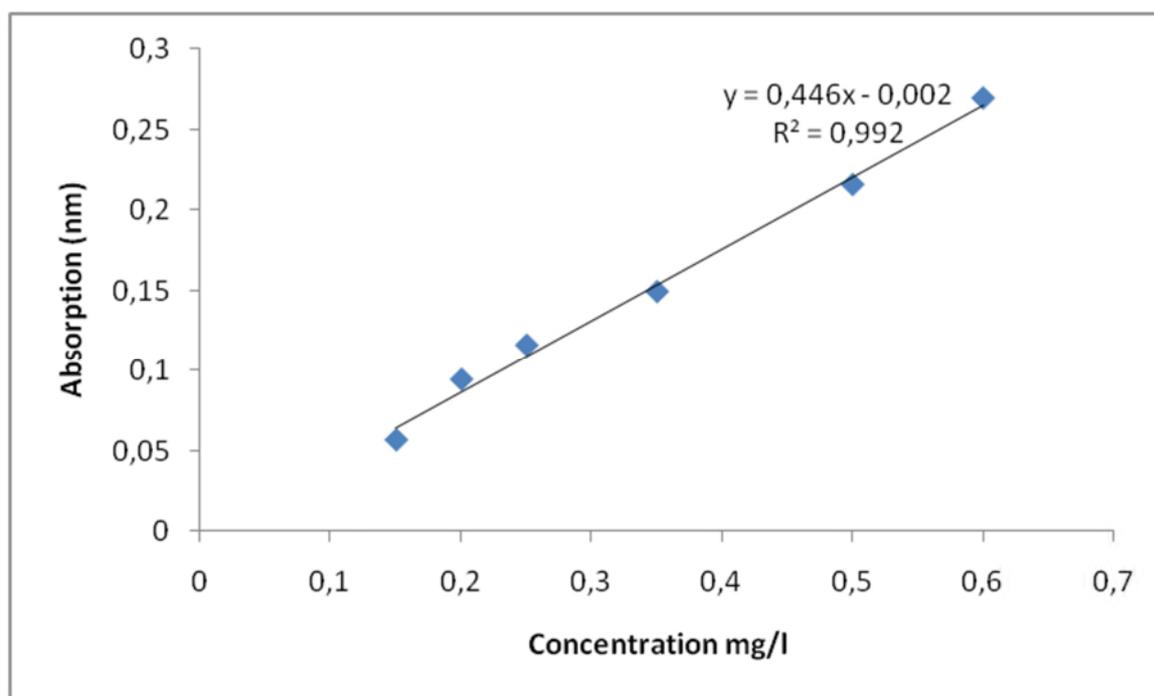


Courbe d'étalonnage du calcium

- **Etablissement de la courbe d'étalonnage du cadmium :**

Annexe I.2 : Etablissement de la courbe d'étalonnage

| | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Concentration (mg/l) | 0.15 | 0.2 | 0.25 | 0.35 | 0.5 | 0.6 |
| Absorption (nm) | 0.0567 | 0.0943 | 0.1159 | 0.1492 | 0.2157 | 0.2693 |

