

*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 : Sciences Biologiques et de l'Environnement  
Filière : Sciences de l'Environnement  
Option : Sciences Naturelles de l'Environnement



Réf :.....

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

**MASTER**

*Thème*

**Géo localisation et mesure des  
paramètres physiques des sources  
Karstiques de la zone côtière Ouest  
de Bejaia.**

Présenté par :

**AZEGAGH Hakima & CHAABNA Kamir**

Soutenu le : **14 Juin 2015**

Devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> HASSISSENE M.	MAA	Président
M <sup>r</sup> BENHAMICHE N.	MAA	Encadreur
M <sup>r</sup> BOULILA A.	MAA	Examineur

**Année universitaire : 2014 / 2015**

# Remerciements

*En premier lieu, nous remercions le bon Dieu, de nous avoir donné la force de mener ce travail jusqu'à la fin. Comme nous tenons à adresser nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce mémoire*

*Nous adressons un très grand merci à notre encadreur Mr BENHAMICHE N, qui nous a beaucoup aidées, soutenue, guidée, conseillée et orientée dans notre travail, qu'il sache que nous avons eu un grand plaisir de travailler avec lui, et que nous sommes très reconnaissantes.*

*A Mr HASSISSENE ET Mr BOULILA membres du jury. Mr LAISSAOUI, Mr SAOU, Mr MAZA, Mr ADJAOUD, Mr HADDAD FARES, Mr SAIT BILAL, Mr DJARROUDI AISSA.*

*Et à tous les enseignants de la faculté SNV qui nous ont prodigué leurs encouragements en répondant à nos questions. Et nous n'omettrons pas enfin de remercier tout particulièrement le personnel du :  
PARC NATIONAL DE GOURAYA, MUSEE GEOLOGIQUE, MUSEE DE L'EAU DE TOUDJA,*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail au plus beau trésor que dieu m'a donné « mes parents » pour leur amour, leur attention, leur encouragement, qui m'ont toujours poussé vers la réussite, ces deux êtres chers qui pour moi ont souffert à qui je dis tout simplement*

*« Maman papa je vous aime »*

*À mes chères sœurs, leurs conjoints et leurs enfants :*

*Lyna, Bilal et Céline.*

*À mes amis (es) : Kamir, Nesrine, Amira Shahrzade,*

*Toufik, Salima que j'admire beaucoup.*

*À tous ceux et celle qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

*Hakima*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mon défunt père M<sup>d</sup>  
Cherif et mon professeur de français ANNABI  
Rachid, qui auront tant aimé être présent en ce jour, la  
volonté de Dieu en a décidé autrement, qu'il accueille  
leurs âmes dans son vaste paradis.*

*À ma très chère mère, que Dieu la protège et la garde,  
à mon frère et mes sœurs qui m'ont toujours encouragé  
dans cette voie.*

*À ma grand-mère, mes oncles, mes tantes, leurs  
conjointes et leurs enfants ;*

*Sans oublier de dédier ce présent travail à tous les  
enseignants qui m'ont enseigné, pour leurs aides, leurs  
disponibilités et leurs précieux conseils.*

*En un mot à tous qui ont contribué de près ou de loin à  
la réussite de ce travail.*

*Kamir*

# Sommaire

Remerciements.	
Dédicaces	
Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Liste des acronymes.	
<b>Introduction générale</b> .....	1-3

## *PREMIERE PARTIE*

### **Chapitre I. *Etat de l'art sur les milieux karstiques***

<b>I.1. Le système karstique</b> .....	04
I.1.1. Le karst et système karstique.....	04
I.1.2. Le karst dans le bassin Méditerranéen.....	04
<b>I.2. La karstification</b> .....	10
I.2.1. Définition.....	10
I.2.2. Le phénomène.....	11
I.2.3. Polyphasage.....	11
<b>I.3. Principe de la karstification</b> .....	13
I.3.1. Définition.....	13
I.3.2. Généralités.....	13
I.3.3. Les facteurs influents.....	14
I.3.4. Schéma général de la karstification.....	15
<b>I.4. Les méthodes d'études des systèmes karstiques</b> .....	16

## *DEUXIEME PARTIE*

### **Chapitre II : *Matériels et Méthodes***

<b>1. Présentation du milieu d'étude</b> .....	19
1.1. Introduction.....	19
1.2. Situation géographique.....	20
1.3. La population.....	20
1.4. Géologie, Hydrogéologie et Géomorphologie.....	21
1.4.1. Cadre géologique.....	21
1.4.2. Cadre Stratigraphique.....	21
1.4.2.1. Trias.....	22
1.4.2.2. Jurassique.....	22
1.4.2.3. Crétacé.....	22
1.4.2.4. Paléogène.....	22
1.4.2.5. Quaternaire.....	22
1.4.3. Cadre hydrogéologique.....	22
1.4.4. Cadre géomorphologique.....	23
1.5. Végétation.....	24
1.6. Contexte climatique.....	24
1.6.1. Les précipitations.....	24
1.6.2. Les températures.....	25

1.6.3. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен.....	25
1.6.4. Quotient Pluviothermique et Climagramme d'Emberger.....	26
<b>II. Méthodes.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1. Géo-localisation et Cartographie.....</b>	<b>28</b>
II.1.1. Géo-localisation.....	28
II.1.1.1. Définition et principe de GPS.....	28
II.1.2. Cartographie.....	28
<b>II.2. Le système d'information géographique.....</b>	<b>29</b>
II.2.1. Définition et fonctions d'un SIG.....	29
<b>II.3. Présentation du logiciel de cartographie « MapInfo ».....</b>	<b>29</b>
II.3.1. Définition et utilité de MapInfo.....	29
II.3.1.1. Etapes à suivre.....	29
II.3.1.2. Calage de l'image raster.....	30
<b>II.4. Les méthodes d'échantillonnage des différentes sources karstiques.....</b>	<b>30</b>
II.4.1. Prélèvements.....	30
II.4.1.1. Ressources logistiques.....	30
II.4.1.2. Stratégie du travail.....	31
II.4.1.3. Difficultés rencontrées et solutions mises en œuvre.....	31
<b>II.5. Les méthodes d'analyses.....</b>	<b>31</b>
II.5.1. Introduction.....	31
II.5.2. Principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau.....	32
II.5.3. Les paramètres physiques.....	32
II.5.3.1. La température.....	32
II.5.3.2. Le pH.....	33
II.5.3.3. Conductivité Electrique.....	34
II.5.3.4. Total des solides dissous.....	34
II.5.3.5. Salinité.....	35
<b>II.6. Corrélation entre les paramètres physiques.....</b>	<b>35</b>
<b>II.7. Les méthodes de mesures des débits des sources karstiques.....</b>	<b>36</b>
II.7.1. Introduction.....	36
II.7.2. Mesure de débit.....	36
<b>Chapitre III : Résultats et discussions</b>	
<b>III.1. Présentation du SIG de différentes sources karstiques.....</b>	<b>37</b>
III.1.1. Introduction.....	37
III.1.2. Base de données spatiales.....	37
III.1.3. base de données thématiques.....	37
<b>III.2. Interprétations des résultats d'analyse.....</b>	<b>38</b>
III.2.1. Température.....	38
III.2.2. Potentiel d'hydrogène.....	40
III.2.3. La conductivité électrique.....	40
III.2.4. Salinité.....	40

III.2.5. Total des solides dissous.....	40
<b>III.3. Corrélation entre les paramètres physiques.....</b>	<b>42</b>
III.3.1. Potentiel d'hydrogène et températures.....	42
III.3.2. Salinité et conductivité électrique.....	42
III.3.3. Total des solides dissous et température.....	43
III.3.4. Conductivité électrique et le potentiel d'hydrogène.....	43
III.3.5. Total des solides dissous etsalinité.....	44
III.3.6. Total des solides dissous versus conductivité électrique.....	44
<b>III.4. Mesure des débits de quelques sources.....</b>	<b>45</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>46-47</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>48-51</b>

<i>Figure n°01</i> : Répartition des principaux gisements d'eau profonde.....	02
<i>Figure n°I.02</i> : Carte de répartition des zones karstiques, en bleu, autour de la Méditerranée. Les couleurs de vert à brun figurent les reliefs, selon les représentations habituelles. Les sources littorales et sous-marines associées aux aquifères karstiques sont figurées par les points rouges.....	05
<i>Figure n°I.03</i> : Les régions karstiques dans le globe.....	05
<i>Figure n°I.04</i> : Schéma fonctionnel des systèmes karstiques. En gras : les « organes » de l'aquifère karstique ; en italique : le fonctionnement.....	07
<i>Figure n°I.05</i> : Types de systèmes karstiques, d'après leur impluvium.....	09
<i>Figure n°I.06</i> : Système karstique jurassien et vauclusien.....	09
<i>Figure n°I.07</i> : Schéma conceptuel du fonctionnement d'un aquifère karstique.....	10
<i>Figure n°I.08</i> : La chimie des carbonates et de la dolomite.....	16
<i>Figure n°I.09</i> : Méthodologie d'étude des ressources en eaux karstiques intégrant modélisation numérique géologique 3D et analyses hydrogéologiques.....	18
<i>Figure n°II.10</i> : Les principaux Karst d'Algérie.....	19
<i>Figure n°II.11</i> : Situation géographiques des zones d'étude.....	20
<i>Figure n°II.12</i> : Coupes géologiques montrant la double vergence dans la région de Bejaia.....	23
<i>Figure n°II.13</i> : Diagramme ombrothermique de la région de Bejaia durant la période - coupe de la terminaison du djebel de Gouraya.....	26
<i>Figure n°II.14</i> : Détermination de l'Etage Bioclimatique de la Région de Bejaïa sur le Climagramme d'Emberger.....	27
<i>Figure n°II.15</i> : Photos de quelques sources localisées.....	30
<i>Figure n°II.16</i> : Matériels utilisés sur le terrain.....	35
<i>Figure n°III.17</i> : Carte de Localisation des Sites des Prélèvements.....	38
<i>Figure n°III.18</i> : Courbe de régression pH et la T° des eaux des sources.....	42
<i>Figure n°III.19</i> : Courbe de régression salinité vs CE des eaux des sources karstiques.....	42
<i>Figure n°III.20</i> : Courbe de corrélation TDS vs T° des eaux des sources karstiques.....	43

<i>Figure n°III.21</i> : Courbe de régression CE vs pH des eaux des sources karstiques.....	43
<i>Figure n°III.22</i> : Courbe de régression TDS vs salinité des eaux des sources karstiques.....	44
<i>Figure n°III.23</i> : Courbe de régression TDS vs CE des eaux des sources karstiques.....	44

<i>Tableau n° I.01</i> : Constante de dissociation de quelques roches carbonatées.....	13
<i>Tableau n° II.02</i> : Les grands bassins de la population de la wilaya de Bejaia.....	20
<i>Tableau n° II.03</i> : La répartition des précipitations moyennes mensuelles en mm de la période (1978-2012) pour la station de Bejaia.....	25
<i>Tableau n° II.04</i> : Températures moyennes mensuelles pour la région de Bejaia (1978-2012).....	25
<i>Tableau n° II.05</i> : Calcul de Q2 de la région de Bejaia.....	27
<i>Tableau n° II.06</i> : Goût de l'eau avec différentes concentrations de TDS.....	35
<i>Tableau n° III.07</i> : Résultats d'analyse des eaux de sources et calcul des statistiques descriptives.....	39
<i>Tableau n° III.08</i> : Description de la qualité des eaux des sources analysées (TDS) comparée aux normes de l'OMS (2003).....	41
<i>Tableau n° III.09</i> : Calcul du débit de quelques sources.....	45

## **Listes des acronymes et abréviations**

T°C : Température Degré Celsius

pH : Potentiel d'Hydrogène

CE : Conductivité Electrique

TDS : Total des Solides Dissous

S : Salinité

P : Précipitation

CV : Coefficient de Variation

Eq : Equation

SAD : Système Annexe au Drainage

GPS : Système de Positionnement Global

SIG : Système d'Information Géographique

OMS : Organisation Mondial de la Santé

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

AES : Atropos Ecosystème

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique

DSPBW : Direction de la Planification et Suivie du Budget de la wilaya de Bejaia.

ORGM : Office National de Recherche Géologique et Minière

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

PNG : Parc National de Gouraya

IPCC : Plan Intergouvernemental sur le Changement Climatique

ONM : Station Office National de la Météorologique

APC : Assemblé Populaire Communal

WGS : world Geodetic System (Système Géodésique du Monde)

## Introduction générale

---

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

L'expansion des villes, des industries et de l'agriculture a provoqué des modifications socioéconomiques significatives dans le monde durant ces dernières décennies. La croissance rapide de la population, particulièrement dans les pays en développement, coïncidant avec un processus d'industrialisation et d'élévation du niveau de vie, a fait augmenter les besoins en eau directs (alimentation en eau potable) et indirects (industrie, agriculture). Dans la même période, la surexploitation et/ou la pollution des eaux de nombreuses régions ont réduit, en qualité et en quantité, l'eau disponible pour les usages et le milieu naturel. Les bilans offre-demande évoluent vers des déficits structurels, notamment durant les phases d'étiages. Dès lors, une véritable évaluation des ressources, ainsi qu'une gestion de l'eau plus parcimonieuse, sont devenues impératives. La gestion des ressources hydriques devra maintenir l'équilibre entre des demandes croissantes et des ressources en eau douce de moins en moins disponibles. Pour cela, la gestion devra anticiper et résoudre les conflits entre les utilisateurs afin de partager les ressources en eau et les revenus issus de leurs utilisations tout en préservant le milieu naturel (**Christin, 2008**).

La région méditerranéenne est l'un des points chauds « Hot Spot » du changement global (IPCC, 2009). Elle évolue rapidement sous l'effet de fortes pressions climatiques et anthropiques alors que les ressources produites ne suffisent déjà plus aux besoins des populations. L'actuelle exploitation intense des ressources accroît les vulnérabilités sociales et environnementales et induit des tensions fortes sur les cycles hydrologiques et biogéochimiques. Les situations critiques et les conflits d'usages se multiplient. La recherche de nouveaux modes de développement durable passe par une connaissance plus approfondie des facteurs de dégradation, de résilience, de flexibilité et de réhabilitation des anthropo-écosystèmes (AES) (**Leduc et al., 2012**).

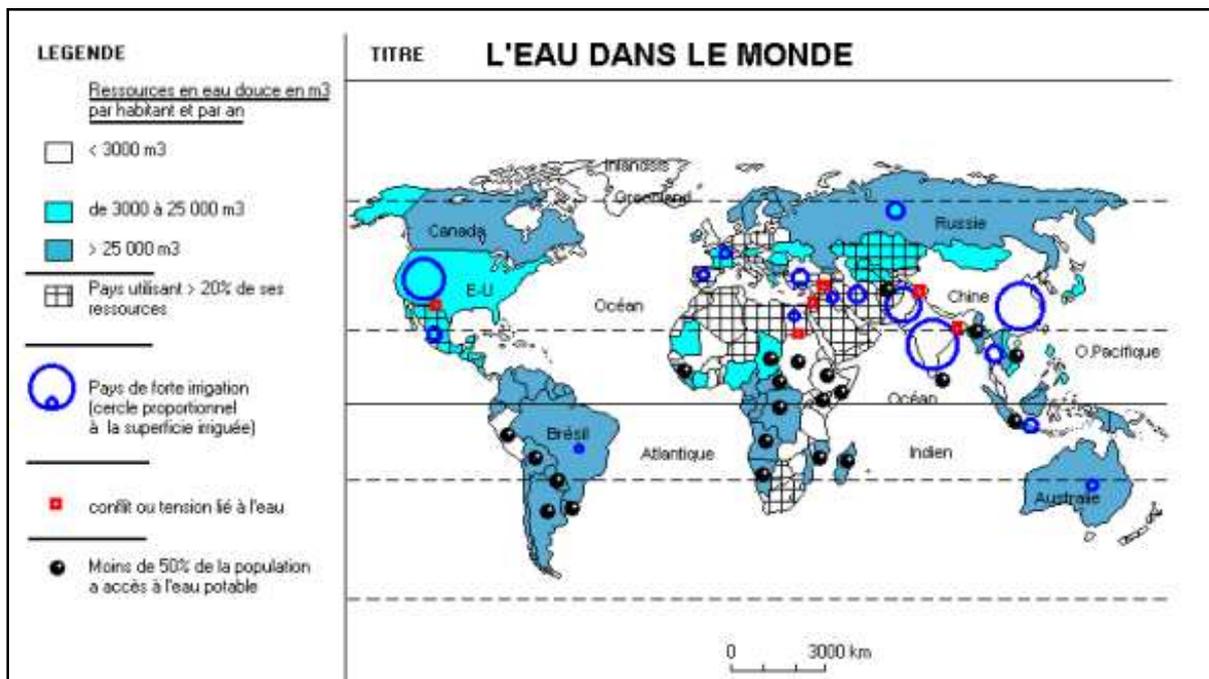
Les différentes conférences mondiales sur l'eau, ou le développement durable, à Dublin (1992), Rio de Janeiro (1992), Harare, Kyoto (2003)...etc. traduisent la prise de conscience de la communauté internationale face au problème de la gestion des ressources en eau. De nombreuses questions ont émergé, notamment sur les objectifs, le choix des règles de gestion et les pas d'espace et de temps à considérer pour permettre de satisfaire les demandes parfois conflictuelles entre les différents usages (irrigation, industrie, eau potable, activités touristiques, milieu naturel, etc.) (**Christin, 2008**).

