



**UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE**

**Faculté des Sciences et Techniques**

**Béni Mellal**

**Centre d'études doctorales : Sciences et Techniques**  
**Section : Ressources Naturelles, Environnement et Santé**



**THESE**

Présentée par

**Lahcen ALILI**

En vue de l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT ES SCIENCES ET TECHNIQUES**

**Spécialité : Géologie**

**Option : Hydrologie, Hydrogéologie et Environnement**

**Protection et sauvegarde des ressources en eau du Haut Atlas de  
Beni Mellal (Maroc) - Cas des sources du Dir situées entre  
Ouaoumana et Bzou**

**Soutenu le 21/06/2021 devant la commission d'examen composée de :**

Mohamed EL BAGHDADI	Faculté des Sciences et Techniques - Beni Mellal	PES	Président
Lhoussaine BOUCHAOU	Faculté des Sciences - Agadir	PES	Rapporteur
Lahcen BENAABIDATE	Faculté des Sciences et Techniques - Fès	PES	Rapporteur
Abdessamad NAJINE	Faculté des Sciences et Techniques - Beni Mellal	PES	Rapporteur
Soumia AMIR	Faculté Polydisciplinaire - Beni Mellal	PES	Examineur
Ahmed BOUKDIR	Faculté des Sciences et Techniques - Beni Mellal	PES	Directeur de Thèse

## Avant-Propos

Cette thèse est le fruit de la collaboration entre l'université Sultan Moulay Slimane à travers sa formation doctorale ; Ressources Naturelles, Environnement et Santé (RNES), le laboratoire de Génie Industriel et l'agence du bassin hydraulique de l'Oum Er R'bia.

L'encadrement de cette thèse a été assuré par le professeur de l'enseigneemt superieur à la faculté des Sciences et Tchniques Ahmed BOUKDIR.

Ce travail nous a permis de participer à des nombreux travaux de recherche et de participer aux congrès nationaux et internationaux au moyen des communications présentées ci-dessous :

### Publications :

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, A. YOUNSI, B. AGHAZZAF, M. R. MASLOUHI et E. BEN-SAID (2018). Delimitation of the Protection Perimeters of Dir Springs (El Ksiba-Ouaoumana, High Atlas, Morocco). Journal of Water Sciences & Environment Technologies (JOWSET), 2019 (04), N°01, 465-471.

H. IKHMERDI, A. BOUKDIR, A. KOSSIR, **L. ALILI** and E. BEN-SAID (2018). Hydrogeological functioning of the tablecloth of the Midelt Furrow (High Moulouya, MOROCCO). E3S Web of Conferences, Volume 37, 01002.

E. BEN-SAID, A. BOUKDIR, A. MAHBOUB, A. YOUNSI, A. ZITOUNI, **L. ALILI** and H.IKHMERDI (2018). Functioning of the Primary Aquifer Relating to the Maider Basin, Morocco: Case of the Ordovician aquifer. E3S Web of Conferences, Volume 37, 01001.

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, M. R. MASLOUHI and H. IKHMERDI (2018). Karst groundwater vulnerability mapping to the pollution: Case of Dir springs located between El Ksiba and Ouaoumana (High Atlas, Morocco). E3S Web of Conferences, Volume 37, 01004.

E. BEN-SAID, A. BOUKDIR, A. MAHBOUB, A. YOUNSI, K. EL MOQUADDAM, **L. ALILI** et Abdelhamid ZITOUNI (2017). Apport de la statistique a l'étude des interactions entre la nappe jurassique et le barrage Hassan Addakhil. American Journal of Innovative Research and Applied Sciences, 5(6): 476-486.

### Communications :

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, H. IKHMERDI, M. R. MASLOUHI, E. BEN-SAID. Apport du SIG dans la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des sources karstiques (région de Beni Mellal, Haut Atlas, Maroc). Les troisièmes Journées Jeunes Chercheurs en Géosciences, Faculté des sciences Kénitra le 18 & 19 avril 2019.

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, H. IKHMERDI et M. R. MASLOUHI(2018) : Apport du SIG dans la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des sources karstiques (El Ksiba-Tanogha, Haut Atlas, Maroc). 4 ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG, Faculté des sciences Meknès.

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, B. AGHZAF, M.R. MASLOUHI, E. BEN-SAID, H. IKHMERDI (2017). Délimitation des périmètres de protection des sources du dir situées entre El Ksiba et Ouaoumana (Haut Atlas, Maroc). 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement », FST de Béni Mellal.

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, M. MASLOUHI, E. BEN-SAID, H. IKHMERDI, I. BOUTIRAME, A. ZITOUNI, W. BAITE, Z. ECHAKRAOUI (2017). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines karstiques : Cas des sources du Dir situées entre El Ksiba et Ouaoumana (Haut Atlas, Maroc). 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement », FST de Béni Mellal.

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, EL. ABDELKHALEK, H. IKHMERDI, E. BEN-SAID, A. ZITOUNI, W.BAITE, Z. ECHAKRAOUI, I. BOUTIRAME, E. V. R. MBAKI(2016). Etude d'impact environnemental de la décharge publique de la ville d'el Kelaa des Sraghna. 1<sup>ère</sup> Rencontre Nationale des Jeunes Géologues, Faculté des Sciences El Jadida.

**L. ALILI**, A. BOUKDIR, K. AIT LMEKDAM, L. BENAABIDATE, E. BEN-SAID, H. IKHMERDI et A. ZITOUNI (2016). Cartographie de l'aquifère jurassique du haut atlas relevant de la province d'Errachidia. III ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG, Faculté des Lettres et Sciences Humaines.

E. BEN-SAID, A. BOUKDIR, K. Ait Lmkadam, **L. ALILI**, IKHMERDI, A.ZITOUNI Z.ECHAKRAOUI, W. BAITE. Application of the electrical resistivities method to the characterization of the aquifer system in the region of erfoud-tnghir, cretaceous basin of errachidia (morocco). MineWat2017 – 2nd International Multidisciplinary Conference on Mineral Waters: Genesis, Exploitation, Protection and Valorisation, le 26-31 Mars 2017 à Vila de Luso, Portugal.

E. BEN-SAID, A. BOUKDIR, A. Mahboub, K. El Mouquaddam, A.ZITOUNI, H. IKHMERDI, **L. ALILI**, Z. ECHAKRAOUI. Etude de la relation structurale entre le bassin cretace et le bassin de haut atlas d'Errachidia Maroc, 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6, 12, 13 et 14 Décembre 2017 FST de Béni Mellal.

E. BEN-SAID, A. BOUKDIR, A.Mahboub, K. EL MOUQUADDAM, A.ZITOUNI, H. IKHMERDI, **L. ALILI**, Z. ECHAKRAOUI. Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère primaire de l'anti atlas relevant du bassin de Maider Maroc. 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6, 12, 13 et 14 Décembre 2017 FST de Béni Mellal.

H. IKHMERDI, A. BOUKDIR, A. KOSSIR, E. BEN-SAID, W. BAITE, **L. ALILI**, A. ZITOUNI, Z. ECHAKRAOUI, I. BOUTIRAME. Etude d'impact de l'exploitation minière sur la qualité des eaux souterraine de la haute Moulouya (MAROC). la 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6, 12, 13 et 14 Décembre 2017 FST de Béni Mellal.

H. IKHMERDI, A. BOUKDIR, A. KOSSIR, E. BEN-SAID, **L. ALILI**, W. BAITE, Z. ECHAKRAOUI, I. BOUTIRAME, A. ZITOUNI. Fonctionnement hydrogéologique de la nappe du Sillon de Midelt (Haut Moulouya, Maroc). 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6, 12, 13 et 14 Décembre 2017 FST de Béni Mellal.

Z. ECHAKRAOUI, A. BOUKDIR, A. GUERNER DIAS, R.M. EL MASLOUHI, A. ZITOUNI, E. BEN-SAID, S. EL MOUATASSIME, **L. ALILI**, H. IKHMERDI. Climate changes in the sub-basin of the Oum Er rbia central and the impact on the surface waters. 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6, 12, 13 et 14 Décembre 2017 FST de Béni Mellal.

Z. ECHAKRAOUI, A. BOUKDIR, A. GUERNER DIAS, R.M. MASLOUHI, A. ZITOUNI, E.BEN-SAID, S. EL MOUATASSIME, **L. ALILI**, H.IKHMERDI. Strategy of adaptation of the water resources in the Hydraulic Basin of Oum Er Rbia to the climate change. 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6, 12, 13 et 14 Décembre 2017 FST de Béni Mellal.

IKHMERDI H., BOUKDIR A., Kossir A., BENABELHADI M., **ALILI L.**, BEN-SAID E. Application des SIG pour comprendre le Fonctionnement Hydrogéologique couloire Taourirt Oujda (Domaine oriental-MAROC). 3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG, 22-23 novembre 2016, Faculté des Lettres et Sciences Humaines Oujda.

IKHMERDI H., BOUKDIR A., BENABELHADI M. KOSSIR A., Kadi A., ZITOUNI A., BOUTIRAME I., **ALILI L.**, BEN-SAID E., ECHAKRAOUI Z., BAITE W. Fonctionnement hydrogéologique des bassins Béni Snassen-Béni Bouyahi et Couloir Taourirt Oujda 5<sup>ème</sup> Colloque International du Réseau ‘Eaux et Climats’(CIREC5) 12-13 Octobre 2016, FST Fès.

H. IKHMERDI, A. BOUKDIR, A. EL AMRANI IDRISSE, **L. ALILI**, E. BEN-SAID, I. BOUTIRAME, W. BAITE, Z. ECHAKRAOUI, A. ZITOUNI. Choix du site pour la mise en place de la décharge contrôlée- de la province d’El Kelâa des Sraghna (Maroc).Premier Congrès International des Etudes sur l’Eau et l’Environnement (CI3E 2016), 21-22 Avril 2016 à ENSA ELHOCEIMA.

E. BEN-SAID, A. BOUKDIR, **L. ALILI**, H. IKHMERDI, A. ZITOUNI, Z. ECHAKRAOUI, I. BOUTIRAME, W. BAITE. Gestion intégrée des ressources en eau dans la nappe des Ouled Abdoun (Khouribga, Maroc). Premier Congrès International des Etudes sur l’Eau et l’Environnement (CI3E 2016) 21-22 Avril 2016 à ENSA ELHOCEIMA.

Z. ECHAKRAOUI, A. BOUKDIR, A. CHAOUNI, A. ZITOUNI, W. BAITE, S. EL MOUATASIME, E.V.R. MBAKI, H. IKHMERDI, E. BEN-SAID, **L. ALILI**. Maitrise et optimisation de la station de traitement des eaux usées de Khouribga. Premier Congrès International des Etudes sur l’Eau et l’Environnement (CI3E 2016) 21-22 Avril 2016 à ENSA ELHOCEIMA.

#### **Autres activités**

- Membre dans le comité d’organisation de la sixième édition du congrès international Eau, Déchets et Environnement(EDE6) organisé par la Faculté des sciences et Technique de Béni Mellal sous la coordination de Professeur Ahmed BOUKDIR.

## Remerciement

Gloire soit rendu au Dieu tout puissant le très miséricordieux pour tous ses bienfaits dont il m'a comblé et de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce travail.

Ce travail n'aurait sûrement pas été possible sans l'intervention de personnes qui tant par leurs compétences scientifiques que par leur soutien moral, ont su m'apporter une aide précieuse pour mener à bien cette thèse.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance à Monsieur **Ahmed BOUKDIR**, qu'il m'a accepté dans son équipe et m'a confié ce sujet de recherche sans hésitation. Je me saurai le remercier aussi pour la confiance et la compréhension qu'il a toujours manifestées à mon égard, et de m'avoir toujours poussée à donner le meilleur de moi-même. Son encadrement et son suivi de près, malgré ses nombreuses occupations, ses qualités scientifiques et humaines indéniables m'ont marquées, qu'il soit assuré de ma profonde estime.

La collaboration avec l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia m'a été très précieuse. Je tiens à remercier vivement le Directeur Monsieur **Abdellah BOURAK** et le secrétaire général Monsieur **Brahim AGHAZZAF** pour l'importance qu'ils ont donné et le temps qu'ils ont consacré à la réalisation de ce travail. Messieurs **Mohamed Rachid MASLOUHI**, **Abdelkhalek EL AMRANI IDRISSE**, **Abdelouahed ZAKARIA** et **Youssef CHAFAK** ainsi que tout le personnel de cette honorable Agence trouvent ici mes remerciements les plus profonds et les plus chaleureux.

Mes sincères et chaleureux remerciements s'adressent à Monsieur **Abdelkader YOUNSI**, professeur dans la faculté des sciences d'El Jadida qui m'a fait bénéficier de son expérience, de ses compétences et de ses exigences scientifiques.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait Monsieur Mohamed EL BAGHDADI, Professeur à la Faculté des sciences et techniques de Béni Mellal, en acceptant de présider le jury de ma thèse, je le remercie sincèrement et je le prie de croire à ma grande considération.

Messieurs **Lhoussaine BOUCHAOU** Professeur à la Faculté des Sciences d'Agadir, **Lahcen BENAABIDATE** Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et **Abdessamad NAJINE** Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal, je vous adresse mes sincères remerciements pour l'honneur que vous me faites en acceptant de juger ce travail en tant que rapporteurs.

Madame **Soumia AMIR** Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de Beni Mellal, je vous exprime toute ma gratitude pour avoir bien voulu examiner mon travail.

**Hassan IKMERDI**, **Elhassan BEN-SAÏD**, **Lahcen JABIR**, **Abdelhamid ZITOUNI**, **El Moutassime SABRI**, **Wissal BAITE**, **Zhour ECHAKRAOUI**, **Vivien Romaric EKOUELE MBAKI**, **Larbi BARHAZI**, **Ikram BOUTIRAME**, merci à tous et bon courage à certains pour l'ensemble de vos travaux.

Mes remerciements et mes encouragements s'adressent aussi à mes amis plus particulièrement à **Nadia LMOUDN**, **Amina EL JOUDIANI**, **El Mehdi SAAF**, **Meryem CHAHBI**, **Khaoula SAAOUD**, **Kholti CHARKAOUI**, **Oussama BOUZID** et **Khadija AMINE**.

Que toutes les personnes, qui m'ont apporté une quelconque aide et dont j'aurai oublié de citer leurs noms, soient assurées de ma profonde gratitude.

Enfin je ne peux terminer sans exprimer mes plus vifs remerciements à mon père, ma mère, ma sœur et mes frères ainsi que toute la famille ALILI, sans lesquels je n'aurais pu aller jusqu'au bout de ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde affection et ma sincère reconnaissance. **C'est à ces personnes que je dédie ce travail.**

## Résumé

La zone d'étude est située dans les provinces de Beni Mellal et Azilal. Elle couvre le piémont nord du Haut Atlas de Beni Mellal entre Ouaoumana et Bzou. Le Jurassique occupe la quasi-totalité du point de vue géologique et jalonné par des sources de débits importants (Ain Asserdoune à 1,25 m<sup>3</sup>/s). Elle est caractérisée aussi par un réseau hydrographique peu développé et par la présence de formes karstiques très importantes qui conditionnent l'infiltration rapide aux sources karstiques.

Face à l'augmentation de la demande régionale en eau et aux problèmes de pollution, ces sources ont fait l'objet de la présente étude et ce dans la mesure de délimiter leurs périmètres de sauvegarde quantitative et surtout qualitative. Pour ce faire, ce travail a porté sur la délimitation des périmètres de protection immédiats (PPI), rapprochés (PPR) et éloignés (PPE) des sources du Dir situées entre Ouaoumana et Bzou. Ces périmètres ont été délimités sur la base de l'analyse multicritère de données multisources (topographiques, hydroclimatologiques, géologiques, hydrogéologiques, images satellitaires, occupations du sol, inventaire des sources de pollution et enquêtes de terrain). Avant de délimiter ces périmètres de protection, le présent travail a porté aussi sur l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par la méthode EPIK.

Cette approche de sauvegarde nous a permis de délimiter les trois périmètres de protection immédiats (PPI), rapprochés (PPR) et éloignés (PPE). En effet, les périmètres de protection immédiats ont été adoptés est de 1600 m<sup>2</sup> autour de chaque source. Ainsi que les périmètres de protection rapprochés ont été délimités en fonction du comportement hydrogéologique des sources et la vulnérabilité à la pollution. Tandis que les périmètres de protection éloignés, correspondent aux aires d'alimentation des sources.

Mots clés : Vulnérabilité, pollution, sources, périmètres de protection, Ouaoumana, Bzou, Haut Atlas de Beni Mellal, Maroc.

## Abstract

The study area is located in the province of Beni Mellal and Azilal. It covers the northern piedmont of the Beni Mellal High Atlas between Ouaoumana and Bzou. The Jurassic occupies almost all of the geological point of view and staked out by springs of significant flows (Ain Asserdoune at  $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ). It is also characterized by a poorly developed hydrographic network and by the presence of very important karstic forms which condition rapid infiltration at karstic sources.

In view of the increase in regional demand for water and the problems of pollution, these springs have been the subject of this study in order to define their quantitative and especially qualitative safeguard perimeters. In order to do this, this work focused on the delimitation of the immediate (PPI), close (PPR) and distant (PPE) protection perimeters of the Dir sources located between Ouaoumana and Bzou. These perimeters were delineated on the basis of multi-criteria analysis of multi-source data (topographic, hydroclimatological, geological, hydrogeological, satellite images, land use, pollution source inventory and field surveys). Before delimiting these protective perimeters, this work also included the assessment of vulnerability to pollution using the EPIK method.

This safeguard approach allowed us to delineate the three protection perimeters: immediate (PPI), close (PPR) and distant (PPE). The immediate protection perimeters adopted are  $1600 \text{ m}^2$  around each spring. The close protection perimeters were delimited according to the hydrogeological compartment of the springs and the vulnerability to pollution. The remote protection perimeters correspond to the source catchment areas.

**Keywords:** Vulnerability, pollution, springs, protection perimeters, Ouaoumana, Bzou, Beni Mellal High Atlas, Morocco.



## ملخص

تقع منطقة الدراسة في إقليم بني ملال وأزيلال. و تغطي السفوح الشمالية لأطلس الكبير لبني ملال بين واومنة وبزو. جيولوجيا تحل التشكلات الجوراسية تقريبا كل منطقة الدراسة وتتميز بمصادر التدفقات الهامة (عين أسردون ب 1.25 متر مكعب / ثانية). كما تتميز بشبكة هيدروغرافية ضعيفة التطور ووجود أشكال كارستية مهمة جدا تساعد التسلل السريع للماء إلى عيون كارستية.

وفي مواجهة الزيادة في الطلب الإقليمي على المياه ومشاكل التلوث، كانت هذه العيون موضوع هذه الدراسة، من أجل المحافظة عليها من حيث الكمية والنوعية. ولهذا ، ركز هذا العمل على تحديد مدارات الحماية المباشرة والمقربة والبعيدة لعيون الدير الواقعة بين واومنة وبزو. وقد تم تحديد هذه المناطق على أساس تحليل للبيانات متعددة المصادر (طبوغرافية و هيدرومناخية و جيولوجية و هيدروجيولوجية وصور الاقمار الاصطناعية و استعمالات التربة و جرد مصادر التلوث و البحث الميداني). وقبل تحديد حدود هذه المدارات، ركز هذا العمل أيضا على تقييم قابلية للتلوث وذلك باستعمال طريقة EPIK.

وقد ساعدنا هذا المنهج المتبع بتحديد ثلاث مدارات الحماية : مباشرة و قريبة و بعيدة. فبالنسبة للمناطق المباشرة تم اعتماد 1600 متر مربع حول كل عين. وتحديد مناطق الحماية القريبة وفقا للسلوك الهيدروجيولوجي للعيون وقابليتها لمخاطر التلوث. في حين أن مدارات الحماية البعيدة فتم تحديدها طبقا لمناطق تغذية العيون.

الكلمات المفتاحية : قابلية للتلوث ، التلوث ، عيون ، مدارات الحماية ، واومنة ، بزو، الأطلس الكبير لبني ملال، المغرب.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Paysage karstique synthétique (bakalowisz, 1999) .....	3
<b>Figure 2</b> : Illustrations des systèmes karstiques unaires et binaires (Marsaud, 1996) .....	5
<b>Figure 3</b> : Illustrations d'un système karstique jurassien et vauclusien .....	5
<b>Figure 4</b> : Approche structurelle des aquifères karstiques (Drogue, 1971) .....	6
<b>Figure 5</b> : Echelles de protection des ressources en eau souterraines .....	18
<b>Figure 6</b> : Organigramme des matériels et méthodes utilisés .....	22
<b>Figure 7</b> : Situation de la zone d'étude .....	25
<b>Figure 8</b> : Carte hypsométrique de la zone d'étude .....	27
<b>Figure 9</b> : Carte des pentes de la zone d'étude.....	27
<b>Figure 10</b> : Carte d'Habitat et réseau routier .....	29
<b>Figure 11</b> : Carte de délimitation des zones agricoles .....	30
<b>Figure 12</b> : Carte de domaine forestier .....	31
<b>Figure 13</b> : Carte d'occupation du sol synthétique .....	32
<b>Figure 14</b> : Carte de découpage administratif de la zone d'étude.....	33
<b>Figure 15</b> : Carte de situation des stations pluviométriques .....	34
<b>Figure 16</b> : Histogrammes des précipitations moyennes mensuelles.....	35
<b>Figure 17</b> : Evolution des précipitations annuelles (Source des données : ABHOER) .....	35
<b>Figure 18</b> : Evolution des Températures mensuelles interannuelles dans les stations d'Ahmed El Hansali et de Beni Mellal (1985-2014).....	36
<b>Figure 19</b> : Vitesse du vent aux stations Béni Mellal et Ahmed El Hansali.....	37
<b>Figure 20</b> : Evolution des Evaporations moyennes mensuelles interannuelles dans les Ahmed El Hansali et Beni Mellal.....	38
<b>Figure 21</b> : Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude.....	40
<b>Figure 22</b> : Carte géologique de la zone d'étude .....	44
<b>Figure 23</b> : Coupes lithologiques et attributions chronostratigraphiques de jurassique .....	46
<b>Figure 24</b> : photos dans une carrière d'extraction de matériaux de construction .....	47
<b>Figure 25</b> : AA' et BB', Coupes tectoniques interprétatives du Haut Atlas Central CC' : Extrait de la coupe géologique du Haut Atlas central entre Béni Mellal-tadla et Tinjdad-Tinghir.....	49
<b>Figure 26</b> : Composition colorée de l'image satellitaire .....	51
<b>Figure 27</b> : Méthodologie d'extraction des linéaments géologiques .....	52
<b>Figure 28</b> : Analyse multidimensionnelle de l'image satellitaire .....	53
<b>Figure 29</b> : Carte de linéaments issue de l'image satellitaire de Landsat 8.....	54
<b>Figure 30</b> : Quelques Formes karstiques dans la zone d'étude.....	55
<b>Figure 31</b> : Coupe hydrogéologique schématique et simplifiée montrant les modes d'alimentation et les principaux aquifères de l'Atlas de Béni Mellal et du Dir.....	58
<b>Figure 32</b> : Diagramme de Piper des sources.....	59
<b>Figure 33</b> : Variabilités cumulées des différents axes principaux .....	60
<b>Figure 34</b> : Projections des variables dans le plan F1XF2.....	61
<b>Figure 35</b> : Projections des points d'eau dans le plan F1XF2 .....	62
<b>Figure 36</b> : Evolution des débits mensuels de la source Tiguemate .....	64
<b>Figure 37</b> : Débits moyens mensuels de la source Tiguemate .....	65
<b>Figure 38</b> : Evolution des débits annuels de la source Tiguemate.....	65
<b>Figure 39</b> : Débits classés de la source Tiguemate .....	66
<b>Figure 40</b> : Courbes de récession de la source Tiguemate.....	66
<b>Figure 41</b> : Evolution des débits mensuels de la source N'Ougziza.....	67

<b>Figure 42</b> : Débits moyens mensuels de la source N'Ougziza.....	68
<b>Figure 43</b> : Evolution des débits annuels de la source N'Ougziza .....	68
<b>Figure 44</b> : Débits classés de la source N'Ougziza.....	69
<b>Figure 45</b> : Courbes de récession de la source N'Ougziza .....	69
<b>Figure 46</b> : Evolution des débits mensuels de la source Ait Athmane.....	70
<b>Figure 47</b> : Débits moyens mensuels de la source Ait Athmane .....	71
<b>Figure 48</b> : Evolution des débits annuels de la source Ait Athmane .....	71
<b>Figure 49</b> : Débits classés de la source Ait Athmane.....	72
<b>Figure 50</b> : Courbes de récession de la source Ait Athmane .....	72
<b>Figure 51</b> : Evolution des débits mensuels de la source Tamescourte.....	73
<b>Figure 52</b> : Débits moyens mensuels de la source Tamescourte .....	74
<b>Figure 53</b> : Evolution des débits annuels de la source Tamescourte .....	74
<b>Figure 54</b> : Débits classés de la source Tamescourte .....	75
<b>Figure 55</b> : Courbes de récession de la source Tamescourte .....	75
<b>Figure 56</b> : Evolution des débits mensuels de la source Boullmatene.....	76
<b>Figure 57</b> : Débits moyens mensuels de la source Boullmatene.....	77
<b>Figure 58</b> : Relation entre débit de source Boullmatene et pluie.....	77
<b>Figure 59</b> : Débits classés de la source Boullmatene.....	78
<b>Figure 60</b> : Courbes de récession de la source Boullmatene .....	78
<b>Figure 61</b> : Evolution des débits mensuels de la source Tamda .....	79
<b>Figure 62</b> : Débits moyens mensuels de la source Tamda.....	80
<b>Figure 63</b> : Evolution des débits annuels de la source Tamda.....	80
<b>Figure 64</b> : Débits classés de la source Tamda .....	81
<b>Figure 65</b> : Courbes de récession de la source Tamda.....	81
<b>Figure 66</b> : Evolution des débits mensuels de la source Ou Abdellah amont.....	82
<b>Figure 67</b> : Débits moyens mensuels de la source Ou Abdellah amont.....	83
<b>Figure 68</b> : Relation entre débit de source Ou Abdellah Amont et pluie.....	83
<b>Figure 69</b> : Débits classés de la source Ou Abdellah Amont.....	84
<b>Figure 70</b> : Courbes de récession de la source Ou Abdellah Amont .....	84
<b>Figure 71</b> : Evolution des débits mensuels de la source Ou Abdellah Aval .....	85
<b>Figure 72</b> : Débits moyens mensuels de la source Ou Abdellah aval.....	86
<b>Figure 73</b> : Relation entre débit de source Ou Abdellah Aval et pluie .....	86
<b>Figure 74</b> : Débits classés de la source Ou Abdellah aval .....	87
<b>Figure 75</b> : Courbes de récession de la source Ou Abdellah aval.....	87
<b>Figure 76</b> : Evolution des débits mensuels de la source Boutmariste.....	88
<b>Figure 77</b> : Evolution des débits annuels de la source Boutmarsite .....	89
<b>Figure 78</b> : Débits classés de la source Boutmariste.....	89
<b>Figure 79</b> : Courbe de récession de la source Boutmariste .....	90
<b>Figure 80</b> : Evolution des débits mensuels de la source Ait Laaidi .....	91
<b>Figure 81</b> : Débits moyens mensuels de la source Ait Laaidi.....	91
<b>Figure 82</b> : Relation entre débit de source Ait Laaidi et la pluie .....	92
<b>Figure 83</b> : Débits classés de la source Ait Laadi .....	92
<b>Figure 84</b> : Courbes de récession de la source Ait Laaidi.....	93
<b>Figure 85</b> : Evolution des débits mensuels de la source Bouddilite .....	94
<b>Figure 86</b> : Débit moyen mensuel de la source Boudillite.....	94
<b>Figure 87</b> : Relation entre débit de source et pluie .....	95
<b>Figure 88</b> : Débits classés de la source Boudillite .....	95

<b>Figure 89</b> : Courbe de récession de la source Boudilite.....	96
<b>Figure 90</b> : Evolution des débits mensuels de la source Ouarnfaa .....	97
<b>Figure 91</b> : Débit moyen mensuel de la source Ouarnfaa .....	97
<b>Figure 92</b> : Relation entre débit de source et pluie .....	98
<b>Figure 93</b> : Débits classés de la source Ouarnfaa .....	98
<b>Figure 94</b> : Courbes de récession de la source Ouarnfaa .....	99
<b>Figure 95</b> : Evolution des débits mensuels de la source Igly .....	100
<b>Figure 96</b> : Débit moyen mensuel de la source Igly .....	100
<b>Figure 97</b> : Relation entre débit de source Igly et pluie .....	101
<b>Figure 98</b> : Débits classés de la source Igly .....	101
<b>Figure 99</b> : Courbes de récession de la source Igly .....	102
<b>Figure 100</b> : Courbe des débits classés de la source d’Ain Asserdoune .....	116
<b>Figure 101</b> : Carte des foyers de pollution.....	120
<b>Figure 102</b> : Carte de l’Epikarst (El Ksiba -Ouaoumana).....	122
<b>Figure 103</b> : Carte de la couverture protectrice (El Ksiba -Ouaoumana) .....	123
<b>Figure 104</b> : Carte des conditions d’infiltration (El Ksiba -Ouaoumana).....	124
<b>Figure 105</b> : Carte du réseau karstique (El Ksiba -Ouaoumana) .....	125
<b>Figure 106</b> : Carte de la vulnérabilité globale (El Ksiba-Ouaoumana) .....	126
<b>Figure 107</b> : Carte de l’Epikarst (El Ksiba -Tanogha).....	128
<b>Figure 108</b> : Carte de la couverture protectrice (El Ksiba -Tanogha).....	129
<b>Figure 109</b> : Carte des conditions d’infiltration (El Ksiba -Tanogha).....	130
<b>Figure 110</b> : Carte du réseau karstique (El Ksiba -Tanogha).....	131
<b>Figure 111</b> : Carte de la vulnérabilité globale (El Ksiba-Tanogha).....	132
<b>Figure 112</b> : Carte de l’Epikarst (Tagzirt -Timoulilt) .....	134
<b>Figure 113</b> : Carte de la couverture protectrice (Tagzirt -Timoulilt).....	135
<b>Figure 114</b> : Carte des conditions d’infiltration (Tagzirt -Timoulilt) .....	136
<b>Figure 115</b> : Carte du réseau karstique (Tagzirt -Timoulilt).....	137
<b>Figure 116</b> : Carte de la vulnérabilité globale (Tagzirt -Timoulilt).....	138
<b>Figure 117</b> : Carte de l’Epikarst (Timoulilt- Bzou) .....	140
<b>Figure 118</b> : Carte de la couverture protectrice (Timoulilt- Bzou).....	141
<b>Figure 119</b> : Carte des conditions d’infiltration (Timoulilt- Bzou) .....	142
<b>Figure 120</b> : Carte du réseau karstique (Timoulilt- Bzou).....	143
<b>Figure 121</b> : Carte de la vulnérabilité globale (Timoulilt- Bzou) .....	144
<b>Figure 122</b> : Carte des périmètres de protection des sources situées entre El Ksiba et Ouaoumana .....	150
<b>Figure 123</b> : Carte des périmètres de protection des sources situées entre El Ksiba et Tanogha ..	151
<b>Figure 124</b> : Carte des périmètres de protection des sources situées entre Tagzirt et Timoulilt ..	152
<b>Figure 125</b> : Carte des périmètres de protection des sources situées entre Timoulilt et Bzou .....	153

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Interprétation des ruptures de pente dans courbes de débits classés .....	7
<b>Tableau 2</b> : Critères de la méthode EPIK (Nathalie Dörfliger, 1998) .....	16
<b>Tableau 3</b> : Coefficients de pondération pour la méthode EPIK .....	17
<b>Tableau 4</b> : Coordonnées Lambert des sources .....	26
<b>Tableau 5</b> : Stations climatiques et type de données disponibles .....	33
<b>Tableau 6</b> : Températures mensuelles interannuelles .....	36
<b>Tableau 7</b> : Evaporation moyenne mensuelles aux stations Ahmed El Hansali et Beni Mellal (1985-2014) (Source des données : ABHOER).....	37
<b>Tableau 8</b> : Evapotranspiration potentielle mensuelle à la zone d'étude.....	38
<b>Tableau 9</b> : Pluie efficace à la zone d'étude .....	39
<b>Tableau 10</b> : Bandes spectrales OLI de Landsat 8.....	51
<b>Tableau 11</b> : Matrice de corrélation des paramètres physiques et majeurs .....	61
<b>Tableau 12</b> : Mode d'émergence des sources .....	63
<b>Tableau 13</b> : Réserve régulatrice de la source Tiguemate .....	66
<b>Tableau 14</b> : Surface d'alimentation de la source Tiguemate.....	67
<b>Tableau 15</b> : Réserve régulatrice de la source N'Ougziza.....	69
<b>Tableau 16</b> : Surface d'alimentation de la source N'Ougziza .....	70
<b>Tableau 17</b> : Réserve régulatrice de la source Ait Athmane .....	72
<b>Tableau 18</b> : Surface d'alimentation de la source Ait Athmane.....	73
<b>Tableau 19</b> : Réserve régulatrice de la source Tamescourte.....	75
<b>Tableau 20</b> : Surface d'alimentation de la source Tiguemate.....	76
<b>Tableau 21</b> : Réserve régulatrice de la source Boullmatene.....	78
<b>Tableau 22</b> : Surface d'alimentation de la source Boullmatene .....	79
<b>Tableau 23</b> : Réserve régulatrice de la source Tamda .....	81
<b>Tableau 24</b> : Surface d'alimentation de la source Tamda.....	82
<b>Tableau 25</b> : Réserve régulatrice de la source Ou Abdellah amont.....	84
<b>Tableau 26</b> : Surface d'alimentation de la source Ou Abdellah amont .....	84
<b>Tableau 27</b> : Réserve régulatrice de la source Ou Abdellah aval .....	87
<b>Tableau 28</b> : Surface d'alimentation de la source Ou Abdellah aval .....	88
<b>Tableau 29</b> : Surface d'alimentation de la source Boutmariste .....	90
<b>Tableau 30</b> : Réserve régulatrice de la source Ait Laaidi .....	93
<b>Tableau 31</b> : Surface d'alimentation de la source Ait Laaidi .....	93

<b>Tableau 32</b> : Surface d'alimentation de la source Boudilite.....	96
<b>Tableau 33</b> : Réserve régulatrice de la source Ouarnfaa .....	99
<b>Tableau 34</b> : Surface d'alimentation de la source Ouarnfaa.....	99
<b>Tableau 35</b> : Réserve régulatrice de la source Igly .....	102
<b>Tableau 36</b> : Surface d'alimentation de la source Igly .....	102
<b>Tableau 37</b> : Débit moyens mensuels interannuels (en l/s) .....	115
<b>Tableau 38</b> : Résultats des analyses bactériologiques (ABHOER, 2018) .....	145
<b>Tableau 39</b> : Bactériologie saisonnière des eaux d'Ain Asserdoune (ONEP, 2011).....	145
<b>Tableau 40</b> : Degré de contamination en bactéries des différentes sources testées.....	146

## LISTE DES ABREVIATIONS

**ABHOER** : Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er R'bia

**ACP** : Analyse en Composante Principale

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**ONEP** : Office National de l'Eau Potable

**GTZ** : Agence de Coopération Internationale Allemande

**FAO** : Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture

**COST** : Coopération Européenne en Science et Technologie

**SW-NE** : Sud West- Nord Est

**E-W** : Est-West

**SSW** : Sud Sud West

**SIG** : Système d'Information Géographique

**RN8** : Route Nationale N° 8

**mm** : millimètre

**°C** : Degré Celsius

**m/s** : mètre/seconde

**m/h** : mètre/ Heure

**Mm<sup>3</sup>/an** : Million mètre cube/année

**l/s** : Litre/seconde

**UFC** : unité formant colonie

**PPI** : Périmètre de Protection Immédiat

**PPR** : Périmètre de Protection Rapproché

**PPE** : Périmètre de Protection Eloigné

## SOMMAIRE

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>I</b>
<b>REMERCIEMENT</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUME</b> .....	
.....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>IX</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>XII</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES KARSTIQUES ET LES PERIMETRES DE PROTECTION</b> .....	<b>2</b>
I. INTRODUCTION .....	3
II. KARST .....	3
II.1. Définition.....	3
II.2. Systèmes karstiques.....	4
III. DIFFERENTES APPROCHES D'ETUDE DES SYSTEMES KARSTIQUES .....	5
III.1. Approche structurelle.....	5
III.2. Approche fonctionnelle .....	6
III.2.1. Analyse des débits classés.....	6
III.2.2. Analyse des courbes de récession .....	7
III.3. APPROCHE HYDROGEOCHIMIQUE .....	8
III.3.1. Analyses physico-chimiques et biologiques .....	9
III.3.1.1. Marqueurs d'origine météorique.....	9
III.3.1.2. Marqueurs d'origine géologique .....	9
III.3.1.3. Marqueurs d'origine anthropique.....	9
III.3.1.4. Marqueurs microbiologiques .....	10
III.3.2. Analyse en composante principale.....	10
IV. DELIMITATION DE L'AIRE D'ALIMENTATION .....	11
V. ASPECTS FONDAMENTAUX DE LA VULNERABILITE ET DES PERIMETRES DE PROTECTION ET METHODOLOGIE .....	11
V.1. Introduction .....	11
V.2. Vulnérabilité.....	12
V.2.1. Présentation des méthodes de cartographie de la vulnérabilité en milieux karstiques .....	12
V.2.2. Choix de la méthode.....	13
V.2.3. Description de la méthode EPIK.....	14
V.2.4. Validation des méthodes de vulnérabilité .....	17
VI. PÉRIMÈTRES DE PROTECTION ET DE SAUVEGARDE .....	17
VI.1. Présentation des périmètres de protection .....	17
VI.2. Aspect législatif .....	18
VI.3. Approches de délimitation des périmètres de protection.....	19
VI.3.1. Périmètre de protection immédiat (PPI) .....	19