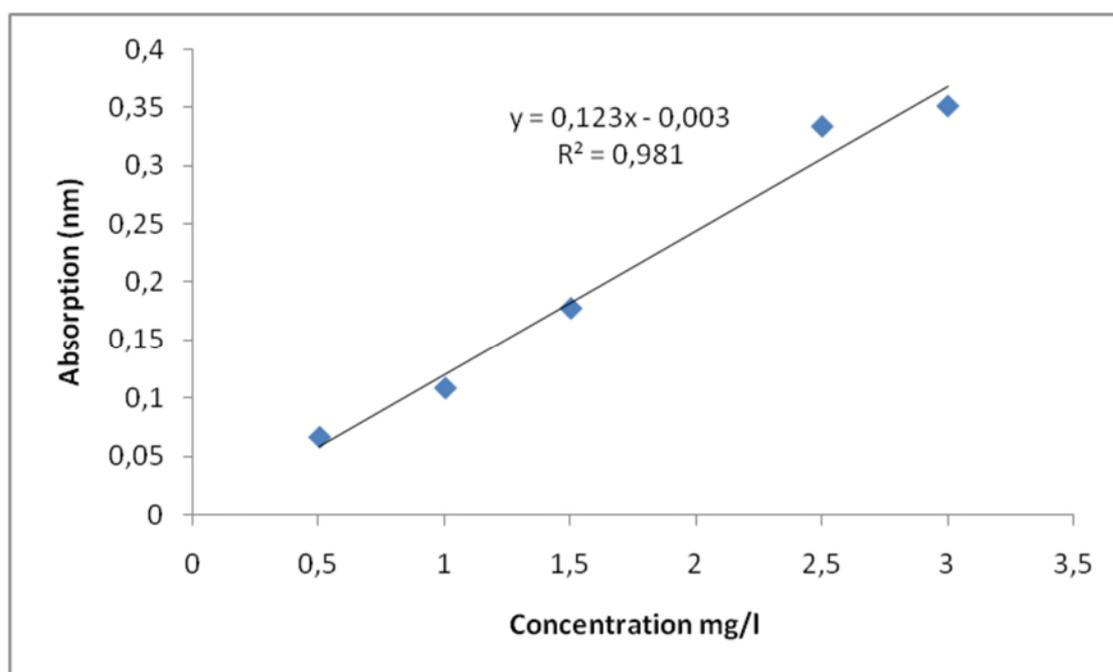


Courbe d'étalonnage du cadmium

- **Etablissement de la courbe d'étalonnage du cuivre :**

Annexe I.3: établissement de la courbe d'étalonnage

| | | | | | |
|----------------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Concentration (mg/l) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 |
| Absorption (nm) | 0.066 | 0.1082 | 0.1773 | 0.3335 | 0.351 |