La rareté relative des ressources en eau autour de la Méditerranée, leur fragilité et leur inégale répartition (Fig. N°01) font naître un risque majeur de pénurie qui s'accroît continuellement

## Introduction générale

face aux pressions démographiques et aux besoins croissants de l'essor socio-économique. Il s'avère donc nécessaire de trouver des solutions alternatives pour préserver les nappes d'eau souterraines. Parmi ces solutions figurent la recharge artificielle des nappes qui doit contribuer à une remontée des niveaux piézométriques et à une amélioration de la qualité par dilution des eaux (Laignel, 2014).

Sur la Terre, nous ne sommes pas tous égaux devant la ressource en eau. La répartition de l'eau est en effet très inégale et les zones d'utilisations intensives ne sont pas toujours les zones les mieux pourvues par la nature (Fig. N°01). La ressource en eau est très faible dans certains pays d'Afrique, d'Asie et du Proche-Orient. Selon les projections de l'O.C.D.E. (Organisation de Coopération et de Développement Economique) en 2030, avec l'augmentation de la population mondiale, l'augmentation des cultures irriguées (augmentation de 50% de la production agricole pour nourrir le Monde d'ici à 2030), la demande en eau pourrait dépasser l'offre. Quatre milliards de personnes vivront dans des zones soumises à un stress lié à l'eau, principalement en Asie du Sud et en Chine. Déjà aujourd'hui, dans certains pays des conflits liés à l'eau apparaissent (Fig. N°01), d'autres conflits futurs pourraient être prévisibles.



**Figure N°01 :** Répartition du stock d'eau sur la planète Terre (source [www.carte-du-monde.net](http://www.carte-du-monde.net))

Les connaissances en matière d'hydrologie karstique et d'évolution géologique des régions méditerranéennes ont fait des progrès considérables, surtout depuis 20 ans. Ceux-ci devraient permettre de reconsidérer l'exploitation, la protection et la gestion des eaux souterraines

## Introduction générale

---

karstiques sous un jour nouveau, de manière à mettre en place des politiques régionales de gestion intégrée assurant leur durabilité (**Bakalowicz, 2010**).

Eu égard à l'importance de cette ressource vitale, l'objectif de ce travail consiste en la connaissance des différentes sources karstiques de la zone côtière de Bejaïa, leur géo-localisation et la mesure de quelques paramètres physiques des eaux de ces sources (température, potentiel d'hydrogène, conductivité électrique et total des solides dissous et salinité).

Le présent mémoire comprend, en plus de l'introduction et de la conclusion, trois parties. La première partie contient une synthèse bibliographique sur les milieux karstiques. Elle décrit les notions de karst et les méthodes utilisées pour l'étude de ses milieux. La deuxième partie comporte les matériels et méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail. La dernière partie comprend les résultats et leurs interprétations.

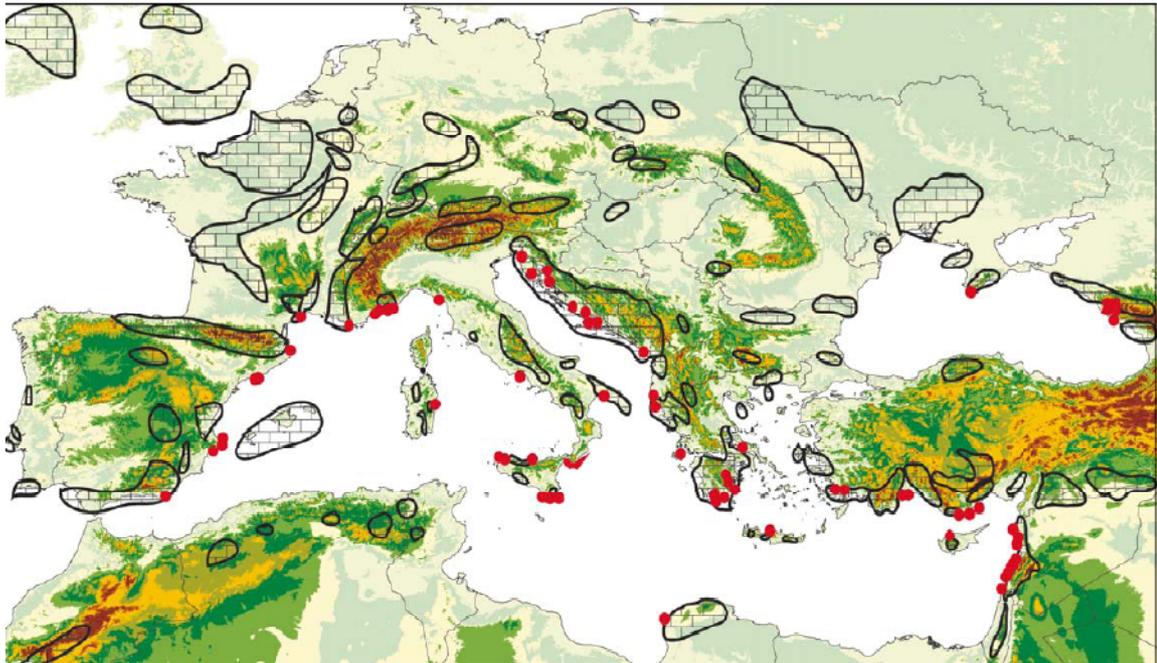
**I.1. Le système karstique****I.1.1. Le karst et le système karstique**

Le karst est l'ensemble des formes superficielle et souterraine engendrées par la dissolution de certaines roches, et en particulier des roches carbonatées. Cette définition morphologique du karst requiert à la fois des conditions thermodynamiques et hydrodynamiques. La dissolution de séries carbonatées par les eaux agressives nécessite des pourvoyeurs de gaz carbonique, l'atmosphère et le sol principalement, et des conditions de pression et de température permettant la mise en œuvre des réactions (Mudry, 1987).

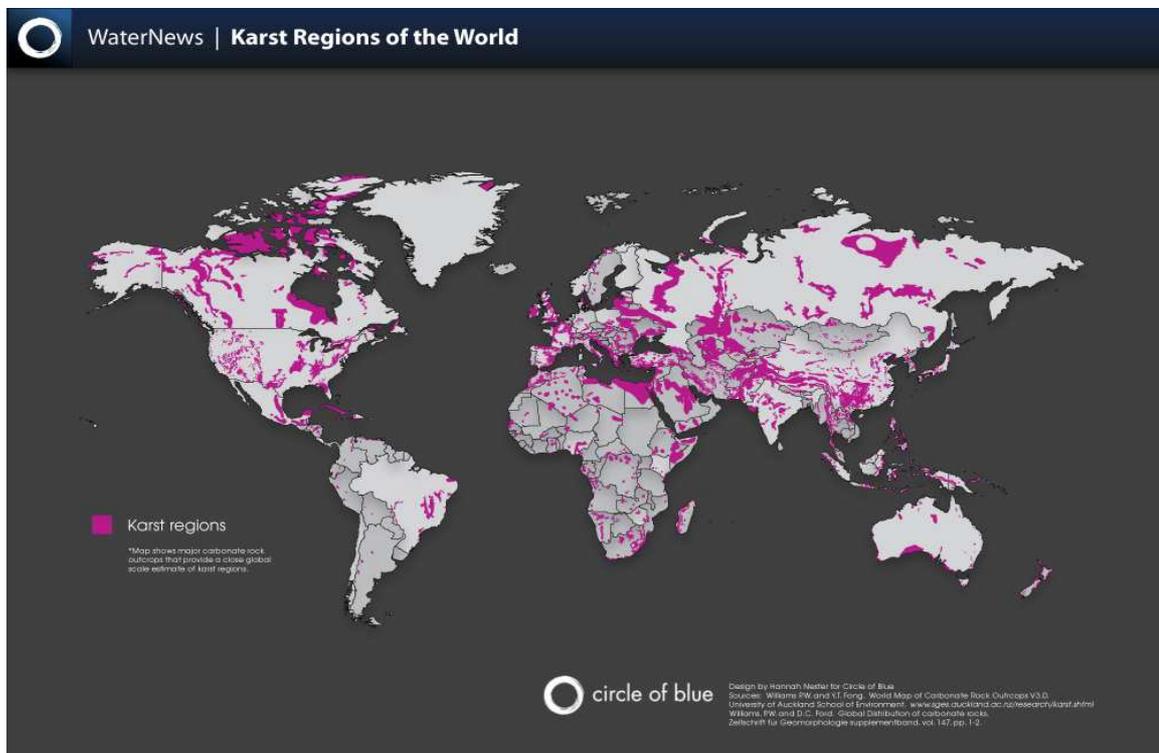
**I.1.2. Le karst dans le bassin Méditerranéen**

Les roches carbonatées sont très présentes dans le bassin méditerrané et affleurent selon les pays sur 30 à 70% de la surface (Fig. N°I.02). De plus, ces régions ont été soumises à des mouvements tectoniques (phase Pyrénéenne) et des variations du niveau de la mer très importantes (variations au cours du Quaternaire, crise de salinité au Messinien). Donc les conditions sont réunies pour que les aquifères karstiques de la région méditerranéenne renferment une partie importante des ressources en eau.

Ils peuvent ainsi offrir des ressources de l'ordre de quelques dizaines de m<sup>3</sup>/s à plusieurs centaines de l/s. Toutes ces quantités d'eau peuvent satisfaire les agglomérations du pourtour méditerranéen qui souffrent, surtout lors de la période estivale, d'une importante pénurie d'eau. Bien que les formations karstiques constituent la principale formation aquifère de ces pays, le cas d'exploitation par gestion active, méthode d'exploitation durable qui veille à respecter les conditions de reconstitution des réserves, restent des exceptions. Il est donc primordial de bien connaître ces systèmes pour pouvoir protéger et exploiter leurs ressources en eau (Chalikakis, 2006).



**Figure N°I.2 :** Carte de répartition des zones karstiques autour de la Méditerranée, en bleu ; les couleurs de vert à brun figurent les reliefs, selon les représentations habituelles. Les sources littorales et sous-marines associées aux aquifères karstiques sont figurées par les points rouges (Bakalowicz, 2010).

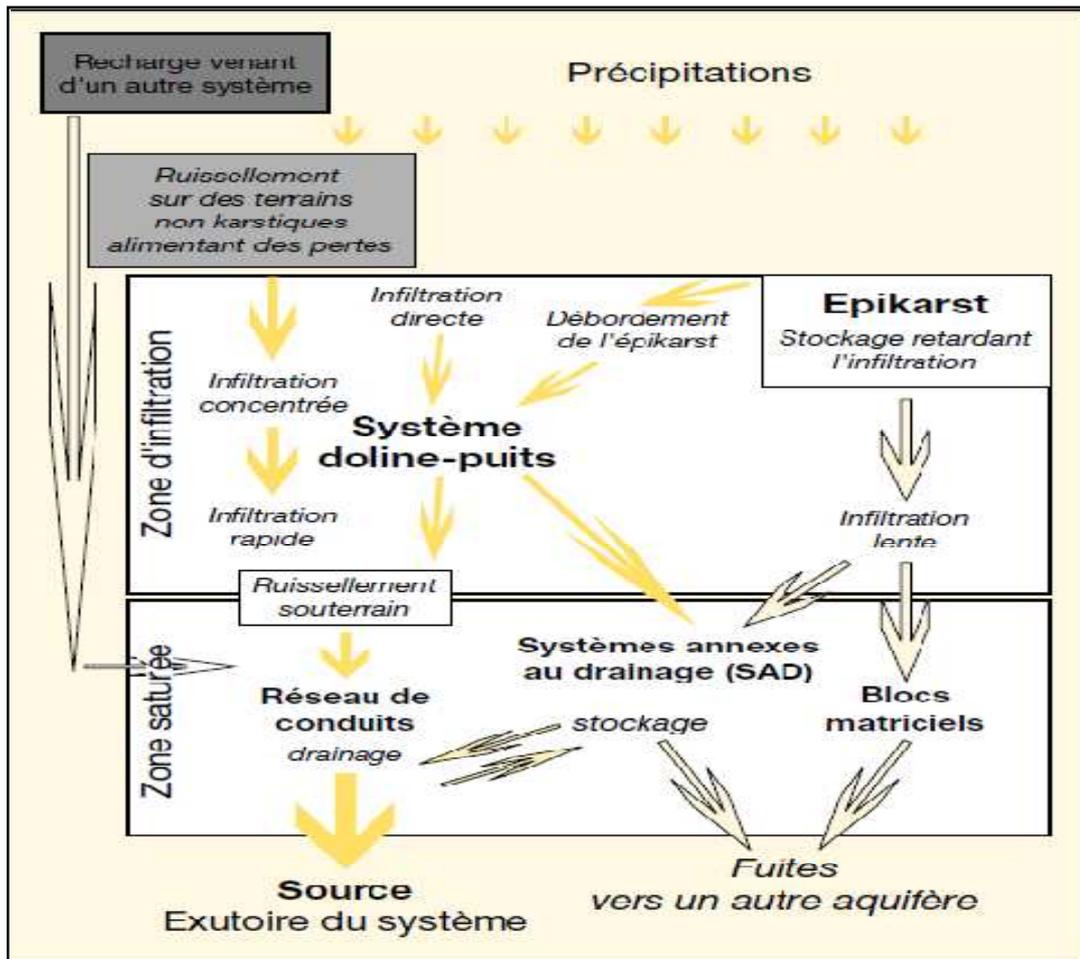


**Figure N°I.03 :** Les régions karstiques dans le monde (International Google marque).

L'origine du mot karst est allemande et provient de la dénomination géographique d'une région s'étendant de Trieste en Italie jusqu'au mont Snežnik à l'est en Slovénie ; cette région était souvent étendue à une région située plus au Nord, le karst de la Carniole jusqu'à Ljubljana, avec la célèbre grotte de Postojna, Adelsberg. Le mot « karst » s'est répandu dans l'Europe centrale et occidentale. On désigne sous le nom de « phénomènes karstiques » les formes du relief, les caractères morphologiques et les processus hydrographiques particuliers aux terrains calcaires ou salins sur toute la surface de la terre. En effet, le paysage de karst résulte des écoulements souterrains particuliers qui se mettent en place progressivement dans les roches carbonatées (calcaire et dolomies) et dans les roches salines (gypse et parfois sel gemme) et constitue également un aquifère puisque l'eau souterraine est totalement impliquée dans sa formation et dans son fonctionnement (**Chalikakis, 2006**).

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

- Sa zone épi-karstique (si elle existe), située dans les premiers mètres de l'aquifère. Elle est soumise à d'importants phénomènes d'altération et constitue un espace de stockage temporaire de l'eau de pluie avant qu'elle ne soit drainée verticalement vers la zone d'infiltration ;
- Sa zone d'infiltration, qui est la partie non saturée de l'aquifère. Les écoulements peuvent y être lents ou rapides ;
- Sa zone noyée, qui constitue la zone saturée de l'aquifère. Elle est constituée d'un drain principal, où les écoulements sont rapides, autour duquel s'organise des systèmes annexes de drainage qui constituent des vides importants. Les écoulements y sont lents du fait de leurs fonctions capacitatives (**Plagnes et al., 2013**). La figure suivante présente un schéma conceptuel du système karstique:



**Figure N°I.04** : Schéma fonctionnel des systèmes karstiques. En gras : les « organes » de l'aquifère karstique ; en italique : le fonctionnement (**Bakalowicz, 2010**).

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

Le système karstique est défini par Mangin (1975) comme étant un ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage. Ainsi un tel système a la spécificité d'englober les terrains non karstiques de l'impluvium dont les eaux de ruissellement sont drainées par l'aquifère karstique au niveau de points singuliers

de type pertes. En fonction de la nature de l'impluvium, on distingue deux types de systèmes karstiques (Fig. N°I.05) :

- **Système unaire** : système pour lequel l'ensemble de l'impluvium est constitué par des terrains karstiques.
- **Système binaire** : système pour lequel une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiable ou imperméables ou les eaux de ruissellement sont concentrées au niveau de pertes. En général, le développement du réseau de drainage souterrain est plus développé d'amont en aval que pour un système unaire, du fait de la concentration des écoulements au contact des formations karstiques et imperméables (**Dörfliger et al., 2004**).

La karstification est probablement plus diffuse et plus lente pour les karsts unaires que pour les karsts binaires. Les conditions internes au système karstique, qui sont représentatives à un instant donné du processus dynamique de la karstification défini par Mangin (1975), telles que lithologie, texture, fracturation et porosité, jouent un rôle sur la position du réseau de drainage d'un système karstique par rapport au niveau de l'exutoire. Ainsi on peut distinguer globalement deux types de systèmes karstiques, jurassiens et vaclusiens bien que cette classification soit restrictive par rapport à la réalité ; ces deux systèmes ont les caractéristiques suivantes (Fig. N°I.06) :

- **Système jurassien** : système pour lequel le réseau de drainage s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire ; le degré de fracturation, la lithologie ainsi que la stratification déterminant une faible résistance à l'écoulement des eaux. Les écoulements au sein du réseau de conduits se font le plus souvent à surface libre.
- **Système vaclusien** : système pour lequel la karstification se développe en profondeur sous le niveau de base actuel ; le degré de fracturation, la lithologie ainsi que la stratification déterminent une forte résistance à l'écoulement des eaux. Pour ces systèmes, la plupart des écoulements se font en charge hydraulique (**DÖrfliger et al., 2004**).