VI.3.2. Périmètre de Protection Rapproché (PPR).....	20
VI.3.3. Périmètre de Protection Eloigné (PPE).....	20
VII. MÉTHODES ET MATÉRIELS .....	20
VII.1. Collecte et analyse des données .....	20
VII.2. Etude de la vulnérabilité à la pollution des sources .....	21
VII.3. Délimitation des périmètres de protection.....	21
VIII. CONCLUSION.....	23
<b>CHAPITRE II : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET HYDROCLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D’ETUDE.....</b>	<b>24</b>
I. INTRODUCTION .....	25
II. SITUATION GEOGRAPHIQUE .....	25
III. TOPOGRAPHIE.....	26
IV. OCCUPATION DU SOL.....	28
IV.1. Réseau routier .....	28
IV.2. Agglomération ou Habitat .....	28
IV.3. Agriculture .....	29
IV.4. Industrie .....	30
IV.5. Forêts .....	30
IV.6. Synthèse de l’occupation du sol.....	31
V. DECOUPAGE ADMINISTRATIF .....	32
VI. CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE.....	33
VI.1. Introduction.....	33
VI.2. Précipitations .....	34
VI.3. Température .....	36
VI.4. Vent.....	37
VI.5. Evaporation.....	37
VI.6. Evapotranspiration potentielle .....	38
VI.7. Evapotranspiration réelle et pluie efficace .....	38
VII. CONTEXTE HYDROLOGIQUE .....	40
VII.1. Caractéristiques des bassins versants des sources .....	40
VII.2. Apports et régimes des cours d’eau.....	40
VIII. CONCLUSION.....	41
<b>CHAPITRE III : CONTEXTE GEOLOGIQUE.....</b>	<b>42</b>
I. INTRODUCTION .....	43
II. LITHOSTRATIGRAPHIE .....	44
II.1. Trias.....	44
II.2. Lias .....	44
II.3. Dogger.....	45
II.4. Crétacé.....	47
II.5. Tertiaire .....	47
II.6. Quaternaire .....	47
III. ETUDE STRUCTURALE .....	48
IV. ETUDE DE L’IMAGE SATELLITAIRE.....	50
IV.1. Acquisition de l’image satellitaire .....	50
IV.2. Prétraitement des images .....	51

IV.3. Etalement interactif du contraste .....	52
IV.4. filtres directionnels .....	52
IV.5. Analyse en composante principale d'image .....	52
IV.6. Analyse de la fracturation à partir de l'image satellitaire .....	53
V. GEOMORPHOLOGIE .....	54
VI. CONCLUSION .....	55
<b>CHAPITRE IV : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....</b>	<b>56</b>
I. INTRODUCTION .....	57
II. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES SYSTEMES AQUIFERES .....	57
II.1. Aquifère du Lias .....	57
II.2. Aquifère du jurassique moyen (Dogger) .....	58
II.3. Aquifère du Plio-Quaternaire .....	59
III. HYDROGEOCHIMIE DES SOURCES.....	59
III.1. Qualité physico-chimique des sources et faciès chimiques .....	59
III.2. Analyse en composante principale.....	59
III.2.1. Démarche suivie.....	60
III.2.2. Analyse et discussions des résultats.....	60
IV. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES SOURCES SITUEES ENTRE OUAOUMANA ET BZOU .....	62
IV. 1. Sources situées entre El Ksiba et Ouaoumana.....	63
IV.2. Sources situées entre El Ksiba et Tanogha .....	102
IV.3. Sources situées entre Tagzirt et Timoulilt .....	115
IV.4. Sources situées entre Timoulilte et Bzou.....	116
V. DELIMITATION DES AIRES D'ALIMENTATION DES SOURCES .....	117
VI. CONCLUSION .....	117
VII. CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	118
<b>CHAPITRE V : ETUDE DE LA VULNERABILITE DES SOURCES SITUEES ENTRE OUAOUMANA ET BZOU.....</b>	<b>119</b>
I. INTRODUCTION .....	120
II. INVENTAIRE DES SOURCES DE POLLUTION.....	120
III. ETUDE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DES SOURCES .....	121
III.1. Evaluation des paramètres de la méthode EPIK .....	121
III.1.1. Epikarst .....	121
III.1.2. Couverture protectrice.....	121
III.1.3. Condition d'infiltration .....	121
III.1.4. Développement du réseau karstique .....	121
III.2. Vulnérabilité globale.....	121
III.2.1. CAS DES SOURCES SITUEES ENTRE EL KSIBA ET OUAOUMANA .....	121
III.2.2. CAS DES SOURCES SITUEES ENTRE EL KSIBA ET TANOGHA .....	127
III.2.3. CAS DES SOURCES SITUEES ENTRE TAGZIRT ET TIMOULILT .....	133
III.2.4. CAS DES SOURCES SITUEES ENTRE TIMOULILT ET BZOU .....	139
III.3. Validation des résultats .....	145
IV. SENSIBILITE A LA POLLUTION.....	146
V. CONCLUSION .....	146

<b>CHAPITRE VI : DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION ET DE SAUVEGARDE DES SOURCES SITUEES ENTRE OUAOUMANA ET BZOU .....</b>	<b>147</b>
I. INTRODUCTION .....	148
II. DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION ET DE SAUVEGARDE DES SOURCES.....	148
II.1. Périmètre de protection immédiat .....	148
II.2. Périmètre de protection rapproché .....	148
II.3. Périmètre de protection éloigné.....	149
III. SERVITUDES DANS LES ZONES DE PROTECTION.....	154
III.1. Introduction.....	154
III.2. Périmètre de protection immédiat .....	154
III.3. Périmètre de protection rapproché .....	154
III.4. Périmètre de protection éloigné .....	155
IV. CONCLUSION .....	155
V. CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE .....	155
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>156</b>

## INTRODUCTION GENERALE

La qualité des ressources en eau au Maroc connaît une dégradation croissante ces dernières décennies sous l'effet de la présence de foyers de pollution engendrés par des activités anthropiques (El Garouani et al., 2004). Il est devenu, de ce fait, nécessaire de mettre en place des mécanismes et des actions visant la protection et la sauvegarde de ces ressources.

En effet, la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau est devenue actuellement une obligation réglementaire (Loi 36-15 relative à l'eau). Cependant, cette délimitation autour des captages s'avère difficile puisqu'elle implique la mise en place d'une politique de développement régional cohérente du point de vue de gestion de l'eau et d'aménagement du territoire.

Au Maroc, les études hydrogéologiques entamées depuis plusieurs décennies par les universitaires ont permis d'avoir une connaissance préliminaire des périmètres de protection des puits et des forages qui en général se développent en milieu poreux (El Mansouri et al., 1999; El Garouani et al., 2004 ; BOUKDIR, 2007) ainsi qu'une étude hydrogéologique antérieure faite dans la zone d'étude (Bouchaou, 1988) a recommandé d'établir les périmètres de protection des sources de l'Atlas de Béni Mellal.

Pour ces raisons, cette étude a pour objectif principal de délimiter les périmètres de protection et de sauvegarde des sources situées entre Ouaoumana et Bzou moyennant une démarche bien appropriée, en appliquant les deux articles 2 et 17 du décret 2-97-657 relatif à la délimitation des zones de protection et des périmètres de sauvegarde et d'interdiction.

Par ailleurs, les périmètres de protection d'une source sont définis généralement à travers des études hydrogéologiques et exigés par une déclaration d'utilité publique. Ils visent à protéger les abords immédiates de la ressource en eau et son bassin d'alimentation, ainsi qu'à interdire les activités qui pourraient nuire à la qualité des eaux captées.

Les sources étudiées sont situées au piémont nord du Haut Atlas de Beni Mellal, entre le centre d'Ouaoumana et celui de Bzou. Il s'agit principalement de quelques dizaines à quelques centaines de sources dont la plus importante est la source d'Ain Asserdoune à Béni Mellal et celle de Tamda à Zaouit Echeikh. Dans le Dir et la montagne, ces sources constituent les principales ressources en eau pour l'alimentation quotidienne des populations autochtones, l'abreuvement de leur cheptel et l'irrigation des cultures.

Le manuscrit relatif à ce travail s'articule, après l'introduction générale, comme suit :

- le chapitre I développera les généralités sur les systèmes karstiques et les périmètres de protection,
- le chapitre II présentera la situation géographique de la zone d'étude dans son contexte physique et humaine, l'étude climatologique et hydrologique des bassins versants des sources,
- le chapitre III portera sur l'étude géologique,
- le chapitre IV abordera le contexte hydrogéologique des aquifères du Haut Atlas de Beni Mellal et le fonctionnement hydrogéologique des sources étudiées.
- le Chapitre V approchera l'étude de la vulnérabilité des sources situées entre Ouaoumana et Bzou,
- le Chapitre VI portera sur la délimitation des périmètres de protection et de sauvegarde des sources situées entre Ouaoumana et Bzou.

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES KARSTIQUES  
ET LES PERIMETRES DE PROTECTION**

## I. INTRODUCTION

Ce premier chapitre sera consacré à une synthèse bibliographique : il comprend le dépouillement d'informations recueillies à partir des thèses, d'articles, de documents, de mémoires et d'études. Cette synthèse servira à la compréhension et l'étude de structure et fonctionnement des systèmes karstiques. Un inventaire des différentes méthodes utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution et la délimitation des périmètres de protection de ces systèmes est également présenté. L'analyse des avantages et des limites de ces approches a guidé notre choix vers les approches les mieux adaptées aux objectifs de notre travail.

## II. KARST

### II.1. Définition

Du point de vue géomorphologique, le karst comporte des formes superficielles et souterraines qui résultent de la dissolution de roches carbonatées (calcaires, dolomies) par l'eau rendue acide par le gaz carbonique de l'air des sols. L'écoulement et le stockage de l'eau souterraine se fait dans les vides créés. Cet ensemble de processus qui transforment une simple formation calcaire ou dolomitique en un massif karstique avec dolines, gouffres, grottes, rivière souterraine et source (figure 1) bien individualisée est appelé karstification (Bakalowisz, 1999).

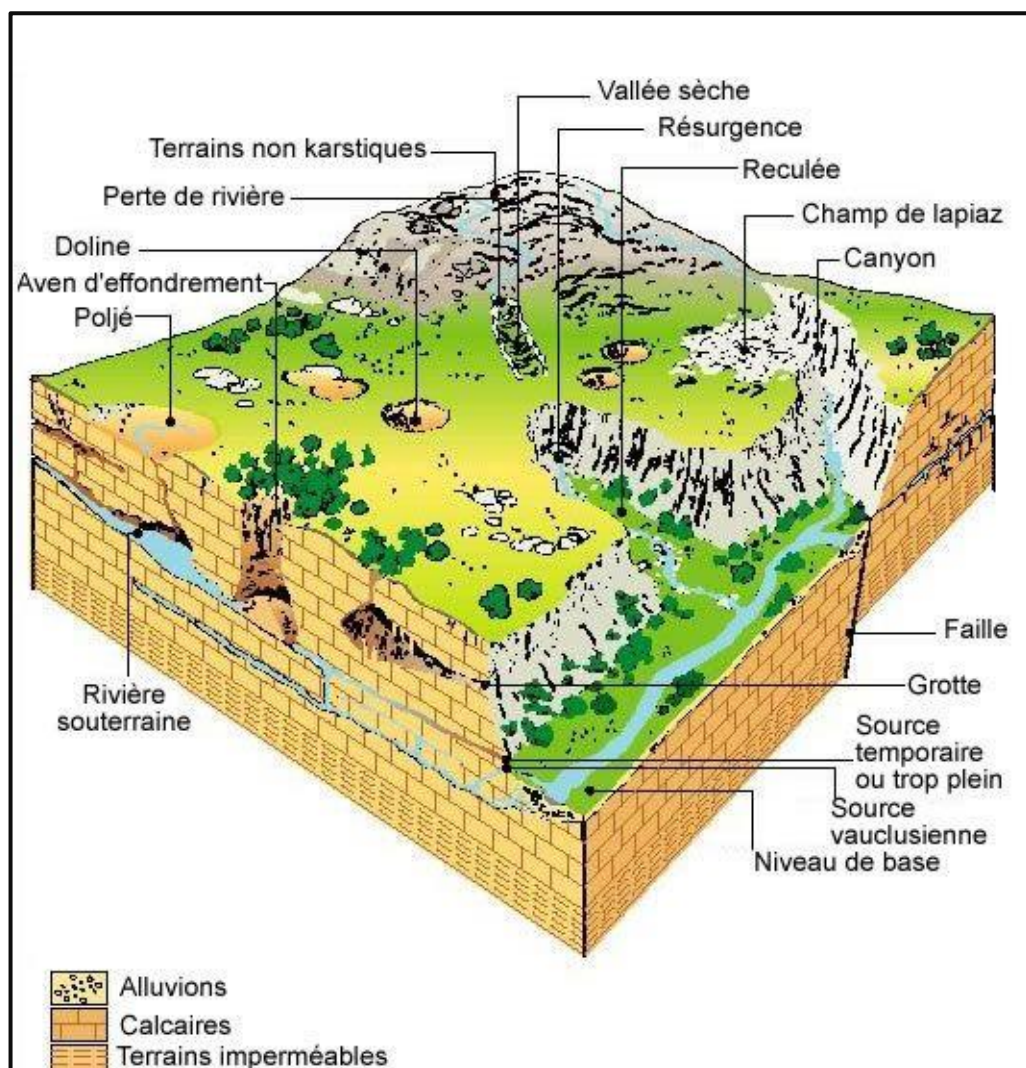


Figure 1 : Paysage karstique synthétique (Bakalowisz, 1999)

Du point de vue hydrogéologique, le karst est un terrain calcaire où le réseau hydrographique de surface s'enfance, partiellement ou totalement, et circule au sein de la masse rocheuse pour ensuite atteindre le drain alimentant les sources (Gilli, 2011). La vision hydrogéologique du karst est très développée dans des pays comme la France, la Suisse et plus récemment l'Espagne et la vision du karst des auteurs anglo-saxons demeure très géomorphologique et spéléologique tout en essayant d'intégrer des éléments hydrogéologiques (Marsaud, 1996).

Comparé aux autres aquifères, les aquifères karstiques présentent les caractéristiques spécifiques suivantes :

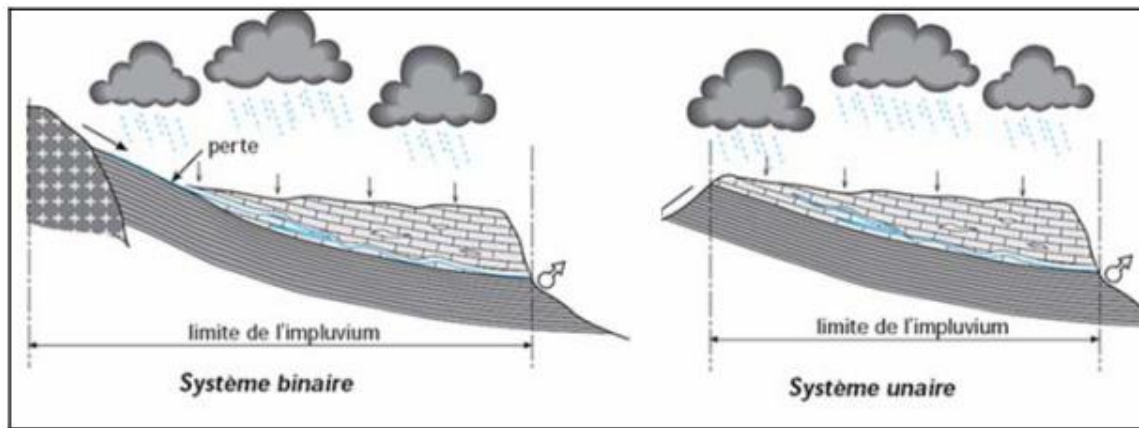
- un réseau de chenaux développé par le processus de karstification qui aboutit à des sources,
- des sources à débit très variable. Selon la saison, le débit naturel de la source du Lez, par exemple, varie de quelques centaines de litres par seconde en étiage à 30 m<sup>3</sup>/s en période de crue (Maréchal et al, 2013),
- des galeries dénoyées accessibles à l'homme. Les dimensions et la forme de ces vides évoluent avec le temps, au point qu'ils sont en partie pénétrables (Bakalowicz, 2018),
- des écoulements souterrains complexes. L'aquifère karstique est caractérisé par une hétérogénéité considérable, tant pour la dimension de ses vides que pour les vitesses d'écoulement de l'eau (Bakalowicz, 2018).

## II.2.Systèmes karstiques

Marsaud (1996) a regroupé les karsts en trois grands types selon que la structure est karstique ou non et que le potentiel hydraulique est fort ou faible :

- type 1 : systèmes non fonctionnels à faible ou fort potentiel et à structure peu karstique. Il s'agit du karst pour lequel le développement de la karstification n'est pas évolué afin que les écoulements soient les considérer comme ceux d'un système fissuré,
- type 2 : systèmes fonctionnels à fort potentiel et structure karstique. Il s'agit des systèmes pour lesquels les vides et les écoulements sont organisés. C'est le cas de tous les karsts fonctionnels polyphasés ou non dans lesquels la structure de drainage est plus ou moins développée,
- type 3 : systèmes non fonctionnels à faible potentiel et structure karstique. Il s'agit des systèmes karstiques déconnectés pour lesquels les vides sont organisés mais les écoulements ne rendent plus compte de cette organisation.

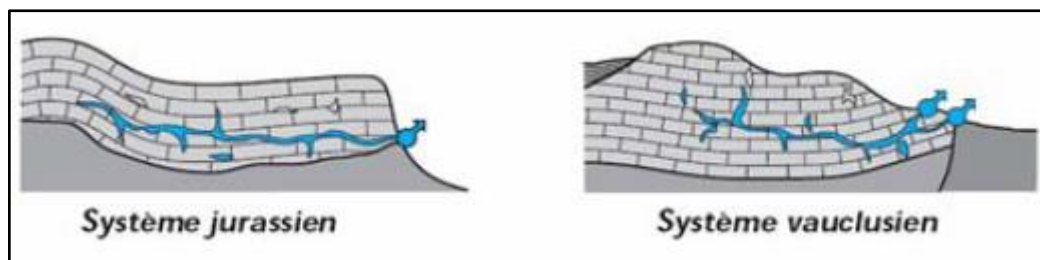
En fonction de la nature de l'impluvium, deux types de karsts ont été distingués (figure 2) : (i) les karsts unaires, pour lesquels l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains calcaires, et (ii) les karsts binaires, qui possèdent dans leur bassin versant des terrains non karstiques siègent de ruissellement et qui concentrent l'infiltration des eaux vers des terrains karstiques (Marsaud, 1996 ; Moussou, 2011 ; Barbel – Perineau, 2013).



**Figure 2** : Illustrations des systèmes karstiques unaires et binaires (Marsaud, 1996)

Une distinction a également été faite en fonction de la position du drain principal (figure3) :

- les karsts vauclusiens, où la karstification se développe en profondeur sous le niveau de base,
- les karsts jurassiens, où le réseau de drainage s'organise à proximité du niveau de l'exutoire.



**Figure 3** : Illustrations d'un système karstique jurassien et vauclusien

(Marsaud, 1996)

La structure interne d'un système karstique s'organise verticalement en deux sous-systèmes (Mangin, 1975; Moussou, 2011 ; Barbel – Perineau, 2013) au sein desquels l'écoulement est structuré de manière différente :

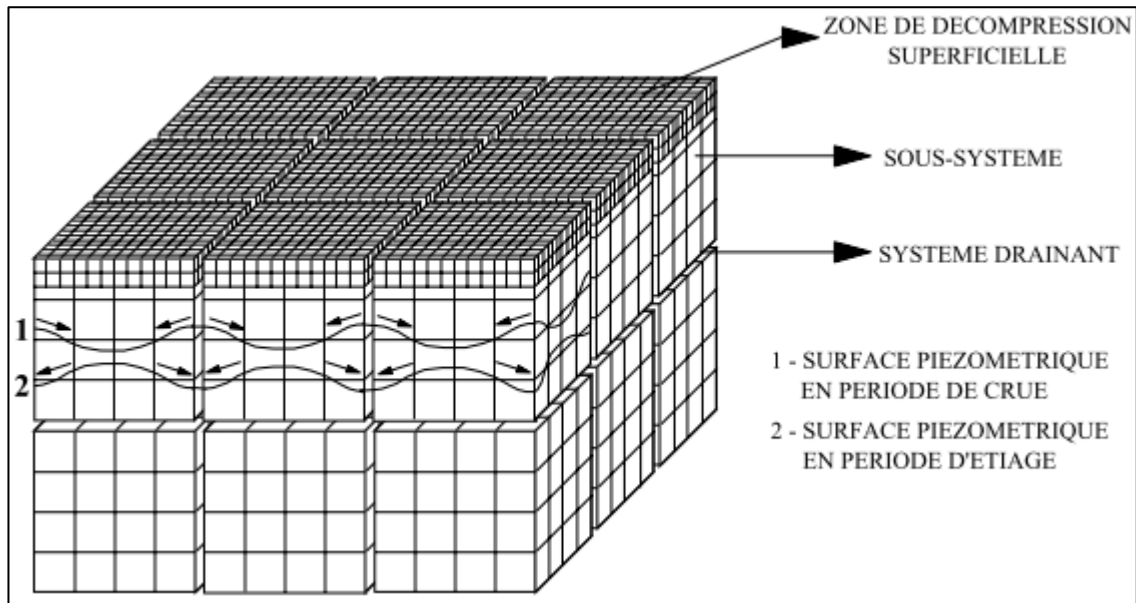
- la zone vadose, qui regroupe le sol, l'épikarst et la zone non saturée,
- la zone saturée ou zone noyée dans laquelle les vides interconnectés sont occupés par l'eau.

### III. DIFFERENTES APPROCHES D'ETUDE DES SYSTEMES KARSTIQUES

#### III.1. Approche structurelle

L'approche structurelle d'un karst est Développée par Drogue entre 1969 et 1971. Le système karstique est représenté par un réseau de chenaux (forte perméabilité) qui est inclut dans un milieu fissuré à faible perméabilité. Le schéma conceptuel de Drogue (figure 4) est assimilé le karst à un aquifère constitué de blocs fissurés séparés par des chenaux assurant le drainage de l'ensemble. Dans ce modèle on retrouve un bloc capacitif à faible drainage et fort volume opposé à un drain transmissif à fort drainage et faible volume.





**Figure 4 :** Approche structurelle des aquifères karstiques (Drogué, 1971)

### III.2. Approche fonctionnelle

Lors de l'étude d'un aquifère karstique, c'est la variation des paramètres au cours du temps qui sera recherchée pour décrire leur mode de fonctionnement (débits des sources) (Marsaud, 1996). Au contraire, la variation spatiale d'un paramètre caractéristique de la structure (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) qui sera recherchée pour l'étude et la caractérisation d'un aquifère poreux.

#### III.2.1. Analyse des débits classés

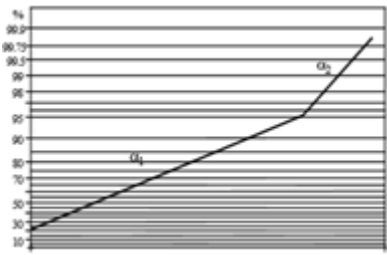
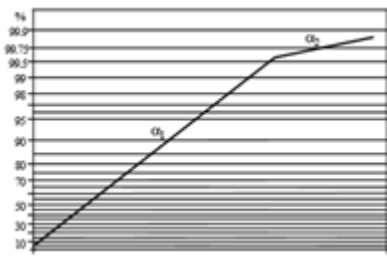
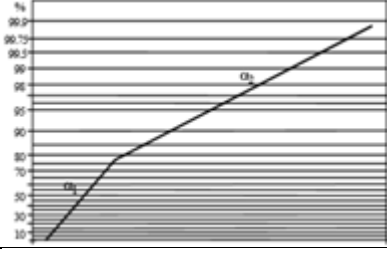
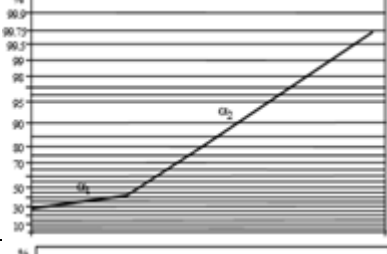
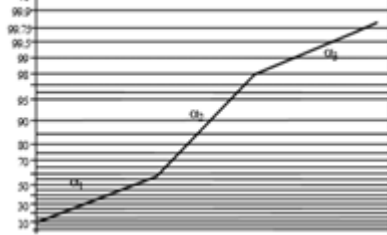
L'analyse des débits classés permet d'identifier des fuites, de mise en fonctionnement d'un trop-plein à partir des changements qu'ils induisent sur l'hydrogramme. La méthode proposée par Mangin en 1971 consiste à ranger les débits par classes afin de mettre en évidence les valeurs de débits anormalement représentées. Ensuite la courbe obtenue est représentée par une loi statistique, dérivée de la loi de Laplace.

La méthode consiste à décrire la courbe des débits classés et à identifier les anomalies qui affectent la droite représentative. L'information obtenue sur le fonctionnement du système est différente selon la position des ruptures et leurs pentes respectives (Mangin, 1971 ; Marsaud, 1996).

L'observation sur la courbe de plusieurs segments de droites traduit l'existence de plusieurs lois d'écoulement. Ces changements de loi d'écoulement peuvent avoir des origines diverses liées soit à des modifications hydrodynamiques internes au système karstique, comme le stockage-déstockage des réserves ou l'entrée en fonctionnement de trop pleins, soit à des interrelations avec un système voisin qui se traduisent par des apports ou des fuites (Mangin, 1971).

Dans sa thèse, Marsaud (1996) détaille les différentes interprétations possibles en fonction de ces variations. Les anomalies de fonctionnement correspondent aux ruptures de pentes observées (tableau 1).

**Tableau 1 : Interprétation des ruptures de pente dans courbes de débits classés**  
(Mangin, 1975 ; Marsaud, 1996)

Pente des droites	Position de la rupture	Courbe illustrative	Interprétation
$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en fonctionnement de trop-plein</li> <li>- Fuites vers un autre système</li> <li>- Stockage momentané</li> <li>- Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes-eaux</li> </ul>
$\alpha_2 < \alpha_1$			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apports en provenance d'un autre système</li> <li>- La station de jaugeage prend compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système</li> </ul>
$\alpha_2 > \alpha_1$	Faibles pourcentages		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Constitution d'une réserve</li> </ul>
$\alpha_2 < \alpha_1$			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apport d'une réserve issue d'un cycle antérieur</li> </ul>
$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement</li> </ul>

### III.2.2. Analyse des courbes de récession

Étant donné qu'en période d'étiage, les débits des sources sont uniquement assurés par la vidange des réserves de leurs aquifères, cet apport peut être analysé à partir du tarissement ce qui permet d'approcher le rythme de vidange des réserves aquifères.

Une source en régime non influencé (notamment par l'absence de précipitations) est alimentée par les réserves régulatrices des couches aquifères. La courbe de tarissement exprime la loi de vidange de la couche aquifère.

La courbe de tarissement est la fin de la courbe de décroissance de l'hydrogramme de crue. Elle est construite en portant en ordonnée les valeurs des débits observés (m<sup>3</sup>/s) et en abscisse le temps en jour.

La formule de base de la courbe de tarissement est la loi de Maillet (Maillet, 1905 ; El-Ouafi, 1993; Marsaud, 1996 ; Savané et al., 2001; Saley, 2003 ; Amoussou, 2010 ; Fiorillo, 2014) admettant la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps et qui permet de calculer le débit  $Q_t$  à l'instant  $t$ , en fonction du débit  $Q_0$  au début de tarissement :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

Où  $Q_0$  est le débit initial de la période de tarissement,  
 $Q_t$  le débit après un temps  $t$ , et  $\alpha$  le coefficient de tarissement.

Cette loi permet ainsi de déterminer le volume d'eau  $V$ , exprimé en m<sup>3</sup>, des réserves emmagasinées par l'horizon aquifère alimentant le tarissement à l'instant  $t_0$ , comme suit :

$$V = Q_0 / \alpha \quad (2)$$

La résolution graphique de l'équation 1 permet de calculer le coefficient de tarissement  $\alpha$ . Ainsi, un graphique est construit en portant en ordonnée les valeurs des débits observés (en échelle logarithmique) et en abscisse le temps en jour.

Pour calculer le coefficient  $\alpha$ , on détermine par le graphique le temps  $t$  en jours pendant lequel s'est écoulé  $Q_t$  en m<sup>3</sup>/s, et on introduit cette valeur numérique dans une formule logarithmique suivante :

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - (0,4343 \alpha) t \quad (3)$$

Cette méthode permet de calculer avec précision le débit  $Q_0$ , donc le point d'origine de la courbe de tarissement de l'hydrogramme.

La surface du bassin d'alimentation du système est déterminée à l'aide du rapport suivant :

$$S_{\text{alimentation}} = V / P_{\text{eff}} \quad (4)$$

Les pluies efficaces sont déterminées généralement au pas de temps mensuel selon la formule suivante :

$$P_{\text{eff}} = P - \text{ETR} \quad (5)$$

Avec  $P$  : Précipitation et ETR : Evapotranspiration réelle.

A ceci s'ajoute le fait que les systèmes karstiques sont rarement linéaires (un système est dit linéaire, si à une combinaison linéaire des signaux d'entrée correspond la même combinaison linéaire des signaux de sortie) et invariant (un système est dit invariant, si la réponse du système à un signal d'entrée n'est pas affectée par une translation dans le temps). Pour ces raisons, l'étude des courbes de récession est approximative mais néanmoins utile (Maqsoud, 1996).

### III.3. Approche Hydrogéochimique

L'analyse de l'évolution de la chimie des eaux émergeant des sources correspond à l'une des composantes de l'étude des systèmes karstiques (Sebastien, 2015) et à sa caractérisation (Marsaud, 1996 ; Dörfliger et al., 2010). L'analyse par les méthodes hydrochimiques peut alors porter sur divers aspects pour caractériser le système karstique :

- le degré d'organisation des écoulements,
- la surface d'alimentation et les formations traversées par les écoulements (faciès chimique de l'eau),
- la vulnérabilité du système karstique vis-à-vis des pollutions.

L'hydrogéochemie est aussi l'outil permettant d'identifier l'origine et l'extension de la contamination des eaux souterraines (Dörfliger et al., 2010). De ce fait, l'hydrogéochemie permet de mener de front l'étude du fonctionnement des systèmes karstiques et des objectifs de qualité de la ressource.

### **III.3.1. Analyses physico-chimiques et biologiques**

La composition chimique de l'eau d'un aquifère karstique est liée à de nombreux facteurs comme l'occupation du sol, les processus de recharge (diffuse ou concentrée), les conditions climatiques, la lithologie du réservoir, la zone d'infiltration et les conditions d'écoulement (dans une matrice micro-fracturée, des cavités ou conduits karstiques). Celle-ci varie aussi pour un même système selon des critères spatiaux (selon le lieu de prélèvement au sein du système karstique), ainsi que selon des critères temporels (Dörfliger et al., 2010).

L'interprétation des analyses physico-chimiques et biologiques de l'eau nécessite par ailleurs d'avoir une connaissance préalable de l'origine des différents marqueurs et des processus qui peuvent affecter leur concentration au cours de leur trajet souterrain.

#### **III.3.1.1. Marqueurs d'origine météorique**

L'eau de pluie n'est pas de l'eau pure. Sa composition chimique peut être influencée par des facteurs naturels (aérosols marins riches en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) et anthropiques (acidité, pesticides, composants organiques...).

Du fait de leur origine météorique, les chlorures, le sodium, le potassium et les sulfates ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) présentent généralement des concentrations inférieures à 10 mg/l dans les eaux des milieux karstiques qui ne sont pas influencés par une intrusion d'eau marine ou des roches évaporitiques (Dörfliger et al., 2010).

#### **III.3.1.2. Marqueurs d'origine géologique**

Dans les milieux karstiques (non influencés par une intrusion marine), les concentrations en calcium, magnésium et bicarbonate ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) des eaux sont quasi exclusivement liées au système carbonaté.

Sur le trajet souterrain des eaux, la présence de minéraux évaporitiques (halite, gypse, anhydrite) conduit à augmenter très significativement les concentrations en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ces minéraux sont collectifs dans les formations triasiques. Dans les eaux karstiques, les variations de concentration en  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  peuvent être attribuées à des interactions avec la formation argileuse par des échanges des cations (Dörfliger et al., 2010). Les minéraux argileux peuvent aussi constituer une source secondaire de  $\text{SO}_4^{2-}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$ .

#### **III.3.1.3. Marqueurs d'origine anthropique**

Ces marqueurs sont issus des activités humaines : pollutions domestiques, agricoles et industrielles et sont injectés dans le système aquifère. Ces trois grandes sources de pollution sont responsables de l'introduction des polluants dans l'eau et le milieu naturel.

Les pollutions liées à l'agriculture ont pour origines principales : l'évolution des systèmes et types de cultures, l'utilisation massive des engrais et produits phytosanitaires en grandes cultures, mais aussi plus marginalement, l'épandage des effluents d'élevage.

Les fertilisants minéraux constituent une source des éléments nutritifs tel que  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , P,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , B<sup>-</sup> tandis que les eaux usées domestiques constituent l'origine de nutriments tel que  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  et de  $\text{Cl}^-$ . Les métaux sont des marqueurs liés au salage des routes et des activités industrielles et minières.

### III.3.1.4. Marqueurs microbiologiques

De nombreux microorganismes, virus, bactéries et protozoaires, voire des champignons et des algues sont présents dans l'eau. Ces organismes diffusent dans l'environnement hydrique par l'intermédiaire de souillures fécales humaines ou animales, qui proviennent de fosses septiques, de décharges, d'épandages des eaux usées, de l'élevage, de matières fermentées, de cimetières, du rejet d'eaux superficielles polluées ou de fuites de canalisations ou d'égouts.

### III.3.2. Analyse en composante principale

L'ACP est l'une des méthodes d'analyse des données quantitatives qui a pour but de représenter, sous forme de graphiques, les données contenues dans des tableaux formés d'individus et de variables, de manière à en résumer l'information (Mudry J., 1991 ; Melloul A. Et Collin M., 1992 ; Ratha D.S. et al., 1994 ; Ribeiro L. et Macedo M.E., 1995 ; Oosterbaan J.M., 2000 ; Powers S.E. et al., 1997 et Brown C.E., 1998 ; BOUKDIR, 2007 ; Baccini, 2010).

Les variables quantitatives peuvent être continues, entières ou polytomiques ordonnées. Les variables continues sont des variables de mensurations comme le niveau piézométrique, la concentration en un élément chimique et la profondeur de la nappe (BOUKDIR, 2007). Les variables entières (ou discrètes) sont le plus souvent des variables de comptage : le nombre de plantes par parcelle, le nombre de plants versés,...etc.

L'idée de l'ACP est de chercher des projections du nuage de points sur des axes, de telle sorte que ces projections s'accompagnent d'un minimum de perte d'information. C'est-à-dire que les distances entre individus (facilement calculables pour toute paire d'individus à partir du tableau de données) doivent être restituées le mieux possible.

Mais, il faut avant tout choisir la définition d'une distance entre les individus. On offre le plus souvent deux options :

- le centrage et la réduction (ACP normée) qui donne le même poids à chaque variable ;
- le centrage (ACP non normée) qui donne à chaque variable un poids égal à sa variance.

Ainsi, l'ACP consiste à transformer les p variables quantitatives initiales, plus ou moins corrélées, en n nouvelles variables quantitatives, non corrélées entre elles, appelées composantes principales. Les résultats de l'ACP se présentent de la manière suivante :

- calcul de statistiques élémentaires : moyenne et écart-type de chaque variable, ainsi que la matrice des corrélations ;
- calcul des composantes principales : valeurs propres et vecteurs propres ;
- étude des variables au moyen des cercles de corrélation ;
- étude des individus à partir des coordonnées sur les axes principaux.