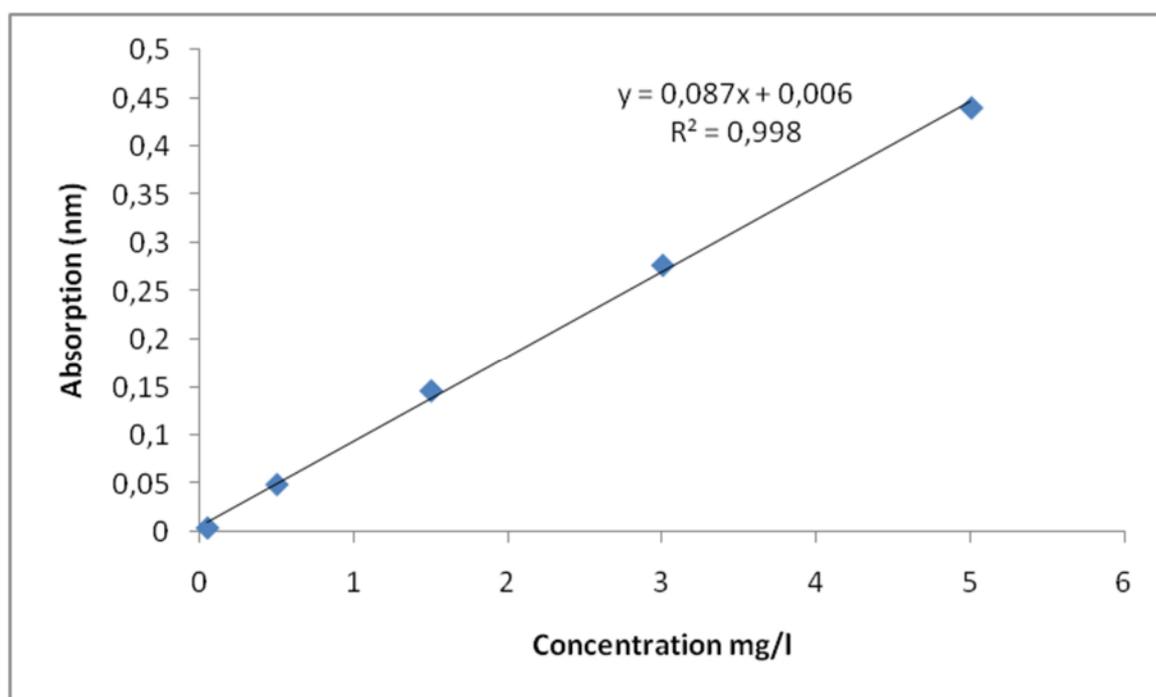


Courbe d'étalonnage du cuivre

- **Établissement de la courbe d'étalonnage du nikel:**

Annexe I.4 : établissement de la courbe d'étalonnage

| | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Concentration (mg/l) | 0.05 | 0.5 | 1.5 | 3 | 5 |
| Absorption (nm) | 0.004 | 0.049 | 0.146 | 0.277 | 0.44 |

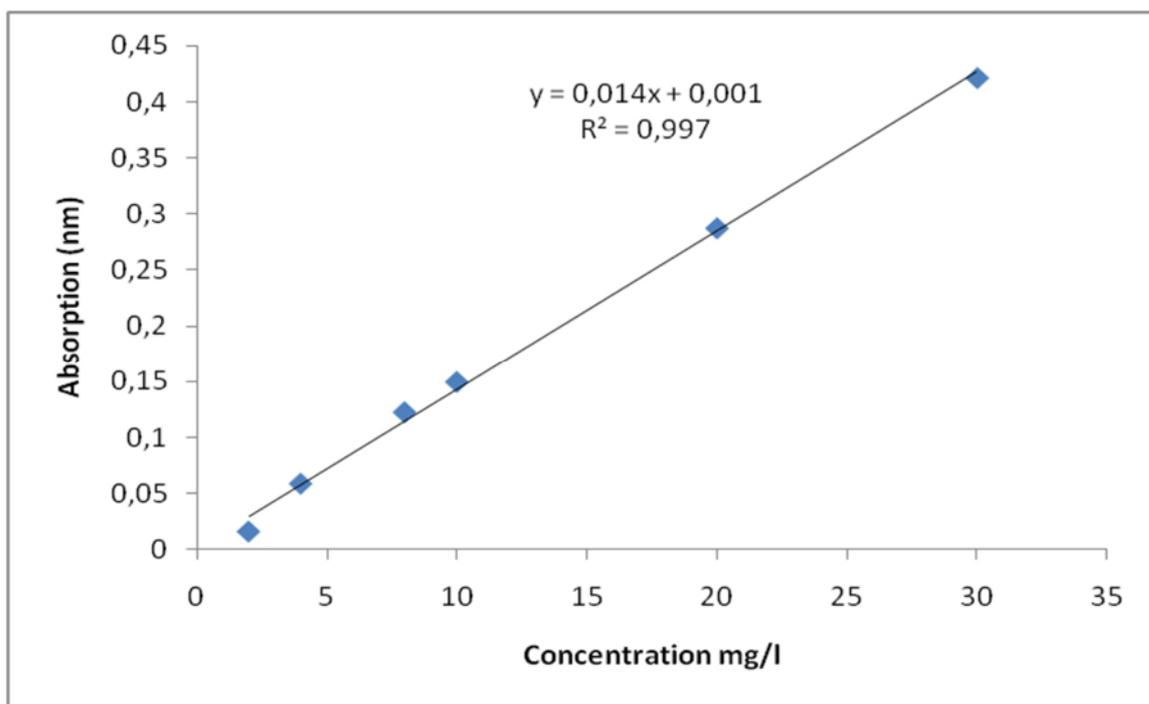


Courbe d'étalonnage du nikel

- **Établissement de la courbe d'étalonnage du plomb:**

Annexe I.5: établissement de la courbe d'étalonnage

| | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Concentration (mg/l) | 2 | 4 | 8 | 10 | 20 | 30 |
| Absorption (nm) | 0.0166 | 0.0592 | 0.1229 | 0.1499 | 0.2876 | 0.4213 |