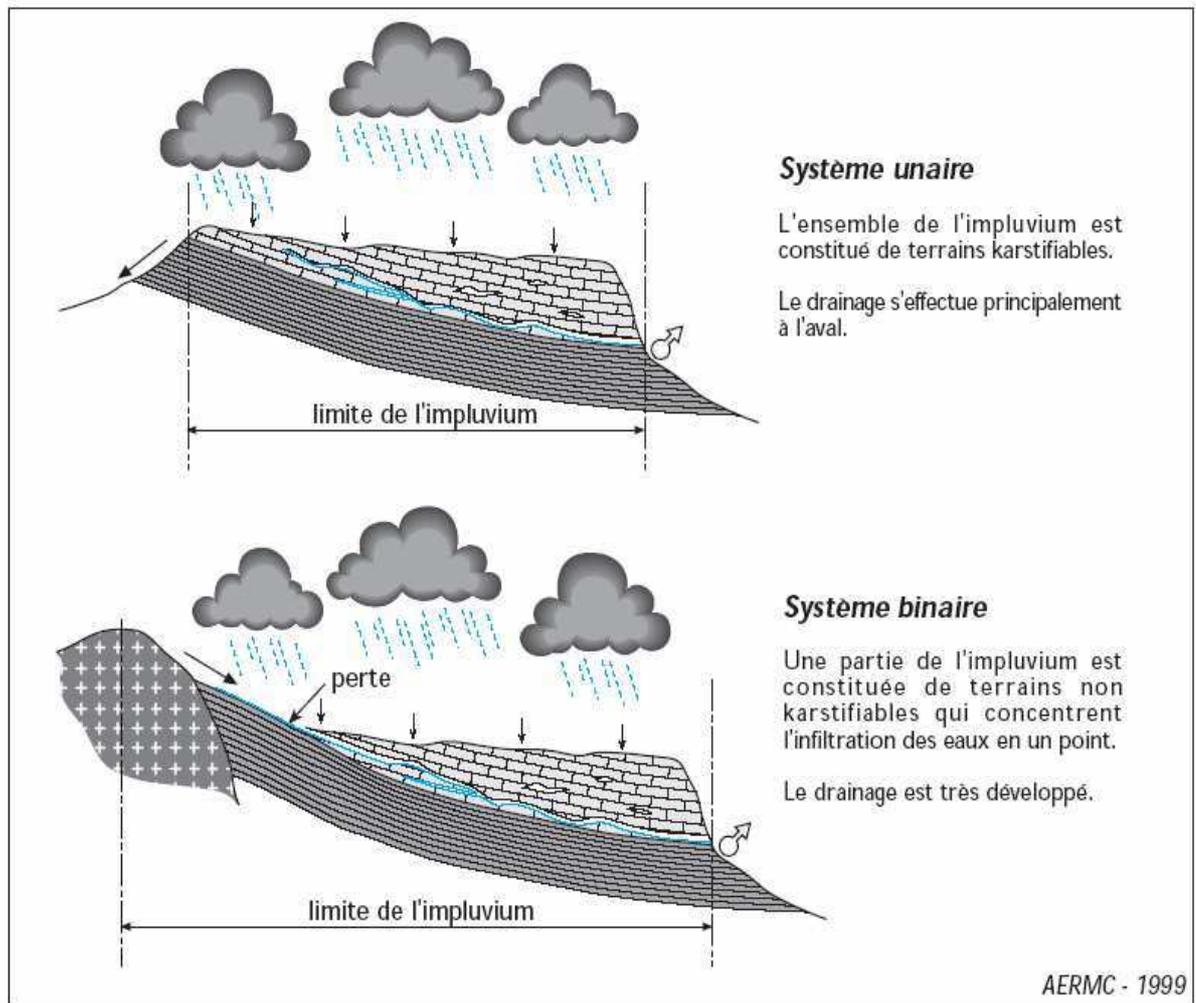


Figure N°I.05 : Types de systèmes karstiques, d'après leur impluvium (Chabour, 2006).

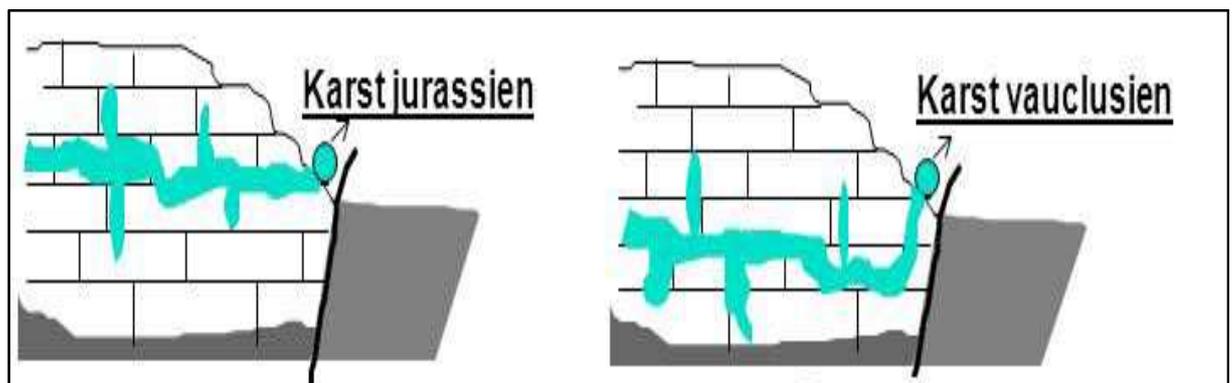


Figure N°I.06 : Système karstique jurassien et vauclusien (International Google marque).

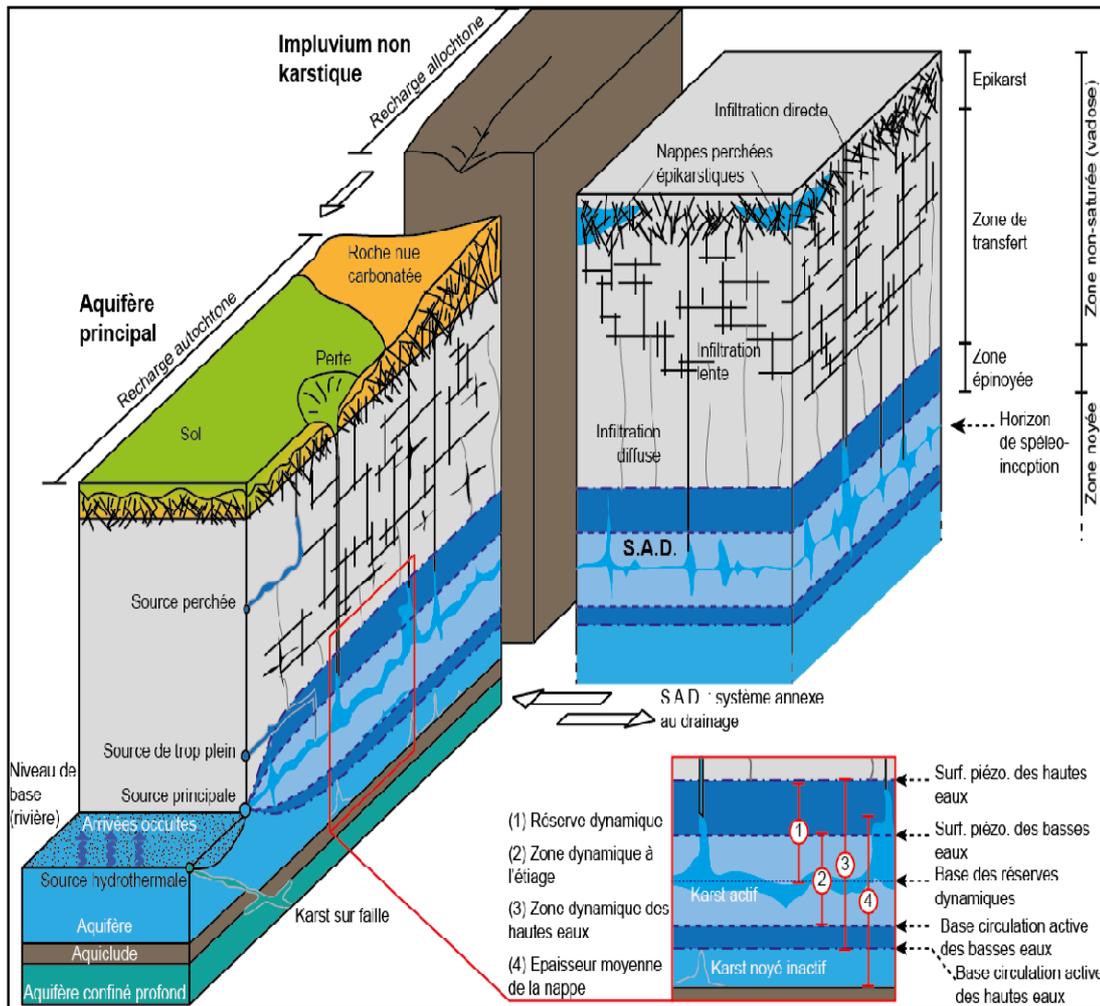


Figure N°I.07: Schéma conceptuel du fonctionnement d'un aquifère karstique (Fournillon, 2012)

## I.2. La karstification

### I.2.1. Définition

La karstification correspond à « l'ensemble des processus de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines d'une région karstique » Elle est principalement liée à la dissolution des carbonates et à une érosion mécanique. De plus, c'est un processus qui dépend essentiellement de deux paramètres qui sont, d'une part, le potentiel de karstification (lié aux conditions climatiques régissant principalement les précipitations et la végétation donc le signal d'entrée de la  $pCO_2$  dans le système, à la géométrie du réservoir et à l'existence d'un gradient hydraulique) et d'autre part, la structure interne du massif (lithologie, fracturation et porosité) (Garry, 2007).

La karstification est un processus thermodynamique et hydrocinématique qui transforme les milieux carbonatés hétérogènes et anisotropes en milieux hiérarchisés, c'est-à-dire qui

organise la coalescence des écoulements souterrains à la manière d'un réseau hydrographique tridimensionnel (**Mudry, 1987**).

### **I.2.2. Le phénomène**

Le phénomène de karstification ne peut se développer que dans des roches dont les minéraux sont solubles dans l'eau pure (gypse) ou dans l'eau rendue agressive par l'adjonction d'un acide fort (oxydation des sulfures métalliques, hydrogène sulfuré des gisements pétroliers), où dans l'immense majorité des cas, par dissociation d'un acide faible, l'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>) dissous dans l'eau (**Gilli et al., 2008**).

### **I.2.3. Polyphasage**

La karstification se met en place dès que des roches carbonatées sont soumises à l'action de l'eau douce. Elle affecte, par exemple, les platiers coralliens dès leur émergence sous l'effet de l'eustatisme ou de la tectonique. La karstification d'une zone calcaire peut donc s'étaler sur des millions d'années. Le double moteur de la karstification est d'une part chimique (sous saturation vis-à-vis des minéraux), d'autre part hydraulique (énergie potentielle entre l'impluvium et l'émergence, capable de transporter en souterrain la sous-saturation vers l'aval). L'évolution de cette énergie potentielle au cours du temps peut être induite par un accroissement de la perméabilité, une orogénèse, la néotectonique, les variations eustatiques. La genèse polyphasée des massifs karstiques en fait des milieux géométriquement complexes (alternance de phases d'enfoncement et de phases d'équilibre avec le niveau de base local), ce qui se traduit par une modification des zones d'écoulement au cours du temps (colmatages, décolmatages, inversions de circulations) (**Gilli et al., 2008**).

La karstification –processus dépendant du climat, de la pédogenèse, de la végétation, de la géologie, de la structurale et du gradient hydraulique- donne lieu à des vides organisés en réseau de conduits assurant le drainage de l'aquifère (**DÖrfliger et al., 2004**). Les roches carbonatées solubles (calcaire, dolomie, marbre, craie) sont façonnées par dissolution : c'est le phénomène de karstification (**Barriquand, 2008**).

Si l'eau pure peut dissoudre une grande quantité d'halite et dans une moindre mesure de gypse, elle est incapable de dissoudre les carbonates. Cependant, si l'eau contient un acide fort, comme du CO<sub>2</sub> dissout, alors la dissolution des carbonates devient possible.

Les roches carbonatées intactes sont peu perméables. Elles peuvent présenter de nombreuses discontinuités qui, sous l'action de l'eau acidifiée et des éléments solides contenus dans l'eau d'infiltration, vont s'élargir par érosion. Cette érosion va se faire préférentiellement le long des discontinuités du massif carbonaté. Parmi ces

discontinuités, nous pouvons différencier les discontinuités d'origine tectonique (fractures, stylolites) et diagénétiques (perméabilité variable et dissolution variable suivant le squelette poreux de la roche et sa composition).

Suite à l'érosion, cette diagenèse tardive, une porosité secondaire va être mise-en place. Cependant, elle est fonction de l'état de vie du système karstique à un moment de son existence et peut même être rebouchée par cristallisation de calcite ou dépôt d'argiles. Cette porosité secondaire dépendra donc des conditions aux limites de l'ensemble karstique considéré, et plus particulièrement de la direction et de l'importance du gradient hydraulique. Les principales sources d'acides forts entraînant la karstification sont :

- Le CO<sub>2</sub> provenant du sol (karsts météoritiques) ou de venues profondes comme de sources hydrothermales (karst hydrothermal) ou la décarbonatation de matière organique enfouie (karst liés à un gisement de matière organique fossile) ;
- les acides humiques et fulviques provenant de la minéralisation de la matière organique naturelle et d'origine anthropique ;
- Les acides sulfuriques provenant de venues profondes (sources hydrothermales).

Pour que l'eau agressive (notamment celle chargée d'acide carbonique) puisse s'infiltrer, il est nécessaire que la dissolution s'opère sur des discontinuités déjà existantes (joints de stratification, diaclases, failles). Ces discontinuités permettront un drainage souterrain de l'eau, des ions produits et des résidus insolubles de la dissolution (argile, silicates). Pour que la karstification puisse évoluer, il est nécessaire que le massif soit capable d'éliminer ses insolubles et les produits de la dissolution.

La vitesse d'évolution de la karstogenèse est fonction de l'état de sous-saturation de la solution vis-à-vis des minéraux constitutifs de l'aquifère, mais aussi avant tout, des flux d'eau entraînant les ions mis en solution (**Baily, 2009**).

Dans les conditions normales de température et pression (25° et 1 atm.), Bakalowicz (1979) a donné les résultats suivants :

**Tableau N° I.01 : Constante de dissociation de quelques roches carbonatées (Chabour, 2006).**

Minéral	Composition	Constante de dissociation
Calcite	CaCO <sub>3</sub> rhomboédrique	3.8 10 <sup>-9</sup>
Aragonite	CaCO <sub>3</sub> orthorhombique	6.09 10 <sup>-9</sup>
Magnésite	MgCO <sub>3</sub>	5.75 10 <sup>-9</sup>
Dolomite	Ca, Mg (CO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup>	10 <sup>-17</sup>

### I.3. Principe de la karstification

#### I.3.1. Définition

Comme nous venons de le voir, le phénomène clef de la karstification est la dissolution de la roche par le CO<sub>2</sub> dissous. Elle n'est possible que dans le cas où il existe suffisamment de CO<sub>2</sub> dissous et que celui-ci soit renouvelé. Ce CO<sub>2</sub> dissous peut avoir plusieurs origines dans les eaux karstiques. Il provient principalement de la respiration racinaire et de la dégradation de la matière organique du sol par l'activité biologique et bactériologique, sans oublier les circulations d'air dans les milieux souterrains, et occasionnellement d'un dégazage d'origine profonde ou volcanique. En effet, les roches carbonatées ont cette spécificité de ne pas se dissoudre facilement dans de l'eau pure en condition normale de température (25°C) et de pression (1atm). D'autres facteurs interviennent dans la dissolution des roches carbonatées comme la lithologie, la texture du sol (plus la roche sera riche en dolomite, plus la mise en solution sera longue) et la fracturation (Garry, 2007).

#### I.3.2. Généralités

L'action de l'eau non acide sur la roche est insuffisante pour expliquer les formes karstiques de grandes dimensions, même en faisant intervenir une érosion mécanique au demeurant assez faible et le plus souvent négligeable. La dissolution de la roche carbonatée est le fait de l'interaction entre trois phases : la roche, l'eau et l'air.

Le processus de karstification met en jeu deux facteurs : une eau rendue acide et agressive par le CO<sub>2</sub> et un gradient hydraulique permettant la circulation et le renouvellement de cette eau. On parle de potentiel de karstification tel que :

$$\text{Potentiel de karstification} = \text{moteur} \times \text{pouvoir de dissolution}$$

Le moteur de la karstification est la circulation du solvant, ici l'eau, qui permet son renouvellement après qu'elle ait épuisé son pouvoir de dissolution. Dans les karsts

classiques, ce moteur est la gravité, ce qui amène Mangin (1975) à parler de karst gravifique. Du fait du gradient hydraulique entre la zone de recharge et le niveau de base, l'eau tend à s'écouler vers ce niveau de base, celui-ci pouvant varier au cours du temps en fonction des mouvements tectoniques ou des variations eustatiques. Ces variations peuvent expliquer l'abandon de certains réseaux plus haut actuellement que le réseau actif ou, au contraire, l'ennoiement de galerie autrefois à l'air libre comme en témoignent leurs stalactites et stalagmites.

Le pouvoir de dissolution correspond à l'agressivité de l'eau vis-à-vis de la roche encaissante et dépend de son acidité, principalement due à sa charge en CO<sub>2</sub> dissout ou acide carbonique. Il existe néanmoins des cas, rares bien que souvent cités pour relativiser l'importance de l'acide carbonique, dans lesquels l'acidité de l'eau est le fruit d'autres processus comme par exemple les karsts dus à l'action de l'acide sulfurique **(Peyraube, 2011)**.