On peut retenir les règles d'interprétation suivantes :

- on ne peut interpréter que les variables proches du cercle, donc bien représentées sur le plan considéré ;

- ce sont les directions des variables par rapport aux axes qui sont à interpréter,
- deux variables dont les directions forment un angle faible sont corrélées positivement ;
- deux variables qui sont absolument opposées sont corrélées négativement ;
- deux variables dont les directions sont perpendiculaires sont non corrélées linéairement.

L'étude des individus est faite par les représentations graphiques dans les plans principaux choisis. On analyse la répartition des individus, en se demandant quels sont ceux qui se ressemblent, et quels sont ceux qui diffèrent.

L'ACP a été employé de nombreuses fois pour décrire la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques (Bakalowicz, 1979 ; Mudry et Blavoux, 1986 ; Mudry, 1991 ; Marchet, 1991 ; Bakalowicz, 1994 ; Maqoud, 1996 ; Plagnes, 1997 ; Ben Othman et al., 1997 ; Reisenhofer et al., 1998 ; Grasso, 1998 ; Stetzenbach et al., 1999 ; Stetzenbach et al., 2001 ; Fournier, 2003 ; Karimi et al. 2005, ; Valdes, 2005 ; Fournier et al. 2007, Mudarra et Andreo 2011, Mudarra et al. 2011, Dassi 2011).

#### **IV. DELIMITATION DE L'AIRE D'ALIMENTATION**

Pour délimiter les périmètres de protection des captages, il faut notamment tenir compte de l'aire d'alimentation, du bassin d'alimentation, de la zone d'influence et de la zone d'appel du captage pour les captages exploités par pompage et de l'aire d'alimentation pour les captages exploités sans pompage notamment des sources dans la plus part des cas (Marchal, 2007).

La délimitation d'une aire d'alimentation des captages d'eau karstiques est effectuée :

- à partir de la prise en considération de la structure géologique ;
- par la mise en œuvre d'essais de traçages artificiels pour prouver l'existence de connexions hydrauliques pour différentes conditions hydrologiques ;
- à partir de la délimitation du bassin versant des éventuels écoulements de surface alimentant les pertes (Vernoux et al., 2014).

La connaissance d'un aquifère karstique peut également être appréhendées par la méthode des analyses corrélatoires et spectrales des débits et des courbes de récession (Mangin, 1984).

Lorsque le captage est alimenté par un aquifère à porosité de fractures ou karstique, l'anisotropie de la conductivité hydraulique ne permet généralement pas de comprendre les écoulements par la méthode graphique. La portion de la nappe qui alimente le captage sera donc généralement déterminé sur la base des structures du massif. La structure de l'aquifère est déterminée par des études géologique et géomorphologique détaillées.

#### **V. ASPECTS FONDAMENTAUX DE LA VULNERABILITE ET DES PERIMETRES DE PROTECTION ET METHODOLOGIE**

##### **V.1. Introduction**

Le concept de la vulnérabilité des eaux souterraines a été introduit par Margat à la fin des années 60 (Margat, 1968). La première carte de vulnérabilité a été publiée en 1970 par Albinet pour le territoire français (Albinet, 1970). Dès lors, de nombreuses méthodes pour l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées. La vulnérabilité des eaux souterraines est un domaine particulièrement vaste et il est impossible de dresser un état des connaissances exhaustif sur cette thématique (Thüler, 2014). C'est pourquoi on s'intéresse uniquement à les méthodes principales adaptées aux aquifères karstiques.

Après la délimitation des systèmes aquifères, l'estimation de la vulnérabilité est essentielle à la définition des conditions de protection des captages d'eau (Livet, 2004).

## V.2. Vulnérabilité

Afin de comprendre la notion de vulnérabilité, il apparaît important de rappeler quelques définitions :

**Risque de pollution** résulte du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux :  
Risque = Aléa x Enjeux.

**Aléa** suppose une approche probabiliste, il s'agit de l'application d'une action polluante par exemple sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable du milieu naturel au regard des eaux souterraines dans le cadre de cette étude.

La vulnérabilité est représentée par la capacité donnée à l'eau située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Le terme vulnérabilité a été utilisé dans les années soixante en France, introduit comme terme scientifique dans la littérature spécifique par Albinet et Margat en 1970. Dans la littérature, ils ont été distingué deux types de vulnérabilité (Daly et al. 2002), la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al., 2002) :

- **la vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour figurer les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;
- **la vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

Les enjeux représentent la cible qui ne doit pas être atteinte par les effets du stress sur le milieu naturel.

Pour qualifier cette vulnérabilité intrinsèque telle que décrite ci-dessus, un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent (nature géologique, nature d'aquifère, épaisseur du sol).

L'exploitation de ces critères est souvent normalisée au travers de différentes méthodologies d'analyse de la vulnérabilité des eaux.

Les méthodes cartographiques d'estimation de la vulnérabilité peuvent s'articuler selon deux axes principaux (Ducommun, 2010) :

- Selon les types de concepts et techniques : méthodes paramétriques (indices), statistiques et par modélisation physique.
- Selon le type de milieu hydrogéologique (pour les méthodes paramétriques particulièrement) : poreux, fissuré ou karstique.

### V.2.1. Présentation des méthodes de cartographie de la vulnérabilité en milieux karstiques

De nombreuses méthodes pour déterminer la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde entier. Les principales méthodes de cartographie de la vulnérabilité dans les environnements karstiques ont été plus largement utilisées jusqu'à présent : EPIK (Dörfli et Zwahlen, 1998; Dörfli et al., 1999), REKS (Malik et Svasta, 1999) ; RISKE

(Pételet-Giraud et al., 2000) ; PaPRIKA (Dörfliger et al., 2009a, 2009b) ; RISKE 2 (Plagnes et al., 2005) ; PI (Goldscheider, 2005) ; l'approche de Slovène (Ravbar et Goldscheider, 2007) ; COP et méthode COP + K (Vias et al., 2002 ; Andreo et al., 2009),.

**EPIK** : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques en Suisse (Dörfliger, 1996 ; Dörfliger et Zwahlen, 1998). Elle est basée sur quatre critères : Epikarst, Couverture protectrice : sol, Conditions d'infiltration et Développement du réseau karstique. Cette méthode a été appliquée aux plusieurs sites hors de Suisse (Gogu et Dassargues, 2001 ; Barrocu et al., 2006 ; Awawdeh et al., 2008 ; Hamdan et al., 2016 ; El Bardai et al., 2006, 2015 ; ALILI et al., 2018).

**REKS** : cette méthode basée sur quatre paramètres : Roche, Epikarst, Développement du réseau karstique et Sol. La méthode d'estimation de vulnérabilité REKS introduite ne nécessite aucune pondération des paramètres. Il ne s'agit donc pas d'une méthode PCSM (modèle de système de comptage de points), mais seulement d'une méthode de système de notation (Vrba-Zaporozec, 1994). Les évaluations de paramètres individuels ont été comptées pour chaque zone unique et les totaux ont été utilisés pour l'estimation finale de la vulnérabilité. Les zones avec des totaux de points <5 points ont été estimées très vulnérables, de 5 à 6 points à faible vulnérabilité, de 7 à 8 points de moyenne, de 9 à 10 points de hauteur et de > 10 très grande vulnérabilité.

**RISKE** : Cette méthode se développe de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Pételet-Giraud et al., 2000 ; Kattaa et al., 2010).

**PaPRIKA** : est une méthode de cartographie multicritères de la vulnérabilité des aires contribuant à la recharge de l'aquifère, dont l'acronyme signifie la protection vis-à-vis de l'infiltration, la nature de la roche du réservoir aquifère, les conditions d'infiltrations et le degré de karstification (Dörfliger et al., 2009a, 2009b ; Kavouri et al., 2011 ; Farfa'n-Gon- za'lez et Plagnes, 2013).

**RISKE 2** : Cette méthode est une évolution de RISKE. Elle cherche à établir l'oscillation des modalités d'infiltration vers la ressource et la source, sans prendre en compte l'existence d'éventuels polluants (Pranville et al., 2008).

**COP** : Cette méthode a été développée dans le cadre du programme COST Action 620 de l'Union Européenne (Vias et al., 2002, 2006). Elle est basée sur trois paramètres : concentration des flux, couches supérieures et précipitations.

**L'approche de Slovène** : a été développée et appliquée sur de nombreux sites en Slovène et Croatie (Ravbar et Goldscheider 2007,2009 ; Ravbar et Kovacic., 2015). Elle est basée sur quatre paramètres : concentration des flux, couches supérieures, précipitations et zone saturé .

De plus amples informations sur la classification de ces méthodes, les avantages et les inconvénients de chaque concept sont détaillées dans les thèses de (Thuler, 2010 ; Romain Ducommun, 2010 ; Nataša Ravbar, 2007) ainsi que dans le rapport final de l'action COST-620 (Zwahlen, 2003).

## V.2.2. Choix de la méthode

Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre est conditionné par des paramètres principaux tels que la nature de l'aquifère alimentant les sources, les objectifs à atteindre et les ressources des données disponibles. Pour ces raisons, notre choix s'est porté sur la méthode EPIK développée par Dörfliger en 1996. Cette méthode a l'avantage d'être relativement simple à utiliser dans le cadre d'un système d'information géographique. De plus, c'est la première méthode permettant de



cartographier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques et de délimiter des périmètres de protection.

Une fois la méthode choisie, la cartographie de la vulnérabilité suit cinq étapes essentielles après avoir délimité la zone d'alimentation des sources karstiques (J.F. Vernoux et al., 2007) : (i) Cartographie de chaque paramètre en fonction des données disponibles. Chaque paramètre est subdivisé en classes avec un indice allant de 0 à 4. (ii) Transposition des cartes ainsi obtenues : le maillage est défini en fonction du pas du modèle numérique de terrain de la zone d'étude et des données disponibles. (iii) Calcul de l'indice de vulnérabilité global  $V_g$  dans chaque cellule de la grille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré (qui reflète l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres en ce qui concerne la vulnérabilité). Les valeurs obtenues pour les cinq paramètres sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de vulnérabilité global  $I_g$ . Cette étape consiste à superposer les cinq cartes des paramètres indexés pour obtenir une représentation cartographique de la distribution de l'indice  $V_g$ . (iv) Étape de régionalisation : la valeur de l'indice  $V_g$  est ensuite subdivisée en cinq classes de vulnérabilité reflétant la sensibilité relative de l'environnement aux influences naturelles et anthropiques. (v) Étape de validation : la carte de vulnérabilité obtenue est comparée aux cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y a pas d'incohérences évidentes et que certains aspects qui peuvent être localement essentiels ne sont pas minimisés ou même masqués.

### **V.2.3. Description de la méthode EPIK**

#### **a. Epikarst (E)**

E1 (très fortement vulnérable) à E3 (faiblement vulnérable). Le critère E fait intervenir l'influence des morphologies karstiques sur la protection de l'aquifère. Les morphologies karstiques telles que les igues (gouffres), les dolines (dépressions fermées)...etc, auront un indice de très fortement vulnérable E1. L'indice E2 fait intervenir les zones intermédiaires entre les champs de dolines, les canyons et les vallées sèches. L'indice E3 caractérisera le reste de la zone.

Dans le secteur d'étude, l'évaluation de la présence et du développement de l'Epikarst a été menée à l'aide d'observations de terrain (modèle karstique, affleurements) et de l'examen des images satellitaires de Google Earth et des cartes topographiques.

#### **b. Couverture protectrice(P)**

P1 à P4 : Le critère P fait intervenir la protection de la couverture pédologique et des formations géologiques de sols (tableau ci-dessous). Le paramètre pris en compte ici est le moins coûteux et le plus représentatif de la protection d'un sol à déterminer, l'épaisseur. Les auteurs font la distinction entre un sol couvrant directement l'aquifère rocheux (cas A) et un autre, associé à des formations géologiques de sols (cas B). Ces formations géologiques de sols constituent généralement une épaisseur de faible conductivité hydraulique.

L'évaluation du critère P dans la zone d'étude est basée principalement sur l'épaisseur des sols déterminés à l'aide des fiches techniques des forages, les affleurements dans les talons des routes, l'analyse des images satellitaires et la nature des formations géologiques à l'aide des cartes géologiques.

#### **c. Conditions d'infiltration(I)**

I1 à I4 : le critère I cherche à distinguer les zones d'infiltration diffuse et d'infiltration concentrée. La méthode donne les zones de vulnérabilité très forte à forte pour les zones alimentant les points d'infiltration directe et concentré, et de vulnérabilité moyennes à faible en dehors de ces zones.

Conjointement à la relation de chaque zone par rapport aux positions des pertes, deux autres paramètres sont pris en compte dans la classification du critère I. La topographie avec des classes de pentes (0-10 %/10-25 %/> 25 %), et les occupations du sol (terres cultivées, prairies et pâturages).

Ce critère a été évalué à l'aide du Modèle Numérique de terrain (MNT), des cartes topographiques, cartes géologiques et images satellitaires.

#### **d. Réseau karstique(K)**

K1 à K3 : Le critère K fait intervenir le développement de l'aquifère karstique en profondeur. L'indice K1 définit un karst bien développé, l'indice K2 indique un karst peu développé et l'indice K3 un aquifère fissuré ou poreux.

Ce paramètre a été évalué à partir de la nature des formations géologiques et la présence des formes karstiques.

#### **e. Synthèse de la méthode EPIK**

Le tableau suivant récapitule les quatre critères de la méthode EPIK.

**Tableau 2 : Critères de la méthode EPIK (Nathalie Dörfliger, 1998)**

Statut	Code	Note	Description	
Morphologie karstique observée (en relation avec l'épikarst)	E1	1	Gouffre, aven, ponor, embut, doline, lapiez, relief ruiniforme, cuesta	
	E2	3	Zones intermédiaires situées dans les alignements de dolines ; ouvalas, vallées sèches, canyons, poljés	
	E3	4	Le reste du bassin d'alimentation	
Absence de morphologie karstique			A. Sol reposant directement sur les formations calcaires ou sur des formations détritiques de très grande conductivité hydraulique	B. Sol reposant sur > 20 cm de formations géologiques de faible conductivité hydraulique
Absence de couverture Protectrice	P1	1	0-20 cm de sol	-
	P2	2	20 - 100 cm de sol	20 - 100 cm de sol et de formations de faible conductivité hydraulique
	P3	3	> 1 m de sol	> 1 m de sol et de formations de faible conductivité hydraulique
	P4	4	-	formations de très faible conductivité hydraulique d'épaisseur > 8m, ou d'épaisseur > 6 m avec > 1 m de sol (vérification ponctuelle nécessaire)
Couverture protectrice importante				
Infiltration concentrée	I1	1	Perte pérenne ou temporaire-lits et berge de cours d'eau pérenne ou temporaire alimentant une perte-écoulement superficiel s'infiltrant-secteurs du bassin versant d'un cours d'eau comprenant des systèmes de drainage artificiel	
	I2	2	Secteurs du bassin versant d'un cours d'eau non drainés artificiellement et dont la pente est supérieure à 10% pour les surfaces cultivées et supérieure à 25 % pour les prairies et les pâturages	
	I3	3	Secteurs du bassin versant d'un cours d'eau dont la pente est inférieure à 10% pour les surfaces cultivées et inférieure à 25 % pour les prairies et les pâturages	
	I4	4	Le reste du bassin d'alimentation	
Infiltration diffuse				
Réseau karstique bien développé	K1	1	Réseau karstique bien développé, à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés entre eux	
Réseau karstique mal développé	K2	2	Réseau karstique mal développé, à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure	
Aquifère mixte ou fissuré	K3	3	Exutoire en milieu poreux avec un effet protecteur possible - aquifère fissuré non karstique	

#### f. Calcul du facteur de protection F

Le calcul du facteur de protection **F** a été effectué selon la formule suivante (Dörfliger et Zwahlen, 1998 ; El Bardai et al., 2006 ; ALILI et al., 2018):

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \quad (6)$$

Les indices  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  : coefficients de pondération de chacun des critères et  $E_i$ ,  $P_j$ ,  $I_k$ ,  $K_l$  représente la valeur de chacun des critères indexés.

Dans le tableau 3, nous avons reporté les coefficients de pondérations affectées.

**Tableau 3** : Coefficients de pondération pour la méthode EPIK

<b>E</b>	<b>P</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
3	1	3	2

#### **V.2.4. Validation des méthodes de vulnérabilité**

Les tests de traçage peuvent être utilisés pour valider une évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, car ils permettent d'observer le temps de transit et le déclin de la concentration d'un contaminant potentiel du point d'injection (origine) à un point d'échantillonnage (cible). Les traceurs conservateurs peuvent être utilisés pour valider la vulnérabilité intrinsèque et les traceurs réactifs permettent de valider une vulnérabilité spécifique (Andreo et al., 2006).

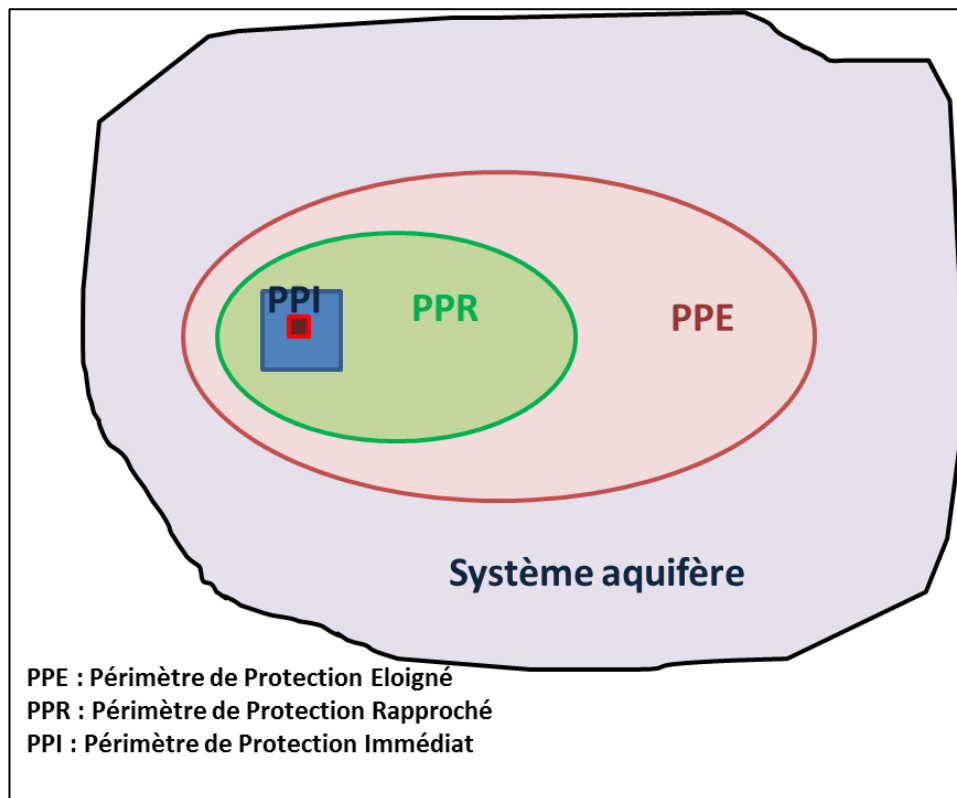
Les tests de traçage ne permettent la validation que sur certains points, tandis que les grandes surfaces ne peuvent pas être validées avec cette méthode (Goldscheider et al., 2001, Goldscheider, 2004b ; Marín et al., 2015). Les hydrogrammes de sources et les traceurs naturels peuvent également être utilisés pour valider une évaluation de la vulnérabilité (Andreo et al., 2006). L'analyse bactériologique, le bilan hydrique et les simulations numérique et les études analogues ont été également utilisés (Daly et al., 2002; Gogu et al., 2003; Neukum et al., 2008).

### **VI. Périmètres de protection et de sauvegarde**

#### **VI.1. Présentation des périmètres de protection**

Les sources d'eau destinées à la consommation humaine nécessitent l'établissement et la mise en place des périmètres de protection (figure 5). Ces périmètres doivent reposer sur une définition hydrogéologique précise de la ressource, une évaluation de la vulnérabilité et risques de pollution. Pour protéger leurs captages, la majorité des pays adopte trois périmètres autour des captages (Lallemand-Barrès et Roux, 1999) :

- Un périmètre immédiat qui est destiné à interdire l'accès aux installations de pompage. Il doit être clôturé et appartenir en pleine propriété à l'exploitant.
- Un périmètre rapproché qui vise à protéger la ressource en eau contre toute source de pollution. Il implique l'acquisition de servitude destinés à interdire ou réglementer les activités susceptibles d'entraîner une pollution de l'eau.
- Un périmètre éloigné facultatif, dans lequel les installations et les activités sont réglementés.



**Figure 5 :** Echelles de protection des ressources en eau souterraines

## VI.2. Aspect législatif

La notion de périmètre de protection a été définie pour la première fois dans la loi française (15 février 1902 relative à la protection de la santé publique). La législation marocaine en matière de protection des eaux –loi 36/15 –Décret N° 2-97-657 du 4 février 1998 relatif à la délimitation des zones de protection et des périmètres de sauvegarde et d'interdiction – exige, dans l'article 50, la délimitation des périmètres de protections autour des captages d'alimentation publique tels que sources, puits, forages et impluviums.

Les zones de protections sont constituées d'une zone immédiate, intégré au domaine public hydraulique et, éventuellement, d'une zone rapprochée et d'une zone éloignée qui ne sont soumises qu'à des servitudes (Article 2.c).

Les zones de protection immédiates visées à l'article 2, paragraphe c de la loi susvisée n° 10/95 sont délimitées conformément aux dispositions du décret relatif à la délimitation du domaine public hydraulique, à la correction des cours d'eau et à l'extraction des matériaux.

L'établissement des zones rapprochées ou éloignées est fait sur le vu d'une étude qui doit comprendre : un rapport hydrologique, un rapport hydrogéologique, un rapport d'évaluation de l'état quantitatif et qualitatif de la ressource, de sa vulnérabilité vis à vis des dangers de pollution ou de dégradation et, éventuellement, des risques encourus par les ouvrages (décret n° 2-97-657 du 4 février 1998).

### ➤ Activités interdites ou réglementés

Dans l'article 11, Le décret n° 2-97-657 du 4 février 1998 peut interdire ou réglementer les activités suivantes en totalité ou en partie :

- l'installation des dépôts de déchets solides d'origine urbaine ou industrielle susceptibles de nuire à la bonne conservation des eaux ;

- l'installation des dépôts ou réservoirs de liquides chimiques, d'hydrocarbures ou d'eaux usées ;
- le transport de produits ou matières nuisibles pour l'eau ;
- l'épandage de fumier, engrais chimiques ainsi que le pacage des animaux ;
- la construction ou la réfection d'immeubles superficiels ou souterrains ;
- les activités sportives et nautiques, en particulier sur les eaux et les abords des lacs et retenues de barrages dont les eaux sont utilisées pour l'alimentation des populations ;
- l'établissement d'étables ;
- la création de cimetières ;
- l'utilisation des produits chimiques en agriculture ;
- la création de nouvelles voies de communication ou de nouvelles unités industrielles ;
- les activités forestières polluantes ;
- l'utilisation ou le dépôt de produits radioactifs.

### ➤ **Périmètres de sauvegarde et d'interdiction**

Des périmètres dits de sauvegarde peuvent être délimités dans les zones où le degré d'exploitation des eaux souterraines est susceptible de mettre en danger les ressources en eau existantes. En cas de nécessité, des périmètres d'interdiction peuvent être délimités, dans les zones où le niveau des nappes ou la qualité des eaux sont déclarés en danger de surexploitation ou de dégradation (Articles 111 et 112 de la loi 36/15).

### **VI.3. Approches de délimitation des périmètres de protection**

Les différentes approches ont été employées pour délimiter les périmètres de protection sont fondées sur la distance, le rabattement de la nappe, le temps de transport d'un contaminant jusqu'à la ressource en eau (Biaggi et al., 2012), le temps d'atténuation nécessaire pour réduire la quantité de polluant, la vulnérabilité (Dörfliger et zwahlen, 1998) et les délimitations hydrogéologiques (piézométrie). Ainsi que selon les pays, et selon les quantités de données disponibles, la délimitation des zones se fait soit sur des critères parfois fixés arbitrairement soit sur des approches plus complexes avec des calculs et des modélisations (Bussard, 2005).

#### **VI.3.1. Périmètre de protection immédiat (PPI)**

Le périmètre de protection immédiat vise à protéger le captage lui-même et ses équipements (bâtiments, pompe, installation électrique, appareils de contrôle et de traitement) ainsi que leur environnement immédiat de toutes impuretés et contaminations. Pour la zone de protection immédiate, il a été proposé au Maroc et dans le monde une distance de 10m à 20m autour des captages dans un milieu poreux et 30m à 40m autour des captages dans un milieu karstique (ONEP-GTZ, 1995 ; BOUKDIR, 2007).

C'est une zone qui appartient au domaine hydraulique publique. Le terrain doit être acquis en pleine public et protégé par l'exploitant du captage. A l'intérieur de cette zone, aucune activité ou dépôt autre que celle liée à l'exploitation du captage, n'est permise (Backalowicz, 2000).

Dans le milieu karstique, il est aussi proposé de considérer comme PPI satellites les zones de pertes (à travers des chenaux verticaux) situées à l'intérieur de l'aire d'alimentation (Souchet, 2006).

### **VI.3.2. Périmètre de Protection Rapproché (PPR)**

La zone de protection rapprochée doit protéger les eaux souterraines d'un captage ou un champ captant contre les pollutions bactériologiques et donne une marge de sécurité pour une intervention en cas d'une pollution chimique ou accidentelle.

Si le périmètre de protection rapproché des captages implantés en secteur karstique a été parfois délimité à l'instar de ce qui se faisait en milieu poreux, conduisant bien évidemment à des échecs liés à la structure hétérogène du karst. Les hydrogéologues se sont très tôt appuyés sur la détermination des limites du système, sur l'analyse de son fonctionnement, de façon à mettre en évidence les circulations rapides (traçages et hydrodynamisme), et sur l'inventaire des sources potentielles de pollutions (Carré et al., 2010). En 1998, Bakalowicz et al. ont proposé également d'inclure la totalité du bassin d'alimentation dans ce périmètre, mais sans servitudes imposées. En milieu karstique, les effets sont suffisamment lointains et très marqués pour que souvent, par exemple, le périmètre de protection rapproché soit confondu avec le bassin d'alimentation de la source dans son ensemble, qui peut atteindre parfois quelques centaines de Km<sup>2</sup> (source du Lez : 400 Km<sup>2</sup> ; Fontaine de Vaucluse : 1100 Km<sup>2</sup>) (Bakalowicz et al., 1999).

Considérant l'organisation particulière du karst, Avias et al. ont proposé en 1977, pour la source du Lez (Hérault), une délimitation du périmètre de protection rapproché en s'appuyant sur une carte de vulnérabilité. Cette approche a été reprise et complétée par Tripet et al. qui ont utilisé une méthode multicritères de détermination de la vulnérabilité à indices EPIK.

### **VI.3.3. Périmètre de Protection Eloigné (PPE)**

Le Périmètre de protection éloigné se base sur la délimitation de l'aire d'alimentation du captage.

Il est inutile de considérer dans les PPE les zones non vulnérables et/ou sans risques. Cela revient à définir au sein des PPE des zones sensibles qui présentent le plus grand risque que les polluants soient lessivés et entraînés par les écoulements souterrains en direction du captage. Dans les bassins karstiques, le périmètre de protection éloigné est corespond au bassin d'alimentation des points d'eau.

## **VII. MÉTHODES ET MATÉRIELS**

### **VII.1. Collecte et analyse des données**

Pour une bonne délimitation des périmètres de protection des sources du Dir situées entre Ouaoumana et Bzou, on a fait recours aux :

- cartes topographiques : la zone d'étude est couverte par des cartes topographiques au 1/50000ème qui ont servi à la compréhension de la zone d'étude (localisation, altitude, nomination des cours d'eau principaux, formes géomorphologiques,...) ;
- carte géologique de Rabat au 1/500000ème qui couvre la totalité du bassin des sources et deux cartes géologiques de Beni Mellal et Afourer aux 1/100000ème ;
- historique des débits des sources utilisés pour calculer les débits classés et de tracer les courbes de récession dont l'objectif est de comprendre le fonctionnement hydrogéologique des sources ;
- images satellitaires de LandSat 8 et de Google Earth qui sont utilisées pour la cartographie de l'occupation du sol, l'extraction des linéaments et les formes karstiques;
- modèle numérique de terrain qui est utilisé pour la détermination de l'altitude et la délimitation des bassins hydrologiques des sources et du réseau hydrographique ;
- réglementation : la loi de l'eau 36-15 relative à l'eau, la loi n° 11-03 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement et le Décret N° 2-97-657 du 4 février 1998 relatif

à la délimitation des zones de protection et des périmètres de sauvegarde et d'interdiction sont utilisées ;

- des enquêtes sur le terrain ont été menées dans le cadre de ce travail, en vue de rassembler le maximum d'informations, notamment celles relatives à l'occupation des sols et aux foyers de pollution existants et des formes karstiques ainsi que de prendre des échantillons d'eau pour accomplir la qualité des sources existante ;
- qualité des sources de 2015, de 2016 collectée de l'ABHOER et 2019 réalisée au sein de laboratoire de ladite Agence.

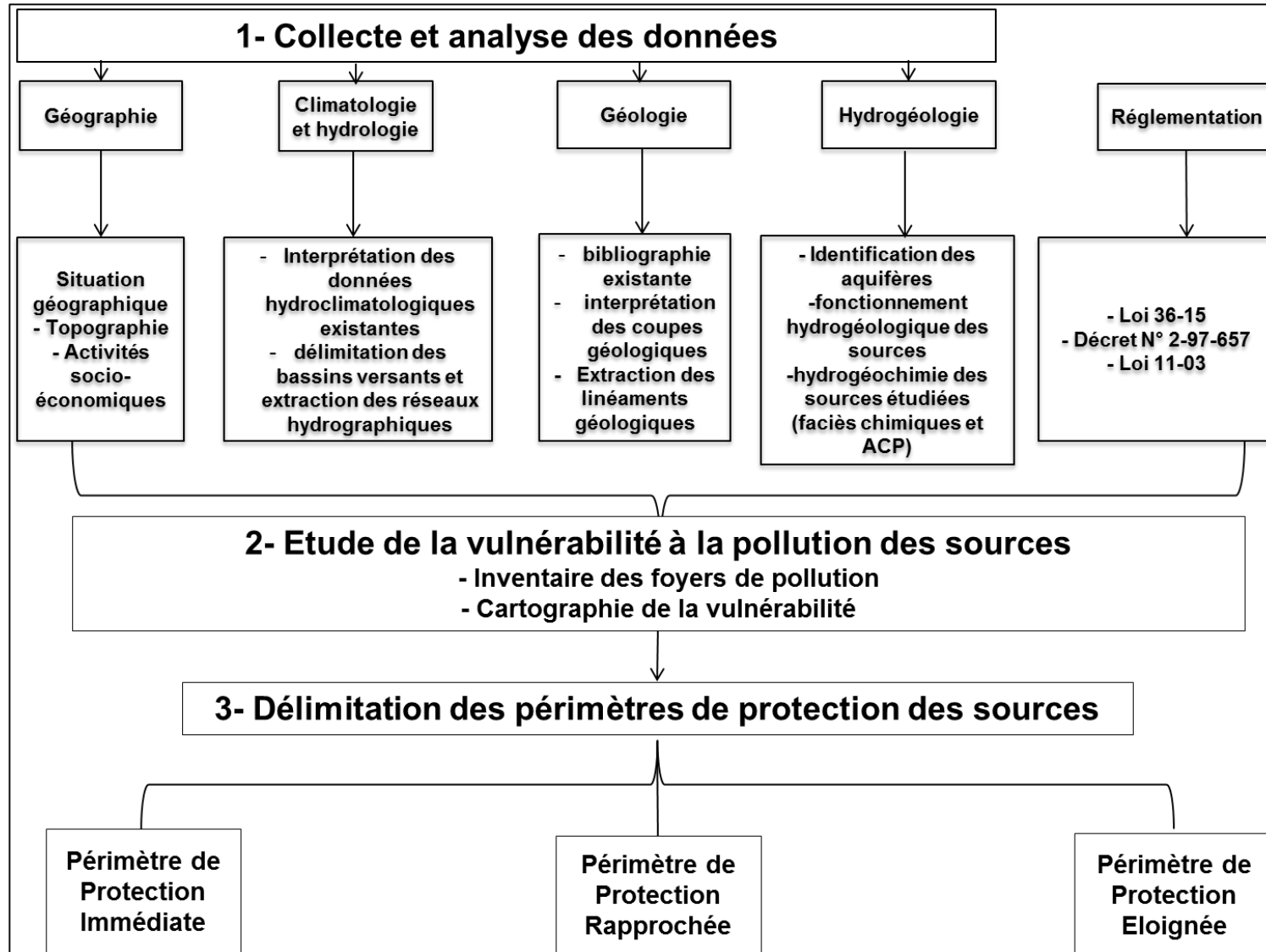
## **VII.2. Etude de la vulnérabilité à la pollution des sources**

Après la collecte et l'analyse des données, la cartographie de la vulnérabilité a été faite pour localiser les zones sensibles à la pollution.

## **VII.3. Délimitation des périmètres de protection**

L'intégration et l'analyse des différentes données collectées et la carte de la vulnérabilité dans un système d'information géographique, a permis de délimiter trois périmètres de protection (Immédiat, rapproché et éloigné) autour des sources du Dir situées entre El Ksiba et Ououmana (Figure 6).





**Figure 6 :** Organigramme des matériels et méthodes utilisés

## VIII. CONCLUSION

Plusieurs approches, notamment structurelles, fonctionnelles et hydrogéochimiques, ont été développées à partir des contributions pour la caractérisation et la délimitation des zones d'alimentation dans les systèmes karstiques.

Après la délimitation des aires d'alimentation, l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères reste un outil indispensable pour la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau.

Au Maroc comme dans le monde, trois périmètres de protection des captages ont été adaptés :

- périmètre de protection immédiat : ce périmètre est délimité pour protéger le captage et ses ouvrages contre tout rejet direct ;
- périmètre de protection rapproché : ce périmètre est destiné à prévenir la migration de polluants dans le sous-sol. Les activités, installations et dépôts susceptibles de nuire, même indirectement, à la qualité de l'eau y sont interdites ou réglementées ;
- périmètre de protection éloigné : ce périmètre facultatif renforce le PPR est délimité dans le cas échéant.

**CHAPITRE II : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET HYDROCLIMATOLOGIQUE  
DE LA ZONE D'ETUDE**

## I. INTRODUCTION

La compréhension et la maîtrise du contexte et la caractérisation de la zone d'étude constituent un élément fondamental dans les processus de confection de cette étude. En effet, les différentes décisions à prendre ou l'interprétation des résultats des diagnostics et de protection des ressources en eau ne peuvent être effectuées qu'à la lumière des propriétés et des spécificités de la zone étudiée. Pour cela, ce chapitre sera traité comme suit :

- le cadre géographique, topographique et socio-économique ;
- les contextes climatologique et hydrologique ;

## II. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Située au piémont nord du Haut Atlas de Beni Mellal, la zone d'étude fait partie de la région de Beni Mellal-Khénifra au centre du Maroc. Elle s'étend d'Ouaoumana à Bzou (figure 7), au sud de la plaine de Tadla, au Nord de trois bassins (Tagleft, Ouaouizeght et Ait Ateb), à l'Est et Nord du bassin d'Oued El Abid (affluent du bassin de l'Oum Er R'bia) et à l'Ouest du Bassin de la Haute Moulouya. Il s'agit de Dir partageant la plaine de Tadla et le Haut Atlas de Beni Mellal.