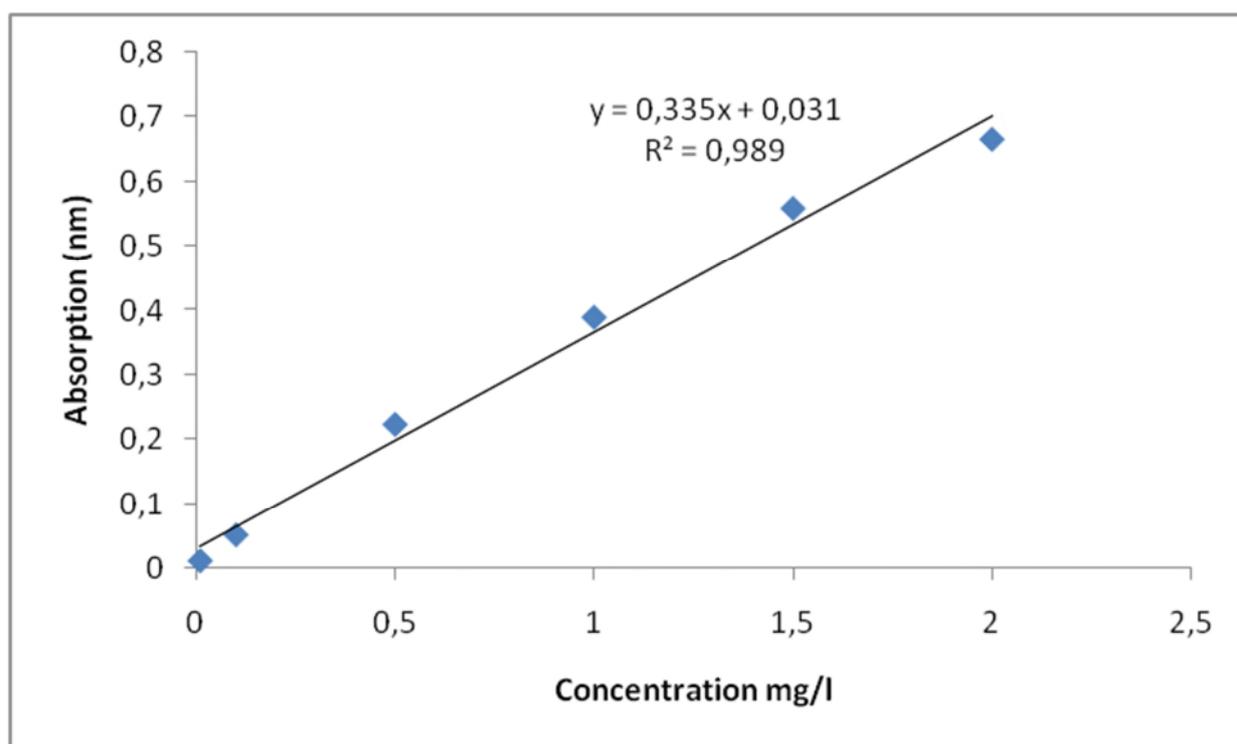


Courbe d'étalonnage du plomb

- **Etablissement de la courbe d'étalonnage du zinc:**

Annexe I.6: établissement de la courbe d'étalonnage

| | | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Concentration (mg/l) | 0.01 | 0.1 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
| Absorption (nm) | 0.012 | 0.052 | 0.224 | 0.39 | 0.56 | 0.667 |



Courbe d'étalonnage du zinc

Annexe II

Initial solution 1.