Le CO<sub>2</sub> peut être produit en tout point de l'aquifère par la dégradation bactérienne de la matière organique présente dans l'eau. Il peut également trouver son origine dans les remontées profondes à la faveur des failles. Cependant le CO<sub>2</sub> est majoritairement produit dans les sols par les bactéries (dégradation aérobie de la matière organique) et par les végétaux (respiration racinaire). La production de CO<sub>2</sub> varie selon plusieurs critères, notamment la température et la teneur en eau dans les sols. Miotke (1974) montre que la plage de température optimum pour différentes espèces de bactéries varie de 20 à 65°C et que la production de CO<sub>2</sub> est maximum pour une teneur en eau de 50 à 80% dans les sols. La concentration de CO<sub>2</sub> dans les sols varie de ce fait en fonction du climat et de la latitude : de 0,2% à 11% en zone tropicale, de 0,1% à 6% zone tempérée et de 0,2% à 1% pour les hautes latitudes ou 0,04% à 1% en montagne **(Peyraube, 2011)**.

Si l'un des deux paramètres est nul (moteur ou pouvoir de dissolution), la karstification ne peut intervenir. La circulation de l'eau agressive est une condition nécessaire et suffisante. Cependant, elle est en compétition avec la vitesse de dissolution : il faut renouveler l'eau mais pas avant qu'elle ait épuisé son pouvoir de dissolution **(Peyraube, 2011)**.

### **I.3.3. Les facteurs influents**

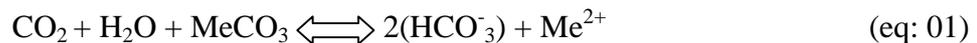
Longtemps, deux écoles se sont affrontées quant à la prépondérance de l'influence de la température ou de la pluviométrie sur la karstification. Corbel (1959) propose la température comme facteur prépondérant à la karstification. Il indique qu'à pluviométrie

égale, la karstification serait près de dix fois plus importante dans les régions nordiques et montagneuses (basse température) que dans les régions tropicales (hautes températures). Ceci étant du à la plus forte solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau à basse température.

Cette assertion a été remise en cause par de nombreux auteurs : Priesnitz (1974) ; Smith et Atkinson, (1976) proposant au contraire une prépondérance de la pluviométrie, donc du flux, qui expliquerait les formes très karstifiées visibles en zone tropicale. Bakalowicz (1992) fait une synthèse de ces théories et ajoute une influence de la géologie et de la morphologie en précisant qu'aucun des critères ne peut être considéré comme prépondérant sur les autres (Peyraube, 2011).

### I.3.4. Schéma général de la karstification

Le schéma général de la karstification fait intervenir une eau qui s'infiltré dans le sol où elle se charge en CO<sub>2</sub> dissout, puis circule dans le karst pour rejoindre le niveau de base local. Au cours de son transit, cette eau dissout la roche et se minéralise. Il s'agit de fait d'une interaction triphasique entre l'air, l'eau et la roche résumée par l'équation 01 :



Où Me<sup>2+</sup> représente le cation divalent associé au carbonate. Il peut correspondre au magnésium ou au calcium. Cependant, nous ferons désormais référence uniquement au calcium dans ce type d'équation.

L'équation 01 est la synthèse des équations régissant les équilibres du système calco-carbonique. Par souci de simplification, les espèces carbonatées sont rassemblées ici sous la forme HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> bien que quatre formes coexistent dans l'eau :

- CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, l'ion carbonate;
- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, l'ion bicarbonate;
- H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, l'acide carbonique ;
- CO<sub>2</sub> aqueux, le CO<sub>2</sub> dissout.

Les deux dernières espèces sont rassemblées sous le terme H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> par Appelo et Postma (2005) qui précisent que la forme H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> est 600 fois moins présente que la forme CO<sub>2</sub> aqueux pour une température de 25°C (Peyraube,2011).

En résumé, la structure du karst est issue de la karstification qui élargit vides originels et fissures. La conséquence est le développement d'un système à triple porosité, avec d'un côté la roche encaissante, poreuse, microfissurée, et de l'autre côté un réseau de drains et

de fractures interconnectés. L'écoulement s'organise en direction de l'exutoire par le réseau de drains, qui assure la fonction transmissive de l'aquifère, alors que la fonction capacitive est assurée par le réseau de fractures de la roche encaissante et les SAD (Fleury, 2013).

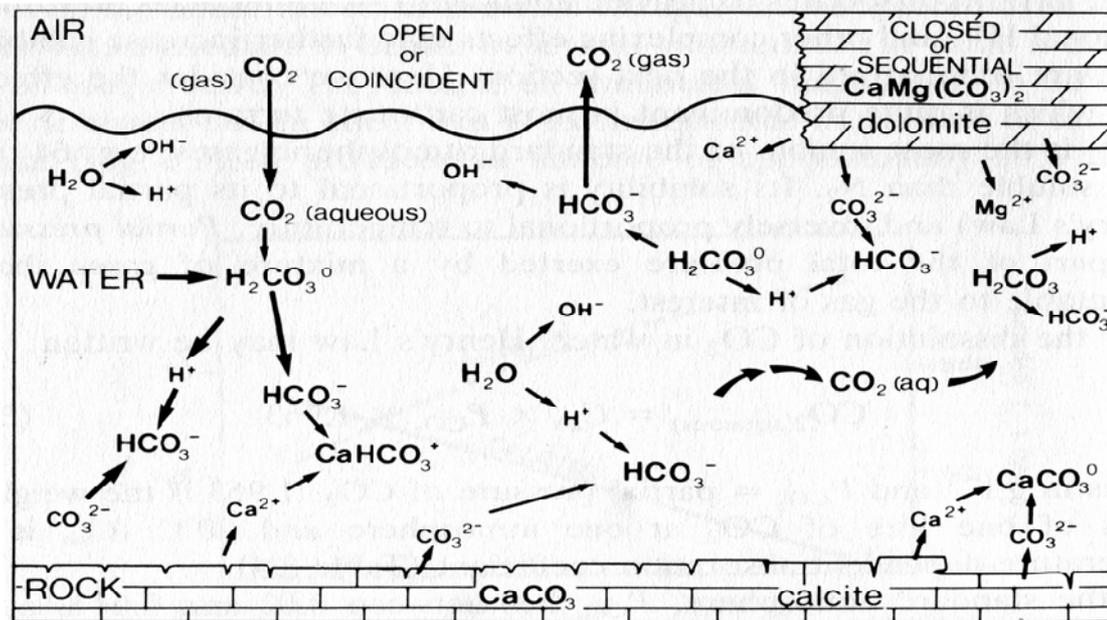


Figure N°I.08: La chimie des carbonates et de la dolomite (Bakalowicz, 2002).

La circulation de l'eau au sein de l'aquifère, par l'intermédiaire d'un gradient, est alors définie comme une condition nécessaire et suffisante qui détermine l'existence ou non d'une karstification. Il y a donc une compétition entre la vitesse de dissolution et la dynamique des écoulements. Ce dernier point souligne une autre particularité de la karstification, à savoir, le phénomène d'auto organisation des vides. Celle-ci permet la hiérarchisation des vides et « l'élaboration de tout un réseau de drainage souterrain » (Garry, 2007).

#### I.4. Les méthodes d'études des systèmes karstiques

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

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

L'étude des aquifères karstiques reposent sur deux approches principales: l'approche fonctionnelle, et l'approche structurelle. L'approche fonctionnelle vise à inférer les caractéristiques de l'aquifère karstique à partir de son fonctionnement. Cette approche peut reposer soit sur l'étude d'enregistrement de paramètres physico-chimiques de l'aquifère soit sur l'étude hydrochimique de l'aquifère. Selon Jeannin (1996), cette approche présente l'avantage de pouvoir caractériser l'aquifère dans sa globalité mais pas de spatialiser les informations. Des modèles de type boîte-noire peuvent en dériver. Ils n'ont pas, ou peu, de réalité physique mais peuvent servir d'outil de gestion des aquifères.

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

Les avantages et inconvénients respectifs des approches fonctionnelles et des approches structurelles montrent la nécessité de les intégrer, en particulier à travers la modélisation numérique. En effet, ces deux approches deviennent complémentaires et permettent de comparer et de corréler la réalité physique des aquifères et leur fonctionnement dynamique. Les approches intégrées doivent donc reposer sur une caractérisation multi-échelle des objets karstiques du fait de leur hétérogénéité. En effet, les échelles

d'investigation ne sont optimales que pour une fourchette réduite de taille d'objets hydrogéologiques (Fournillon, 2012).

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

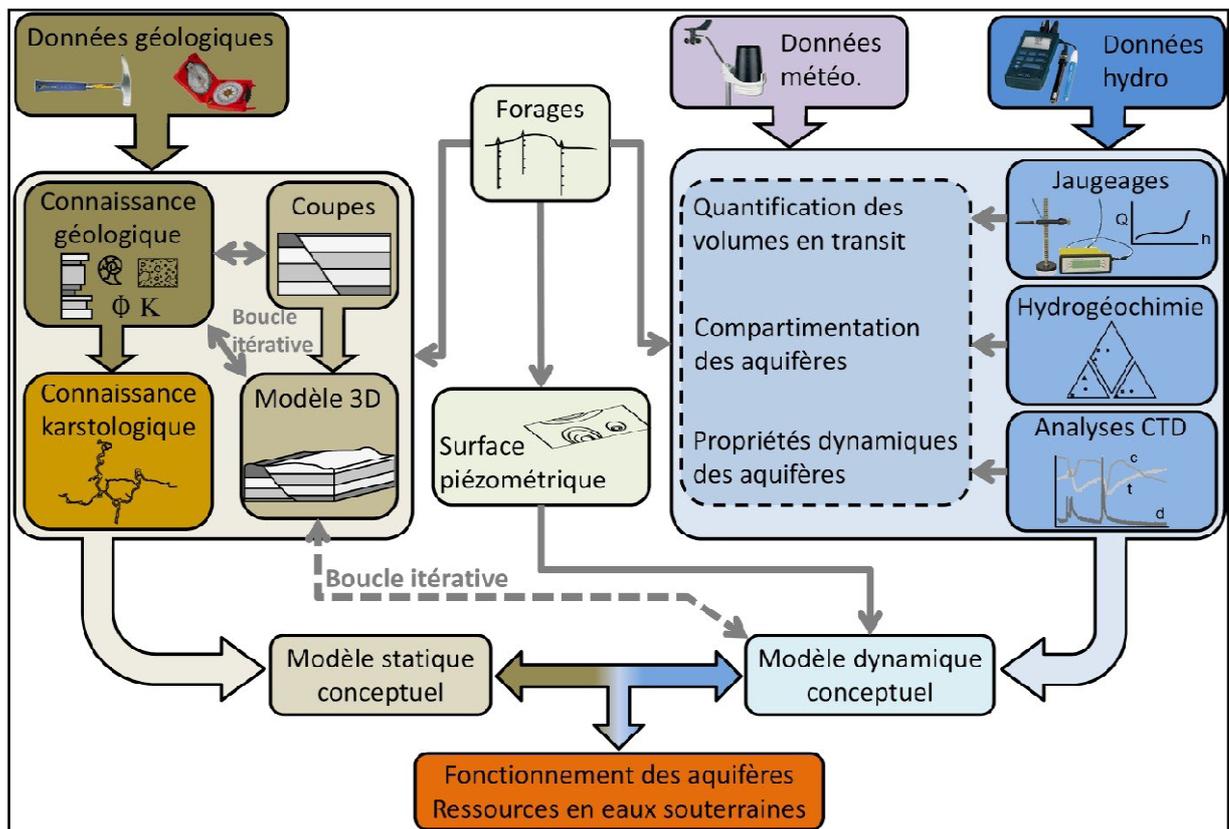


Figure N° I.09: Méthodologie d'étude des ressources en eaux karstiques intégrant modélisation numérique géologique 3D et analyses hydrogéologiques (Fournillon, 2012).

## 1. Présentation du milieu d'étude

### 1.1. Introduction

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

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

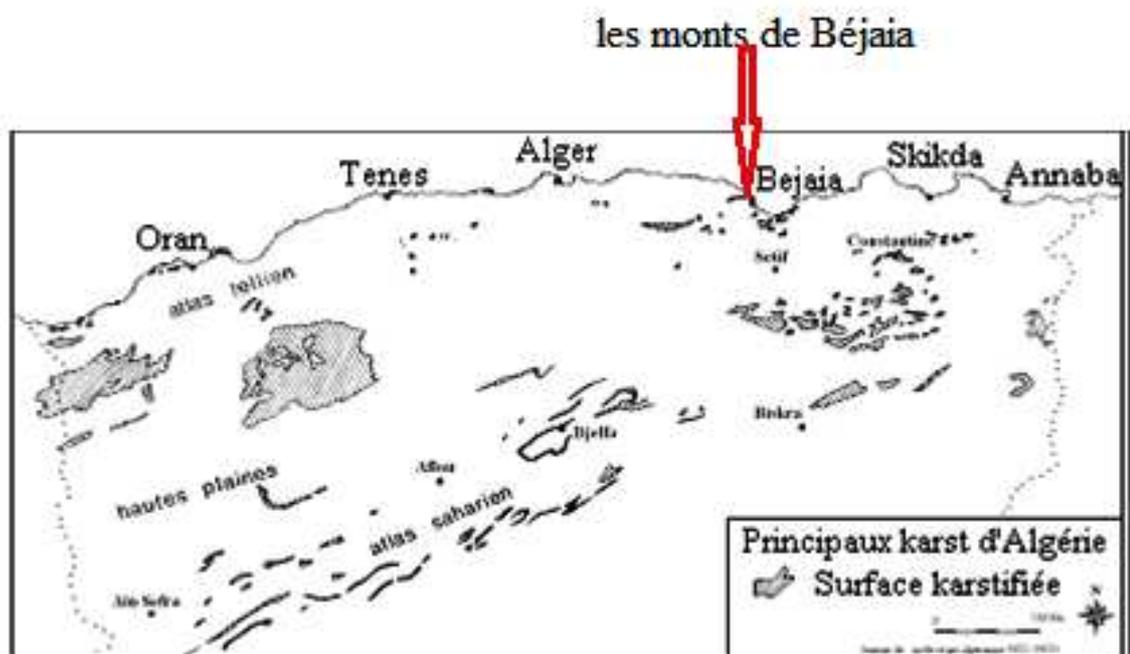


Figure N° II.10 : Les principaux Karst d'Algérie (Bensaoula *et al*, 2007).

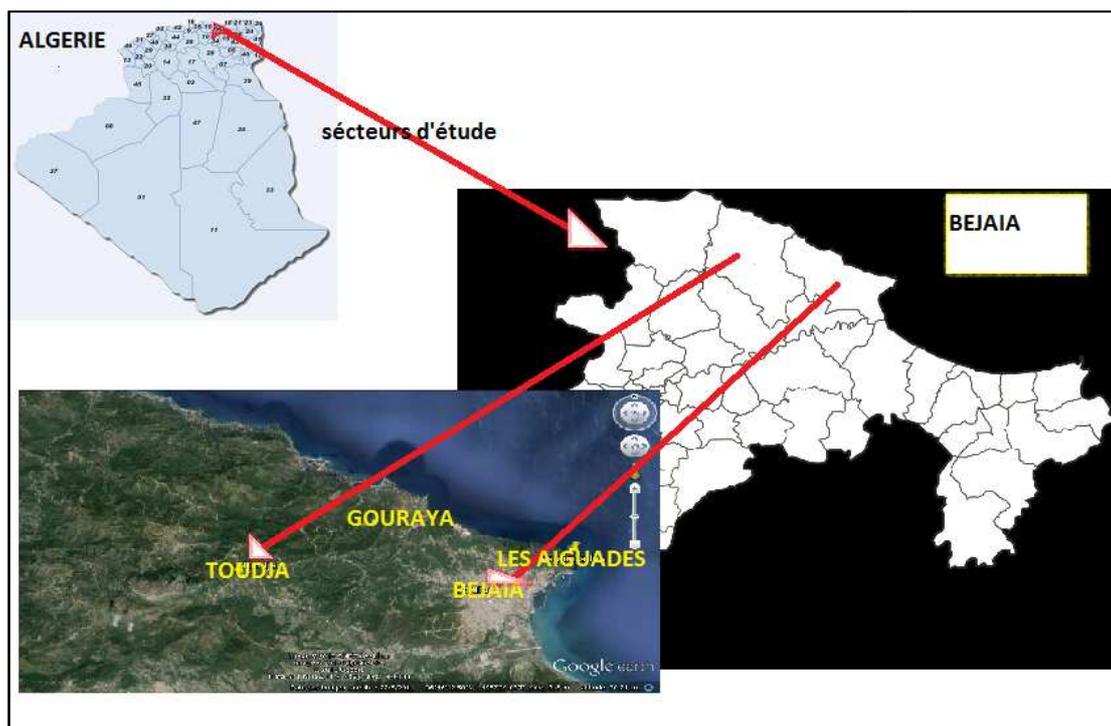


Figure N° II.11 : Situation géographique des zones d'étude.

### 1.2. Situation géographique

La Wilaya de Bejaia est située sur la partie orientale de l'Algérie septentrionale à environ 200 km à l'Est de la capital. Elle est limitrophe des wilayates de Tizi Ouzou et Bouira à l'Ouest ; Sétif et Bordj-Bou-Arréridj au Sud ; Jijel à l'Est et la mer méditerranéenne au Nord. La wilaya s'étend sur une superficie de 3328.5 km<sup>2</sup> (ORGM, 1999).