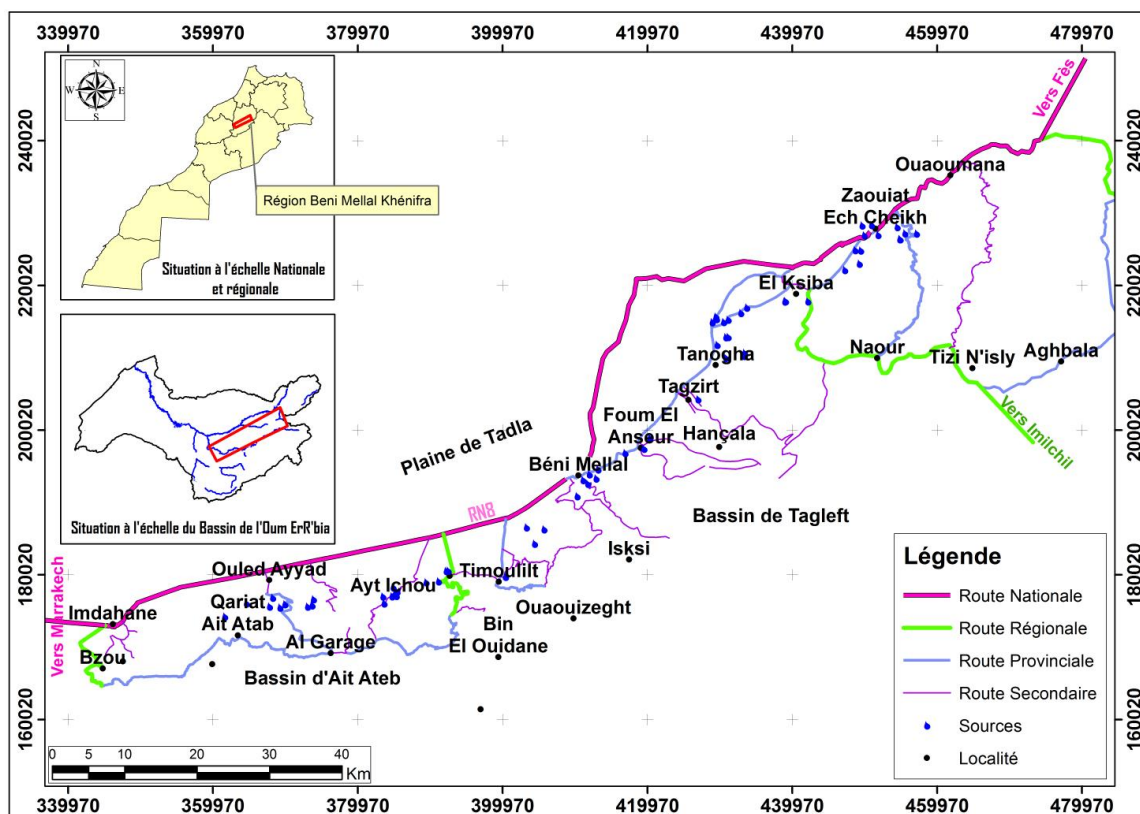


Figure 7 : Situation de la zone d'étude

Le tableau 4 ci-dessous, récapitule les intitulés et les coordonnées Lambert des l'ensemble des sources de Dir du Haut Atlas de Beni Mellal objets de l'étude.

**Tableau 4 : Coordonnées Lambert des sources**

N°	Nom	X	Y	N°	Nom	X	Y
1	Tamda	451847	227006	34	Tamegnounte	411110	193130
2	Ouarnfaa	449630	228305	35	Sidi Bouyakoub	411960	193905
3	Boudilit	450933	228369	36	Ourbiaa	410274	190876
4	Ou Abdellah Amont	454886	226393	37	Fou Elancer	419500	197450
5	Ou Abdellah Aval	454830	226412	38	Fechtala	420319	198925
6	Tamescourt	454480	228078	39	El Ghazi	412888	193333
7	Tiguemate	449251	223014	40	El Ksabi	413165	194601
8	Boulmatene	449454	224854	41	Sebk	416905	196850
9	Igly	449925	226940	42	Tazeroualte	426964	204286
10	N'ougziza	447239	222156	43	Foum Oudi	403272	186590
11	Ait Athmane	448690	224897	44	Ait Alouane	404389	184329
12	Boutmarsite	457139	227196	45	Ait Boujou	405720	186324
13	Ait Laaidi	455540	227220	46	Timoulilt	400407	179741
14	Agh.N'ygourramen	438944	217788	47	Tighboula	392464	180605
15	Agh.N' Moha Ou khity	439054	217846	48	Rbat	392195	180539
16	Ain Sidi Chami Amont	430825	212852	49	Anfag	391141	179120
17	Ain Sidi Chami Aval	431154	212904	50	Saghden	389422	178986
18	Ain N'oudaine	431130	215280	51	Safsaf	383628	176065
19	Ain Ou Achcha	432888	216217	52	Ait Imloul	383467	177026
20	Ain Ou Sefrou R.G	433707	216945	53	Ait Ichou Amont	384698	177046
21	Ain Ou Sefrou R.D	433707	216940	54	Ait Ichou Milieu	385158	177418
22	Ain Taghbaloute N'HIima	442142	217819	55	Ait Ichou Aval	385410	177685
23	Ain Tamoudjoute Milieu	433365	210292	56	Kherrouba	385297	177114
24	Ain Tamoudjoute Amont	433393	210681	57	Iferghs	384870	178269
25	Ain Tamoudjoute aval	430804	210006	58	S'Bouزيد	373875	176642
26	Ain Biha Ou Hammou	400000	322068	59	Inifif	373671	175813
27	Ain Ghorm El Alem	428924	214923	60	Ait Chliyyan	373061	175627
28	Ain Ghorm Nih	429376	215393	61	Ait Accou	368228	176866
29	Ain Sidi Maati	429448	215699	62	Echorfa	369913	175961
30	Ain Zriouil	429545	215374	63	Aghbalou n Mly Abdellah Abdselam	369243	175500
31	Ait Daoud	430505	214972	64	Ait Habbou	367812	175631
32	Ain Ichorba	429614	211790	65	Tibadine	361621	174255
33	Ain Asserdoune	411750	192600	66	Ait Bouhamza	364604	176071

### III. TOPOGRAPHIE

La partie du Haut Atlas de Beni Mellal située entre Ouaoumana et Bzou présente une topographie relativement accidentée, dont les altitudes varient entre 500m dans la plaine de Tadla et 2411m dans la montagne (figure 8). Des pentes moyennes oscillent entre 0 et 77% (figure 9). Ce relief est formé d'un ensemble des rides et des cols qui peuvent entrer dans l'alimentation des sources par les précipitations et les neiges qui les reçoivent.

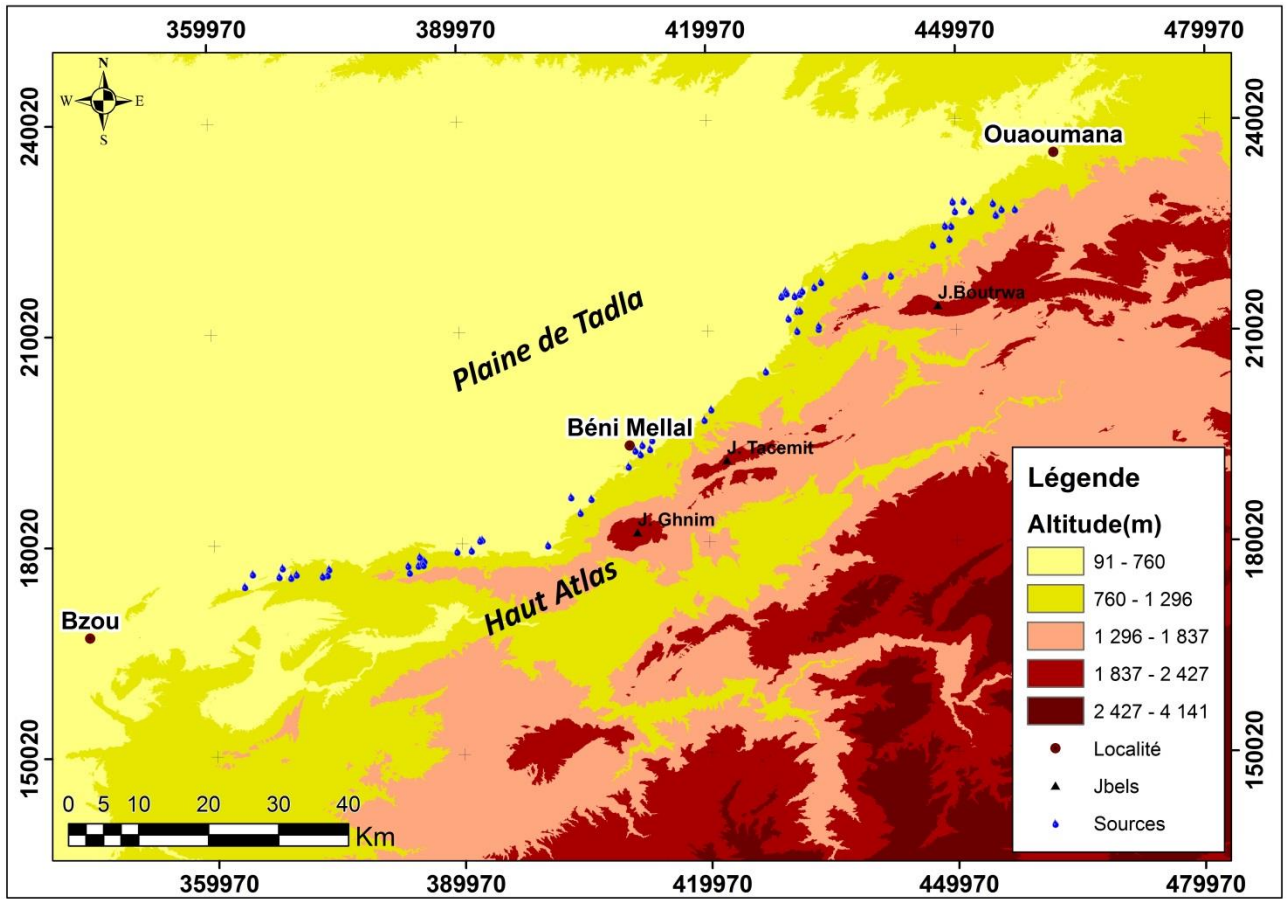


Figure 8 : Carte hypsométrique de la zone d'étude

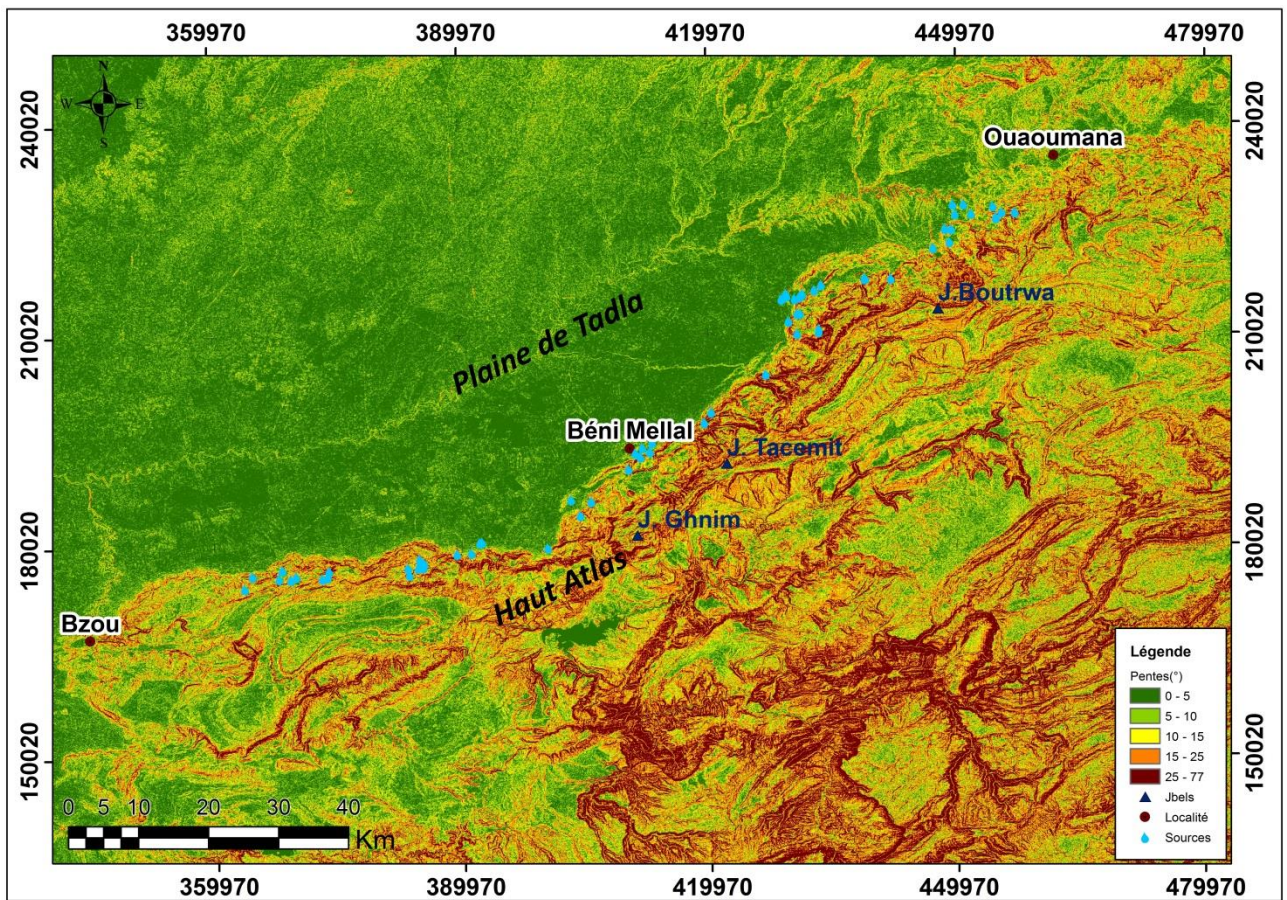


Figure 9 : Carte des pentes de la zone d'étude

Généralement, le secteur étudié est subdivisé en trois paliers : la montagne du Haut Atlas de Beni Mellal, le Dir et la plaine de Tadla.

#### ➤ **La montagne du Haut Atlas de Beni Mellal**

Elle présente des sommets qui atteignent 2411 m au Jbel Ghnim et 2248 m au Jbel Tacemit, les lignes de crêtes sont généralement rectilignes et de direction SW-NE et d'autres sont orientées E-W. Le massif est constitué essentiellement par des roches carbonatées (calcaires et dolomies du lias) au sein desquelles se développent des manifestations karstiques superficielles et souterraines.

#### ➤ **Le Dir**

Il s'agit du piémont nord du Haut Atlas de Beni Mellal, il est formé de collines d'âge tertiaire et de cône de déjection du quaternaire ancien et moyen. Les dépôts du Dir sont riches en calcaires, très caillouteux et généralement encroûtés, des dépôts de travertins occupent une grande place dans ce piémont, les altitudes varient entre 600 m à Timoulilt (SSW) jusqu'à 650 m à Beni Mellal, 800 m dans le secteur Gharm Laalam et 1000 m à El Ksiba.

#### ➤ **La plaine de Tadla**

La plaine de Tadla s'abaisse de l'Est vers l'Ouest et du nord-est vers le sud ouest, avec une altitude moyenne de 500 m et couvre une superficie de 3600 Km<sup>2</sup> environ. Elle est constituée par une dépression occupée pendant le secondaire et le tertiaire par des mers et des lacs. Au cours du quaternaire, une subsidence générale de la plaine accompagnée d'une importante accumulation alluviale et colluviale s'est produite, ce qui a permis la mise en place de limons rouges et calcaires qui font du Tadla une des plus riches régions agricoles du Maroc.

Compte tenu de leur contribution à l'alimentation des sources étudiées, cette étude se focalise sur le Dir et la partie montagneuse.

### **IV. OCCUPATION DU SOL**

L'objectif de cette partie est la préparation d'une base de données géographiques pour les différentes composantes du territoire étudié afin de dresser des cartes thématiques et synthétiques qui serviront à la prise de décision. Pour cette fin, les images satellitaires à haute résolution fournies par Google Earth et les cartes topographiques à l'échelle 1:50 000 ont été utilisées. Comme la base de données est fondée sur la plateforme de SIG d'usage répandu, il est facile d'associer ce travail à d'autres ensembles de données, déjà constitués ou en cours d'élaboration, pour de nombreuses applications.

#### **IV.1. Réseau routier**

La zone cartographiée est menue par un réseau routier d'une longueur estimée de 1500 Km, qui se répartit entre les routes secondaires, provinciales, régionales et nationales. Cette zone est desservie par la RN8, reliant Fès à Marrakech en traversant les centres urbains de Beni Mellal, Zaouiat Echeikh et Ouaoumana.

#### **IV.2. Agglomération ou Habitat**

Les principales agglomérations (figure 10) dans le secteur d'étude sont : la ville de Beni Mellal chef lieu de la région, le centre de Zaouiat Echeikh, d'El Ksiba et celui d'Ouaoumana, d'autres agglomérations sont dispersées dans le Dir et la montagne le long de la zone d'étude. Ladite zone est délimitée au sud par les centres d'Aghbala, Tizi N'isly, et Ouaouzeght. A l'exception des centres précités, la plupart des habitats sont dépourvues aux réseaux d'Assainissement.

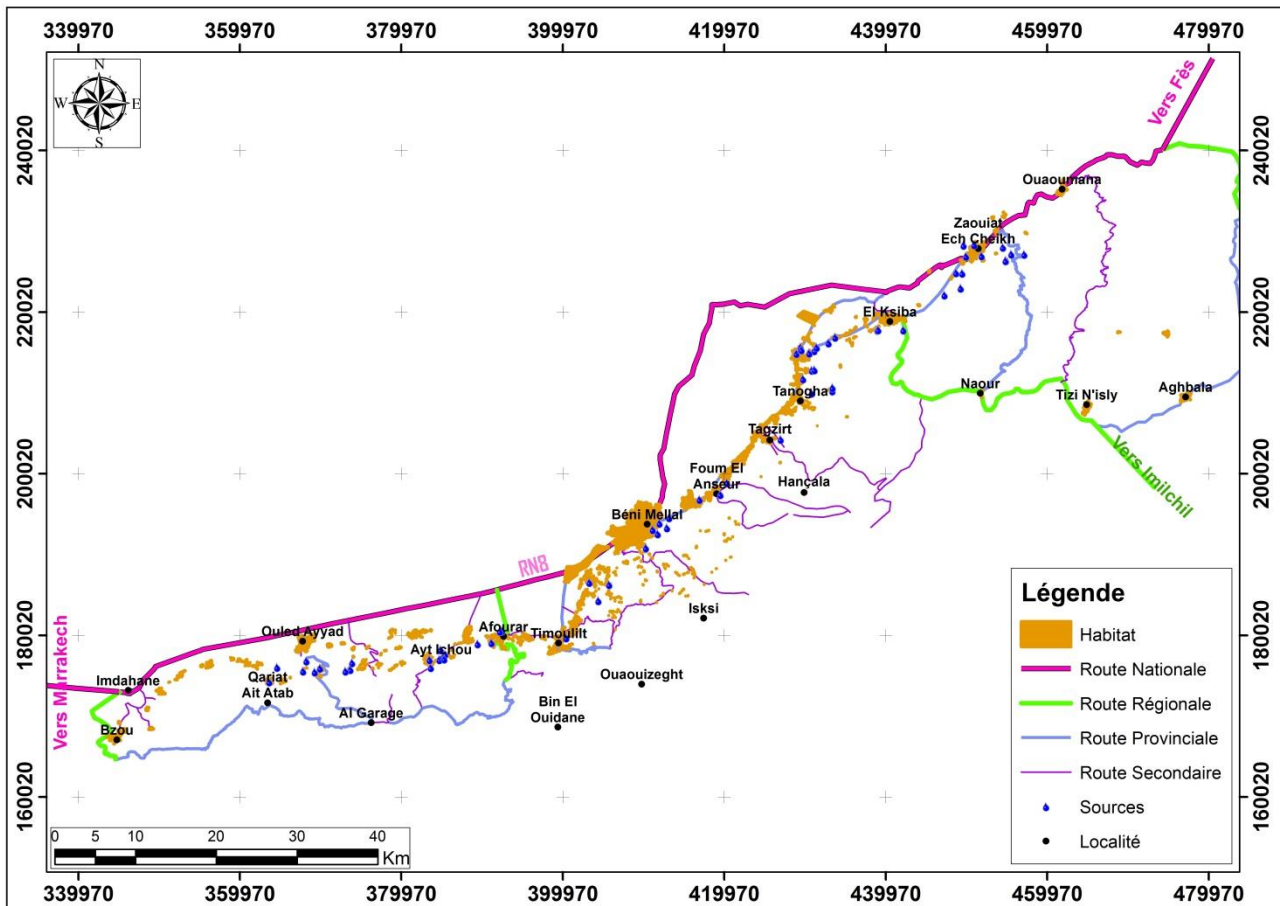


Figure 10 : Carte d'Habitat et réseau routier

### IV.3. Agriculture

Bien que le Dir, dispose d'un nombre important des sources d'eau, ce qui est une solide base pour une activité agricole importante (figure 11) et un pilier essentiel dans la vie de la population, celle-ci utilise des méthodes traditionnelles de production (techniques d'irrigation, façons de partager d'eau, bornes fontaines...) et le système gravitaire dans l'irrigation est encore dominant, ce qui crée une importante faiblesse dans le processus de l'évaluation des ressources en eau disponibles. La production agricole reste la culture de subsistance, basée sur l'olive, les céréales et quelques légumes.

L'olivier est la plantation la plus importante en matière de superficie, de production et de création d'emplois (Finigue, 2017). Il s'accompagne par la création d'un ensemble d'huileries pour la production d'huile d'olive, conduit au déversement des margines, ce qui constitue une source de pollution sur les ressources en eau de la région.



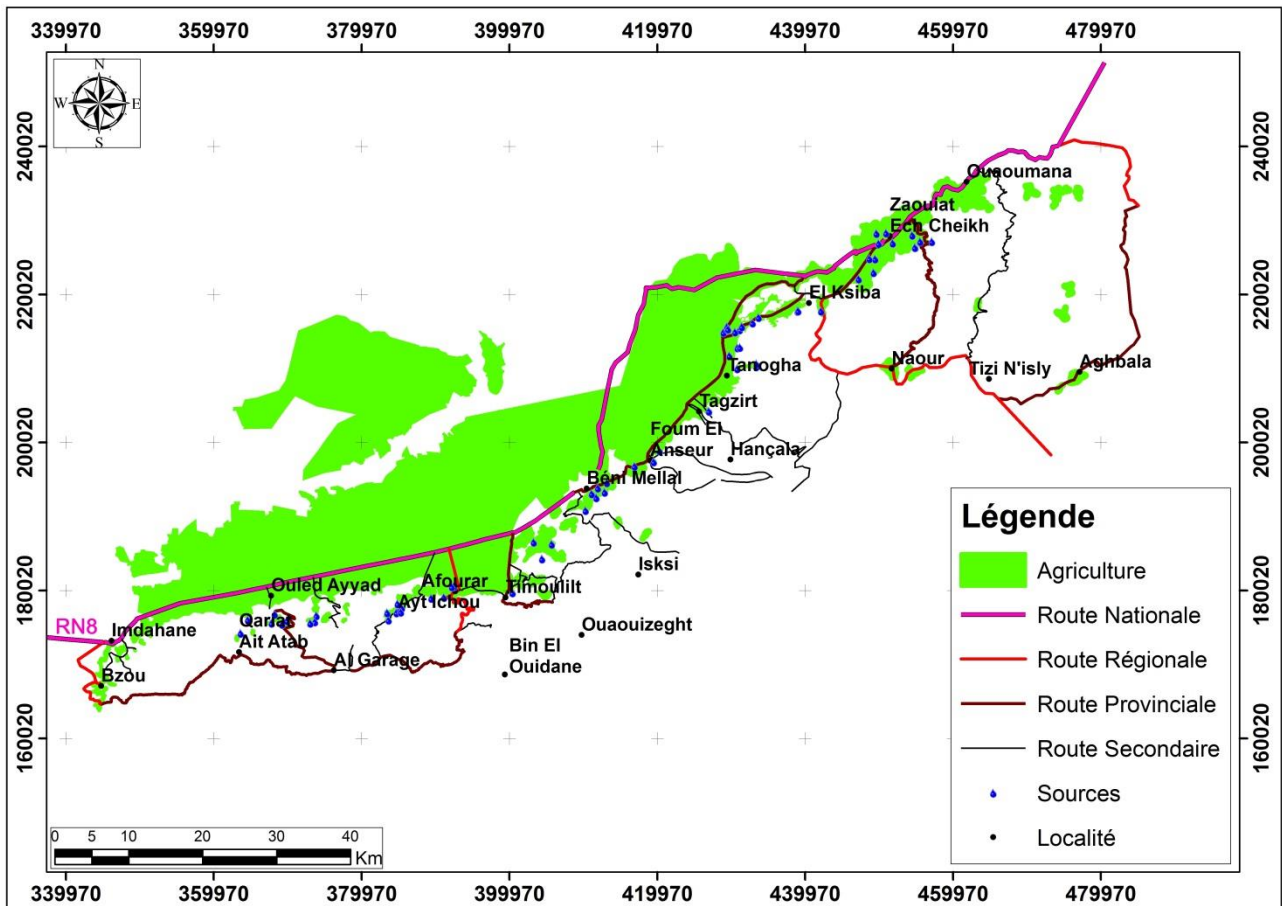


Figure 11 : Carte de délimitation des zones agricoles

#### IV.4. Industrie

L'industrie au niveau des bassins des sources est essentiellement tributaire de la production agricole, Il s'agit d'une industrie de transformation des produits de l'arboriculture fruitière (Olive). Parmi les principales unités industrielles, on retrouve les huileries installées principalement le long des routes longeant le Dir. En dehors de cette activité, on y rencontre des carrières implantées aux premiers contreforts de l'Atlas.

#### IV.5. Forêts

Les forêts naturelles couvrent environ 65 188 ha de la superficie de la zone cartographiée (figure 12). Ces forêts se composent essentiellement des feuillues naturelles (chêne vert) et des essences résineuses naturelles constituées essentiellement de genévriers, de pins et de caroubier.

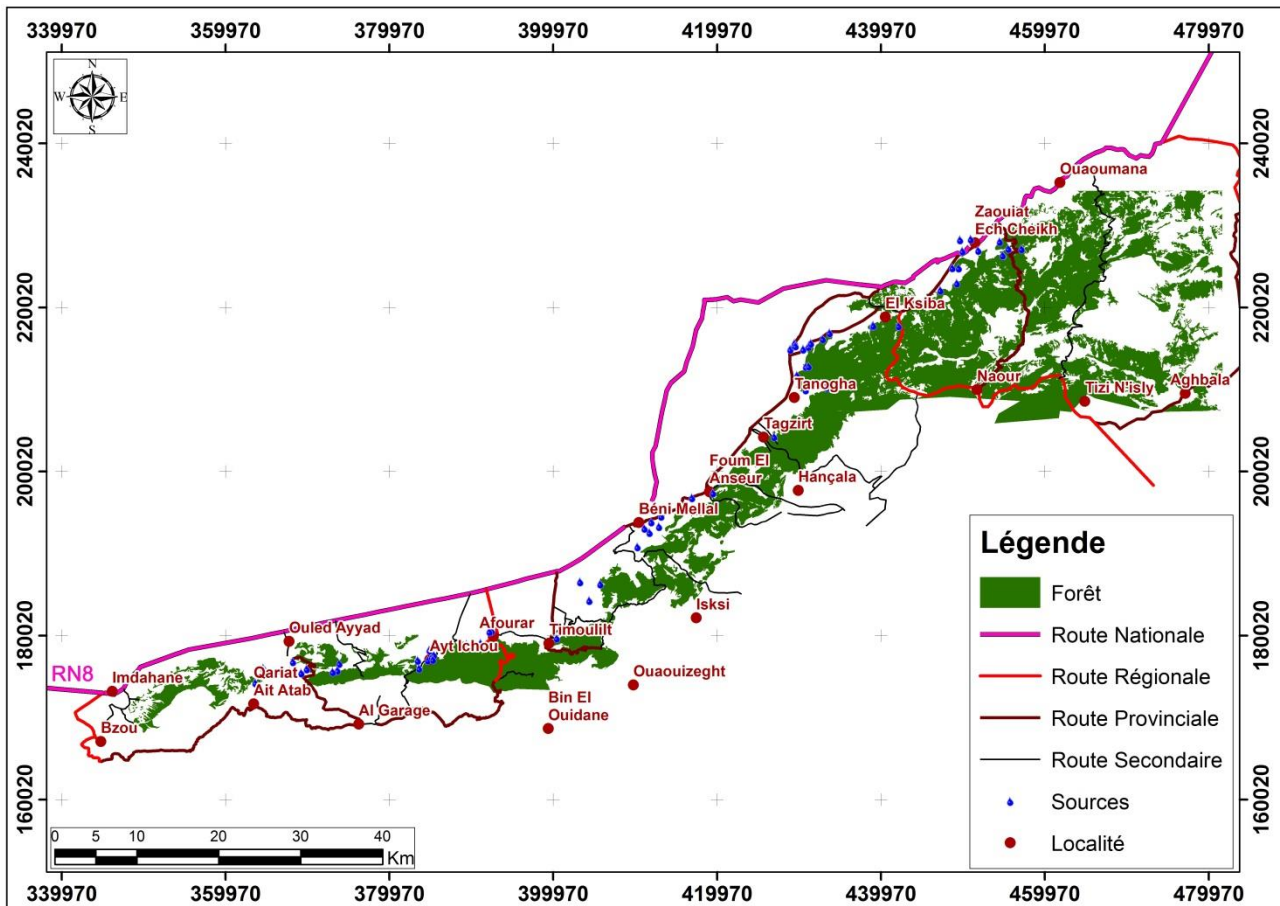


Figure 12 : Carte de domaine forestier

#### IV.6. Synthèse de l'occupation du sol

Un territoire est à la fois une ressource et un support au développement et la protection des ressources en eau. Les responsables et les acteurs du territoire ont besoin d'outils pour connaître, évaluer, décider et gérer ainsi les outils d'observation du territoire permettent de mettre en œuvre des politiques de gestion et d'aménagement du territoire.

Les Systèmes d'Information Géographique sont l'un de ces outils. Ils sont dédiés plus particulièrement à la gestion des informations spatiales. Ils nécessitent d'être « alimentés » en données qui pourront être traitées pour répondre aux différents besoins.

Les données (la connaissance) constituent un élément préalable déterminant pour la conduite d'une politique de développement et d'aménagement d'un territoire.

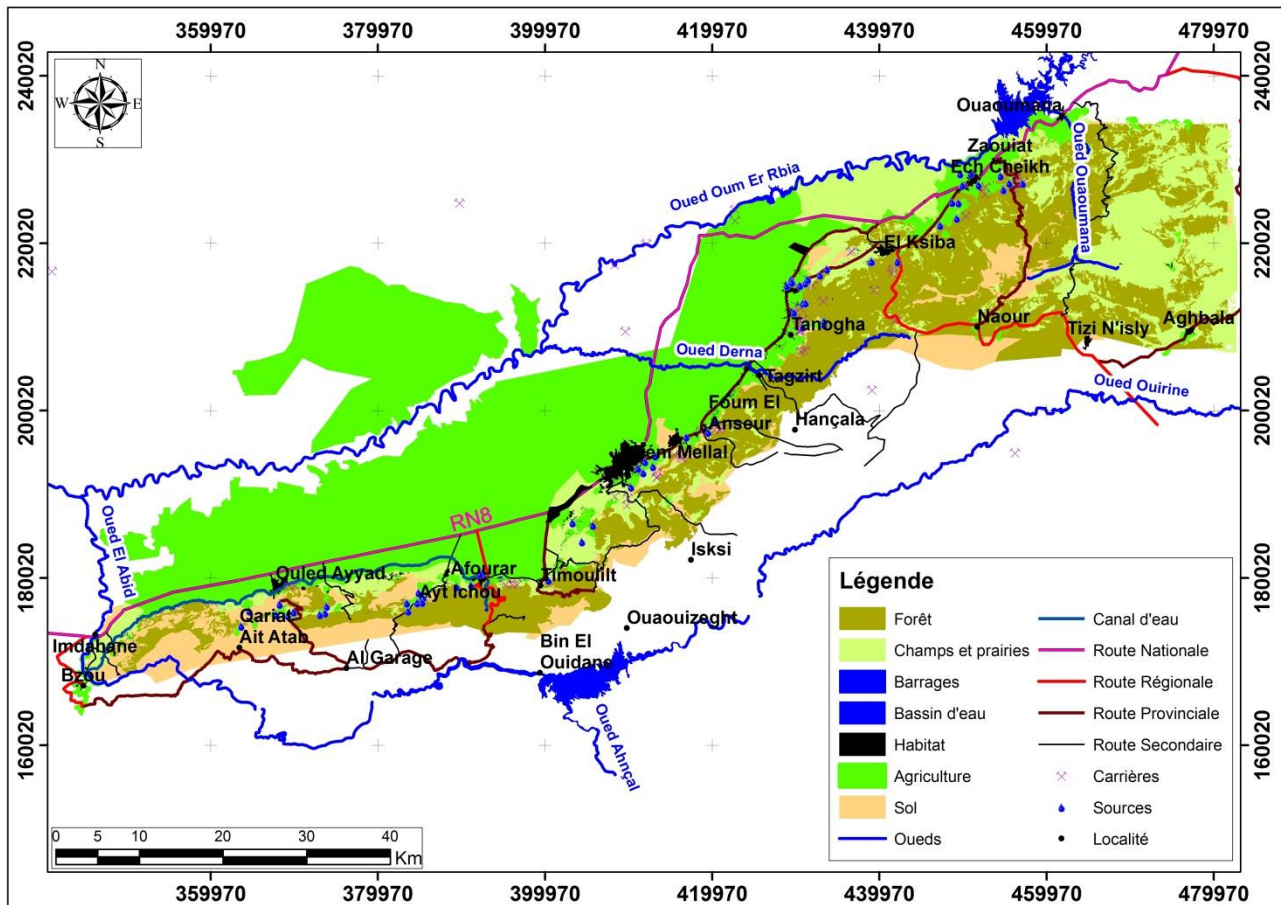
Les choix d'acquisition des données dépendent donc du besoin des responsables ou des acteurs du territoire.

L'occupation du sol peut être succinctement définie comme la couverture (physique et biologique) de la surface des terres émergées (FAO, 1998). Différents processus naturels et anthropiques interviennent et modifient l'occupation du sol. Ainsi, la description de celle-ci est alors utile pour la connaissance scientifique des états et de l'évolution des écosystèmes, des agrosystèmes et des territoires en plus de la gestion des ressources naturelles et l'aménagement du territoire : zones artificialisées, espaces agricoles, forêts, zones humides, plans d'eaux...etc.

La description de l'occupation du sol repose sur la représentation d'une homogénéité locale et relative de la couverture terrestre et dépend des applications scientifiques et techniques utilisées, de

l'échelle de représentation et du point de vue de l'utilisateur final. Aussi, une information produite dans un référentiel d'occupation du sol doit être homogène, strictement comparable pour tout point de la zone de cartographie et susceptible d'être mise à jour périodiquement.

À la base des entités constituées précédemment, on a élaboré la carte synthétique des différentes composantes de la zone d'étude (figure 13).



**Figure 13 :** Carte d'occupation du sol synthétique

L'interprétation de cette carte montre que la majorité de la superficie est occupée par la forêt en premier rang avec une superficie de 65188Ha puis les champs agricoles et les prairies en deuxième position avec une superficie totale de 63060 Ha désormais la troisième et la quatrième situation sont cédées pour le périmètre irrigué et le sol nu avec une superficie de 59163 Ha et 35677 Ha successivement. Tandis que la surface occupée par le bâti demeure moins importante.

## V. DECOUPAGE ADMINISTRATIF

Les bassins des sources étudiées couvrent en partie la province de Béni Mellal dans le nord et celle d'Azilal au sud, en plus de 28 communes territoriales. Selon le dernier Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2014, la population de communes citées dans la figure 14 est de l'ordre de 556036 Habitants.