Aiguades

1. Aiguades-----Solution composition-----

| Eléments | Molality | Moles |
|------------|------------|------------|
| Alkalinity | 6.406e-003 | 6.406e-003 |
| Ca | 2.999e-003 | 2.999e-003 |
| Cl | 3.358e-003 | 3.358e-003 |
| K | 1.895e-005 | 1.895e-005 |
| Mg | 1.314e-003 | 1.314e-003 |
| Mn | 1.251e-007 | 1.251e-007 |
| N(5) | 2.441e-004 | 2.441e-004 |
| Na | 3.839e-003 | 3.839e-003 |
| S(6) | 8.985e-004 | 8.985e-004 |
| Sr | 1.416e-006 | 1.416e-006 |

1. Aiguades-----Description of solution-----

| | |
|--|-----------------|
| pH | = 7.600 |
| pe | = 4.000 |
| Activity of water | = 1.000 |
| Ionic strength | = 1.621e-002 |
| Mass of water (kg) | = 1.000e+000 |
| Total carbon (mol/kg) | = 6.741e-003 |
| Total CO2 (mol/kg) | = 6.741e-003 |
| Temperature (deg C) | = 13.300 |
| Electrical balance (eq) | = 6.831e-004 |
| Percent error, $100 * (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$ | = 2.96 |
| Iterations | = 7 |
| Total H | = 1.110188e+002 |
| Total O | = 5.553039e+001 |

1. Aiguades-----Saturation indices-----

| Phase | SI | log IAP | log KT | |
|---------------------|--------|---------|--------|--------------------------------------|
| Anhydrite | -1.80 | -6.13 | -4.33 | CaSO ₄ |
| Aragonite | 0.39 | -7.88 | -8.27 | CaCO ₃ |
| Calcite | 0.54 | -7.88 | -8.42 | CaCO ₃ |
| Celestite | -2.83 | -9.46 | -6.62 | SrSO ₄ |
| CO ₂ (g) | -2.11 | -20.31 | -18.20 | CO ₂ |
| Dolomite | 0.69 | -16.11 | -16.81 | CaMg(CO ₃) ₂ |
| Gypsum | -1.55 | -6.13 | -4.59 | CaSO ₄ ·2H ₂ O |
| H ₂ (g) | -23.20 | -23.20 | 0.00 | H ₂ |
| H ₂ O(g) | -1.83 | -0.00 | 1.83 | H ₂ O |
| Halite | -6.55 | -5.00 | 1.55 | NaCl |
| Hausmannite | -17.31 | 46.73 | 64.04 | Mn ₃ O ₄ |
| Manganite | -5.90 | 19.44 | 25.34 | MnOOH |
| O ₂ (g) | -40.81 | 46.40 | 87.21 | O ₂ |
| Pyrochroite | -7.36 | 7.84 | 15.20 | Mn(OH) ₂ |
| Pyrolusite | -12.29 | 31.04 | 43.33 | MnO ₂ |
| Rhodochrosite | -1.38 | -12.47 | -11.09 | MnCO ₃ |
| Strontianite | -1.92 | -11.20 | -9.28 | SrC |

Initial solution 2. Toudja

2. Toudja-----Solution composition-----

| Elements | Molality | Moles |
|------------|------------|------------|
| Alkalinity | 7.350e-003 | 7.350e-003 |
| Ca | 4.481e-003 | 4.481e-003 |
| Cl | 7.669e-003 | 7.669e-003 |
| K | 6.872e-005 | 6.872e-005 |
| Mg | 2.068e-003 | 2.068e-003 |
| Mn | 6.290e-008 | 6.290e-008 |
| N(5) | 4.986e-004 | 4.986e-004 |
| Na | 7.944e-003 | 7.944e-003 |
| S(6) | 2.211e-003 | 2.211e-003 |
| Sr | 2.536e-006 | 2.536e-006 |

2. Toudja-----Description of solution-----

| | |
|--|-----------------|
| pH | = 8.360 |
| pe | = 4.000 |
| Activity of water | = 0.999 |
| Ionic strength | = 2.601e-002 |
| Mass of water (kg) | = 1.000e+000 |
| Total carbon (mol/kg) | = 7.089e-003 |
| Total CO2 (mol/kg) | = 7.089e-003 |
| Temperature (deg C) | = 19.500 |
| Electrical balance (eq) | = 1.176e-003 |
| Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An) | = 3.14 |
| Iterations | = 9 |
| Total H | = 1.110191e+002 |
| Total O | = 5.553777e+001 |