### 1.3. la population

D'après le recensement national de 2012, la population de l'ensemble de la wilaya est de 941 110 habitants. La population de la région de Bejaia s'élève à 183 554 habitants environ, dont 10 134 sont situés dans la commune de Toudja. Les grands bassins de la population sont représentés dans le tableau au dessous :

Tableau N° II.2. Les grands bassins de la population de la wilaya de Bejaia (DSPBW. Bejaia, 2012)

N°	Communes	Habitants
1	Bejaia	183 554
2	Akbou	54 948
3	Amizour	38 737
4	Kharrata	36 177
5	El kseur	30 775
6	Draa EL KAID	30 135
7	Tazmalt	29 793
8	Timezrit	26 662
9	Ouzellaguen	23 435
10	Seddouk	21 214

## 1.4. Géologie, Hydrogéologie et Géomorphologie

### 1.4.1. Cadre géologique

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

#### ➤ Géologie des zones d'étude

Notre site d'étude fait partie des monts de Bejaia qui est mentionné dans la (Fig. N°II.10) et parmi : le djebel de Gouraya qui est caractérisé par des calcaires massifs et des calcaires stratifiés en grands bancs admettant des niveaux de marnes intercalaires (Duplan et Gravelle, 1960). Ensuite, le Cap Carbon qui est représenté par des marno-calcaires en petits bancs, avec des marnes inter-stratifiées. Le jurassique moyen n'est pas caractérisé paléontologiquement (Duplan et Gravelle, 1960).

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

### 1.4.2. Cadre Stratigraphique

Les roches métamorphiques et éruptives très souvent altérés sont représentées par des schistes et gneiss avec des lentilles de cipolin et des filons de pegmatites. Ces formations sont datées du Paléozoïque. Ces terrains anciens affleurent très peu autour du village de Bouhatem situé Nord du massif d'Aghbalou. Discordantes sur ce socle, des formations

tertiaires constituent un recouvrement d'âge Oligo-Miocène. Ces formations sont représentées par un niveau conglomératique de base, des marnes micacées, des grès, des silexites, des calcaires marneux et des argiles. A tous les niveaux de ces formations peuvent s'intercaler des roches volcaniques (ORG, 1999).

### I.4.2.1. Trias

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

### I.4.2.2. Jurassique

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

### I.4.2.3. Crétacé

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

### I.4.2.4. Paléogène

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

### I.4.2.5. Quaternaire

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

### 1.4.3. Cadre hydrogéologique :

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

La région d'étude : le relief s'individualise en trois zones distinctes :

- Une plaine côtière d'une longueur de 30 km

- Une zone montagneuse constituée des massifs de l'Akfadou, Gouraya au Nord et des Chaines des Bibans-Bâbord au Sud.
- La vallée de la Soummam qui est une dépression intra-montagneuse de 80 km de longueur et 04 km de largeur au maximum.

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

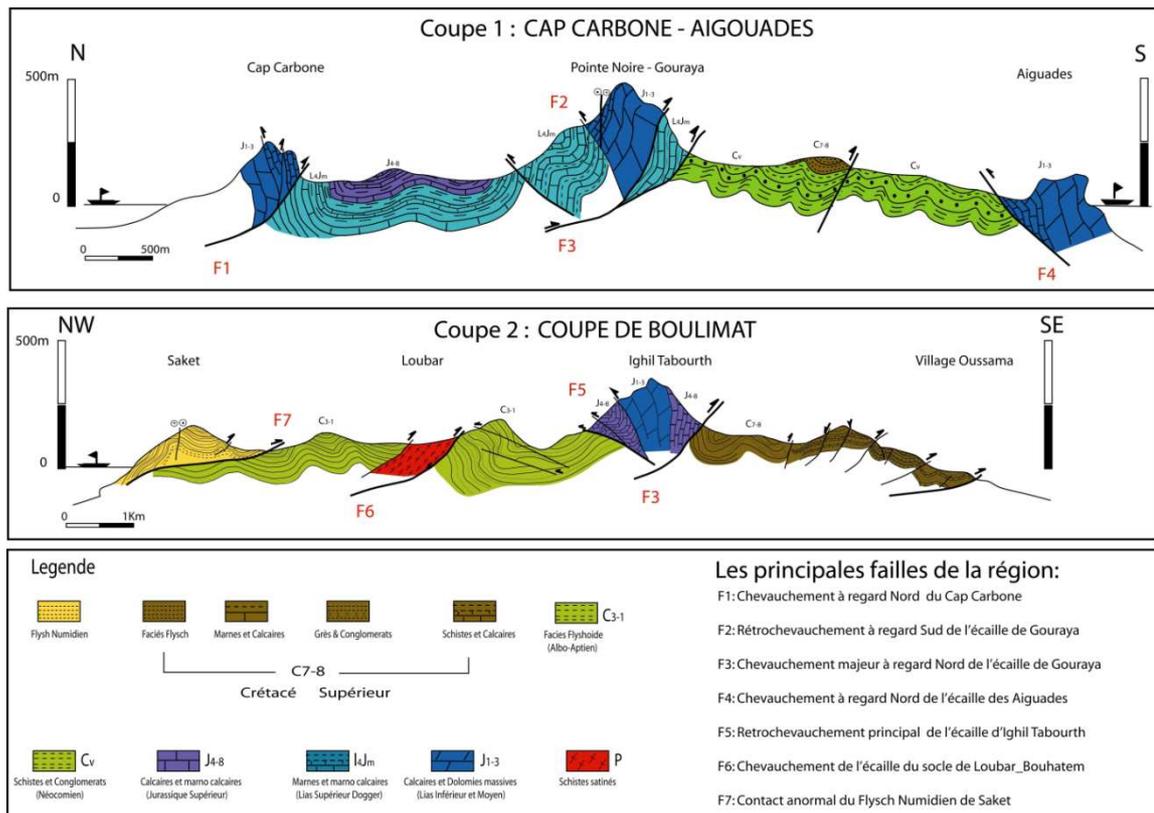


Figure N° II.12 : Coupes géologiques montrant la double vergence dans la région de Bejaia (Medaouri et al, 2010).

#### 1.4.4. Cadre géomorphologique

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:

- *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 Kms de long sur une largeur maximale de 04 Kms et la plaine côtière qui sépare la mer et la chaîne des Babors. Elle se présente comme une bande étroite qui s'étend de l'embouchure d'Oued Soummam à celui d'Oued Agrioun soit une trentaine de Kilomètres (DPAT, 2012).

### 1.5. Végétation

La région de Bejaia est d'une richesse faunistique et floristique importante. En effet, étant l'un des points de l'Algérie où il pleut le plus (en moyenne 600 à 1.100 mm), la végétation s'y développe dans les meilleures conditions.

C'est par excellence le pays de l'olivier, du figuier, du caroubier, du câprier, du peuplier, des chênes (liège, zèn, afarès et vert) et autres pins d'Alep, cèdre et sapin de Numidie. Au niveau du Parc National de Gouraya existe une espèce endémique de la région, il s'agit de l'euphorbia dendroïdes (DPAT, 2012).

### 1.6. Contexte climatique

Appartenant au domaine méditerranéen, le climat de la wilaya de Bejaia varie d'une zone à une autre. La zone littorale et la vallée de la Soummam jouissent d'un climat pluvieux et doux en hiver, sec et chaud en été. Le climat des zones de montagnes est caractérisé par un été sec et chaud et un hiver pluvieux et froid. La température atteint parfois 0°C et moins. Ce qui s'accompagne par la chute de neige.

#### 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. Elle est sous l'influence des facteurs géographiques tels que : 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 (Saou, 2013).

**Tableau N°II.03 :** La répartition des précipitations moyennes mensuelles en mm période (1978-2012) (Station ONM de Bejaia, 2013).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
P (mm)	110	88.9	79.5	71.3	42	15.1	5.3	9.6	58.1	75.4	103.2	143.6

- Ce tableau nous montre que la pluviométrie minimale est enregistrée durant le mois de Juillet avec une valeur de 5.3 mm.

- La pluviométrie maximale est enregistrée pendant le mois de Décembre avec une valeur de 143.6 mm.

### 1.6.2. Les températures

La température est un facteur écologique limitant de toute 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 (**Saou, 2013**).

**Tableau N°II.04:** Températures moyennes mensuelles pour la région de Bejaia (1978-2012) (**StationONM de Bejaia, 2013**).

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
<b>M</b>	16.5	16.9	18.6	20.3	22.9	26.4	29.5	30.2	28.1	25.3	20.8	17.5
<b>m</b>	7.7	7.8	9	12	14.4	18	20.9	21.7	19	16.4	12.2	9
<b>M+m/2</b>	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 mensuelle ;

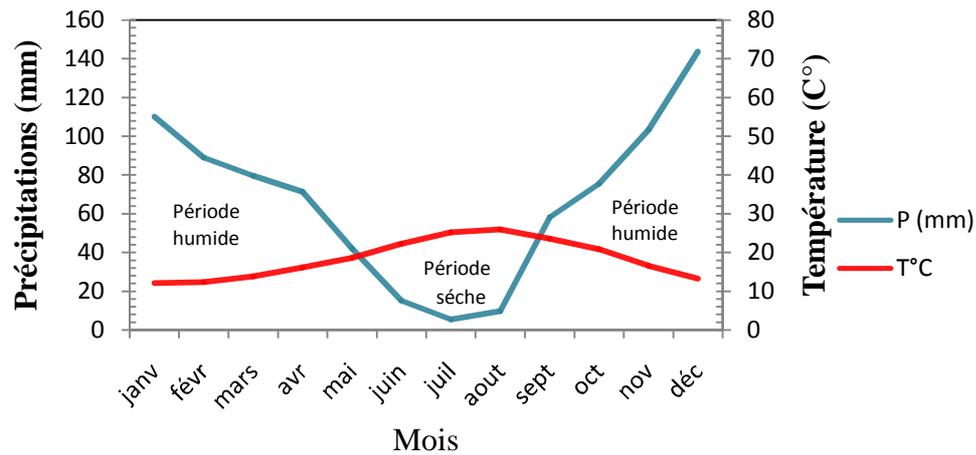
**m**: température minimale mensuelle ;

**M+m /2** : température moyenne mensuelle.

- Ce tableau nous montre que le mois le plus chaud est celui d'Août avec une température maximale 30.2°C.
- et le mois le plus froid correspond au mois de janvier avec une température minimale 7.7°C.

### 1.6.3. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

En 1954, Bagnouls et Gaussen ont établis un diagramme qui permet de dégager la période sèche en s'appuyant sur la comparaison des températures moyennes et de précipitations mensuelles moyennes, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec une échelle des précipitations équivalente aux doubles de celles des températures ( $P= 2T$ ) (**Benhamiche et al, 2013**).



**Figure N° II.13 :** Diagramme Ombrothermique de la région de Bejaia durant la période (1978-2012).

Il y a sécheresse lorsque la courbe des précipitations rencontre celle des températures et passe en dessous (**Benhamiche et al, 2013**).

Ce diagramme Ombrothermique, réalisé à partir des données de la période (1978-2012) dans la région de Bejaia, montre qu’il existe :

- une période humide, du mois de janvier à Avril et du mois d’Octobre à décembre,
- une période sèche durant les cinq autres mois (Mai-Septembre).

**1.6.4. Quotient Pluiothermique et Climagramme d’Emberger**

Le quotient pluviométrique ou *Indice Climatique d’Emberger* sert à définir les cinq différents types de climats méditerranéens, depuis le plus aride, jusqu’à celui des hautes montagnes, climats que seul le Maroc, dans la région méditerranéenne, possède en totalité. Ce quotient est défini par la formule :

$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2} \tag{eq : 02}$$

Avec

**Q** : Quotient pluviométrique d’Emberger

**M** : la moyenne des températures du mois le plus chaud en °C

**m** : la moyenne des températures du mois le plus frais en °C

**P** : pluviométrie annuelle en mm

La formule est parfois adaptée sous la forme suivante (formule de Stewart)

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M-m} \quad (\text{eq : 03})$$

Tableau N°II.05: Calcul de Q<sub>2</sub> de la région de Bejaia.

P (mm)	M (°C)	m (°C)	Q <sub>2</sub>
793	30.2	7.7	120.9

$$Q_2 = \frac{3.43 \times 793}{30.2 - 7.7} \quad Q_2 = 121$$

Les valeurs du quotient, combinées à celles des températures minimales m sur le climagramme d’Emberger, permettent de déterminer l’étage bioclimatique. D’une manière générale, un climat méditerranéen est d’autant plus humide que le quotient Q<sub>2</sub> calculé est égal à 121 pour une période de 34 ans (1978-2012). Ce qui permet de situer la zone d’étude dans l’étage bioclimatique subhumide à hiver chaud (**Benhamiche et al, 2013**).

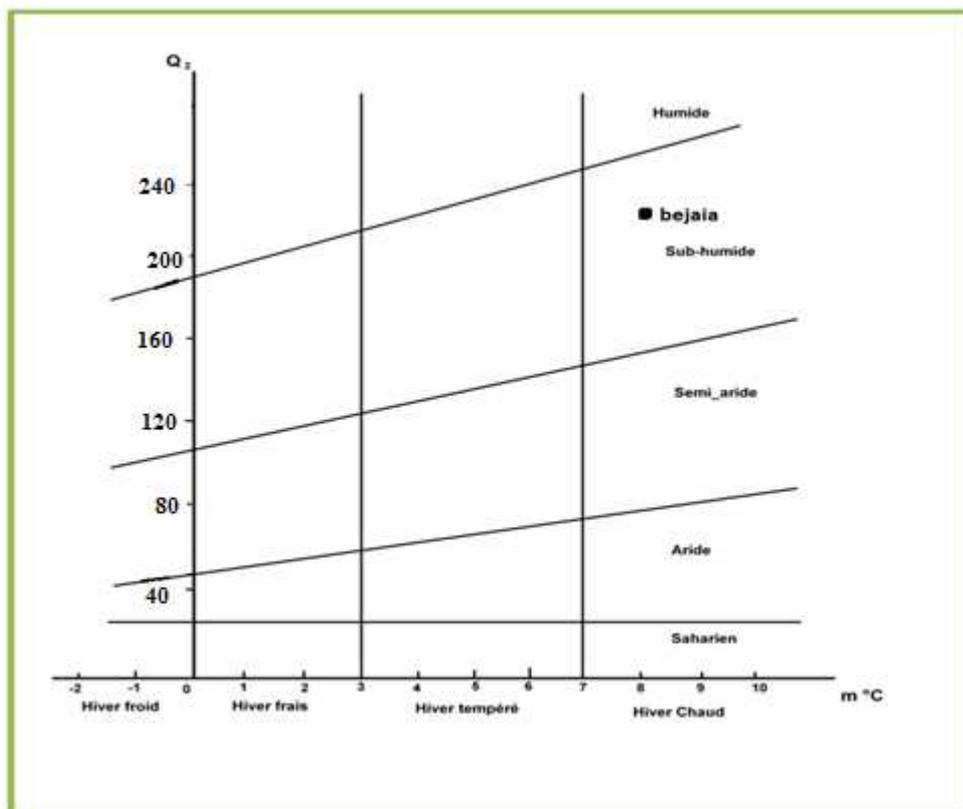


Figure N°II.14 : Détermination de l’Etage Bioclimatique de la Région de Bejaïa sur le Climagramme d’Emberger.

### II. Méthodes

#### II.1. Géo-localisation et Cartographie

##### II.1.1. Géo-localisation

###### II.1.1.1. Définition et principe de GPS

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

Le repérage des sources karstiques se trouvant à Bejaia et à Toudja a été réalisé durant le mois de Mars et le mois d'Avril 2015. Leurs positionnement avec le GPS s'est fait comme suit :

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

##### II.1.2. Cartographie

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

### II. 2. Le système d'information géographique

#### II. 2.1 Définition et fonctions d'un SIG

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

- Un SIG a pour but d'informer sur la géographie d'un espace donné ;
- Il s'appuie donc sur un certain nombre de bases de données géographiées permettant d'intégrer, de gérer, de traiter et de représenter sous forme de cartes ;
- Plusieurs définitions des SIG existent mais toutes incluent l'ensemble de ces différentes fonctions (**Provost, 2011**).

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

### II.3. Présentation du logiciel de cartographie « MapInfo »

#### II.3.1. Définition et utilité de MapInfo

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

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

#### II.3.1.1. Etapes à suivre

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

### II. 3.1.2. Calage de l'image raster

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

- **Catégorie** : longitude / latitude
- **Projection**: longitude / latitude (WGS 84)
- **Echelle** : 1/200. 000

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

## II.4. Les méthodes d'échantillonnage des différentes sources karstiques

### II.4.1 Prélèvements

Les sites où ont eu lieu les prélèvements des échantillons d'eau sont au nombre de 32 et sont situés dans les zones de Bejaïa et de Toudja. A chaque prélèvement, la température, la salinité, la conductivité électrique, le pH et TDS ont été mesurés in situ.