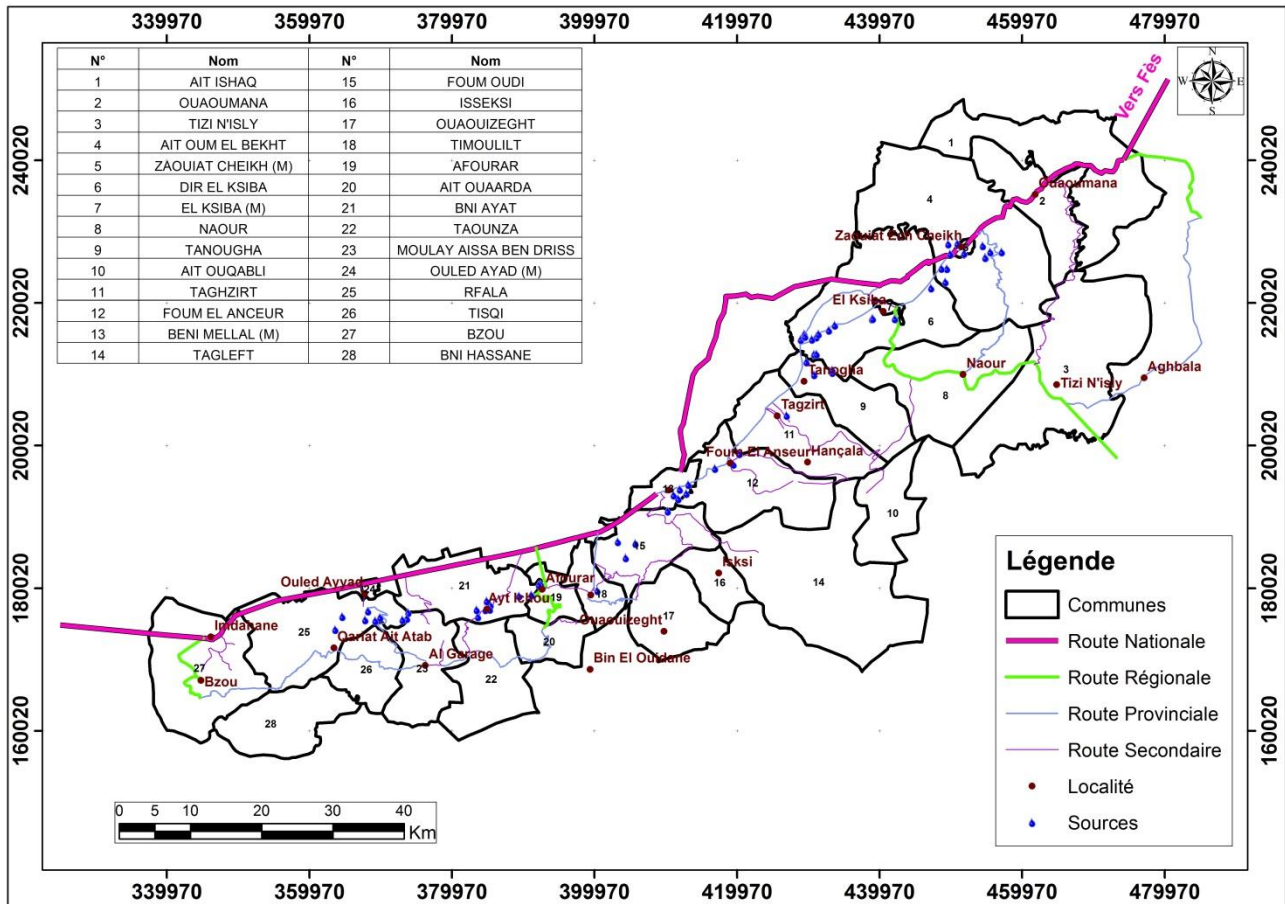


Figure 14 : Carte de découpage administratif de la zone d'étude

## VI. CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE

### VI.1. Introduction

Les stations climatologiques les plus proches et qui peuvent renseigner sur la répartition climatologique spatio-temporelle sont celles du barrage Ahmed El Hansali, Béni Mellal, Tagzirt et Taghzoute. Les caractéristiques et les données mesurées sur chaque station sont synthétisées dans le tableau 5, quant à la figure 15 représente la répartition spatiale de ces stations.

Tableau 5 : Stations climatiques et type de données disponibles

Station	X(m)	Y(m)	Z(m)	Période	Données disponibles	Observations
Ahmed El Hansali	452550	231600	595	1968 - 2014	Précipitation, Température, Evaporation, Vent	Pas de mesure entre 2000-2002 (Période de construction du barrage)
Tagzirt	423900	205600	565	1967 - 2014	Précipitation	-
Taghzoute	461400	235500	628	1972 - 2013	Précipitation	Manque de données en 1996/97, 1999/00 et 2001/2002
Beni Mellal	409165	193045	535	1982 - 2014	Précipitation, Température, Evaporation, Vent	-

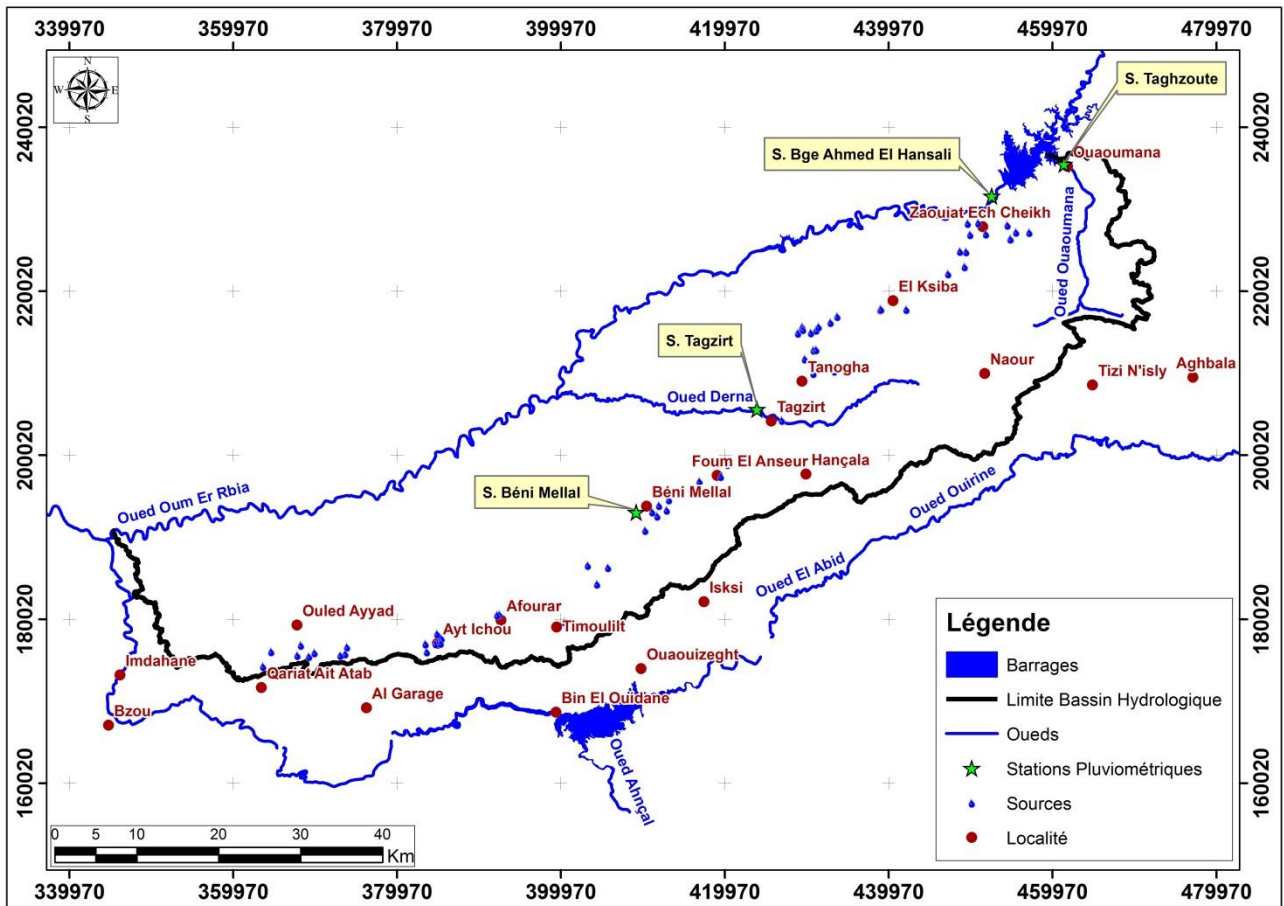
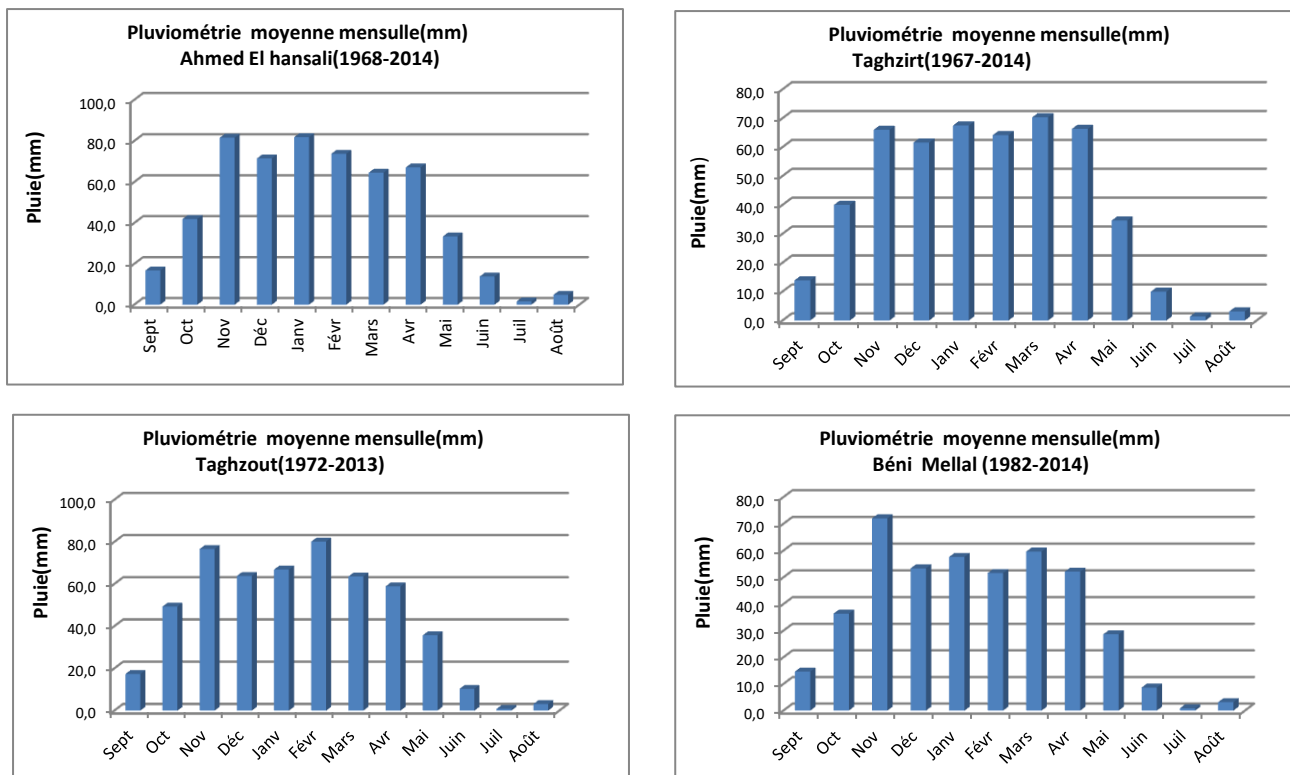


Figure 15 : Carte de situation des stations pluviométriques

## VI.2. Précipitations

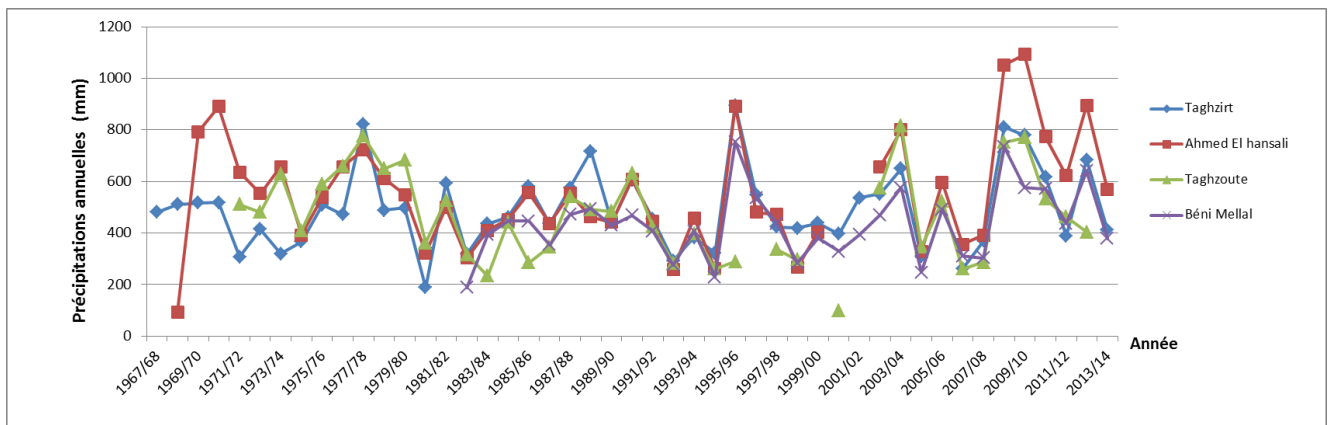
Les précipitations moyennes mensuelles interannuelles (figure 16) ont été mesurées dans les quatre stations, connaissent une grande variabilité selon les saisons. La période pluvieuse s'étend de novembre en mai. Durant cette période, les précipitations connaissent une répartition plus ou moins régulière. En été, en particulier en juillet, les pluies sont rares ou quasi inexistantes.



**Figure 16 :** Histogrammes des précipitations moyennes mensuelles

(Source des données : ABHOER)

La figure 17 ci-dessous donne l'évolution des précipitations annuelles dans les quatre stations climatologiques et montre que les précipitations connaissent une grande variabilité entre les années. La moyenne annuelle est de l'ordre de 500 mm à Tagzirt, 543 mm à Ahmed El Hansali, 424 à Taghzoute et 433 à Béni Mellal.



**Figure 17 :** Evolution des précipitations annuelles (Source des données : ABHOER)

L'analyse des précipitations fait ressortir les constats suivants :

- Les pluies annuelles moyennes sont de l'ordre de 527 mm.
- Pendant la période 1982-2014, les valeurs des précipitations annuelles les plus élevées ont été enregistrées sont de l'ordre de 837mm en 2008/2009 et 804 mm en 2009/2010 et celle la plus faible enregistrée est de 268.5 mm en 1994/1995.
- La réduction des précipitations enregistrées dans le bassin d'Oum Er R'bia n'est pas ressentie dans la station d'Ahmed El Hansali par rapport aux autres stations.

Cette analyse donne une idée sur l'hydrologie de surface d'une part et le fonctionnement et la recharge des aquifères concernés d'autre part.

### VI.3. Température

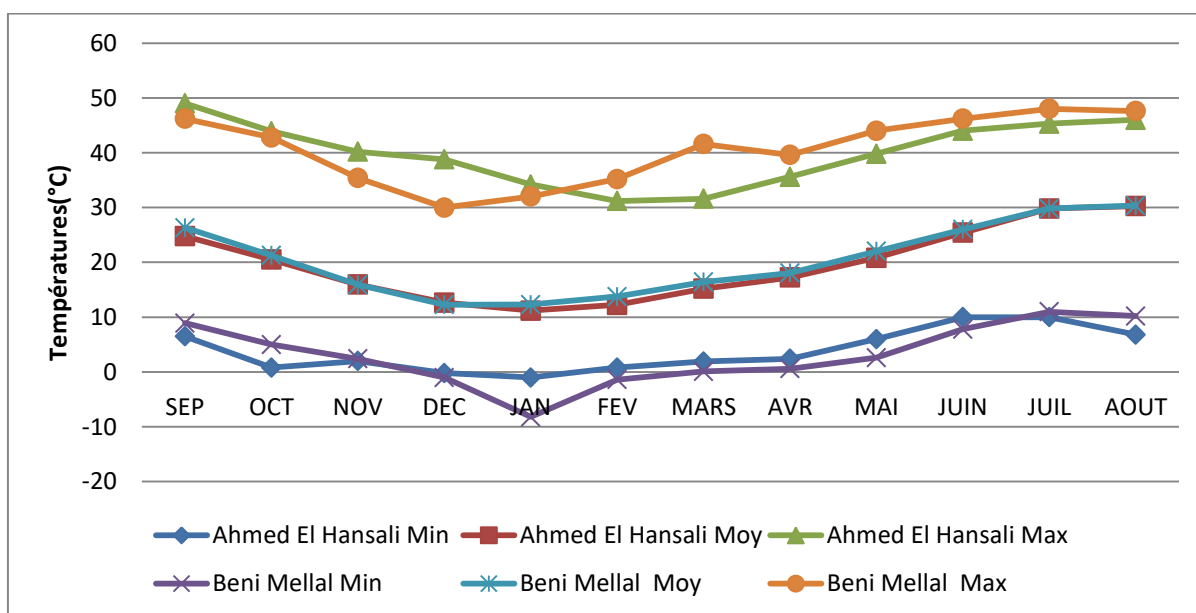
Les températures mensuelles interannuelles minimales, maximales et moyennes, enregistrées aux stations d'Ahmed El Hansali et de Beni Mellal (tableau 6, figure 18) présentent de fortes variations interannuelles et saisonnières :

- la variation interannuelle dépasse 30°C entre les minima et les maxima enregistrés pour un même mois ;
- la variation saisonnière atteint 15°C à la station Ahmed el Hansali alors qu'elle dépasse 20°C à la station de Beni Mellal. Ceci est dû à l'influence de la montagne du Haut Atlas de Beni Mellal ;
- les températures sont minimales de décembre à février ;
- la température est plus élevée en été, le mois d'Août est souvent le plus chaud de l'année avec des niveaux avoisinants de 30 °C.

**Tableau 6 : Températures mensuelles interannuelles**

	Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T° minimale	Ahmed El Hansali	6,5	0,8	2	-0,2	-1	0,8	1,9	2,4	6	10	10	6,8
	Beni Mellal	8,9	5	2,4	-1	-8,2	-1,4	0,1	0,6	2,6	7,8	11	10
T° moyenne	Ahmed El Hansali	24,8	20,5	16	12,7	11,2	12,2	15,2	17,2	20,8	25,4	30	30
	Beni Mellal	26,3	21,3	15,9	12,3	12,3	13,8	16,4	18,1	22	26	30	30
T° maximale	Ahmed El Hansali	49	43,9	40,2	38,8	34,2	31,2	31,6	35,6	39,8	44	45	46
	Beni Mellal	46,2	42,8	35,4	30	32	35,2	41,6	39,6	44	46,2	48	48

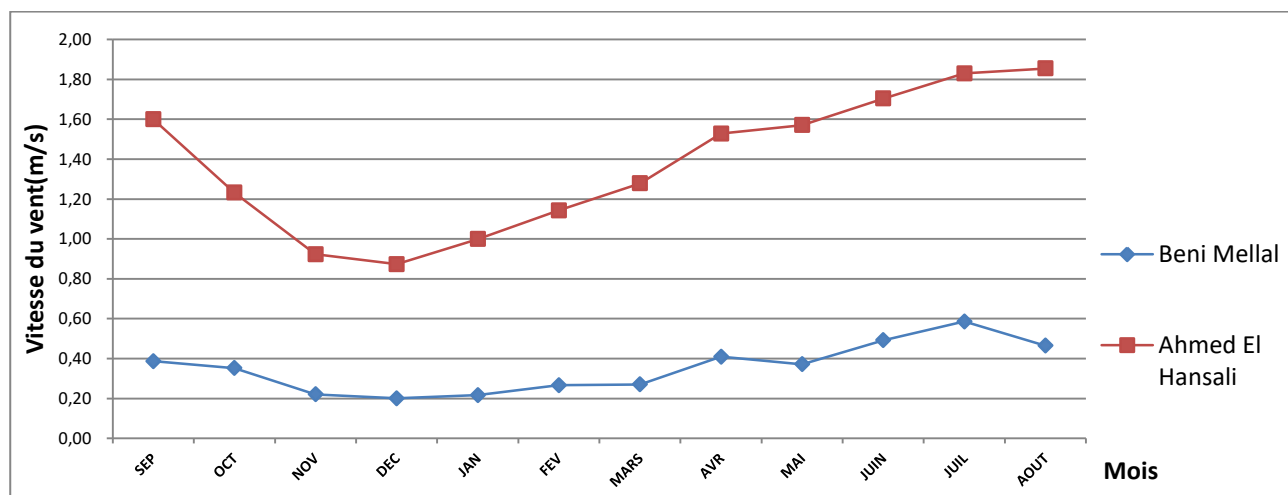
(Source des données : ABHOER)



**Figure 18 : Evolution des Températures mensuelles interannuelles dans les stations d'Ahmed El Hansali et de Beni Mellal (1985-2014)**

## VI.4. Vent

Les vents sont généralement faibles, inférieurs à 2m/s (figure 19). Ils sont orientés nord ouest à sud ouest. La vitesse, en moyenne, diminue graduellement à partir de septembre pour atteindre sa valeur minimale au mois de décembre. Dès ce mois, elle s'élève progressivement pour enregistrer ses valeurs maximales en été. L'orientation et la vitesse des vents jouent un rôle important dans la dispersion des polluants et leur répartition dans les bassins et aussi pour ne pas avoir aucun impact sur les ressources en eau de l'installation des futurs projets.



**Figure 19** : Vitesse du vent aux stations Béni Mellal et Ahmed El Hansali

(Source des données : ABHOER)

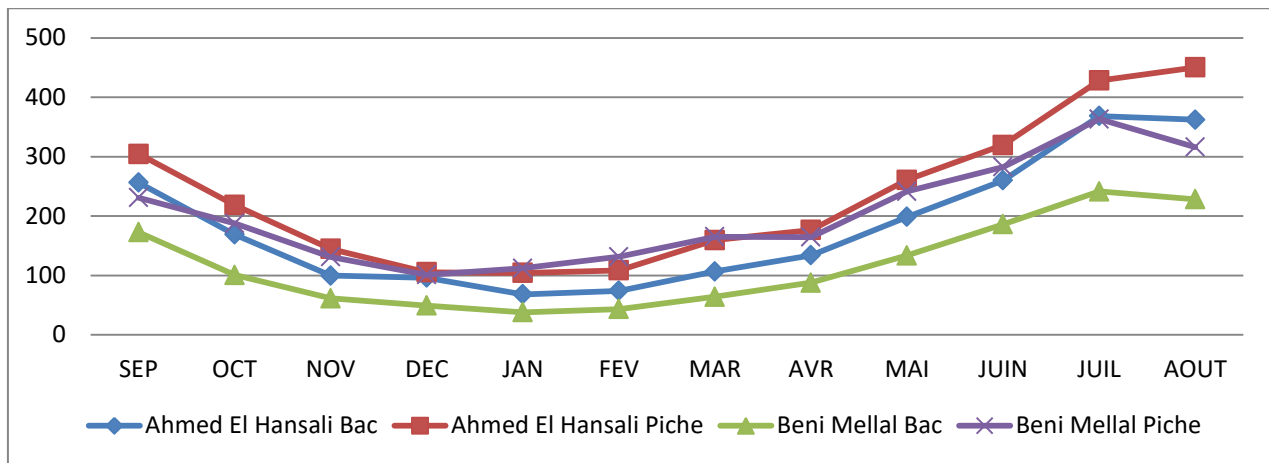
## VI.5. Evaporation

Les mesures d'évaporation par Bac et Piche ont été effectuées dans les deux stations barrage Ahmed El Hansali et Beni Mellal, montrent que la moyenne mensuelle interannuelle varie de la même manière. Les valeurs minimales sont enregistrées du mois décembre à février, alors que les valeurs maximales sont enregistrées pendant les mois juillet et Août (tableau 7, figure 20).

**Tableau 7** : Evaporation moyenne mensuelles aux stations Ahmed El Hansali et Beni Mellal (1985-2014) (Source des données : ABHOER)

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	TOT
<b>Ahmed El Hansali (Bac)</b>	256,3	168,9	99,7	96,3	68,1	74,2	106,6	133,9	198,5	260,1	368,4	362,2	2193,2
<b>Ahmed El Hansali (Piche)</b>	304,6	218,6	144,7	105,3	104,3	108,5	159,6	176,6	260,8	319,5	428,3	450,2	2781
<b>Beni Mellal (Bac)</b>	172,7	100,7	61,3	49,2	37,9	43,3	64	87,7	133,6	186,2	241,4	228,2	1406,3
<b>Beni Mellal (Piche)</b>	230,8	187,4	131,2	100,9	112	131,4	165,3	164,5	241,5	282,6	363,3	316,1	2427





**Figure 6 :** Evolution des Evaporations moyennes mensuelles interannuelles dans les Ahmed El Hansali et Beni Mellal

L'évaporation est maximale en Juillet-Août et minimale en Janvier-Février. Durant les trois mois, juin, juillet et août, il s'évapore autant que pendant les neuf autres mois de l'année.

### VI.6. Evapotranspiration potentielle

Le calcul du paramètre évapotranspiration potentielle permettra de renseigner sur la lame d'eau susceptible de s'infiltrer dans la roche et alimenter les aquifères des différentes sources dans la zone d'étude.

La méthode classique de Thornthwaite est retenue pour cette évaluation.

La formule proposée s'écrit ;

$$ETP_i = 16 * k * (10 * T_i/I) a \quad (9)$$

avec :

$ETP_i$  : Evaporation potentielle du mois  $i$  ayant la température  $T_i$ .

$k$  : Coefficient de correction dépendant de la latitude et donné par un tableau (Annexe 2).

$I$  : Indice thermique annuel qui est fonction de la température du mois  $j$ .

$$I = \sum I_j \text{ avec } I_j = (T/5)^{1.5}$$

$$a = 1.6/100 * I + 0.5 \text{ (il est égale à 1.7)}$$

En utilisant les valeurs moyennes de la température et de la pluviométrie de l'aire de la zone d'étude, on obtient comme valeur moyenne interannuelle de l'évapotranspiration potentielle ce qui suit (tableau 8) :

**Tableau 8 :** Evapotranspiration potentielle mensuelle à la zone d'étude

Ahmed Hansali	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
$T_j$	25	21	16	12	11	11	15	18	21	27	32	31
$I_j$	7,39	6,3	4,7	3,69	3,26	3,4	4,52	5,4	6,37	8,08	9,5	9,41
<b>ETP</b>	72,3	62	46	36,1	31,9	34	44,2	53	62,4	79,1	93	92,1

### VI.7. Evapotranspiration réelle et pluie efficace

Le calcul de la pluie efficace a été fait sur la base des données de l'évapotranspiration potentielle calculée plus haut (tableau 9) :

**Tableau 9 : Pluie efficace à la zone d'étude**

Ahmed Hansali	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>ETP</b>	72,3	62	46	36,1	31,9	34	44,2	53	62,4	79,1	93	92,1
<b>P</b>	16,7	42	81,5	71,5	81,8	73,8	64,5	67,1	33,4	13,8	1,6	4,8
<b>P-ETP</b>	-55,6	-20	35,5	35,4	49,9	39,8	20,3	14,1	-28	-65,3	-91,4	-87,3

L'évapotranspiration réelle annuelle est de 356mm. Par conséquent, la pluie efficace est de 196mm.



### ➤ **Sous bassin d'Oued Ouaoumana**

L'oued Ouaoumana est un affluent de la haute Oum Er R'bia. Son bassin versant ayant une forme allongée couvre une superficie de 171 Km<sup>2</sup>. Il prend sa source à une altitude de 2000 m et se jette dans le barrage d'Ahmed El Hansali à une altitude de 700m.

### ➤ **Sous bassin d'Oued Derna**

Au débouché dans la plaine du Tadla, à Tagzirt, le bassin versant du Derna a une superficie de 447 Km<sup>2</sup>. Le bassin est orienté W-E comme ceux des oueds El-Abid et Tassaoute et possède une forme assez allongée. Ce bassin est limité par des crêtes culminant autour de 2000 m au sud et à l'est, et à 2068 m au Nord Est (jbel Aherda) et se jette dans l'Oued Oum Er r'bia.

### ➤ **Autres sous bassins**

Plusieurs sous bassins sur la bordure du haut atlas entre les oueds Ouaoumana au NE et El Abid au SW. Ces bassins sont drainés par des sources qui sont très utilisées au niveau du piémont de l'Atlas par des dérivations et épandages destinés à l'irrigation. D'après les études antérieures (Combe, 1977), la somme des débits consommés par l'irrigation est de l'ordre de 25 millions de m<sup>3</sup>/an et les débits écoulés des bassins situés entre oued Srou au Nord Est et oued El Abid au sud ouest sont de l'ordre de 200 millions de m<sup>3</sup>/an.

## **VIII. CONCLUSION**

La zone d'étude est située au cheval sur deux provinces de Béni Mellal et d'Azilal. Elle couvre le piémont Nord du Haut Atlas de Beni Mellal entre Ouaoumana et Bzou. Elle est caractérisée par une topographie relativement accidentée dans sa partie montagneuse avec une altitude variant entre 500 m et 2411 m. La population est relativement rurale à l'exception des centres en développement de laquelle l'agriculture et l'élevage constituent leur mode de vie.

Le développement de l'habitat accompagne la croissance démographique de la population, ce qui constitue une pression sur les ressources en eau en entraînant une augmentation des sources de pollution (domestique, industrielle et agricole) et une augmentation de la demande en eau.

L'agriculture qui se manifeste dans l'olivier constitue une activité socio-économique importante dans la zone d'étude. Elle conduit à la création d'un ensemble des huileries qui constituent une source de pollution par le rejet des margines. Les activités des carrières constituent également une importante des revenus de la région. toutefois, ce secteur pourrait engendrer des problèmes environnementaux.

L'analyse climatologique a mis en évidence le caractère semi-aride. Caractérisé par les précipitations moyennes annuelles d'environ 527mm, la température moyenne annuelle est de 20 °C, la vitesse de vents est inférieure à 2 m/s et l'évaporation annuelle est de 2188 mm. La pluie efficace retenue est de 196 mm.

La nature karstique des affleurements géologiques des bassins fait que, le réseau hydrographique est peu développé. L'hydrologie est caractérisée par la présence de plusieurs cours d'eau temporaires à l'exception de l'Oued Ouaoumana et l'Oued Derna. Les débits écoulés sont de l'ordre de 200 Mm<sup>3</sup>/an.

### **CHAPITRE III : CONTEXTE GEOLOGIQUE**

## I. INTRODUCTION

Le Haut Atlas est l'élément morphologique le plus important du Maroc. Il sépare les plateaux et les plaines atlantiques, au nord et à l'ouest et le domaine saharien, au sud et au sud-est.

Le Haut Atlas constitue l'élément le plus méridional des chaînes alpines péri-méditerranéennes. Il correspond à une chaîne montagneuse relativement étroite, allongée selon une direction approximative WSW-ENE couvrant une bonne partie de l'Afrique nord occidentale. Au sein de ce dispositif, la partie centrale du Haut Atlas marocain comporte deux grandes unités structurales :

- à l'Ouest, le massif ancien du Haut Atlas constitue d'un socle précambrien, de terrains primaires plissés et de granites relevant de l'orogénèse hercynienne ;
- le Haut Atlas de Beni Mellal prolongement montagneux vers l'est du massif cite, correspond à une chaîne de montagnes intracontinentale (Choubert et Faure Muret, 1962; Michard, 1976; Mattauer et al., 1977) résultant de l'inversion structurale d'un bassin essentiellement jurassique d'obédience téthysienne. La couverture post-hercynienne, plissée et décollée sur le Trias, comporte une épaisse série d'Age jurassique inférieur et moyen avec, localement, des dépôts crétacés et néogènes affleurant sur les bords Nord et sud de la chaîne. Elle montre un réseau de plis anticlinaux redressés, généralement étroits, crevés jusqu'au Lias ou au Trias avec localement des intrusions de roches magmatiques d'âge jurassico-cretacé. Ces plis aigus sont le plus souvent disposés en échelon et séparés par de larges synclinaux à fond érasé ou plat.

Le Haut Atlas central (Michard, 1976) ou Haut Atlas calcaire (Mattauer, 1977), dans lequel fait partie la zone d'étude, est limité par la transversale Marrakech-Ouarzazate à l'ouest, et la vallée de l'Oued Ziz à l'est. Ici, le substratum est rarement visible, et il n'y a guère que des affleurements de la couverture mésozoïque, dite « couverture atlasique plissée », dont les sédiments forment des séries caractéristiques. Les dépôts terrigènes rouges permo-triasiques sont surmontés par les carbonates blancs d'âge jurassique inférieur. Au Jurassique moyen et supérieur, on relève encore des dépôts terrigènes rouges, cette fois fortement épaissis. Les rares affleurements du crétacé et du Tertiaire, souvent érodés, se trouvent conservés sur la seule bordure de la chaîne ou au centre des synclinaux. En outre, on découvre des basaltes triasiques et liasiques, ainsi que des gabbros alcalins d'âge jurassique et crétacé. Ces derniers témoignent d'un amincissement de la croûte continentale par allongement (Hailwood et Mitchell, 1971).

Le soulèvement du Haut Atlas est le résultat d'une inversion structurale à partir du Crétacé et au Cénozoïque, pendant laquelle la couverture post-hercynien a été plissée et décollée sur le Trias détritique.

La zone d'étude fait partie du Haut Atlas de Beni Mellal, dont l'histoire géologique s'étale du Trias jusqu'au Quaternaire (figure 22). Elle est dominée par le relief de Jbel Ghnim avec une altitude de 2411 mètres.

Dans cette région, deux grandes structures se rejoignent : Le zone de faille d'Aghbala-Afourer d'orientation N 70° à N80° et le chevauchement frontal nord-atlasique. Ce dernier est orienté nord-est à sud-ouest dans l'Atlas de Beni Mellal, et est-ouest dans l'atlas d'Afourer.

D'une manière générale, la chaîne atlasique présente une structure caractéristique en éventail, à vergence Nord sur la bordure septentrionale et sud sur la bordure méridionale. Le secteur étudié présente une succession d'accidents inverses à vergence nord, nord-est et nord-ouest et d'anticlinaux étroits, clé style "éjectif", limité par de larges synclinaux. L'ensemble de ces structures témoigne d'un raccourcissement modeste (de l'ordre de 10 à 15% le long de la transversale de Béni Mellal ; Brede, 1992), suite à la phase d'inversion tectonique tertiaire.

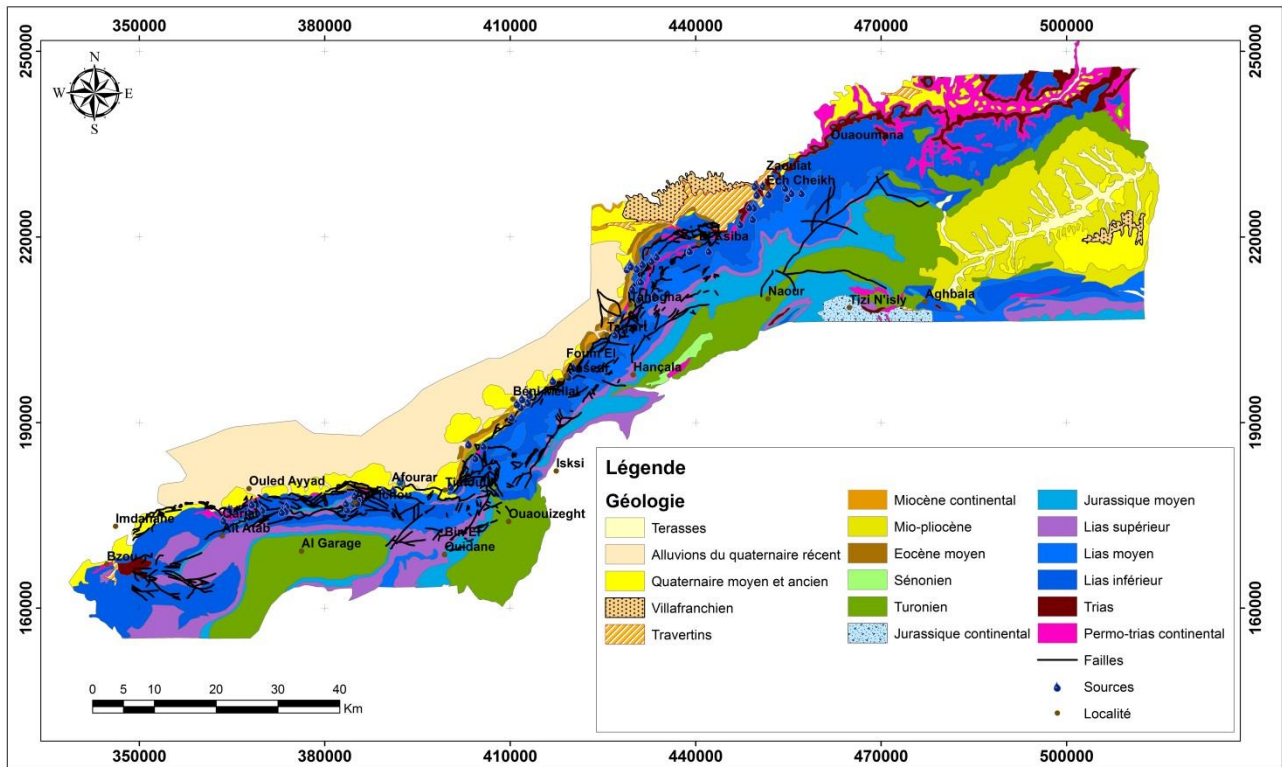


Figure 22 : Carte géologique de la zone d'étude

## II. LITHOSTRATIGRAPHIE

### II.1. Trias

Le Haut Atlas Central, au Maroc, est un segment d'une vaste chaîne montagneuse intracontinentale mésozoïque, individualisé dès le Trias dans la partie nord de la plaque africaine (Laville et al., 1994 ; Guezal et al., 2013). Dans son contexte géodynamique, il constitue un élément important pour les reconstitutions paléogéographiques et cinématiques de tout le domaine atlasique, depuis le Trias jusqu'à l'actuel. Dans ce secteur atlasique, les affleurements de Trias n'ont pas l'étendue qu'on leur attribue habituellement (Rolley, 1978; Laville, 1978). Situons encore les coulées basaltiques dans ce contexte d'origine fissurale (Rolley, 1978; Monbaron, 1980 ; Guezal et al., 2013), elles s'interstratifient au sein des Grès des Guettioua d'âge bathonien et se rattachent incontestablement au même événement magmatique (Jenny et al., 1981; Westphal et al., 1979). Les dépôts terrigènes rouges permo-triasiques sont surmontés par les carbonates blancs d'âge jurassique inférieur (Löwner, 2009).