2. Toudja-----Saturation indices-----

| Phase | SI | log IAP | log KT | |
|---------------|--------|---------|--------|------------|
| Anhydrite | -1.38 | -5.72 | -4.34 | CaSO4 |
| Aragonite | 1.35 | -6.95 | -8.30 | CaCO3 |
| Calcite | 1.50 | -6.95 | -8.45 | CaCO3 |
| Celestite | -2.33 | -8.95 | -6.62 | SrSO4 |
| CO2(g) | -2.83 | -20.99 | -18.17 | CO2 |
| Dolomite | 2.74 | -14.22 | -16.96 | CaMg(CO3)2 |
| Gypsum | -1.14 | -5.72 | -4.58 | CaSO4:2H2O |
| H2(g) | -24.72 | -24.72 | 0.00 | H2 |
| H2O(g) | -1.66 | 0.00 | 1.65 | H2O |
| Halite | -5.92 | -4.35 | 1.57 | NaCl |
| Hausmannite | -11.62 | 50.79 | 62.42 | Mn3O4 |
| Manganite | -4.29 | 21.05 | 25.34 | MnOOH |
| O2(g) | -35.56 | 49.44 | 85.00 | O2 |
| Pyrochroite | -6.51 | 8.69 | 15.20 | Mn(OH)2 |
| Pyrolusite | -8.87 | 33.41 | 42.28 | MnO2 |
| Rhodochrosite | -1.19 | -12.30 | -11.11 | MnCO3 |
| Strontianite | -0.91 | -10.18 | -9.27 | SrCO3 |

Résumé

L'étude hydrogéochimique a été élaborée dans le but de caractériser les faciès chimiques des eaux karstiques des deux sources de « Toudja » et « Aiguades », de la wilaya de Bejaia, ainsi que leur qualité. Elle nous a permis de suivre en deux campagnes, les paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en relation avec la géologie et les activités anthropiques. Les résultats obtenus montrent que les paramètres mesurés sont en majorité conformes aux normes, sauf pour la salinité qui atteint la valeur de 378 mg/l aux Aiguades, ainsi que le cadmium 0.0130 mg/l, le plomb 0.0503 mg/l et le nikel avec 0.1796 mg/l, qui sont légèrement plus élevées. Suite à cette contribution, nous disposons de nombreuses mesures qui participent à la confection d'une base de données sur les caractéristiques physiques et chimiques des écoulements du système karstique de Toudja et des Aiguades

Cependant, il faut insister sur le fait que ce sont des aquifères vulnérable à la pollution et à la surexploitation. Le maintien de la qualité et la protection des eaux souterraines karstiques passe donc par une bonne connaissance de ces aquifères et par une gestion du territoire, des activités humaines et de la ressource.

Mots clés : hydrogéochimie, faciès chimique, karstiques, aquifères, Bejaia .

Abstract

The hydrogeochemical study was developed in order to characterize the chemical facies and the quality of waters of two karst sources: Toudja and Aiguades in the wilaya of Bejaia. We performed, in two campaigns, the monitoring of physicochemical parameters, determine their origin in relation with geology and human activities. The results obtained show that measured parameters are in majority comply from standards, except for salinity that reaches the value from 378 mg/l in Aiguades, as well as the cadmium 0.0130 mg/l, the lead 0.0503 mg/l and nikel with 0.1796 mg/l, respectively, which are slightly higher. Following this contribution, we propose the making of a database on the physical and chemical characteristics of the karstic aquifers throughout the region of Bejaia.

However, we must emphasize that these are vulnerable aquifers to pollution and overexploitation. Maintaining the quality groundwater and their protection therefore requires a good knowledge of these aquifers and a best land management and human activities.

Keywords: hydrogeochemistry, chemical facies, karst, aquifers, Bejaia .