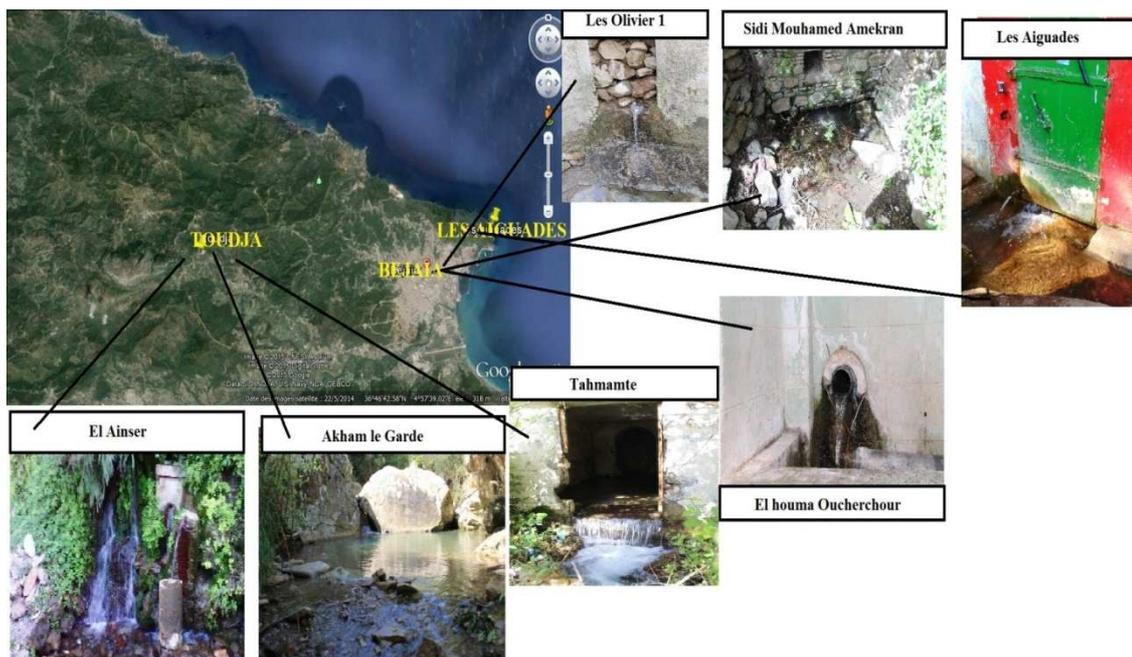


Figure N° II.15 : Photos de quelques sources localiser.

#### II.4.1.1. Ressources logistiques

Le matériel suivant a été nécessaire pour la réalisation du travail : une voiture personnelle, une glacière, des flacons, des étiquètes, un GPS, un multi-paramètre de terrain, une pissette d'eau distillée, un appareil photo et des feutres.

### II.4.1.2. Stratégie du travail

La collecte des informations brute et l'orientation vers les endroits exacts s'est dérouler comme suit: contacter les différentes organismes d'accueil comme: les bureaux d'études, les bureaux de l'environnement, parc national de Gouraya, musée géologique de Gouraya, musée de l'eau de Toudja, APC de Toudja et de Bejaïa, ou demander des renseignements auprès des gens autochtones.

- Pour les premières zones d'étude qui sont : les Aiguades, les Oliviers et Gouraya, le travail est comme suit : nous étions en rapport avec le personnel du parc national du Gouraya et le musée géologique, qui nous ont orientés vers un ex gradient de PNG. Celui-ci connaissait très bien les sites à étudier non seulement la localisation mais aussi les informations de chaque source.
- Pour la deuxième zone d'étude qui est Toudja nous étions en contact avec l'APC et le musée de l'eau qui nous ont fournie la localisation exacte des sources et leurs caractéristiques. Dont la source chef lieu (El Ainsser) est l'une des sources qui alimente toute la population de Toudja et les alentours.

### II.4.1.3. Difficultés rencontrées et solutions mises en œuvre

Vu la complexité du travail de terrain, plusieurs difficultés ont été rencontrées et surmontées. En effet, afin de nous rendre aux sites de prélèvement, non seulement le problème du déplacement est posé, mais aussi les dangers encourus à cause de l'isolation de ces sites. Parmi les difficultés rencontrées, nous citons :

- Il faut être véhiculé et accompagné pour se déplacer;
- Avoir un papier administratif pour accéder à certains endroits ou à quelques informations ;
- Des fausses informations nous ont été données concernant les sources ;

Nonobstant les difficultés, problèmes et autres entorses, la collecte des données s'est déroulée de manière globalement satisfaisante. Toutes les zones sélectionner pour le travail de cette études on été faites.

## II.5. Les méthodes d'analyses

### II.5.1. Introduction

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en

sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.). Globalement, il est donc nécessaire de mettre en place une organisation structurée, de disposer d'un personnel qualifié, de développer une méthodologie adaptée à chaque cas, de procéder à un choix judicieux des points de prélèvement et d'utiliser le matériel convenable.

Pour faciliter le travail de l'analyste et l'exploitation des résultats tout en évitant les erreurs, il convient d'étiqueter ou de numéroter très soigneusement les prélèvements. Chaque flacon doit être accompagné d'une fiche signalétique permettant de rassembler les renseignements utiles au laboratoire ainsi que les observations relevées au cours des opérations (**Rodier et al, 2009**).

### II.5.2. Principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau

- Date et heure du prélèvement.
- Nom du point d'eau et localisation précise.
- Origine de l'eau (nom de la source).
- Débit approximatif par minute ou par seconde (**Rodier et al, 2009**).

### II.5.3. Les paramètres physiques

Les analyses effectuées permettent de déterminer, par exemple, l'origine de la minéralisation, d'évaluer le bilan hydrologique global et les apports des différentes composantes de l'hydro-système. Le matériel d'échantillonnage a été choisi en fonction des buts de ce travail. Des outils spéciaux ont été utilisés pendant l'échantillonnage sur le terrain. Pour avoir des résultats sur la qualité des eaux, sur son faciès géochimique (facteurs physico-chimiques), sur sa minéralisation vis-à-vis des minéraux dissous et sa potabilité, ont été utilisés les matériels suivants:

- Mesurer les paramètres physiques des émergences, in situ, lors de l'échantillonnage par un multi paramètre qui est doté de deux sondes différentes : l'une mesure le potentiel d'hydrogène (pH) et l'autre: la température (T), la conductivité électrique (CE), total des solides dissous (TDS) et la salinité (S). Tous ces paramètres doivent être mesurés in situ. En effet, ces derniers sont très sensibles aux conditions du milieu et sont susceptible de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur site.

#### II.5.3.1. Température

La température de l'eau est un traceur naturel complexe car le transfert de chaleur au sein d'un aquifère est soumis à deux grands processus :

- *la conduction ou diffusion* : il s'agit du transfert de chaleur au sein d'un milieu, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La densité de flux est proportionnelle au gradient de température et à la conductivité thermique de la roche ;
- *l'advection* : le flux de chaleur est transporté par un fluide (exemple : eau) en déplacement. Selon Bundschuh (1993), lorsque la propagation de la vague de la température de l'air annuelle à travers le sol et l'aquifère a lieu par conduction, le signal d'entrée est transformé : l'amplitude est de plus en plus faible avec la profondeur jusqu'à être nulle. Bundschuh (1993) démontre que le signal n'est plus visible à des profondeurs supérieures à 20 m (**Delbart, 2013**).

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous, donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuelles. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques, et du point de vue industriel pour les calculs d'échanges thermiques. D'une façon générale, la température des eaux superficielles est influencées par la température de l'air et ceci d'autant plus que leur origine est moins profonde ; la mesure de la température à effectuer sur le terrain nécessite la détermination de la température de l'air au même endroit et au même moment (**Rodier, 1984**).

### II.5.3.2. Le pH

La valeur du pH d'une source d'eau est une mesure d'acidité ou d'alcalinité. Le niveau du pH est une mesure de l'activité de l'atome d'hydrogène parce que le niveau d'activité de l'hydrogène représente bien l'acidité et l'alcalinité de l'eau. L'échelle du pH, s'étend de 0 à 14 avec 7 étant neutre. Une eau avec un pH en bas de 7 est considéré comme acide et en haut de 7 est considéré comme alcalin. L'eau pure à un pH de 7, mais les sources d'eaux ont tendance à être légèrement acide à cause des précipitations et des polluants qui sont dans l'eau. L'échelle du pH est logarithmique. Ce qui signifie que chaque étape du pH représente un changement de 10 de l'acidité. Par exemple, un organisme présent dans l'eau avec un pH de 5.0 est dix fois plus acide que l'eau avec un pH de 6.0 et l'eau avec un pH de 4.0 est cent fois plus acide que de l'eau avec un pH de 6.0 (**FEPS, 2008**). Le pH est relié à l'activité en protons par :

$$\text{pH} = - \log [\text{H}^+] \quad (\text{eq : 04})$$

Log : logarithme décimal

[H+] : concentration en ions  $H^+$  ou  $H_3O^+$

### **II.5.3.2. Conductivité Electrique**

La conductivité électrique correspond à la mesure de la capacité de l'eau à transmettre un courant électrique. C'est l'image de la quantité d'ions présents dans l'eau, quantité contrôlée principalement par l'équilibre calco-carbonique dans le cas des aquifères carbonates karstiques. Une variation de la conductivité électrique des eaux souterraines traduit une modification de la composition moyenne des eaux souterraines : une diminution de la conductivité électrique traduit un apport d'eau moins minéralisée, souvent associé à des eaux de recharge aux vitesses de transfert élevées. Une augmentation de la conductivité, quant à elle, est classiquement associée soit à une arrivée d'eau lente ou/et diffuse, soit à une remobilisation d'eau ancienne stockée, soit à l'arrivée d'eau à fort pouvoir de dissolution, soit à l'arrivée d'une eau contaminée en sel de route par exemple (**Delbart, 2013**).

Une conductivité élevée traduit, soit des pH anormaux, soit le plus souvent une salinité élevée. Celle-ci pourrait être naturelle ou due à des rejets salins (**Brémond et al., 1973**). La conductivité traduit la minéralisation totale de l'eau. Sa valeur varie en fonction de la température, niveau guide de la conductivité à 20°C d'une eau destinée à la consommation humaine : 400  $\mu S/cm$  (**Brault, 1989**).

### **II.5.3.3. Total des solides dissous**

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

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

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

**Tableau N° II.06 : Goût de l'eau avec différentes concentrations de TDS (FEPS, 2008).**

Niveau de TDS mg/l)	Évaluation
Moins de 300	Excellent
300 - 600	Bien
600 - 900	Passable
900 - 1200	Faible
Plus de 1200	Inacceptable

**II.5.3.4. Salinité**

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium ( $Ca^{2+}$ ), de magnésium ( $Mg^{2+}$ ), de sodium ( $Na^+$ ), de potassium ( $K^+$ ), les chlorures ( $Cl^-$ ), les sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) et les bicarbonates ( $HCO_3^-$ ). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution. Ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires (Couture, 2006).



**Figure N° II.16 : Matériels utilisés sur le terrain.**

**II.6. Corrélation entre les paramètres physiques**

Ce coefficient donne les liaisons entre les paramètres physiques, pris deux à deux. Les liaisons linéaires, si elles existent, sont obtenues par un calcul numérique. Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais Pearson R, lequel donne une idée sur le réseau

d'interrelations et de dépendances linéaires existant entre les paramètres physiques, le coefficient de Bravais-Pearson est compris entre -1 et 1. Il indique une présomption de liaison linéaire entre les deux séries d'autant qu'il se rapproche de 1 en valeur absolue (Sekiou *et* Kellil, 2014).

## **II.7. Les méthodes de mesures des débits des sources karstiques :**

### **II.7.1. Introduction**

Il est très important de bien connaître les variations de débit des exutoires d'un massif aquifère. Certaines sources, qualifiées de pérennes, présentent un écoulement permanent et sont généralement situées aux points bas du réservoir. Elles sont souvent associées à des sources temporaires qui permettent l'évacuation des débits de trop-plein à une cote supérieure, lors des mises en charges générées par les épisodes pluvieux. Cette situation caractérise les aquifères karstiques, où de véritables regards sur la nappe permettent la vidange brutale de débits importants à une cote très élevée au-dessus du niveau de base ; ces événements sont qualifiés de crevaisons.

Lorsque les débits sont faibles, le remplissage chronométré d'un récipient étalonné peut permettre d'acquérir rapidement les données.

### **II.7.2. Mesure de débit:**

Il existe un grand nombre de méthodes de mesures des débits, dont la mise en œuvre variera selon les situations (petit ou très fort débit), et la méthode que nous avons choisie pour mesurer le débit de quelque source durant se travail est la suivante :

#### **➤ Jaugeage capacitif :**

La méthode la plus précise sur les faibles débits est la mesure dite « à capacité », nécessitant un récipient et un chronomètre. Elle s'applique à un flux faible et canalisé. La méthode consiste à mesurer le temps que met le récipient, de volume connu, à se remplir d'eau. La formule :

$$Qc = V/T \quad \text{(Eq. 05)}$$

V : le volume du seau en litres.

t : le temps en secondes mis pour le remplir.

L'erreur de mesure est faible avec ce système et peut être estimée en fonction de l'imprécision sur le temps de remplissage et le volume du seau.

## Chapitre III.

### Résultats et discussion

---

#### **III.1. Présentation du SIG de différentes sources karstiques**

##### **III.1.1. Introduction**

Un Système d'Information Géographique ou SIG est un ensemble d'outils (matériels, informatiques et humains) permettant de gérer, d'analyser et d'afficher des données géographiques (données possédant une référence spatiale telle que des coordonnées). La superposition d'informations diverses (vecteurs, rasters, littérales) avec un seul outil permet de faire des croisements de données, donc des analyses plus pertinentes. On appelle donnée à référence spatiale toute donnée pouvant être localisée de façon directe (une école, une route...) ou indirecte (une adresse, un propriétaire...) à la surface de la terre. Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale, on décompose le territoire en couches thématiques (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques. Les bases de données qui alimentent les SIG doivent être géo-référencées, c'est à dire partager un cadre commun de repérage appelé système de projection.

##### **III.1.2. Base de données spatiales**

Cette base est composée d'un document cartographiques digitalises directement sur l'écran de l'ordinateur à partir de documents préalablement scannés (après réduction au besoin). Il s'agit des documents :

- Carte de Localisation des Sites des Prélèvements.
- Fonds topographiques au 1/200 000 ; carte géologique détaillée ;

##### **III.1.3. Base de données thématiques**

Cette base de données repose sur un inventaire de 32 sources situées entre Bejaia et Toudja. Les informations ont été organisées et stockées dans le tableau N°III.7. Les données suivantes ont été classées par colonnes :

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

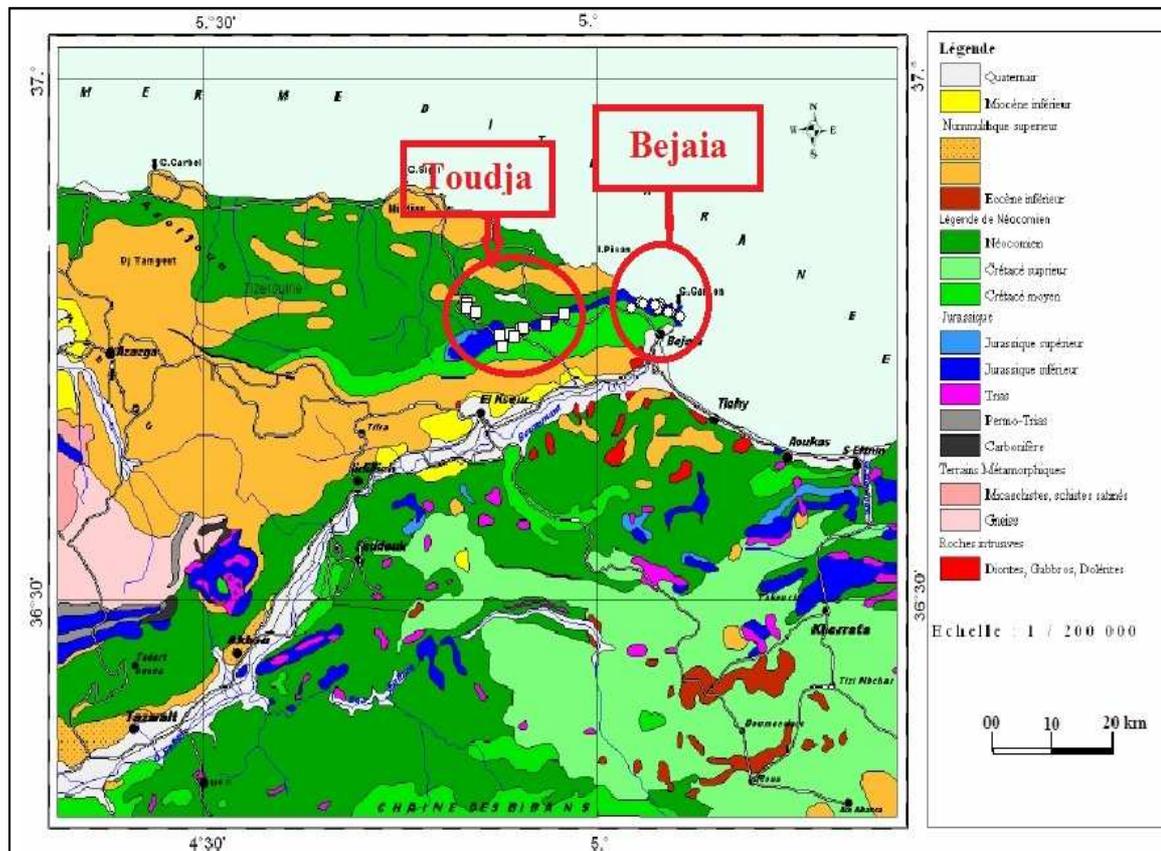


Figure N° III.17 : Carte de Localisation des Sites des Prélèvements.

## III.2. Interprétations des résultats d'analyse

### III.2.1 Température

La température des eaux des sources analysées varie entre 13.3°C et 24.6°C. La moyenne est de 19.4°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 2.2 et 0.11, respectivement. Ces deux valeurs sont plus petites par rapport à la moyenne. La dispersion des valeurs de températures, autour de la moyenne, est très faible. Les températures mesurées sont toutes proches de la moyenne.