### II.2. Lias

Les dépôts carbonatés du Lias se trouvent partout le long du sillon atlasique entre la Meseta marocain au nord-ouest, et le craton saharien au sud-est.

Au cours du Lias, la séparation d'un bassin de la plate-forme le long de la zone de décrochements d'Aghbala-Afourer montre l'instabilité de la plate-forme et produit ainsi une différenciation lithologique (Löwner, 2009). Dans le secteur étudié, le faciès calcaire dolomitisé domine cette série de sa base à son sommet (Bouchaou, 1988). Elle se présente sous trois formations à savoir le Lias inférieur, moyen et supérieur. Les couches calcaires plus au moins dolomitisées se trouvent broyées au voisinage des accidents tectoniques pour prendre une forme de matériel bréchi que très exploité en carrière au pied de l'atlas (Ait Asri à l'est d'Afourer).

La formation de Bouimoura (Monbaron, 1985) est la formation la plus dominante dans le chauvechement frontal de l'atlas. Cette unité correspond à l'équivalent latéral de la formation d'Aganane à l'est du méridien de Jbel Ghnim ou elle est datée du Sinémurien supérieur - Domérien moyen (Chafiki, 1994). Elle s'en distingue, toutefois, par un aspect plus massif (peu ou pas d'intercalations marneuses), par l'abondance d'épandages de sables oolithiques et bioclastiques.

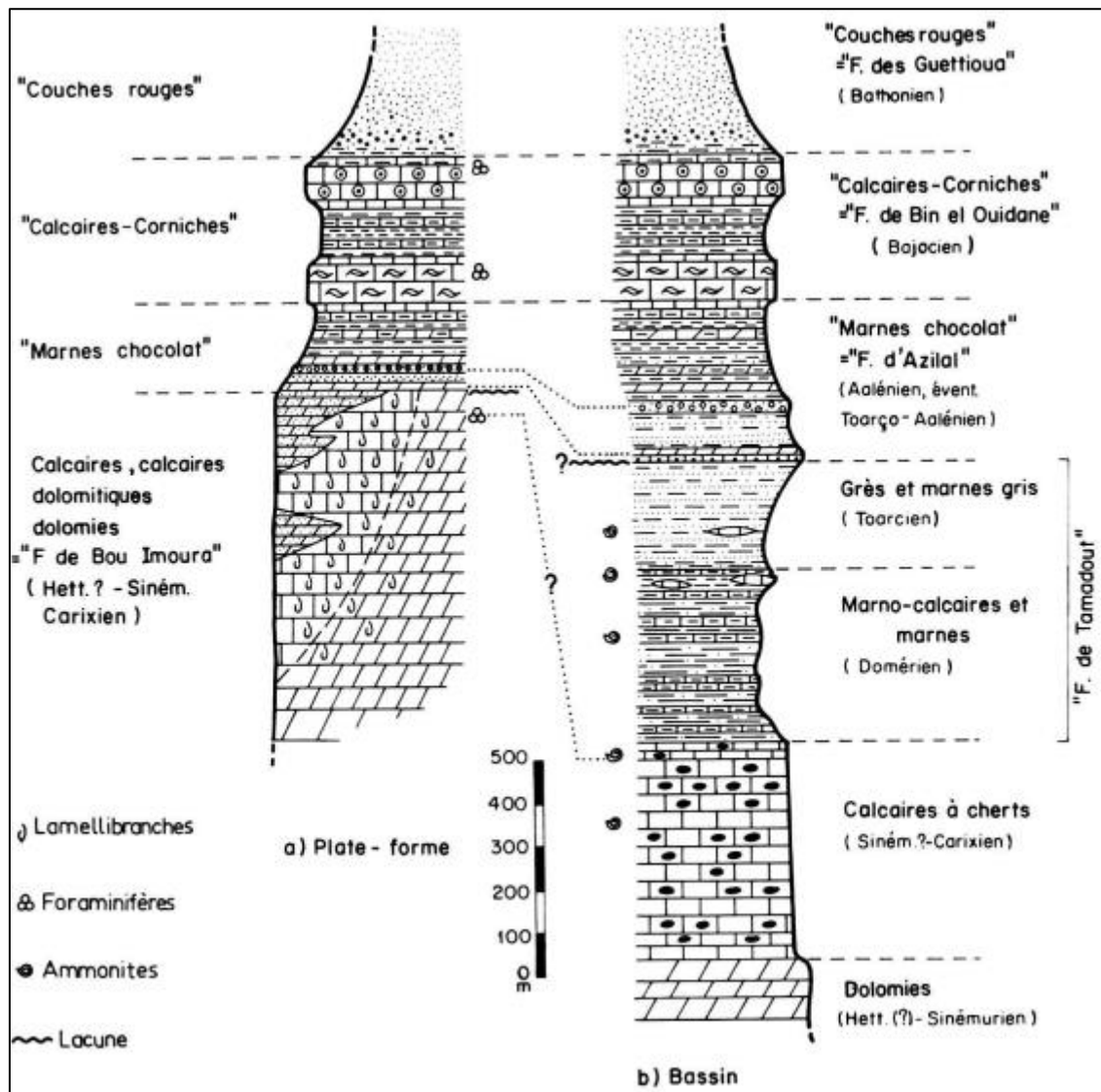
### II.3. Dogger

Les formations du Dogger (figure 23) sont essentiellement formées par le Bajocien constitué de deux bancs calcaires corniches séparés par des marnes et les couches rouges continentales du Bathonien, constituées de plusieurs niveaux de grès et d'argiles à passées de conglomérats.

Cette série du Jurassique moyen, s'accompagne de coulées basaltiques interstratifiées et assez épaisses dans les couches rouges. On peut distinguer cinq formations :

- **Formation d'Azilal** : Il s'agit d'un ensemble à dominance terrigène - grès à dragées de quartz, argiles et dolomies gréseuses bioclastiques - affleurant essentiellement au niveau de la bordure nord-ouest du bassin atlasique. Cette formation est datée par son encadrement stratigraphique du Toarcien moyen - Aalénien moyen (Jenny, 1988).
- **Le groupe de Bin El Ouidane** : Les trois unités qui composent cet ensemble forment une succession classique dans l'ensemble de zone d'étude (Monbaron, 1981) ou elles sont d'âge aalénien supérieur - Bajocien moyen. De bas en haut on distingue :
  - **formation Bin El Ouidane I** : Correspond à une barre de calcaires lités à bird eyes. Plus au sud, dans l'axe du bassin atlasique, elle est formée de calcaires à dominance oolithique (Jossen, 1988) ;
  - **formation Bin El Ouidane II** : elle est formée par des marnes et des calcaires marneux soulignés, dans la partie moyenne, par des passées pétries derhynchonelles. Des ammonites de la zone à sauzei y ont également été signalées (Jossen, 1988) ;
  - **formation Bin El Ouidane III** : c'est une succession de calcaires a onchoïdes en dalles, localement coralligènes et riches" en brachiopodes. Ces derniers indiquent un âge Bajocien moyen pour les assises sommitales de cette unité.





**Figure 23 :** Coupes lithologiques et attributions chronostratigraphiques de jurassique (Monbaron, 1981)

- **Formation de Tilougguit :** Les dépôts de cette formation représentent les derniers témoins marins d'âge jurassique dans le Haut Atlas de Beni-Mellal. Il s'agit d'une série marneuse et marne gréseuse à sa base et carbonatée à son sommet (Jenny et al., 1981). Le contenu fossilifère est représenté par des restes osseux de dinosaures au niveau des grès et par des coraux, lamellibranches et brachiopodes dans les calcaires sommitaux. Ces derniers sont datés du Bathonien inférieur.
- **Formation de Guettioua :** Essentiellement composée de matériel terrigène (conglomérats, grès et argiles), elle est célèbre par sa richesse en ossements de dinosaures (Monbaron, 1983). Une ou plusieurs coulées de basaltes peuvent localement s'interstratifier au sommet de cette unité (Jenny et al., 1981).
- **Formation d'Iouaridene :** Dans l'ensemble du secteur étudié, cette unité est composée de deux membres : des argiles rouges à minces passées gréseuses à la base et un membre évaporitique au sommet (Jenny et al., 1981 ; Löwner, 2009). Rapportée au Jurassique moyen sans argument paléontologique (Jenny et al., 1981), cette unité pourrait aussi appartenir au Jurassique supérieur (Souhel, 1987).

## II.4. Crétacé

L'affleurement du crétacé occupe les larges synclinaux (Ait Ateb, Ouaouizeght et Aghzif-Naour), sous forme des grès rouges brique et des marnes bariolées à gypses et marno-calcaires (Monbaron, 1985 ; Rolley, 1978). Dans le Dir, cette formation réduite présente sous faciès des calcaires blancs à beiges parfois dolomités, des marnes et marnocalcaires blanchâtres à jaunâtres.

## II.5. Tertiaire

Le tertiaire est représenté par les formations suivantes :

- La série phosphatée d'âge Maestrichtien et Eocène inférieur est formée de calcaire et grès phosphatés. Elle peut atteindre 100 m d'épaisseur dans le piémont et 300 m dans le synclinal du Tadla (Bouchaou, 1988) ;
- L'Eocène supérieur avec une série rouge continentale discordante sur l'Eocène inférieur. Elle disparaît par endroits suite à des laminages dus au chevauchement de la bordure ;
- La série Oligocène et Miocène, qui est formée de conglomérats rouges en discordances soit sur l'Eocène inférieur, soit sur l'Eocène supérieur (Choubert, 1952).

Le Mio-pliocène est largement représenté dans la zone d'étude par la série continentale représentée par le Villafranchien à cailloutis et les conglomérats.

## II.6. Quaternaire

Le Quaternaire est bien représenté aussi par le quaternaire moyen et ancien formé de travertins et repose en discordance sur les formations des écailles du Dir.

Au niveau du Dir, des formations principalement travertins se sont déposées et pouvant atteindre jusqu'à 60 m d'épaisseur. Ces formations proviennent probablement d'anciennes circulations d'eau aux travers des contacts anormaux du Dir.

Les formations de travertins et de calcaires lacustres du quaternaire se présentent sous formes de petites falaises d'une hauteur de 20m (figure 24). Elles sont très développées dans la zone d'étude et sont convoitées pour l'extraction de matériaux de construction.



**Figure 24** : photos dans une carrière d'extraction de matériaux de construction

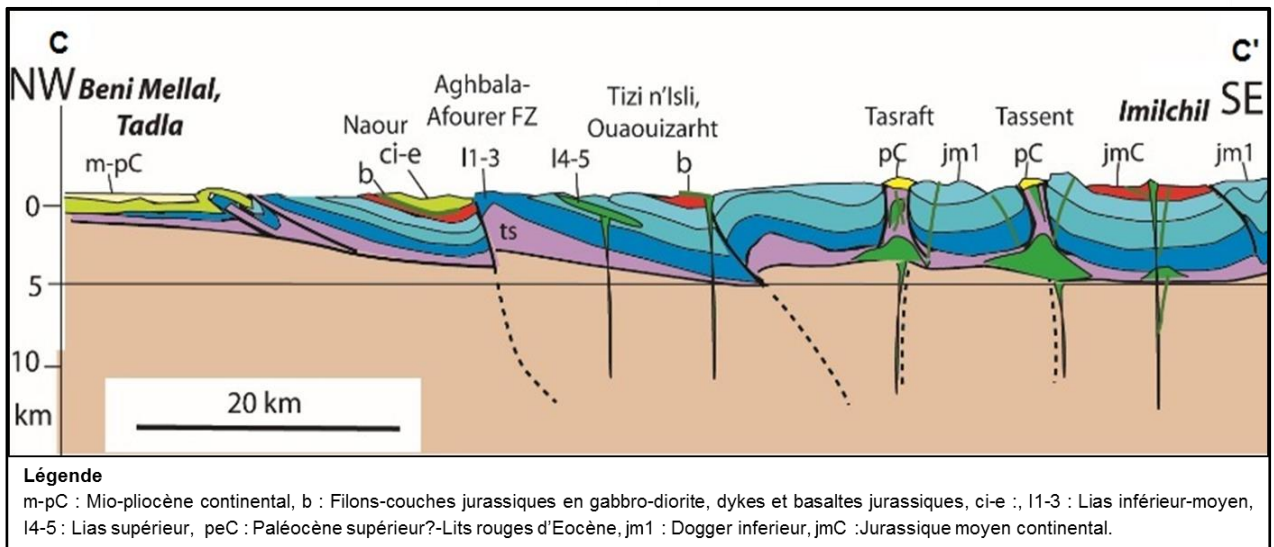
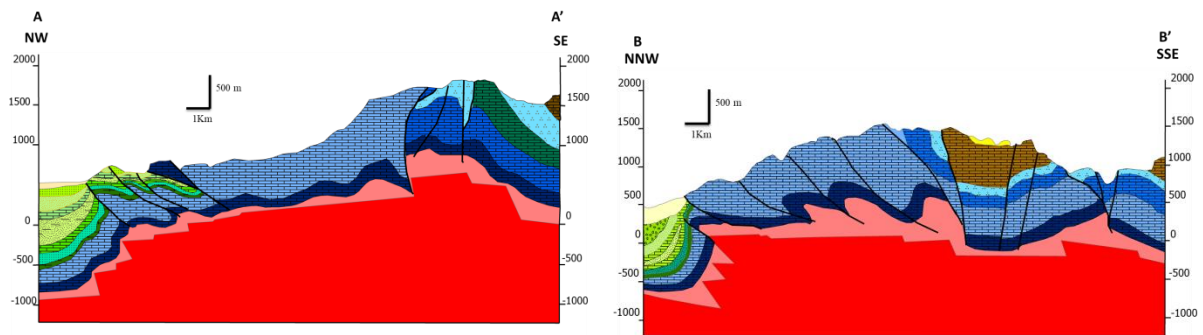
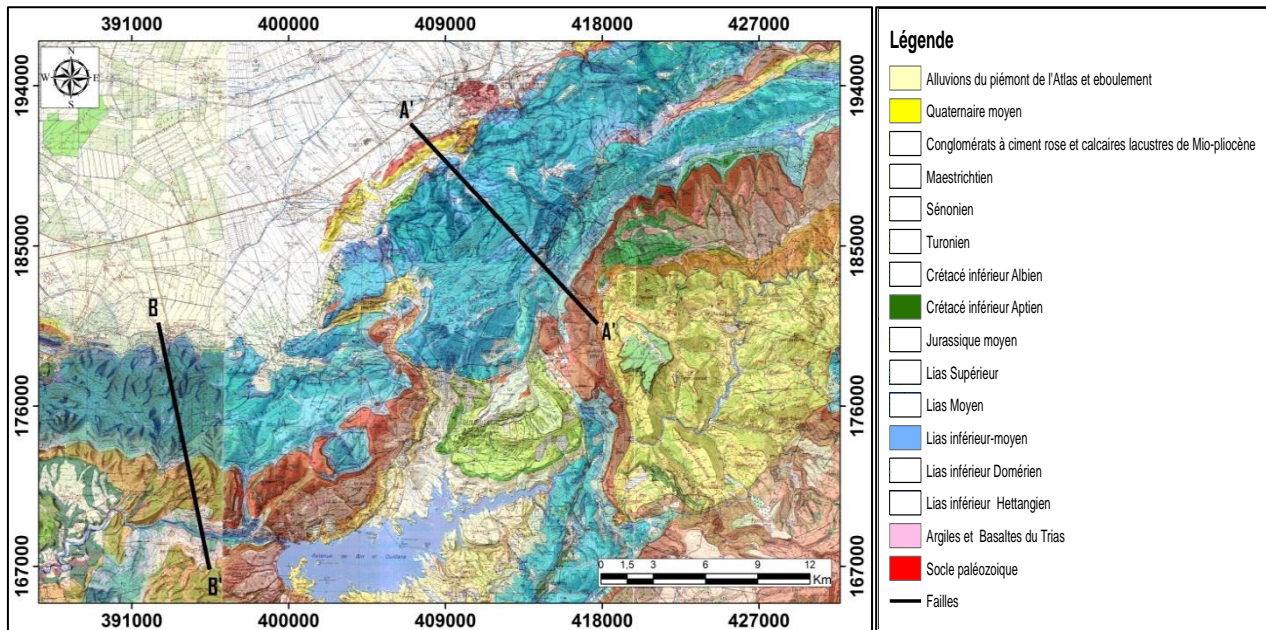
### III. Etude Structurale

Le Haut Atlas central présente des terrains de la couverture mésozoïque, principalement liasiques. Il s'agit donc d'une grande structure en fleur positive, selon le modèle d'une chaîne en transgression. Les chevauchements vers le nord sont dominants. Vers le sud, il s'agit de rétro chevauchements, provoqués par ce dispositif, qui ont un taux de raccourcissement moindre et ne forment parfois que des failles inverses.

Des unités de la couverture chevauchent elles-mêmes vers le nord les dépôts récents de la plaine du Tadla, provoquant morphologiquement des petites collines vallonnées d'avant-pays (Souhel et al., 2011). Par la suite, à partir du crétacé inférieur, la série est continue, mais réduite. Par contre, les formations de l'éocène et du mio-pliocène sont plus épaisses que dans les secteurs montagneux plus méridionaux. L'épaisseur des dépôts quaternaires peut être estimée à environ 50 m à proximité de l'Atlas et devient plus importante vers le nord (Souhel et al., 2011).

L'interprétation tectonique suppose des formations liasiques très réduites (50 à 100 m) sous le Tadla, entre le Trias argileux et évaporitique et le Crétacé. Au-dessus, il faut supposer la présence d'une discordance ou surface érodée, et l'absence complète du Dogger.

Les coupes AA' et BB' de la figure 24 donnent une interprétation des structures du haut atlas central d'après Löwner (2009).



**Figure 25 :** AA' et BB', Coupes tectoniques interprétatives du Haut Atlas Central (Löwner, 2009) CC' : Extrait de la coupe géologique du Haut Atlas central entre Béni Mellal-tadla et Tinjdad-Tinghir (Teixell et al., 2003; Ettaki et al., 2007 ; Michard et al., 2011).

La coupe AA' montre des terrains de la couverture mésozoïque, surtout liasiques, fortement faillés avec des chevauchements majeurs vers le nord, en direction de la plaine de Tadla, vers le sud-ouest et le sud, sur le synclinal de Ouauizarht et vers l'est sur des séries qui font partie du synclinal de Tagleft. Quant la coupe BB' montre que la couverture mésozoïque est fortement déformée en anticlinaux aigus (figure 25).

Dans l'atlas d'Afourer, on trouve aussi des synclinaux plus ou moins plats et vastes (Ait Imloul au milieu et Ait Ateb au sud). En général, toutes les séries jurassiques ont une direction presque est-ouest, conforme à la direction majeure du Haut Atlas Central.

La coupe CC' orientée NW-SE en traversant le centre de Naour, montre des terrains de la couverture mésozoïque (jurassique moyen et inférieur) au nord et au sud du synclinal de Naour. Sur la base de cette coupe, la faille d'Aghbala-Afourer sera constituée la limite sud du bassin d'alimentation des sources situées entre El Ksiba et Ououmana.

#### **IV. ETUDE DE L'IMAGE SATELLITAIRE**

Dans les roches carbonatées, l'écoulement des eaux et des fluides en général, est fortement conditionné par la fissuration. Un des objectifs de l'étude des aquifères en roche carbonatées ou karstiques, demeure la détermination de leur géométrie. La fracturation représente une donnée essentielle pour l'étude hydrogéologique de ce type d'aquifère.

Dans la zone d'étude, les formations géologiques sont majoritairement carbonatées, l'étude des réseaux de fractures est fondamentale pour la connaissance des comportements hydrauliques de l'eau dans le sous-sol.

En absence de carte géologique très détaillée et à une échelle appropriée couvrant toute la zone d'étude, l'usage de l'image satellitaire est un outil important qui permettra de renseigner sur la fracturation et les structures géologiques de la zone d'étude.

En effet, le traitement des images satellitaires permet d'identifier les linéaments et les fractures qui faisaient auparavant appel à des techniques de cartographie traditionnelle comme les photographies aériennes et les investigations de terrains.

##### **IV.1. Acquisition de l'image satellitaire**

Pour les besoins de l'étude, nous disposons d'une scène acquise par le capteur Landsat 8 de la NASA le 06 Septembre 2016. Le choix de cette période est basé essentiellement sur le fait que d'une part, les terrains sont dégagés de végétation (terres cultivées et herbacées) pendant cette période, et que les perturbations des ondes causées par les nuages et l'humidité sont minimales d'autre part.

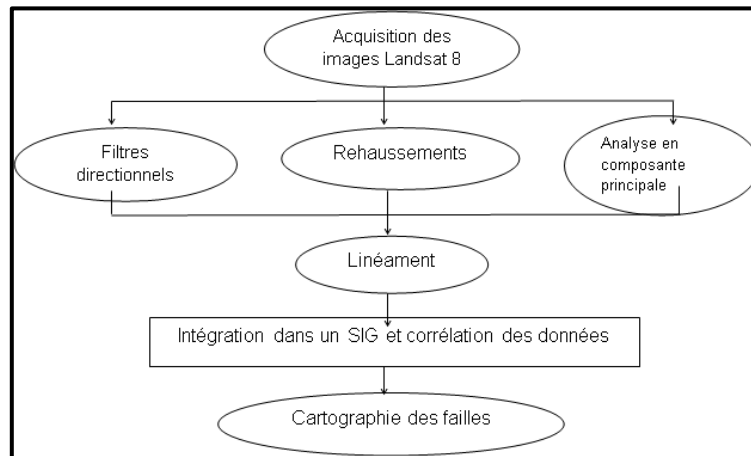
Notons que le dit capteur a été mis en service en 11 février 2013. Selon le site officiel de la NASA. Le capteur Landsat 8 a des avantages plus que celui de Landsat 7 ETM+ qui est utilisée fréquemment pour ce genre d'étude.

Ce nouveau satellite est équipé de deux appareils de pointe pour l'objet d'amélioration qualitative des images et la collecte maximale des données lors de l'observation de la terre. Il mesure l'énergie sous différentes longueurs d'onde notamment le visible, l'infrarouge et l'infrarouge thermique.

Le tableau 10 ci-dessous présente les caractéristiques de Landsat 8. Ce satellite est adaptable aux conditions météorologiques grâce à deux canaux supplémentaires qui lui permettent de détecter les nuages (1380 nm) et la correction atmosphérique (canal bleu à 440 nm).

Le Landsat 8 reprend la même scène d'un lieu chaque 16 jours avec une couverture nuageuse minimum.





**Figure 27 : Méthodologie d'extraction des linéaments géologiques**

Au cours de traitement des images, nous avons utilisé les méthodes suivantes pour mettre en évidence les failles et leurs directions :

### **IV.3. Etalement interactif du contraste**

Cette opération consiste à augmenter le contraste des données afin d'obtenir une meilleure visualisation de l'image, un étalement de dynamique linéaire de 2% est appliqué à tout canal par le logiciel de traitement utilisé. Nous avons ajouté un étalement interactif.

### **IV.4. filtres directionnels**

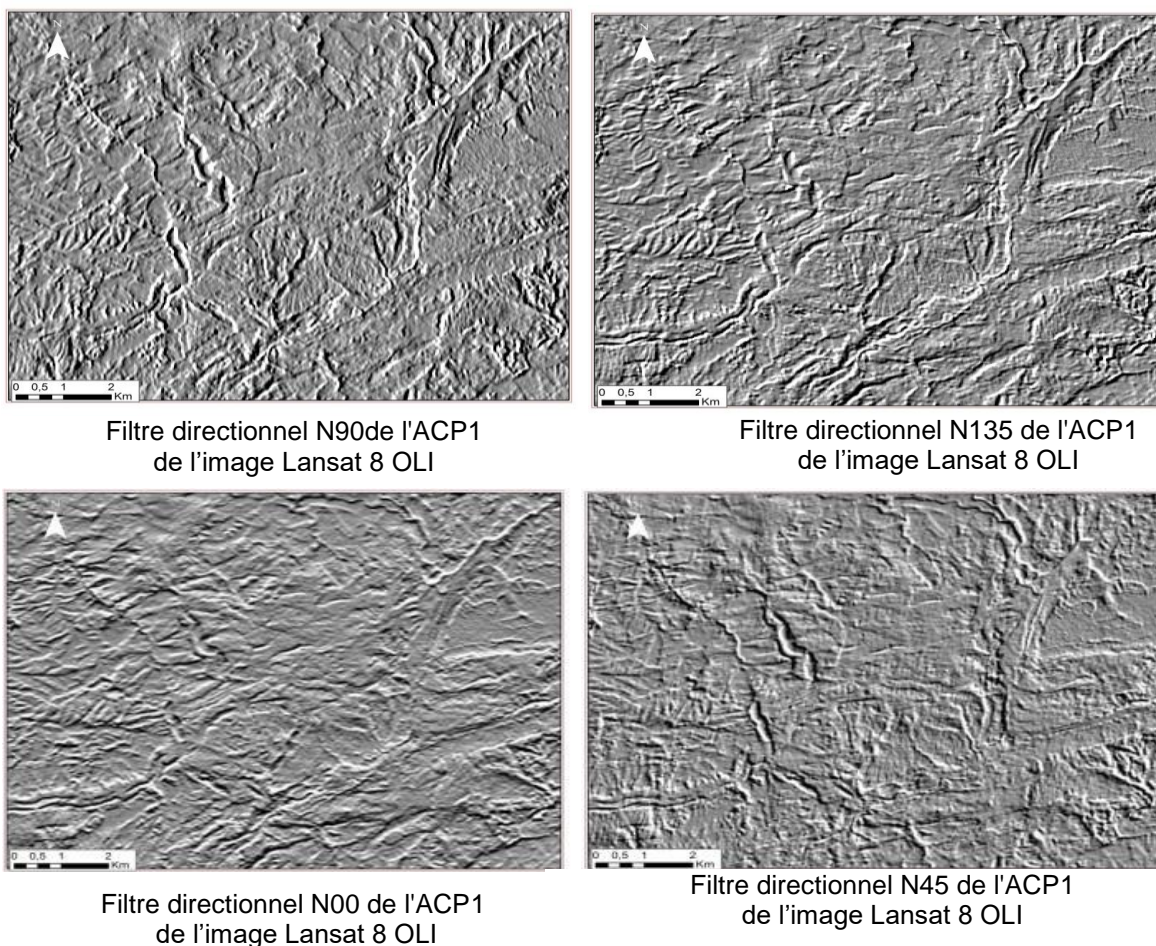
Cette application nous a permis de détecter les structures linéaires. Le problème posé par ce filtre est que les cours d'eau, les infrastructures et les limites des parcelles sont aussi considérés comme des linéaments ce qui va introduire une source d'erreur. Pour faire face à ce problème, on procède à la superposition des linéaments sur une image satellitaire du même délai que l'image Landsat utilisée.

Une interprétation visuelle peut être entreprise dans la zone montagneuse couverte par la végétation, puisque la végétation se développe dans les zones fracturées et on se référant au contexte géologique. Dans la plaine, les linéaments correspondent généralement à des limites de parcelles et des infrastructures.

### **IV.5. Analyse en composante principale d'image**

L'analyse en composante principale (ACP) est une méthode efficace pour accentuer une image multispectrale à des fins d'interprétation géologique.

C'est une méthode d'analyse des données multidimensionnelles permettant une translation et une rotation du système d'axe des variables d'origine (bandes) dans un nouveau système d'axe, les composantes principales (figure 28). Celles-ci ont l'avantage d'être décorrélées contrairement aux données brutes dans le référentiel d'origine.



**Figure 28** : Analyse multidimensionnelle de l'image satellitaire

#### IV.6. Analyse de la fracturation à partir de l'image satellitaire

La fracturation s'exprime sur les images Landsat 8 par des linéaments plus ou moins rectilignes qui délimitent ou décalent des zones à lithologies différentes ou à l'intérieur d'une même zone lithologique. Les décalages permettent de déterminer le sens des jeux et les rejets horizontaux des différentes failles et les principales directions des linéaments.

Les linéaments et les fractures sont parmi les paramètres déterminants qui guident la circulation des eaux par l'accélération de l'érosion et l'altération. En effet, le réseau hydrographique emprunte souvent les zones de faiblesses afin de minimiser l'énergie nécessaire à son écoulement (Deffontaines, 1990).

Comme décrit plus haut, plusieurs niveaux de traitement ont été effectués sur l'image Landsat 8 pour extraire les linéaments.

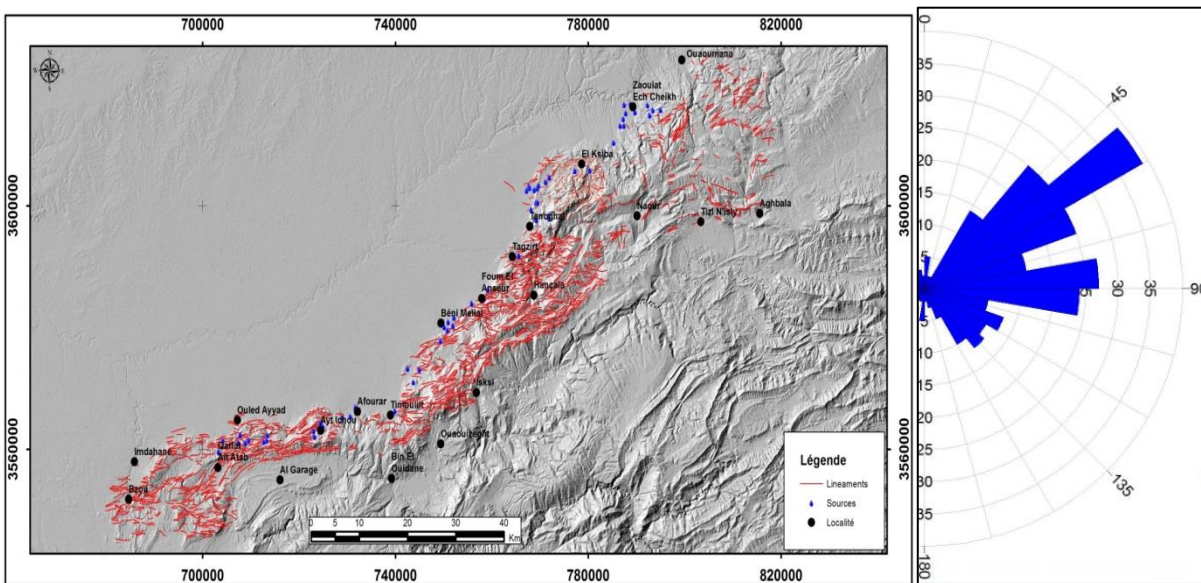
La figure 29 ci-dessous, montre les résultats du traitement de l'image satellitaire. Les résultats ainsi obtenus par cette technique montrent deux directions principales de fracturation :

- N 40-70, parallèle à la direction de la chaîne atlasique ;
- N 150-180, transverse à la chaîne (direction alpine).

Pour vérifier la qualité de ces résultats, il aurait été souhaitable de confronter les linéaments obtenus par traitement d'image avec les failles de la carte géologique à une échelle appropriée. Par ailleurs, les résultats obtenus sont conformes avec l'une des directions majeures ayant joué depuis l'orogénèse hercynienne : N40-N70 (Dresnay, 1975 ; Mattauer et al., 1977 ; Laville, 1978) et qui a



un caractère permanent dans l'évolution de la future chaîne au cours des temps mésozoïque et cénozoïque.



**Figure 29 :** Carte de linéaments issue de l'image satellitaire de Landsat 8

## V. GEOMORPHOLOGIE

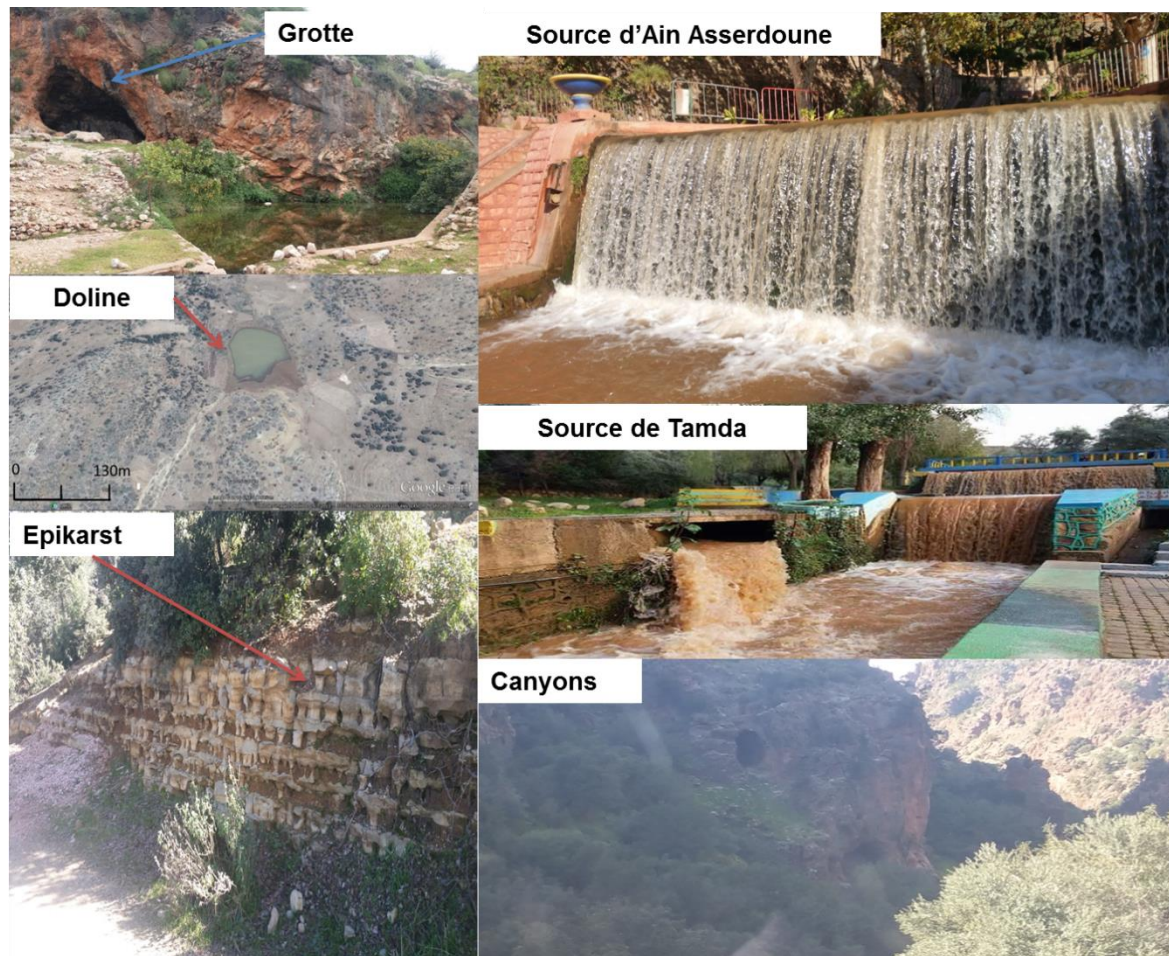
Le karst peut se développer dans des roches solubles carbonatées et évaporitiques, telles que le calcaire, la dolomie, le marbre, le gypse, l'anhydrite et l'halite. Les paysages karstiques sont caractérisés par le développement de cavités créées par les circulations d'eaux souterraines. Le karst superficiel du Haut Atlas est représenté par des lapiés variés, des ouvalas et dolines de diverses dimensions souvent dissymétriques, alors que pour le karst souterrain on y trouve les avens, les gouffres dont la profondeur dépasse les 100 m (Bienfait, 1978 ; Hakim, 1982) et les reliefs ruiniformes qui se localisent dans les jbel dominant directement le Dir. Il convient, en outre, de signaler l'importance des trous absorbants (ponors) qui peuvent, par temps d'orage, absorber de la boue et alimenter les sources en eaux troubles (Ain Asserdoune et Tamda...)(figure 30). Du point de vue de la pollution, on sait que les gouffres et les avens constituent un très grave danger de contamination des eaux par suite des chutes possibles d'animaux et de la mauvaise habitude des bergers d'y jeter des cadavres.

Dans les formations carbonatées principalement liasiques, les phénomènes de dissolution ont entraîné l'apparition d'un système complexe de cavités karstiques (El Khammari et al., 2007) de taille variable et de forme irrégulière.

Sur la base des images satellitaires et des enquêtes de terrain ont été effectués, Il est à souligner que les dolines et les lapiés sont les plus dominants. Les dolines ont des dimensions variant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres, atteignant parfois plus de 300 m de diamètre. Dans la plupart des cas, ces dolines présentent des formes allongées (ouvalas).