En rapport avec les normes de potabilité de l'eau fixées par l'OMS (2003), l'eau est : excellente lorsque la température varie entre 20 et 22°C ; passable lorsque la température oscille entre 22 à 25°C ; médiocre lorsqu'elle est comprise entre 25 et 30°C. Les températures mesurées dans les 32 sources sont jugées excellentes. Comparées aux normes algériennes JORA (2011) fixant les températures des eaux souterraines qui ne doivent pas dépasser 25°C, nos résultats sont également conformes.

Tableau N° III.07. Résultats d'analyse des eaux de sources et calcul des statistiques descriptives

Noms des Sources	Date du prélèvement	X (°)	Y (°)	Z (m)	T°C	PH	CE (µs/l)	Salinité (g/l)	TDS (mg/l)
Les Aiguades	25/03/2015	E005°06'.18"	N36°45'.863"	22	13.3	7.60	724	378	579
Oliviers 1	12/04/2015	E005°05'.634"	N36°45'.499"	150	18.3	9.10	1491	748	1195
Oliviers 3	12/04/2015	E005°05'.466"	N36°45'.296"	70	18.9	7.95	1907	957	1532
Oliviers 2	12/04/2015	E005°05'.466"	N36°45'.292"	194	19.1	7.97	1957	975	1562
Ain Boukhilil	08/04/2015	E005°05'.228"	N36°45'.774"	168	18	8.20	699	351	553
ElhoumaOucherchour	13/04/2015	E005°05'.048"	N36°45'.566"	134	19.4	8.38	1230	618	984
Oued Achaâlal	13/04/2015	E005°04'.944"	N36°45'.594"	126	19.3	8.36	1251	611	996
S.M.A. 1	12/04/2015	E005°04'.811"	N36°45'.565"	144	21.5	7.97	1593	794	1270
Iremanen	13/04/2015	E005°04'.371"	N36°45'.796"	152	19.4	8.70	737	358	595
Tala Ouada	14/04/2015	E004°54'.588"	N36°45'.281"	350	19.4	7.44	1912	973	1555
Tahemamte	14/04/2015	E004°53'.854"	N36°44'.949"	207	21.7	7.50	738	374	597
El Ainser 1	25/03/2015	E004°53'.689"	N36°45'.164"	380	19.5	8.36	636	321	508
Taâwinte	14/04/2015	E004°53'.517"	N36°45'.078"	447	23.5	8.11	626	308	500
Timanithine	14/04/2015	E004°52'.978"	N36°44'.927"	433	21.7	7.09	622	300	492
Bounifaâ	13/04/2015	E004°52'.552"	N36°45'.544"	511	18.4	7.02	1321	628	1052
Tala Hiba 1	13/04/2015	E004°51'.869"	N36°46'.488"	502	19.3	7.69	1213	586	967
Tala Hiba 2	13/04/2015	E004°51'.866"	N36°46'.517"	512	19.3	8.06	1062	527	848
Tamda Acherchour	13/04/2015	E004°51'.482"	N36°46'.725"	586	18.5	7.29	1053	531	872
Tala Samtal	13/04/2015	E004°49'.577"	N36°47'.948"	729	18.6	7.80	717	354	577
Taâwinte PNG	26/04/2015	E005°05'.151"	N36°45'.689"	172	21.7	8.17	946	467	752
S.M.A 2	12/04/2015	E005°04'.778"	N36°45'.554"	106	20.6	8.58	1608	808	1284
Dar Sakia 3	13/04/2015	E005°04'.552"	N36°45'.681"	148	18	7.70	795	398	640
Dar Sakia 2	08/04/2015	E005°04'.455"	N36°45'.767"	157	14.9	8.82	718	356	576
Souk El Âasser	26/04/2015	E005°04'.407"	N36°45'.567"	81	24.6	9.40	1704	845	1360
Dar Sakia 1	08/04/2015	E005°04'.381"	N36°45'.758"	140	17	8.50	750	340	600
Ain Herar	08/04/2015	E005°04'.090"	N36°45'.554"	134	20	7.56	1165	591	934
Aâmriw	02/05/2015	E005°03'.324"	N36°45'.095"	38	/	/	/	/	/
Ifrèn	14/04/2015	E004°55'.597"	N36°45'.720"	319	18.7	9.00	618	311	499
Ibaouchen	14/04/2015	E004°54'.524"	N36°45'.281"	365	21.9	8.58	644	311	515
El Ainser 2	25/03/2015	E004°53'.732"	N36°45'.106"	346	18.5	8.67	620	317	503
El Ainser 3	25/03/2015	E004°53'.717"	N36°45'.127"	377	19.9	8.39	618	309	492
Akham Le Garde	14/04/2015	E004°53'.000"	N36°44'.400"	229	18.5	6.64	803	397	641
<b>Maximum</b>					<b>24.6</b>	<b>9.40</b>	<b>1957</b>	<b>975</b>	<b>1562</b>
<b>Minimum</b>					<b>13.3</b>	<b>6.64</b>	<b>618</b>	<b>300</b>	<b>492</b>
<b>Moyenne</b>					<b>19.4</b>	<b>8.07</b>	<b>1047.67</b>	<b>520.70</b>	<b>839.67</b>
<b>Ecart-type</b>					<b>2.20</b>	<b>0.64</b>	<b>441.38</b>	<b>222.10</b>	<b>354.15</b>
<b>CV</b>					<b>0.11</b>	<b>0.08</b>	<b>0.42</b>	<b>0.43</b>	<b>0.42</b>

### III.2.2. Potentiel d'hydrogène

Le potentiel d'hydrogène des eaux des sources analysées oscillent entre 6.64 et 9.40. La moyenne est de 8.07. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.64 et 0.08, respectivement. Ces deux valeurs sont en dessous de la moyenne. La dispersion des valeurs du pH, autour de la moyenne, est très faible. Les valeurs de PH mesurées tournent autour de la moyenne.

Selon JORA (2011) et OMS (2003) les normes édictées par la réglementation locale et international en matière de potabilité de l'eau recommandent un pH situe entre 6,5 et 8,5 et les textes réglementaires locaux exigent que ce paramètre, dans le cas des eaux souterraines, ait la valeur suivante: pH : 6,5 à 9. Selon FEPS (2008) le pH d'une source peut varier naturellement. Certains types de roches et de sols, comme le calcaire, peuvent neutraliser l'acide plus efficacement que d'autres types de roches et sols, comme le granite.

Le pH des deux sources, 9.10 et 9.40, (les Oliviers<sub>1</sub> et Souk Elassar) respectivement, dépasse les normes.

### III.2.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique des eaux des sources analysées est comprise entre 618 et 1957  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La moyenne est de 1047.67  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . L'écart type et le coefficient de variation sont de 441.38 et 0.42 respectivement. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. La dispersion des valeurs de la conductivité électrique, autour de la moyenne, est très faible. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées sont tous proches de la moyenne.

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

### III.2.4. Salinité

La salinité des eaux des sources analysées varie entre 300 et 975 g/l. La moyenne est de 520.70 g/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 222.10 et 0.43. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. Les valeurs de salinité mesurées pour les sources analysées sont tous proches de la moyenne.

### III. 2.5. Total des solides dissous

Le total des solides dissous des eaux des sources analysées est compris entre 492 et 1562 mg/l. La moyenne est de 839.67 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 354.15 et 0.42 respectivement. Ces deux valeurs sont petites par rapport à la moyenne.

La dispersion des valeurs totales des solides dissous est faible autour de la moyenne. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées oscillent autour de la moyenne.

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

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

D'après les normes données par la grille des classes de qualité de l'eau, les mesures de TDS de l'ensemble des sources sont classées dans le tableau N° III. 08 :

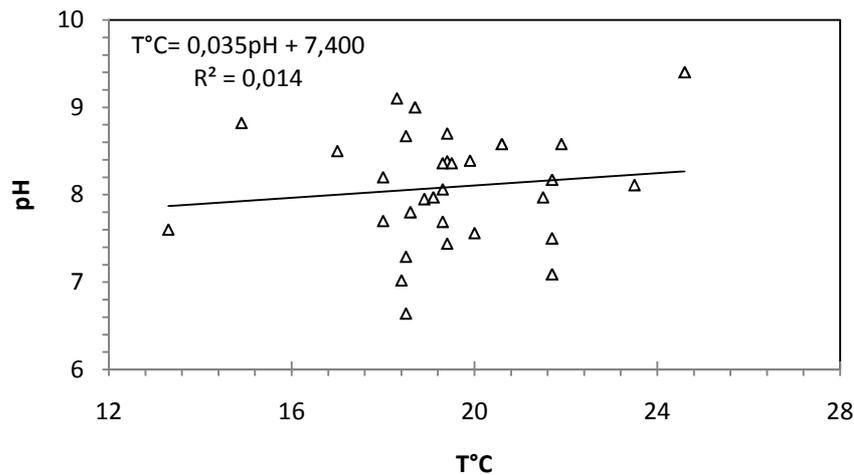
**Tableau N° III. 08 :** Description de la qualité des eaux des sources analysées (TDS) comparée aux normes de l'OMS (2003)

Noms des sources	Les normes (mg/l)	Qualité de l'eau
Les Aiguades, Ain Boukhlil, Iremanen, Tahmamte, El Ainsar 1, Taâwinte, Timanithine, Tala Samtal, Dar Sakia 2, Dar Sakia 1, Ifren, Ibaouchen, El Ainsar 2, El Ainsar 3	300-600	Bien
Tala Heba 2, Tamda Acherchour, Taâwinte PNG, Dar Sakia 3, Akam le Garde	600-900	Passable
El houma Ocherchour, Oued Achaâlal, les Olivier 1, Bounifaâ, Tala Heba 1, Ain Hera	900-1200	Faible
Les Oliviers 2, les Oliviers 3, S.M.A 1, Tala Ouada, S.M.A 2, Souk el aâsser	>1200	Inacceptable

### III.3. Corrélation entre les paramètres physiques

#### III.3.1 Potentiel d'hydrogène et températures

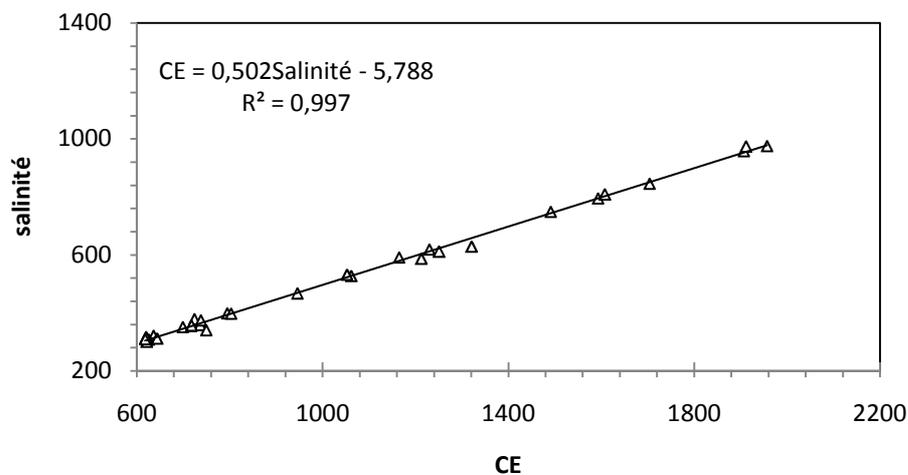
La représentation graphique du pH vs T°C (Fig. N° III.18) montre un nuage de points dispersé. Le coefficient de détermination  $R^2$  est faible ( $R^2 = 0,014$ ). Il n'y a pas une bonne relation entre ces deux éléments. La variation de la température n'influe pas sur les variations du pH. Les points sont répartis autour de la droite d'ajustement et ils sont très dispersés. Ce qui explique que la mauvaise corrélation.



**Figure N° III.18** : Courbe de régression pH vs T°C des eaux des sources karstiques.

#### III.3.2. Salinité et conductivité électrique

D'après la figure N° III.19, les points s'ajustent bien autour de la droite de régression. Le coefficient de détermination  $R^2$  est très fort ( $R^2 = 0,997$ ). Ce qui explique une très bonne liaison entre ces deux paramètres. La conductivité électrique influe sur la salinité.



**Figure N° III.19** : Courbe de régression salinité vs CE des eaux des sources karstiques.

### III.3.3. Total des solides dissous et température

La représentation graphique de TDS vs T°C (Fig. N°III.20) montre un nuage de points très dispersé autour de la droite, il n'a aucune forme particulière. Le coefficient de détermination  $R^2$  est très faible ( $R^2=0.028$ ). Ce qui explique l'absence de relation entre ces deux éléments. Les variations de la température n'influent pas sur le total des solides dissous.

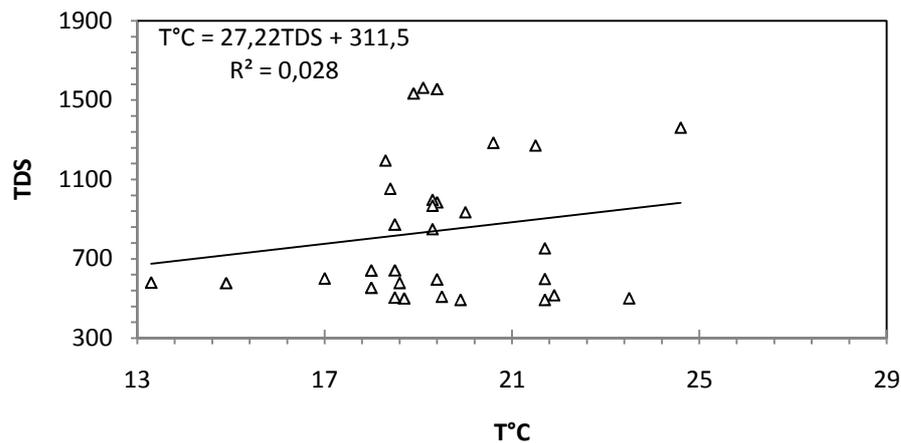


Figure N° III.20 : Courbe de régression TDS vs T°C des eaux des sources karstiques.

### III.3.4. Conductivité électrique et le potentiel d'hydrogène

La corrélation graphique de CE vs pH (Fig. N°III.21) montre que les points sont dispersés autour de la droite de régression et Le coefficient de détermination  $R^2$  est très faible ( $R^2=2E-05$ ) ce qui explique une absence totale de corrélation entre CE vs PH. Les variations de pH n'influent pas sur les variations de la conductivité électrique. Aucune relation n'existe entre ces deux paramètres.

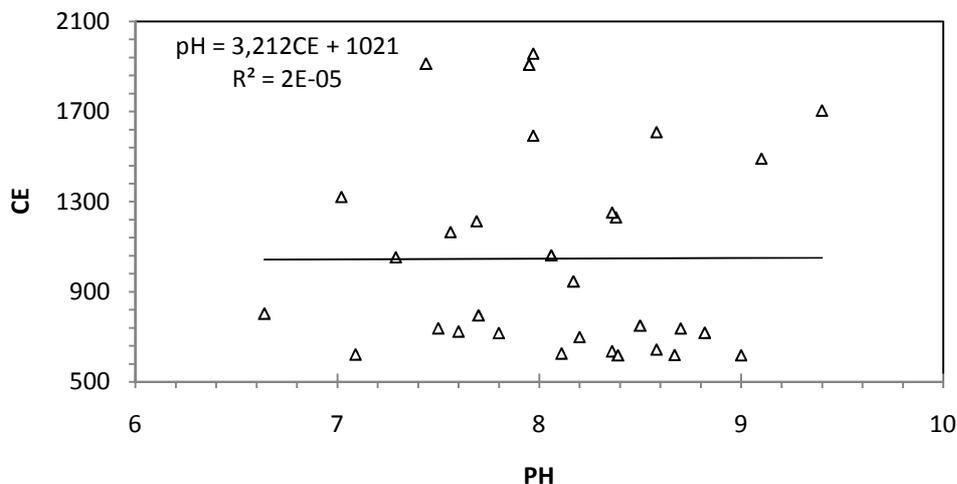


Figure N° III.21 : Courbe de régression CE vs pH des eaux des sources karstiques.

### III.3.5. Total des solides dissous et salinité

Le graphe (Fig. N°III.22) montre que plus les TDS augmentent, plus la salinité augmente et le coefficient de détermination  $R^2$  est très proche de 1 ( $R^2 = 0.997$ ). La variation de TDS influe sur les variations de la salinité, les points sont répartis autour de la droite de régression. Ils ne sont pas dispersés. Ce qui explique une bonne relation.

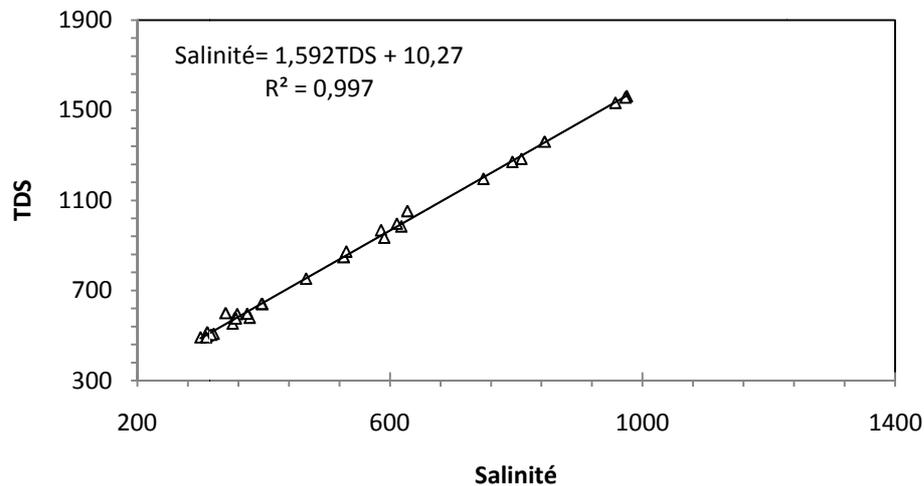


Figure N°III.22 : Courbe de régression TDS vs salinité des eaux des sources karstiques.

### III.3.6. Total des solides dissous versus conductivité électrique

La représentation graphique du TDS vs CE (Fig. N°III.23) montre que plus le TDS augmente plus la CE augmente. Le coefficient de détermination  $R^2$  est très proche de 1 ( $R^2 = 0.999$ ). Il y a une bonne relation entre ces deux éléments. La variation de TDS influe sur les variations de la CE. Les points sont bien répartis autour de la droite.

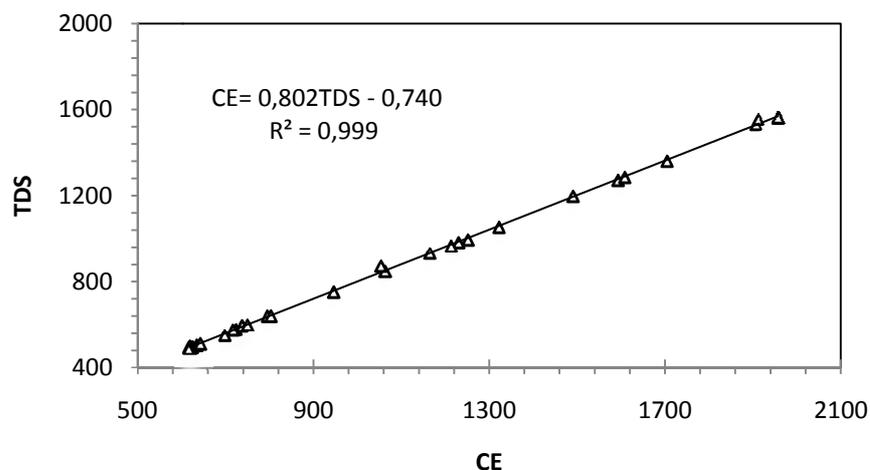


Figure N°III.23 : Courbe de régression TDS vs CE des eaux des sources karstiques

### III.4. Mesure des débits de quelques sources

Le modèle de récipient que nous avons choisis pour prendre le débit de quelques sources est : un jerrican de 5 litre et un bidon de 20 litres. Ce choix a été fait selon le débit des sources. Les calculs sont faits selon l'équation 04 :

$$Q_c = V/t \quad (\text{Eq 04})$$

Avec

V = le volume du seau en litres

t = le temps en secondes mis pour le remplir

**Tableau N° III.09** : Calculs des débits de quelques sources.

Nom des sources	Débit des sources
Les Oliviers 1	0.20 L/S
Les Oliviers 2	0.01 L/S
L'Houma Oucherhour	0.3 L/S
Tala Samtal	0.1 L/S.
Tala Bounifaâ	0.1 L/S.

# Conclusion générale et perspectives

---

Au cours de ce mémoire, nous avons pu mettre en exergue un certains nombres de paramètres, géologiques et physico-chimiques pouvant affecter la qualité des eaux souterraines des formations karstiques de la région de Bejaia.

Il a été constaté à travers cette étude que :

- La région est caractérisée par une formation géologique complexe. Elle fait partie du domaine tellien ; elle se situe entre les massifs intermédiaires de la grande et la petite Kabylie constituées d'anciennes roches métamorphiques. Les dépôts mésozoïques et cénozoïques participent à la construction géologiques de la région qui se trouve réduite à l'état d'une tectonique plissant et disjonctive des plus complexes.
- le relief s'individualise en trois zones distinctes : Une plaine côtière d'une longueur de 30 km, une zone montagneuse constituée des massifs de l'Akfadou, Gouraya au Nord et des Chaines des Bibans-Bâbord au Sud. la vallée de la Soummam qui est une dépression intra-montagneuse de 80 km de longueur et 04 km de largeur au maximum.
- le climat de la région de Bejaia varie d'une zone à une autre. La zone littorale et la vallée de la Soummam jouissent d'un climat pluvieux et doux en hiver, sec et chaud en été. Le climat des zones de montagnes est caractérisé par un été sec et chaud et un hiver pluvieux et froid. La température atteint parfois 0°C et moins. Ce qui s'accompagne par la chute de neige.

Trente deux sources ont été localisées dans le massif montagneux allant de Toudja jusqu'au littoral de la mer Méditerranée. La mesure de cinq paramètres physiques des eaux de ces sources ont donné les résultats suivants :

- La température des eaux des sources analysées varie entre 13.3°C et 24.6°C. La moyenne est de 19.4°C. L'écart type et le coefficient de variation sont de 2.2 et 0.11, respectivement. Ces résultats sont conformes aux normes algérienne et de l'OMS.
- Le potentiel d'hydrogène des eaux des sources analysées oscillent entre 6.64 et 9.10. La moyenne est de 8.07. Ces deux valeurs sont en dessous de la moyenne. L'écart type et le coefficient de variation sont de 0.64 et 0.08, respectivement.
- La conductivité électrique des eaux des sources analysées est comprise entre 618 et 1957 µS/cm. La moyenne est de 1047.67 µS/cm. L'écart type et le coefficient de variation sont de 441.38 et 0.42 respectivement. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à la moyenne. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées sont tous proches de la moyenne et conformes aux normes.

# Conclusion générale et perspectives

---

- La salinité des eaux des sources analysées varie entre 300 et 975 g/l. La moyenne est de 520.70 g/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 222.10 et 0.43. Les valeurs de salinité mesurées pour les sources analysées sont tous proches de la moyenne et conformes aux normes.
- Le total des solides dissous des eaux des sources analysées est compris entre 492 et 1562 mg/l. La moyenne est de 839.67 mg/l. L'écart type et le coefficient de variation sont de 354.15 et 0.42 respectivement. Les valeurs de TDS mesurées sont conformes aux normes.

La régression établit entre les éléments physiques mesurés montre une bonne liaison entre la salinité, la conductivité électrique et la TDS. Pour les autres éléments ( $T^{\circ}$ /TDS, pH/CE), le nuage de points n'a aucune forme particulière et le coefficient de détermination est faible.

L'eau des sources analysée a de bonnes caractéristiques physiques et peut être consommée. Néanmoins, il serait intéressant de compléter ce travail par des analyses chimiques et bactériologiques afin d'avoir un aspect qualitatif plus complet.

## PERSPECTIVES

Il serait utile de caractériser le comportement hydrodynamique de ces aquifères. Cette caractérisation ne peut se faire correctement sans :

- La réalisation de certains travaux tels que les traçages pour améliorer nos connaissances sur l'écoulement souterrain de ces eaux karstiques et les communications qui peuvent exister entre certains points d'eau.
- La réalisation des suivies de la qualité des eaux de ces sources et nous devons commencer par les sources exploités pour l'alimentation en eau potable, ensuite on intégrera les sources qui sont fermés ou en attente d'exploitation.

Ceci permettra une meilleure exploitation des ressources en eau des monts de Bejaia et de Toudja et surtout une gestion active et durable.

# Références bibliographique

- Bakalowicz M. (2010).** Karst et ressources en eau souterraine : un atout pour le développement des pays méditerranéens, Sécheresse vol. 21, n° 1<sup>e</sup>, Université Montpellier 2, Montpellier. p.10.
- Bakalowicz M. (2002).** Hydrogéologie karstique : Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active, Cours DEA H.H.G.G., Université Paris-6, France. p. 234.
- Bakalowicz M. (2008).** Le milieu karstique : études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource, Liban, Montpellier. p. 17.
- Bailly D. (2009).** Vers une modélisation des écoulements dans les massifs très fissurés de type karst : étude morphologique, hydraulique et changement d'échelle, Th DOCT, Université de Toulouse, Toulouse. p.189.
- Barriquand J., Barriquant L. (2008).** La karstification. Grotte d'Azé. ARPA, UFR des Sciences de la terre, Université Claude Bernard, Lyon I, Villeurbanne, France. p. 9.
- Benhamiche. N., Maza M. (2013).** Rapport d'activité projet Oued Agrioun. p.08.
- 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, n° 06. p. 08.
- Brault J.L. (1989).** Memento Technique de l'eau. Tome 1. France, Degremont. p.07.
- Brémond R. et Vuichard R. (1973).** Paramètres de la qualité des eaux, ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEP, Paris, P. 179.
- Canada. (2000).** Introduction au GPSS et DGPSS. p. 29.
- Chabour N. (2006).** Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas Saharien et la plate forme Saharienne à L'Est de l'Algérie, Th. DOCT. Université Mentouri Constantine. p. 177.
- Chalikakis M. (2006).** Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques, Th DOCT, Université Paris 6, France. p. 223.
- Christin F. (2008).** Etude de la Modélisation Hydrodynamique de Surface et Hydraulique Souterraine et de leur Couplage dans un but d'Aider à la Gestion des

Hydrosystèmes Aménagés. Th DOCT, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), France. p. 408.

**Christine C. (2012).** SIG : définition. p. 08.

**Couture I. (2006).** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro irrigation. p. 11.

**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. Earth Sciences. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. French. <NNT : 2013PA112290>. <tel-00939300>. p. 234.

**Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire(DPAT). (2012).** Contribution à l'étude Hydrogéologique de la Vallée de l'Oued Sahel-Soummam. Annuaire Statistiques de la Wilaya de Bejaia. p. 203.

**Dörfliger N., Pinault JL., Petit V., Jauffret D., avec la collaboration de Ladouche B., Balalowicz M., de la Vessiere R. (2004).** Systèmes Karstiques et Crues du Doubs : Méthodologies de détermination de la contribution des systèmes karstiques aux écoulements de surfaces, hors crues et des étiages, BRGM/RP-53063-FR. 68 illustrations, 11 annexes. p. 185.

**Duplan L. (1952).** Monographies Régionales : la Région de Bougie, 1<sup>ère</sup> série, Algérie N°17. p. 20.

**Duplan L. et Gravelle M. (1960).** Publication du service de la carte géologique de l'Algérie : notice explicative de la carte géologique au 1/50 000, bougie, 2<sup>ème</sup> édition. P.6, 7

**Extech. (2008).** Engineered in U.S.A. Made in Taiwan Rev 5/13/08-02.

**Fleury P. (2013).** Sources Sous-marines et Aquifères Karstiques Côtiers Méditerranéens. Fonctionnement et Caractérisation, Th DOCT, Université Paris VI – Pierre et Marie Curie, France. p. 288.

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

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

- Garry B. (2007).** Etude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques, Th. DOCT, Académie d'Aix-Marseille université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France. p. 234.
- Garmin.** Made in Taiwan 1JZ049478 Can 310 (Etrex).
- Gilli É., Christian M., Jacques M. (2008).** Hydrogéologie : Objets, Méthodes, applications, DUNOD, 2<sup>ème</sup> éd., Paris. p. 354.
- Guerreiro. (2009).** Fiche d'aide à MapInfo version 6 à 8. p. 42.
- Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). (2011).** Décret exécutif n° 11-219, fixant les objectifs de qualité des eaux superficielle et souterraine destinées à l'alimentation en eau des populations. p. 23.
- Laignel B. (2014).** Diagnostic des processus de recharge naturelle et artificiel des aquifères superficielles en vue d'une gestion optimisée des ressources en eau au Maghreb (Résumé). *In* : Ressources en Eau & Changement Climatique en Région Méditerranéenne-Programme de 3<sup>ème</sup> Colloque International Eau-Climat'2014 (Institut de Recherche en Génie Rural, Eau et Forêt (INRGREF)). Regards Croisés Nord-Sud. P.5. 21,22 et 23 Octobre 2014. Hammamet (Tunisie). Université de Carthage. p. 18.
- Leduc C., Menaut J.C., Thibon M. (2012).** (SICMED) Evolution des anthropo-écosystèmes méditerranéens (Résumé). *In* : Ressources en eau Préservation et gestion. Les dossiers d'Agropolis International compétence de la communauté scientifique. 6<sup>ème</sup> Forum Mondial de l'Eau (12-17 mars 2012, Marseille) et du salon international de l'eau hydrogaïa (6-8 juin 2012, Montpellier). p. 72.
- Medaouri M., Aïdi, C., Bracène R., Yelles-Chaouche A., Ouabadi A., et Déverchère J. (2010).** Double vergence des structures de la marge algérienne dans la région de Bejaïa, résumé étendu, Geomag : first congress on the Maghreb Geology, November 10-12, Tlemcen, Algeria. p. 03.
- Mudry J. (1987).** Apport du Traçage Physico-chimique Naturel à la Connaissance Hydrocinématique des Aquifères Carbonatés, Th DOCT, L'UFR des Sciences et Techniques de Franche Comte-Besancon, France. p. 401.
- 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.
- OMS (Organisation Mondiale de la Sante) (2003).** L'eau pour les Hommes, l'eau pour la vie, Paris, Unesco-Wwap.

- Peyraube N. (2011).** Apports des Equilibres Calco-carboniques et du Carbone 13 pour l'Etude de l'Air et des Ecoulements d'Eau dans la Zone non Saturée du Karst : Application au Système Karstique Perché de la Grotte de Cussac (Dordogne, France), Th DOCT, l'Université de Bordeaux 1, Bordeaux. p. 350.
- Plagnes V., Jozja N., Danneville L. (2013).** Etude de la relation entre débits des sources karstiques et distributions des temps de séjour, Mémoire fin d'études Master 2, Université Pierre et Marie Curie, Mines Paris Tech & Agro Paris Tech, France. p. 50.
- Poidevin D. (2014).** Manuel de Cartographie. Extrait de son ouvrage « la carte : moyen d'action » aux éditions Ellipses. p. 96.
- Provost F. (2011).** Système d'Information Géographique (SIG): définition et principes de base. *In* : Compte-Rendu thématique «SIG». Séminaire de Rentrée – 6 Septembre 2011 L'embarcadère – Plélan le Petit. Marc Fraval. p. 13.
- Rodier J., Legube B., Merlet N. et coll. (2009).** *L'Analyse de l'eau*. DUNOD. 9<sup>ème</sup> édition. Paris. p. 1579.
- Rodier J. (1984).** Analyse de l'eau, eau naturel, eau résiduaire, eau de mer. 7<sup>ème</sup> édition, bordas, paris.
- Rousseau R. (1907).** Dans la basse vallée de l'Oued sahel [Notes sur les Mezaïas, les Toudja et les Beni Ourlis]. *In*: Annales de Géographie. t. 16, n°86. Nbr. P. 10.
- Saou A. (2013).** Hydrogéochimie des eaux de la vallée de la basse Soummam Bejaia Algérie, Th. DOCT, Université A. Mira-Bejaia. p. 136.
- Sekiou F., Kellil A. (2014).** Caractérisation et Classification Empirique, Graphique et Statistique Multi variable d'Eaux de Source Embouteillées de l'Algérie. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°20, Décembre 2014. p. 08.
- Station Office National Météorologique de Bejaia. (2013).** La répartition des précipitations moyennes mensuelles en mm période 1978-2012. p.3.

## Sites web

[www.carte-du-monde.net](http://www.carte-du-monde.net)

## Résumé

Les formations carbonatées constituent un important réservoir karstique dans la région de Bejaia. Un inventaire, non exhaustif, des principales résurgences d'eau a été réalisé sur le pourtour de ces formations, de Toudja jusqu'au littoral Méditerranée. Ainsi, 32 sources d'eau ont fait l'objet d'une mesure du débit, d'une analyse des paramètres physique (T°, pH, CE, TDS et Salinité), et de surcroît une présentation de leur contexte géologique. L'objectif de ce mémoire est de fournir les caractéristiques physiques des sources drainant ces formations karstiques et leur localisation. En conséquence, les principales résurgences d'eaux karstiques dans le secteur étudié se localisent le long des contacts anormaux majeurs de la Dorsale calcaire qui mettent en contact les formations karstiques avec des formations imperméables, préférentiellement au niveau des croisements avec des accidents transverses ou en l'occurrence au niveau des nœuds tectoniques. Du point de vue physico-chimique, les eaux des sources Oliviers 1 et Souk El âsser ont un pH élevé et les Oliviers 2, les Oliviers 3, S.M.A 1, Tala Ouada, S.M.A 2 et Souk el aâsseront un TDS élevés. Toutes les autres eaux de source sont conformes aux normes de l'OMS.

**Mots clés** : Formations carbonatés, aquifères karstiques, résurgences, localisation, paramètres physiques, Bejaia, Algérie.

## Abstract

The carbonate formations are an important karst reservoir in the region of Bejaia. A important water resurgences inventory, no exhaustive, was made on the periphery of these formations, from Toudja until Mediterranean coast. Thus, thirty two water sources were the subject of a flow measurement, analysis of physical parameters (T °, pH, EC, TDS and Salinity), and in addition, a presentation of their geological context. The objective of this paper is to provide the physical characteristics of these karst springs draining and their location. Consequently, major karst water resurgences, in the study area, are located along of calcareous Dorsal abnormal of contact that connect karst formations with impermeable formations, preferably at the intersections with the accident transverses, in the occurrence, at tectonic nodes. Concerning physico-chemical properties, apart from the sources Olives 1 and Souk El Asser who have a high pH and Olives 2, the Oliviers 3 SMA 1 Tala Ouada, SMA 2 and Souk el aâsser who have a high TDS, all other sources comply with WHO standards.

**Key words**: Carbonate formations, Karst aquifers, Resurgences, Location, Physical parameters, Bejaia, Algeria.