De la région de Timoullit à celle de Zaouiat Echeikh on remarque une forte concentration de dolines de grandes dimensions, des avens et des pertes c'est là où l'on rencontre des sources de haut débit notamment Ain Asserdoune, Tamda, Igly, Ouarnfaa, Taghbaloute N'Ou Hlima ...etc. Par contre dans la région d'afourer à Bzou, nous observons quelques dolines de petites dimensions, des champs de lapiés sur les zones quasi-tabulaires et la dominance des rides où la pente est relativement élevée, c'est là où l'on rencontre des sources dont le débit n'excède pas environ 10 l/s. Il est à noter, pendant la foration de souterrain d'Ait Ouarda-Afourer, des venues d'eau sous 14 à 15 Kg/Cm<sup>2</sup> de pression dans les calcaires du Lias, venues ayant nécessité des imperméabilisations par

injections (Combe, 1977). La neige tombée sur la partie montagneuse du Haut Atlas joue également un rôle important dans l'évolution des formes karstiques de surface (Couvreur, 1974).



**Figure 30** : Quelques Formes karstiques dans la zone d'étude

## VI. CONCLUSION

Du point de vue litho-stratigraphique, la zone d'étude située entre la plaine de Tadla et la montagne du Haut Atlas de Beni Mellal. Les formations dominantes sont des calcaires et dolomies du Lias qui ont subi la tectonique cassante. Les argiles du Trias et les marnes du Toarcien-Aalénien constituent successivement le mur et le toit de Lias et ont permis l'apparition au droit des contacts anormaux, des sources d'eau plus ou moins pérennes.

L'étude de l'image satellitaire a permis de dresser la carte de fracturation et de confirmer les deux directions principales de fracturation, N40-70, parallèle à la direction de la chaîne atlasique et N150-180, transverse à la chaîne (direction alpine).

Les potentialités karstiques du paysage du Haut Atlas jouent un rôle important dans la disponibilité en eau et sa répartition spatiale à l'échelle de la région étudiée.

## **CHAPITRE IV : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE**

## **I. INTRODUCTION**

Les structures diversifiées des formations géologiques et la conjonction de différents facteurs physiques (lithologie, géomorphologie, changement de la perméabilité) du Dir ont donné naissance à l'installation d'une centaine de résurgences karstiques au piémont de l'Atlas dont la plus importante est la source d'Ain Asserdoune (1,25 m<sup>3</sup>/s) à Béni Mellal et celle de Tamda à Zaouit Echeikh (300 l/s). La source d'Ain Asserdoune est considérée parmi les sources karstiques les plus importantes au Maroc et d'une importance non négligeable à l'échelle mondiale (Bakalowicz, 1977).

L'ensemble de ces exutoires émergent au niveau du chevauchement Nord atlasique et jaillissent sur un front de 145 Km entre Ouaoumana et Bzou. Celles-ci sont exploitées par un système de Seguias pour donner au Dir un aspect verdoyant.

Les calcaires du lias constituent un réservoir principal de la zone d'étude. Les écailles du Dir sont des réservoirs locaux fragmentés assurant la transition du Lias avec les aquifères de la plaine de Tadla (Bouchaou et al., 1997).

La synthèse hydrogéologique des aquifères du Haut Atlas de Beni Mellal est effectuée sur la base des résultats des synthèses géologique, structurale et inventaire des sources qui constituent les principaux exutoires des systèmes aquifères.

## **II. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES SYSTEMES AQUIFERES**

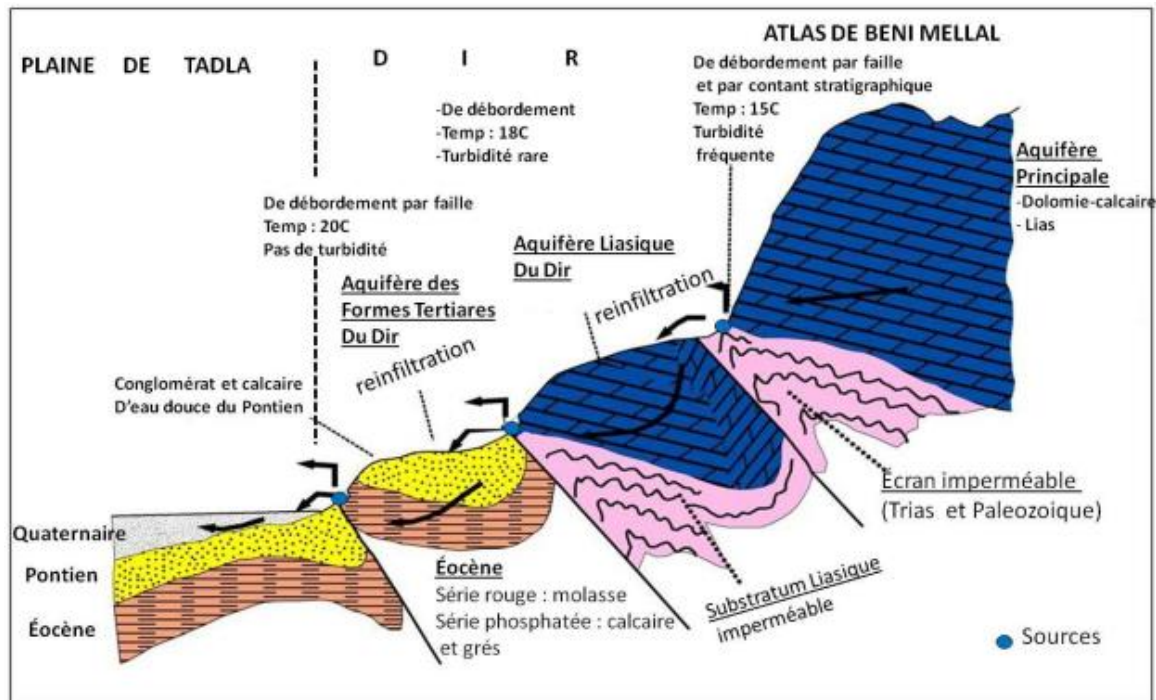
Il ressort de l'étude géologique que, la zone d'Ouaoumana-Bzou fait partie du Haut Atlas de Beni Mellal et renferme les systèmes aquifères suivants : l'aquifère du Lias, l'aquifère du Jurassique moyen (Aalénien-Dogger) et celui des formations du pliocène et quaternaires locaux du Dir.

Par ailleurs, l'implantation des sources sur la carte géologique synthétique de la zone d'étude fait ressortir l'émergence de trois types de sources :

- Les sources issues du Lias de l'Atlas ;
- Les sources issues du Jurassique moyen ;
- Les sources issues du Tertiaire et du Quaternaire.

### **II.1. Aquifère du Lias**

La nappe gît dans les calcaires dolomitiques, calcaires massifs très fissurés et karstifiés du Lias et constituant le réservoir principal du secteur étudié (figure 31). L'aquifère forme une bande de 10 à 12 Km de large et constitue le front nord du Haut Atlas de Beni Mellal. Il a été fortement affecté par la tectonique cassante de la phase atlasique, manifestée par plusieurs écailles chevauchantes connues sous le nom d'Ecailles liasiques du Dir. Le substratum de cet aquifère est constitué par les argiles rouges du Trias.



**Figure 31 :** Coupe hydrogéologique schématisée et simplifiée montrant les modes d'alimentation et les principaux aquifères de l'Atlas de Béni Mellal et du Dir (H. Bahzad, 1982, L. Bouchaou, 1995; A. Finigue, 2017)

La nappe est mise en charge par les failles affectant le Toarcien-alénénien imperméable, qui la recouvre dans les zones synclinales. La faille d'Aghbala-Afourer peut jouer un rôle important dans les circulations vers le Lias et constituer une zone de drainage (Bouchaou, 1988).

Les précipitations constituent l'essentiel des apports : pluies et neiges tombées sur les affleurements fissurés et karstiques. Des apports par abouchement, au travers des contacts avec les niveaux supérieurs du Jurassique moyen peuvent s'effectuer.

Peu de captages, par puits ou forages, ont été réalisés dans la zone d'étude et la géomorphologie bien karstifiée, ce qui n'a pas permis de dresser une carte piézométrique. L'essentiel des points d'eau est constitué par des sources.

## II.2. Aquifère du jurassique moyen (Dogger)

Au niveau de la zone d'étude, Ce niveau aquifère se manifeste dans les calcaires de l'Aalénien. Le substratum est assuré par le niveau de marnes et de marno-calcaires du Toarcien-Aalénien inférieur.

L'étendue de cet aquifère est très importante surtout en dehors de la zone d'étude et plus particulièrement au sud et sud-Est sous forme de grès et des calcaires beiges de Bathonien et Bajocien.

La productivité de l'aquifère est variable en fonction de la fracturation. On ne rencontre pas l'existence de sources importantes. Les eaux de l'Aalénien sont généralement peu chargées (0.2 à 0.5 g/l).

La nappe renferme dans cet aquifère est mise en charge principalement par des précipitations, des pertes des Oueds, d'underflows et de nappes phréatiques dans leurs parties amont lorsque le Dogger forme leur substratum et l'apport du lias grâce à des failles (Combe, 1977).

### II.3. Aquifère du Plio-Quaternaire

Il s'agit des aquifères locaux développées dans les formations villafranchiennes du pliocène et dans les travertins du quaternaires ainsi que des aquifères très localisés aux alentours des oueds.

### III. HYDROGEOCHIMIE DES SOURCES

L'appréciation de la qualité des eaux se base sur la mesure des paramètres physico-chimiques et sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques, indicateurs de qualité de l'eau.

#### III.1. Qualité physico-chimique des sources et faciès chimiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés sont ceux de 2015 et 2016 ont été recueilli de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er R'bia et ceux de 2019 ont été fait au sein du laboratoire de ladite Agence.

Le report des analyses chimiques de 46 sources effectuées sur le diagramme de Piper (figure 32), montre que toutes les sources présentent un faciès bicarbonaté-calcique et magnésien, ce qui renseigne que leur origine appartient à une formation riche en carbonates de calcium (Calcaires) et Magnésium (Dolomies).

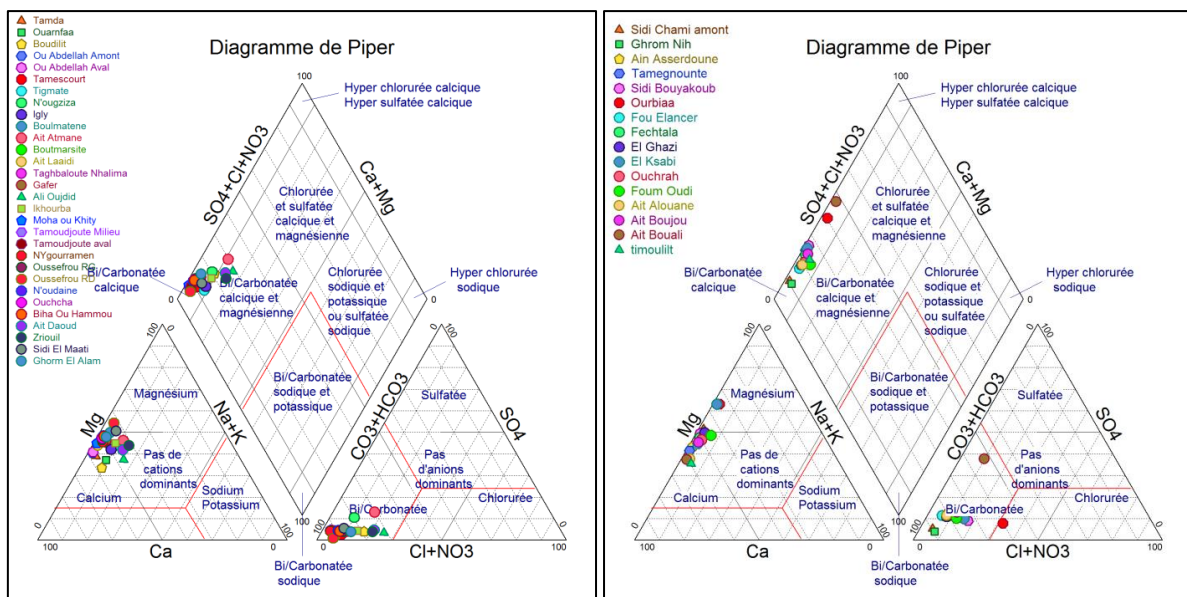


Figure 32 : Diagramme de Piper des sources

#### III.2. Analyse en composante principale

Le Haut Atlas de Beni Mellal est caractérisé par la jonction entre les unités géologiques du jurassique et celles du Plio-Quaternaires de Dir. Dans ce contexte, l'utilisation de différentes techniques statistiques multivariées (analyse en composantes principales, méthodes de classification) pour l'interprétation des données semble une solution intéressante pour une meilleure caractérisation des ressources en eau jaillissantes de ces formations géologiques.

Cette partie du chapitre a pour but de faire le diagnostic de la typologie des eaux des sources à travers les paramètres physico-chimiques mesurés in-situ et au laboratoire par l'analyse en composantes principales (ACP).

### III.2.1. Démarche suivie

L'outil utilisé est le XLSTAT version 2016 d'Adinsoft duquel le développement a démarré dès 1993 et a connu sa commercialisation sur internet depuis 1997 (version 97). Son fonctionnement s'appuie sur le Microsoft Excel pour la saisie des données et la publication des résultats. Les calculs sont entièrement réalisés par des programmes autonomes. L'utilisation d'Excel comme interface rend le produit très convivial, simple d'utilisation et efficace.

La démarche entreprise lors des multiples analyses statistiques, a comporté les phases suivantes :

- préparation et introduction de l'ensemble des données des diverses analyses physicochimiques sur le tableur Excel : un tableau des paramètres physiques et majeurs ;
- les points d'eau qui ont fait l'objet des différentes analyses, sollicitent tous les sources, et sont au nombre de 46 points ;
- analyse en composantes principales des données du tableau ;
- pour chaque analyse, nous avons fixé les options suivantes : ACP centrée et réduite, tester la significativité (corrélations), niveau de signification (coefficient de sécurité = 5 %) ;
- pour un tableau de données, nous avons procédé à une série d'ACP qui ont consisté à des éliminations de variables et/ou d'individus jusqu'à l'obtention du pourcentage le plus élevé de l'information totale ;
- les axes principaux retenus sont les F1, F2 et le plan de projection est F1XF2 ;
- les résultats édités et interprétés dans la suite de cette partie sont : la matrice de corrélation, les pourcentages des axes, les projections des variables et des individus.

### III.2.2. Analyse et discussions des résultats

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites à l'aide de logiciel XLSTAT. Les données portent sur l'ensemble des 46 sources. 12 variables ont été traitées (Annexe 3), à savoir les paramètres physiques (T, pH, conductivité électrique) et les ions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ).

Afin de minimiser la perte d'information, l'ACP réalisé a consisté aux éliminations des variables suivantes : pH, Température, Nitrates et Sulfates.

Dans ce cas, les deux axes principaux choisis, F1, F2 représentent respectivement 38.77, 31.52 soit 70.29 % de l'information totale (figure 33).

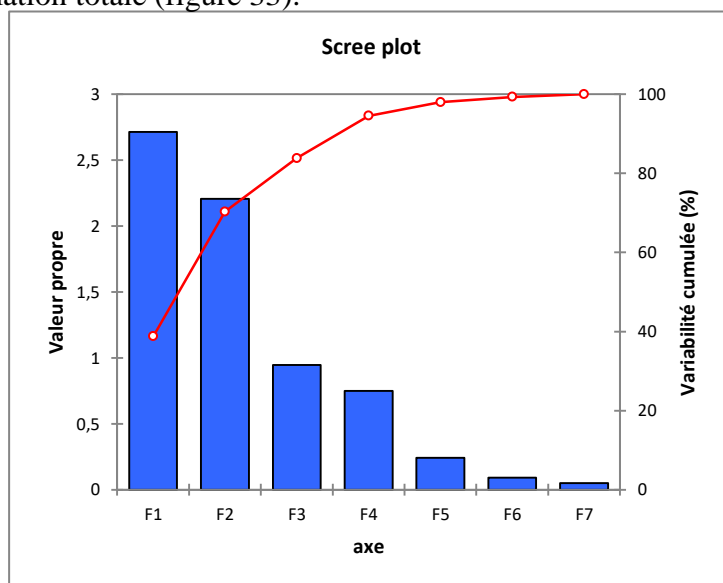


Figure 33 : Variabilités cumulées des différents axes principaux

### a. Matrice des corrélations et variance

Les premiers résultats à exploiter, sont ceux de la matrice des corrélations (tableau 11) qui existent entre les différentes variables. En effet, les corrélations positives importantes sont indiquées en gras dans le tableau.

**Tableau 11** : Matrice de corrélation des paramètres physiques et majeurs

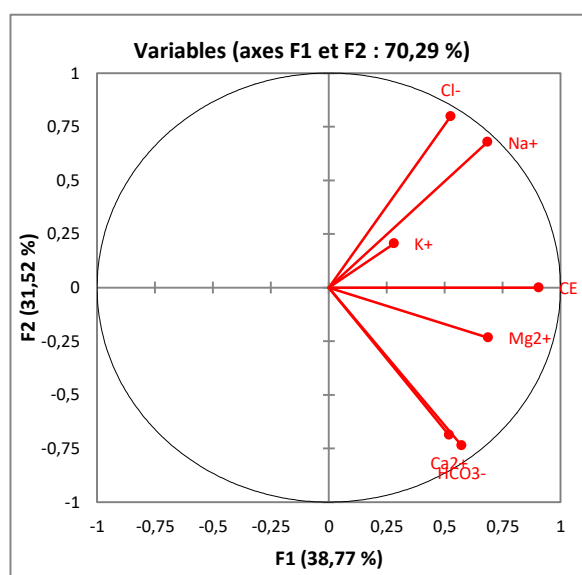
Variabes	CE	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
CE	<b>1</b>						
Na <sup>+</sup>	<b>0,629</b>	<b>1</b>					
K <sup>+</sup>	0,163	0,234	<b>1</b>				
Mg <sup>2+</sup>	<b>0,491</b>	0,223	0,048	<b>1</b>			
Ca <sup>2+</sup>	<b>0,554</b>	-0,061	0,049	0,212	<b>1</b>		
Cl <sup>-</sup>	<b>0,418</b>	<b>0,894</b>	0,191	0,196	-0,273	<b>1</b>	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,404</b>	-0,093	0,027	<b>0,616</b>	<b>0,722</b>	-0,238	<b>1</b>

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

### b. Projections des variables

L'analyse des variables (figure 34) retenues montre que :

- **Le facteur 1** exprimant 38,77% de l'inertie totale, est essentiellement bien corrélé avec les variables : conductivité et Magnésium. Il s'agit bien du pôle de minéralisation issue en partie de l'interaction eau – roche. La présence du magnésium indique généralement des eaux à transit lent (Bakalowicz, 1994)
- **Le facteur 2** exprime 31,52 % de l'inertie totale du nuage, il est caractérisé par le chlor et le sodium dans le pôle positif et Calcium et bicarbonate dans le pôle négatif. Il s'agit bien du pôle du contact avec des eaux météoriques et superficielles ainsi que les eaux qui circulent dans les réservoirs carbonatés.



**Figure 34** : Projections des variables dans le plan F1XF2



### c. Projections des individus

L'analyse de la projection des individus dans le plan factoriel F1XF2 montre qu'on peut subdiviser les points de mesure en trois groupes (figure 35) :

1. groupe des eaux très minéralisés par rapport aux autres : 45 il s'agit de la source d'Ait Bouali situé en aval du douar d'Ait Bouali et issue d'une formation gréseuse (Album photos en Annexe) ;
2. groupe des eaux d'origine météorique et superficielle : 11, 16, 17, 27, 28, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46. Se sont des eaux des sources où sa composition chimique est influencée par les eaux provenant de la zone de recharge et les écoulements superficiels. Pour ce groupe, on n'oublie pas l'origine géologique qui se manifeste dans le contact des eaux avec les formations argileuses ;
3. groupe des eaux exclusivement liées à l'aquifère carbonaté : 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32.

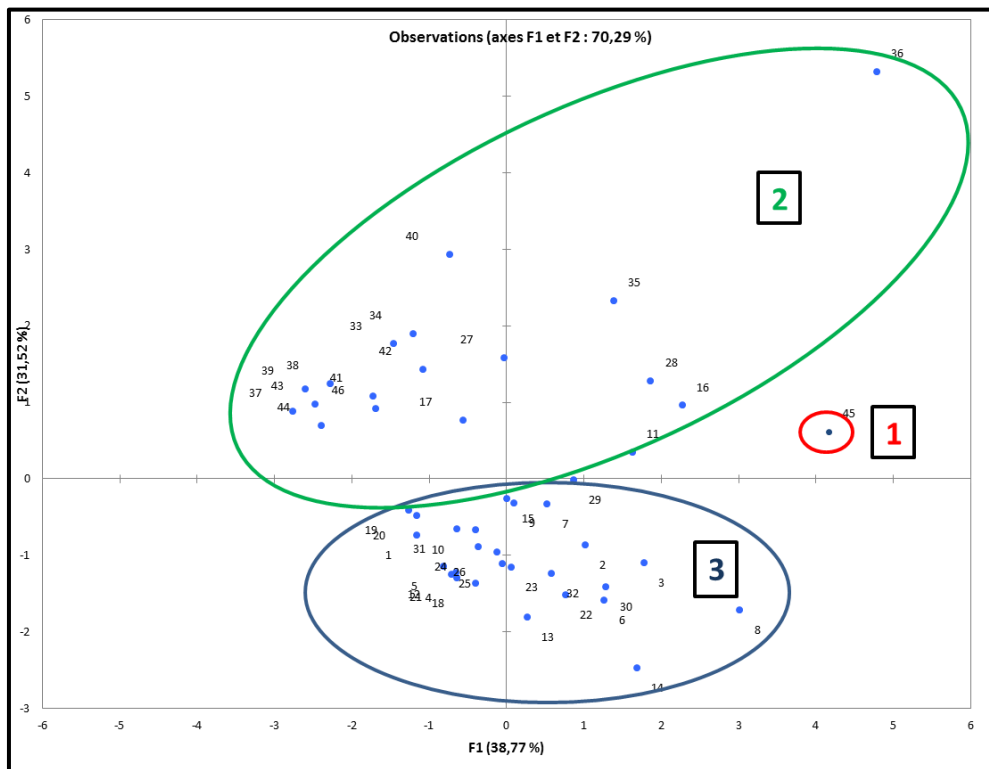


Figure 35 : Projections des points d'eau dans le plan F1XF2

## IV. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES SOURCES SITUÉES ENTRE OUAOUMANA ET BZOU

A la base du contexte géologique de la zone d'étude, les sources du Dir émergent directement à partir d'une formation ou des contacts anormaux entre les différentes formations (tableau 12). Après avoir caractérisé les propriétés géologiques des aquifères jurassiques et de plio-quadernaires, il est nécessaire de comprendre les propriétés hydrodynamiques de ces exutoires. En effet, les variations de débit de l'eau souterraine au cours du temps constituent des signaux qui informent sur le fonctionnement dynamique de l'hydrosystème karstique (Bakalowicz, 1979; Mudry, 1990).

**Tableau 12 : Mode d'émergence des sources**

N°	Nom	Formation géologique	N°	Nom	Formation géologique
1	Tamescourt	Lias-primaire	34	Fechtala	Lias -Paliocène
2	Boutmarsite	Lias-Dogger	35	Fou Elancer	Lias -quaternaire
3	Ait Laaidi	Dogger	36	Sebk	Paliocène-quaternaire
4	Ou Abdellah Amont	Lias-Dogger	37	El Ksabi	Quaternaire
5	Ou Abdellah Aval	Lias-Dogger	38	El Ghazi	Lias-quaternaire
6	Tamda	Lias-Quaternaire	39	Ain Asserdoune	Lias
7	Boudilit	Plioquaternaire	40	Sidi Bouyakoub	Quaternaire
8	Ouarnfaa	Villafranchien-Trias	41	Tamegnounte	Quaternaire
9	Igly	Villafranchien-Quaternaire récent	42	Ourbiaa	pliocène-Paliocène
10	Tiguemate	Lias	43	Ait Boujou	Lias-quaternaire
11	Ait Athmane	Lias	44	Ait Alouane	Lias
12	Boulmatene	Lias-primaire	45	Foum Oudi	Mio-pliocène
13	N'ougziza	Lias	46	Timoulilt	Lias-quaternaire
14	Taghbaloute N'Ou Hlima	Lias	47	Tighboula	Quaternaire
15	Agh.N' Moha Ou khity	Lias	48	Rbat	Quaternaire
16	Agh.N'ygourramen	Lias	49	Anfag	Lias
17	Ain Tamoudjoute Amont	Lias	50	Saghden	Lias
18	Ain Tamoudjoute Milieu	Lias	51	Ait Ichou Aval	Quaternaire
19	Ain Tamoudjoute aval	Lias	52	Ait Ichou Milieu	Lias -quaternaire
20	Ain Ikorba	Ecaille liasiques du Dir	53	Ait Ichou Amont	Lias -crétacé inférieur
21	Ain Sidi Chami Amont	Lias	54	Kherrouba	Lias
22	Ain Sidi Chami Aval	Ecaille liasiques du Dir	55	Iferghs	Cénomano-turonien
23	Ain Ou Achcha	Ecaille liasiques du Dir	56	Ait Imloul	Albo-cénomanién
24	Ain Ou Sefrou R.G	Ecaille liasiques du Dir	57	Safsaf	Lias
25	Ain Ou Sefrou R.D	Ecaille liasiques du Dir	58	S'Bouزيد	Lias
26	Ain N'oudaine	Ecaille liasiques du Dir	59	Inifif	Lias-dogger
27	Ain Biha Ou Hammou	Ecaille liasiques du Dir	60	Ait Chliyyan	Lias-dogger
28	Ain Ait Daoud	Plio- quaternaire	61	Echorfa	Lias
29	Ain Sidi Maati	Plio- quaternaire	62	Aghbalou Moulay Abdellah Abdeslam	Lias-trias
30	Ain Zriouil	Plio- quaternaire	63	Ait Accou	Lias-quaternaire
31	Ain Ghorm Nih	Plio- quaternaire	64	Ait Habbou	Lias-trias
32	Ain Ghorm El Alem	Plio- quaternaire	65	Ait Bouhamza	Lias-quaternaire
33	Tazeroualte	Lias	66	Tibadine	Lias

#### **IV. 1. Sources situées entre El Ksiba et Ououmana**

L'analyse des débits des sources objet de la présente étude se fera selon la répartition déjà mise en place en trois groupes de sources. La période de données des débits moyens mensuels interannuels s'étale de 1973 à 2014. L'exploitation des données de jaugeage des différentes sources, ont permis d'élaborer les diagrammes de leur débits au pas de temps annuel et mensuel.

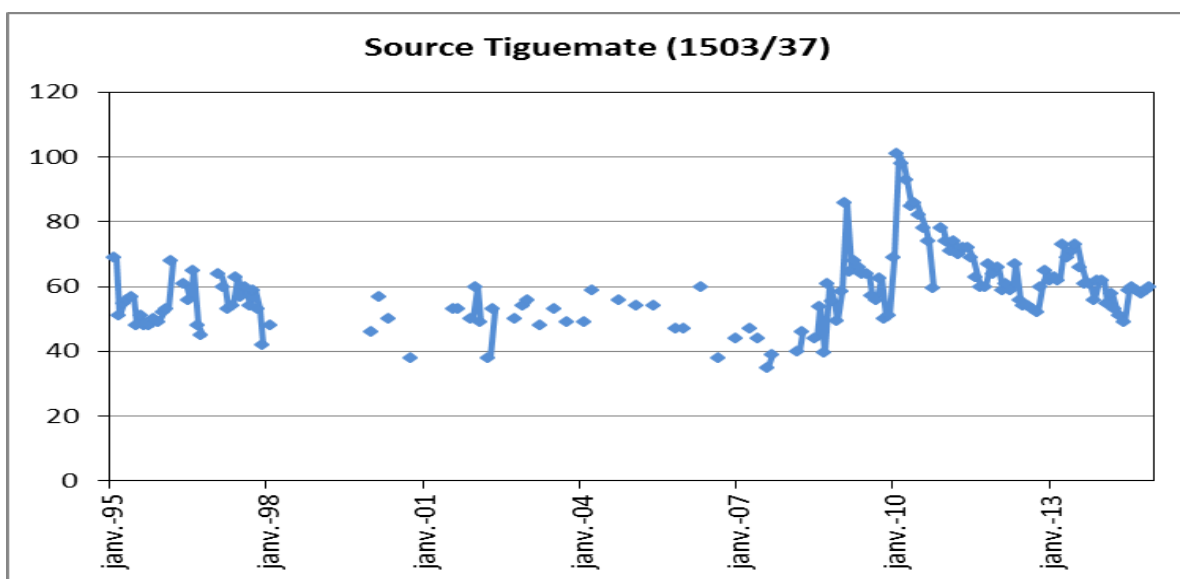
## IV.1.1. Sources du Lias

### a. Source Tiguemate

La source de Tiguemate est située dans le territoire de la Commune rurale de Dir d'El Ksiba. Elle présente les coordonnées suivantes :  $x = 449\ 321$  ;  $y = 222\ 968$  ;  $z = 992$ .

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Lias. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable des douars voisins et l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias en béton aménagées dans ce sens. Cette source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

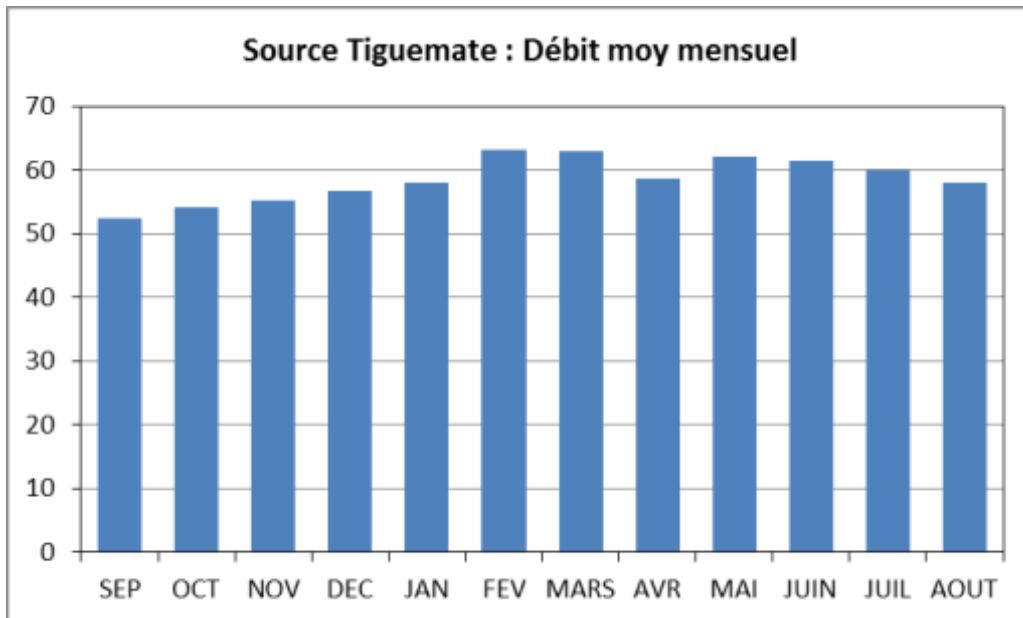
Le graphique de la figure 36 ci-dessous, montre l'évolution du débit mensuel de la source Tiguemate durant la période 1995-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1973-1994 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires (7 valeurs sur 20 ans).



**Figure 36 :** Evolution des débits mensuels de la source Tiguemate

La source a enregistré un débit peu variable pendant la période 1995-2008. A partir de 2008, la source change de comportement et on note une fluctuation importante du débit et des épisodes d'histogrammes de crues très courtes. On note par ailleurs, une nette amélioration du débit de la source au courant des dernières années.

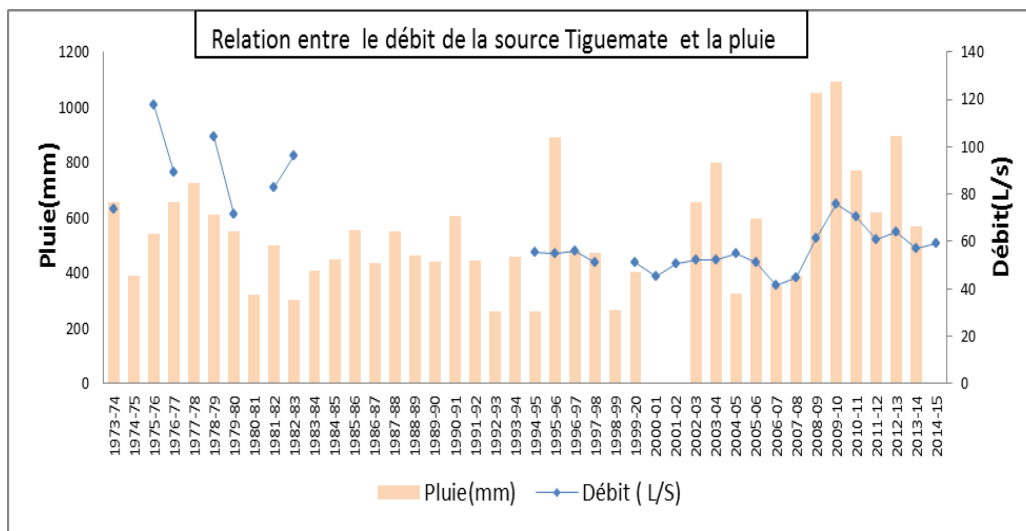
Le graphique de la figure 37 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.



**Figure 7 :** Débits moyens mensuels de la source Tiguemate

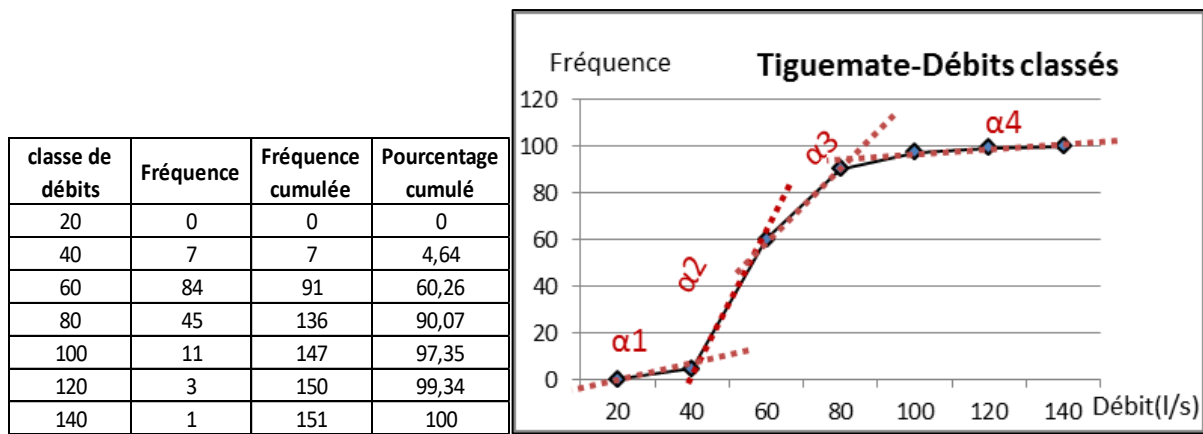
Le graphique montre un seul profil d'hydrogramme de crue très aplati témoignant d'un débit soutenu de la source durant toute l'année et donc d'un réservoir important très étendu bien alimenté.

La figure 38 montre la relation entre le débit de cette source et la pluviométrie durant la période 1995-2014.



**Figure 38 :** Evolution des débits annuels de la source Tiguemate

La source a enregistré un débit peu variable pendant la période 1994-2008. A partir de 2008, le débit de la source change de comportement et on note une fluctuation importante avec deux épisodes d'histogrammes de crues de la source durant 2008-2012 et 2012-2013. Durant cette période, la source Tiguemate montre une corrélation positive avec les précipitations enregistrées durant la même période.



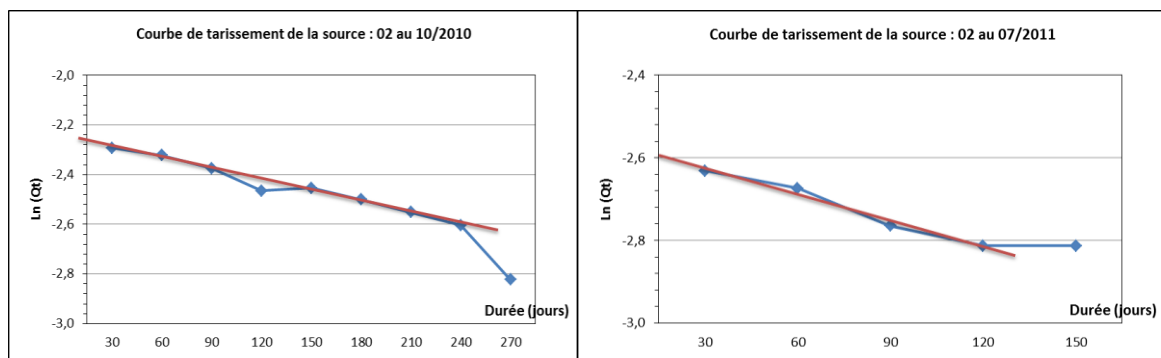
**Figure 39 :** Débits classés de la source Tiguemate

La courbe des débits classés de la figure 39, présente trois ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dus aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde rupture de pente à 60 l/s pourrait être associée à l'exploitation d'un système karstique plus profond et plus transmissif.

La troisième rupture à 80 l/s, avec une pente plus faible que la deuxième, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Tiguemate en 2010 et 2011.

Les graphiques de la figure 40, donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.



**Figure 40 :** Courbes de récession de la source Tiguemate

Le tableau 13 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 13 :** Réserve régulatrice de la source Tiguemate

Paramètres	2010	2011	Réserve moyenne
$\ln(Q_0)$	-2,29	-2,63	<b>6</b>
$\ln(Q_t)$	-2,32	-2,67	
Coef. tariss	0,00115	0,00154	
$V_0$ (Mm <sup>3</sup> )	8,09	4,05	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 14) est variable d'une année à une autre de 52 à 26 Km<sup>2</sup>.

**Tableau 14 : Surface d'alimentation de la source Tiguemate**

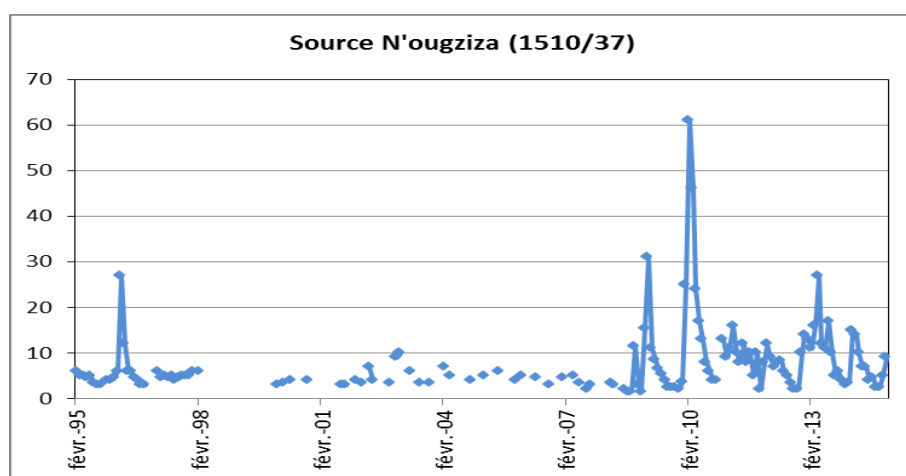
Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
2010	8,09	196	51,59
2011	4,05	196	25,83

### b. Source N'Ougziza

La source N'Ougziza est située dans le territoire de la Commune rurale de Naour. Elle présente les coordonnées suivantes : x = 447 389 ; y = 220 408 ; z = 1116

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Lias. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable des douars riverains et l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias en béton aménagées dans ce sens et l'abreuvement du cheptel. La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

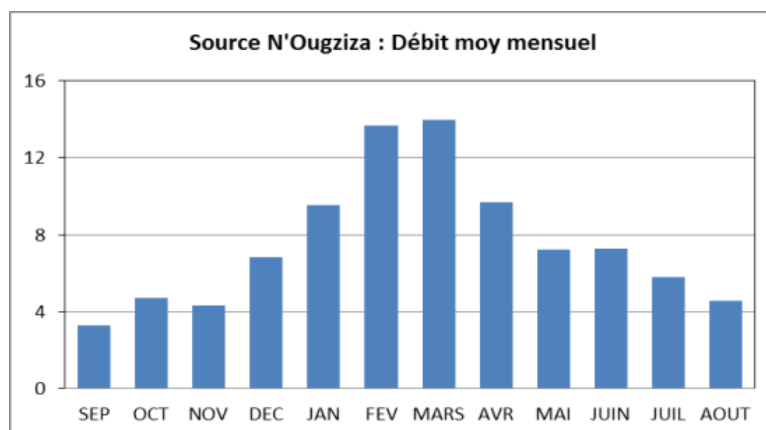
Le graphique de la figure 41, montre l'évolution du débit mensuel de la source N'Ougziza durant la période 1995-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1978-1995 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires (3 valeurs sur 17 ans).



**Figure 41 : Evolution des débits mensuels de la source N'Ougziza**

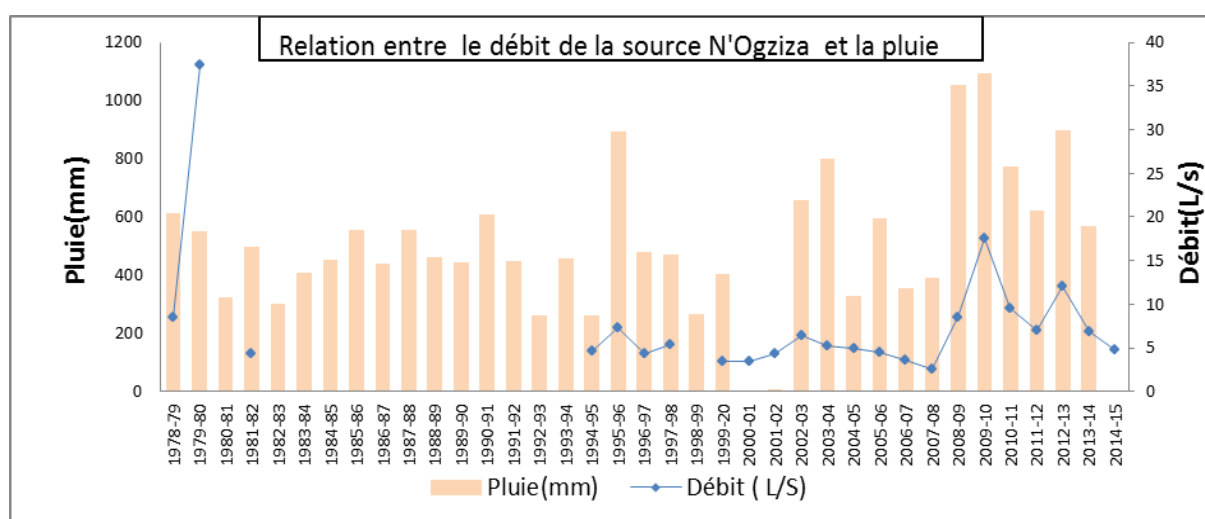
La source a enregistré un débit constant pendant la période 1995-2008. A partir de 2008, le débit de la source change de comportement et on note une activité karstique intense avec des histogrammes de crue de courte durée, mais d'intensité importante ce qui témoigne d'un bassin versant de faible étendue et des circulations rapides d'eau.

Le graphique de la figure 42 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.



**Figure 42 :** Débits moyens mensuels de la source N'Ougziza

Le graphique donne un seul profil d'hydrogramme de crue qui s'étale de Novembre à Août, ce qui témoigne d'un bassin versant très important et d'un temps de décrue très long et donc d'un réservoir important bien alimenté avec un système de karstification suffisamment développé.



**Figure 43 :** Evolution des débits annuels de la source N'Ougziza

Le graphique de la figure 43 ci-dessus, montre la relation entre le débit de la source N'Ougziza et la pluviométrie de la région. En effet, les mesures de débits de la source durant la période 1999-2008 sont presque invariables sans corrélation avec les précipitations.

Par ailleurs, durant la période 2008-2014, la source N'Ougziza change de comportement et on note une corrélation positive avec les précipitations enregistrées durant la même période avec deux épisodes d'histogrammes de crues de la source durant 2008-2012 et 2012-2014.

La courbe des débits classés de la figure 44, présente une rupture de courbe à 15 l/s. La rupture avec une pente plus faible, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

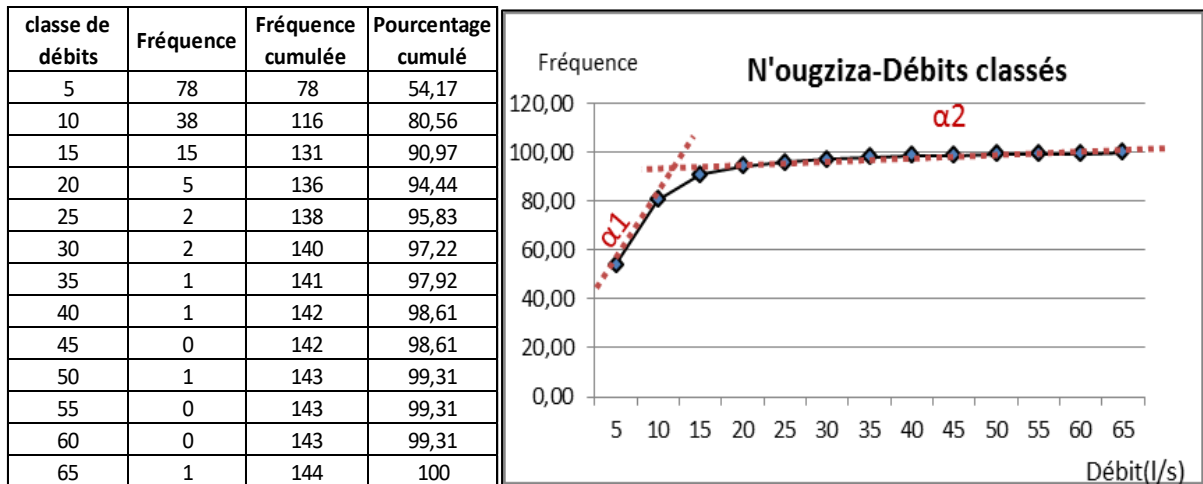


Figure 44 : Débits classés de la source N'Ougziza

Deux courbes de récession ont été établies pour la source N'Ougziza entre 1996 et 2014. Les graphiques de la figure 45 donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.

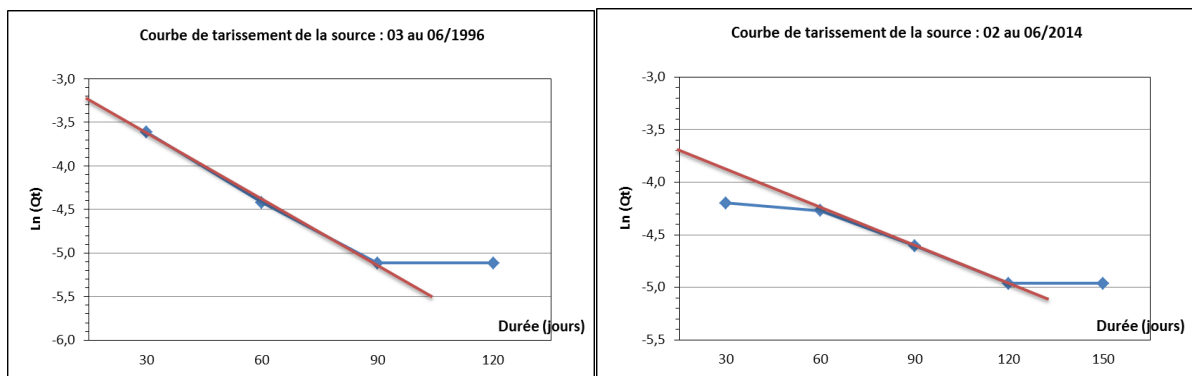


Figure 45 : Courbes de récession de la source N'Ougziza

Le tableau 15 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

Tableau 15 : Réserve régulatrice de la source N'Ougziza

Paramètres	1996	2014	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-3,61	-4,27	<b>0,3</b>
Ln(Qt)	-4,42	-4,61	
Coef. tariss	0,03108	0,01305	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	0,11	0,16	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 16) est variable d'une année à une autre. On retient une surface de 0,8 Km<sup>2</sup>.



**Tableau 16** : Surface d'alimentation de la source N'Ougziza

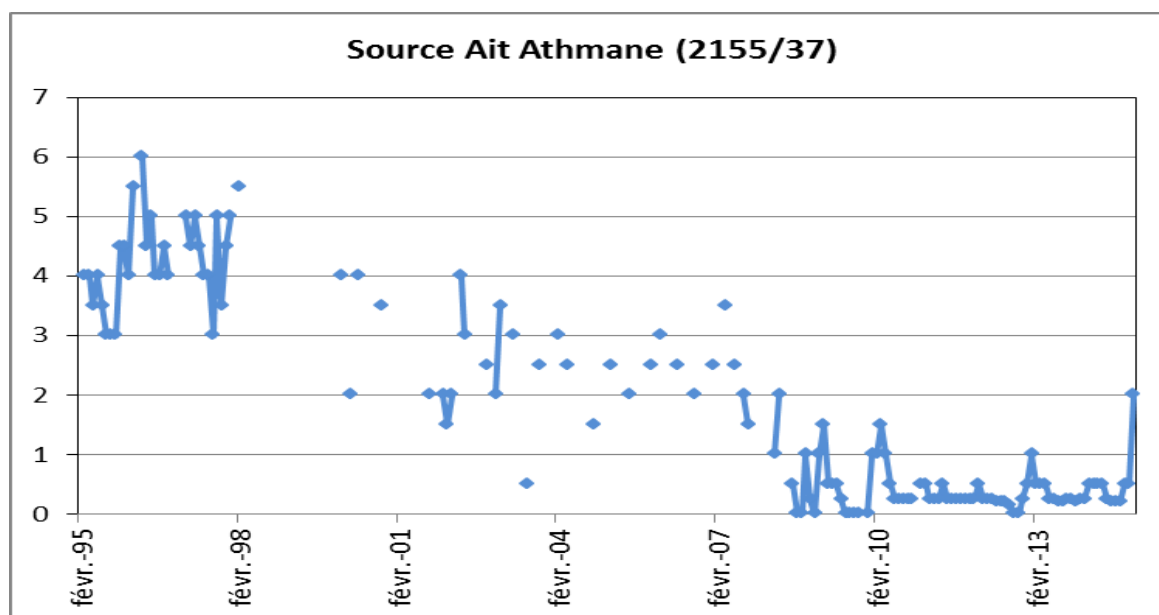
Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1996	0,1	196	0,64
2014	0,16	196	1,02

### c. Source Ait Athmane

La source d'Ait Athmane est située dans le territoire de la Commune rurale de Dir El Ksiba. Elle présente les coordonnées suivantes : x = 449 541 ; y = 224 850 ; z = 894.

Le griffon de la source affleure dans les calcaires dolomitiques attribués au Lias. La source est utilisée pour l'abreuvement du cheptel et l'irrigation des terres du périmètre irrigué du Dir en aval moyennant un système de seguias en béton aménagées dans ce sens. La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

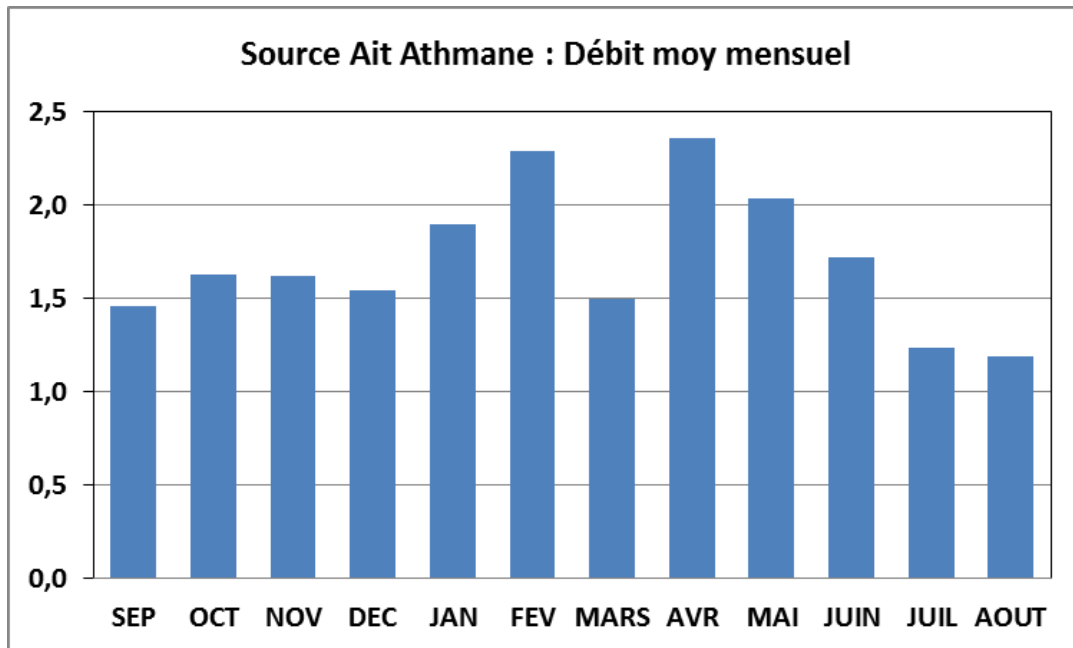
Le graphique de la figure 46 ci-dessous, montre l'évolution du débit mensuel de la source d'Ait Athmane durant la période 1995-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1974-1995 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires (6 valeurs sur 21 ans).



**Figure 46** : Evolution des débits mensuels de la source Ait Athmane

On note une baisse continue de la source avec des périodes de tarissement total. A partir de 2008, le débit de la source s'est maintenu à son niveau actuel avec des histogrammes de crue de longue période, mais de faible intensité.

Le graphique de la figure 47 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.

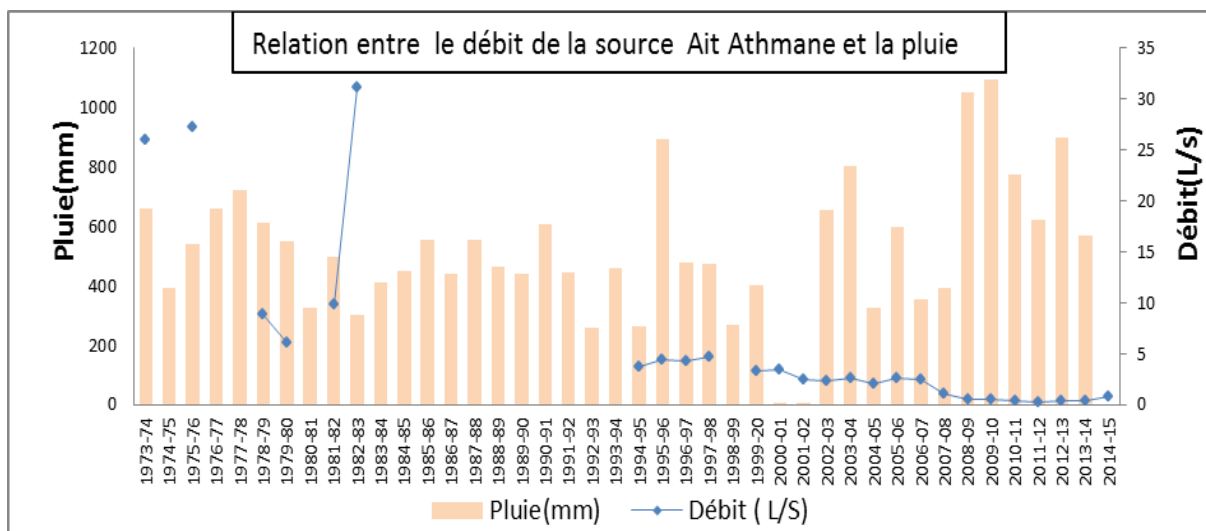


**Figure 47 :** Débits moyens mensuels de la source Ait Athmane

On note deux épisodes d'histogrammes de crues de septembre à Novembre et de Décembre à Juillet.

Le débit de la source commence à baissé à partir de Mars ce qui correspond à la fin de la période de pluie de la région qui s'étalent de Novembre à Février.

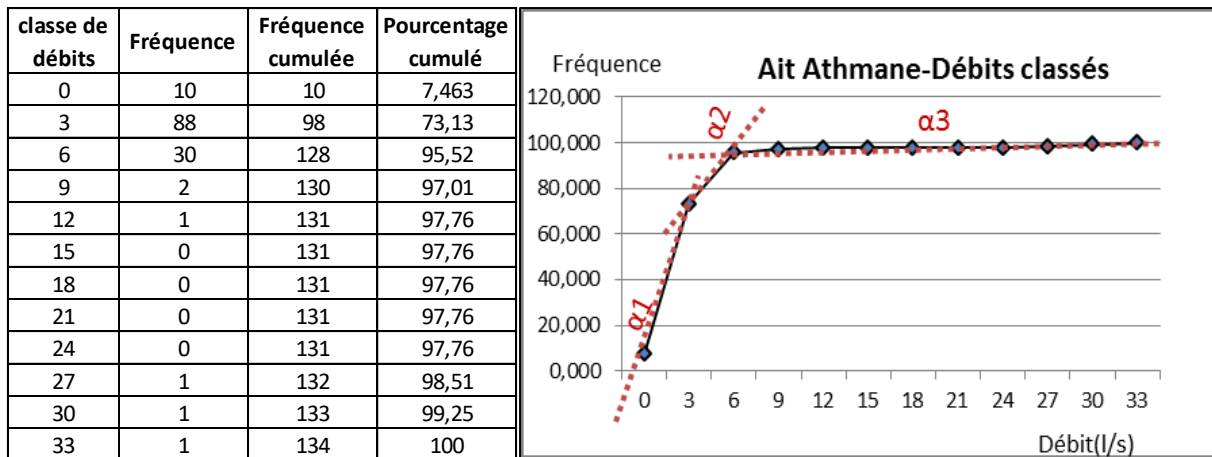
Par ailleurs, le régime de la source est cependant soutenu grâce à la fonte des neiges dans les montagnes qui entraînent une augmentation de la durée de la débitance de la source jusqu'à Juillet et Aout.



**Figure 48 :** Evolution des débits annuels de la source Ait Athmane

Le graphique de la figure 48 ci-dessus, montre l'évolution des débits annuels de la source Ait Athmane durant la période 1974-2014 et sa relation avec la pluviométrie.

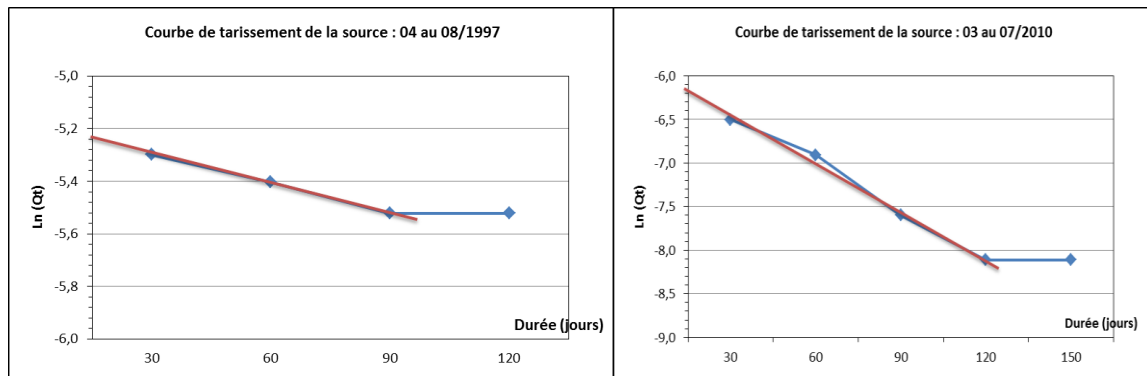
On note qu'à partir de 1998, le débit de la source décroît jusqu'à se stabilise à partir de 2008. Par ailleurs, aucune corrélation n'est identifiée avec la pluviométrie étant donné que l'alimentation de la source se fait à partir de la fonte des neiges.



**Figure 49 : Débits classés de la source Ait Athmane**

La courbe des débits classés de la figure 49 ci-dessus, présente deux ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dus aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde rupture de pente à 6 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, pourrait être associée à l'exploitation d'un système karstique plus profond et plus transmissif ou d'apports d'eau supplémentaires au système.

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Ait Athmane pour les années 1997 et 2010. Les graphiques de la figure 50 donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.



**Figure 50 : Courbes de récession de la source Ait Athmane**

Le tableau 17 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 17 : Réserve régulatrice de la source Ait Athmane**

Paramètres	1997	2010	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-5,3	-6,5	<b>0,1</b>
Ln(Qt)	-5,4	-6,91	
Coef. tariss	0,00384	0,01573	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	0,12	0,01	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 18) est de 0,7 Km<sup>2</sup>.

**Tableau 18 : Surface d'alimentation de la source Ait Athmane**

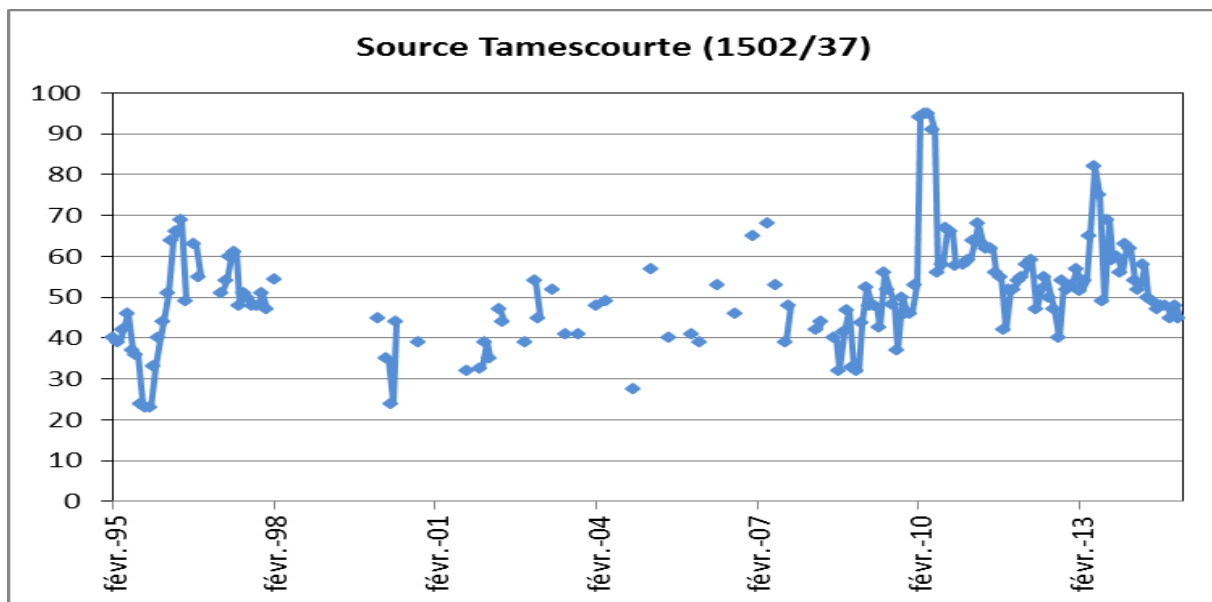
Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1997	0,12	196	0,77
2010	0,01	196	0,06

**d. Source de Tamescourte**

La source de Tamescourte est située dans le territoire de la Commune urbaine de Zaouiat Echeikh. Elle présente les coordonnées suivantes : x = 454 487 ; y = 228 080 ; z = 897

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Lias. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation des terres du périmètre irrigué du Zaouiat Echeikh en aval moyennant un système de seguias aménagées en béton dans ce sens. La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompe.

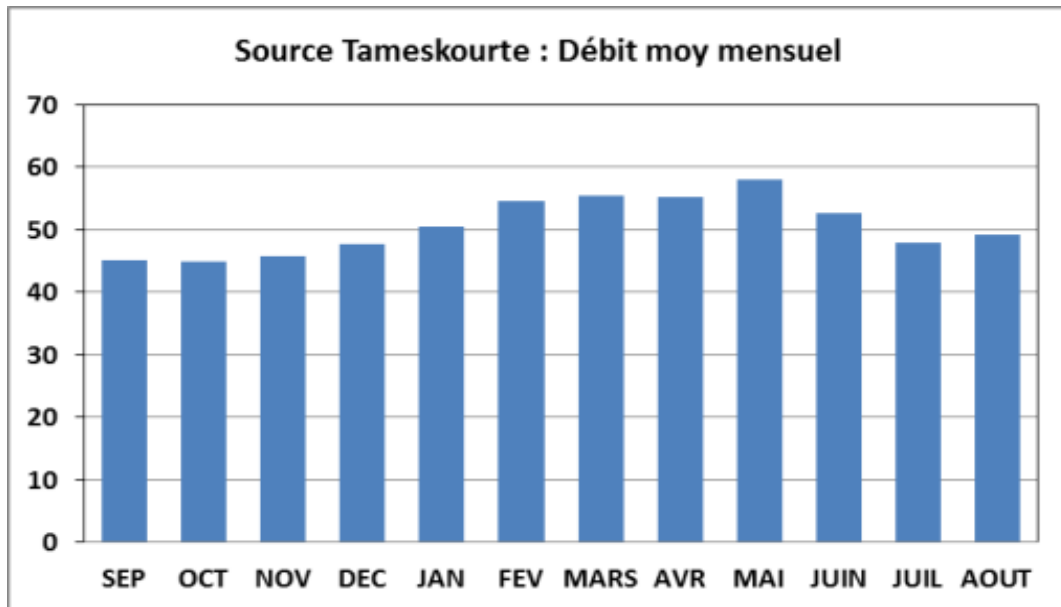
Le graphique de la figure 51, montre l'évolution du débit mensuel de la source Tamescourte durant la période 1995-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1974-1995 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires (8 valeurs sur 21 ans).



**Figure 51 : Evolution des débits mensuels de la source Tamescourte**

On note une amélioration du débit de base de la source avec des histogrammes de crue de courte période, mais à forte intensité.

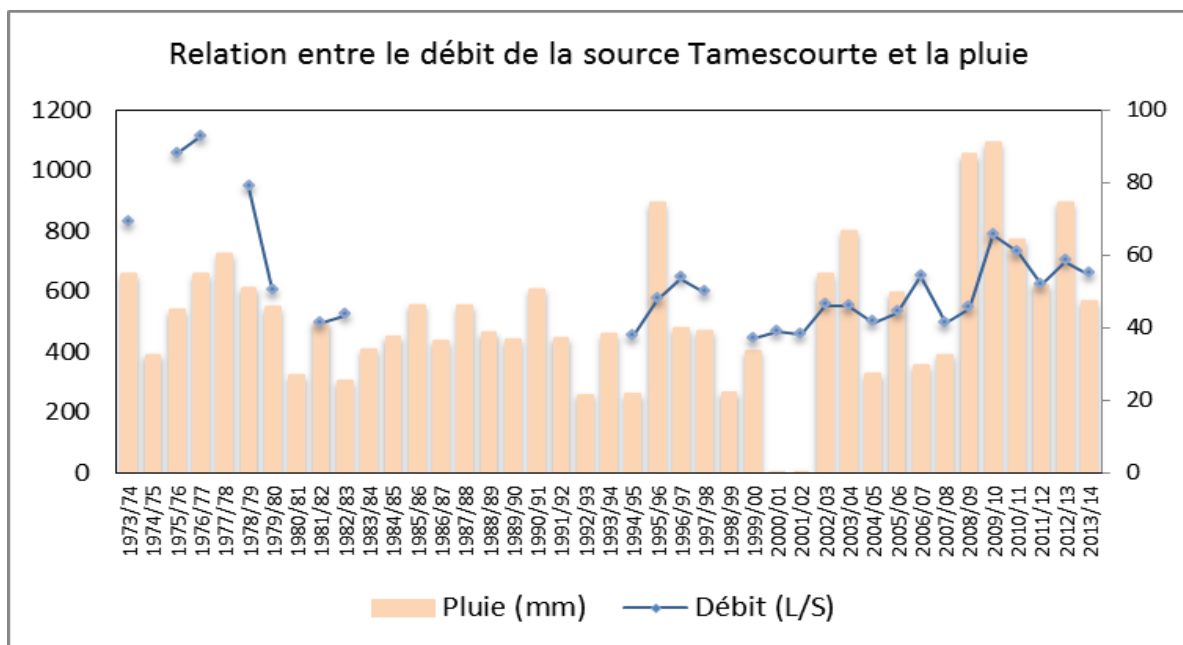
Le graphique de la figure 52 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.



**Figure 52 :** Débits moyens mensuels de la source Tamescourte

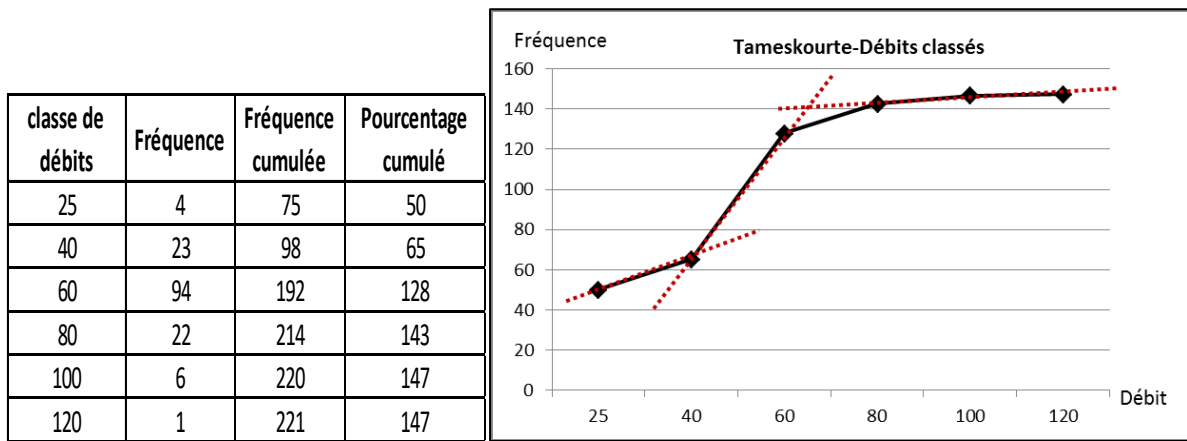
Le graphique donne un seul profil d'hydrogramme de crue très aplati témoignant d'un débit soutenu, probablement par les fontes des neiges, de la source durant toute l'année et donc d'un réservoir important très étendu bien alimenté.

Le graphique de la figure 53, montre la relation entre le débit de la source Tamescourte et la pluviométrie de la région. En effet, le débit de la source s'est nettement amélioré durant la période 2000-2014 en relation avec les précipitations enregistrées au cours des dernières années.



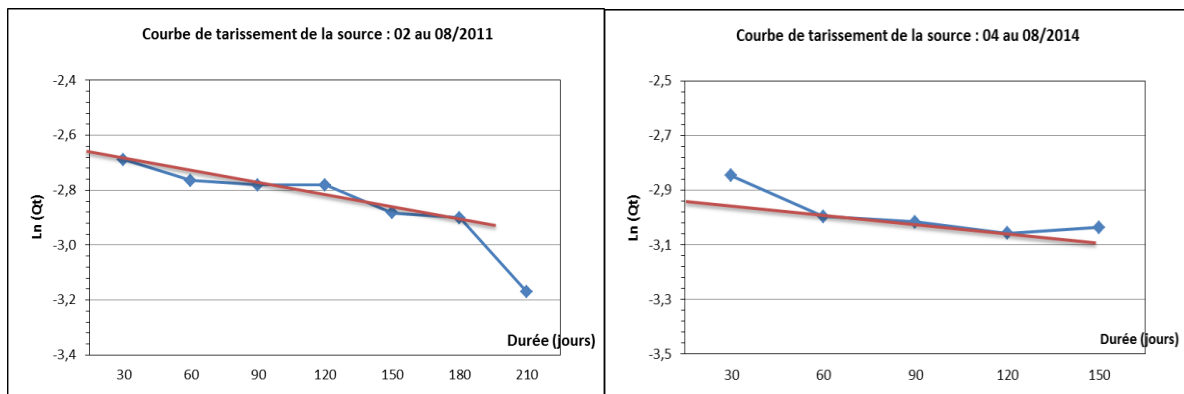
**Figure 53 :** Evolution des débits annuels de la source Tamescourte

La courbe des débits classés de la figure 54, présente deux ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture de pente pourrait être associée à la provenance des eaux de la partie non saturée du système de la source lui-même. La deuxième rupture à 82 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.



**Figure 54 : Débits classés de la source Tamescourte**

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Tamescourte pour les années 2011 et 2014. Les graphiques de la figure 55 donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.



**Figure 55 : Courbes de récession de la source Tamescourte**

Le tableau 19 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 19 : Réserve régulatrice de la source Tamescourte**

Paramètres	2011	2014	Réserve moyenne
$\ln(Q_0)$	-2,69	-3	<b>4</b>
$\ln(Q_t)$	-2,76	-3,02	
Coef. tariss	0,00269	0,00077	
$V_0$ (Mm <sup>3</sup> )	2,27	6,07	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 20) est variable d'une année à une autre de 14,5 à 39 Km<sup>2</sup>. La valeur de 15 Km<sup>2</sup> sera retenue pour l'aire d'alimentation de cette source.

**Tableau 20 : Surface d'alimentation de la source Tiguemate**

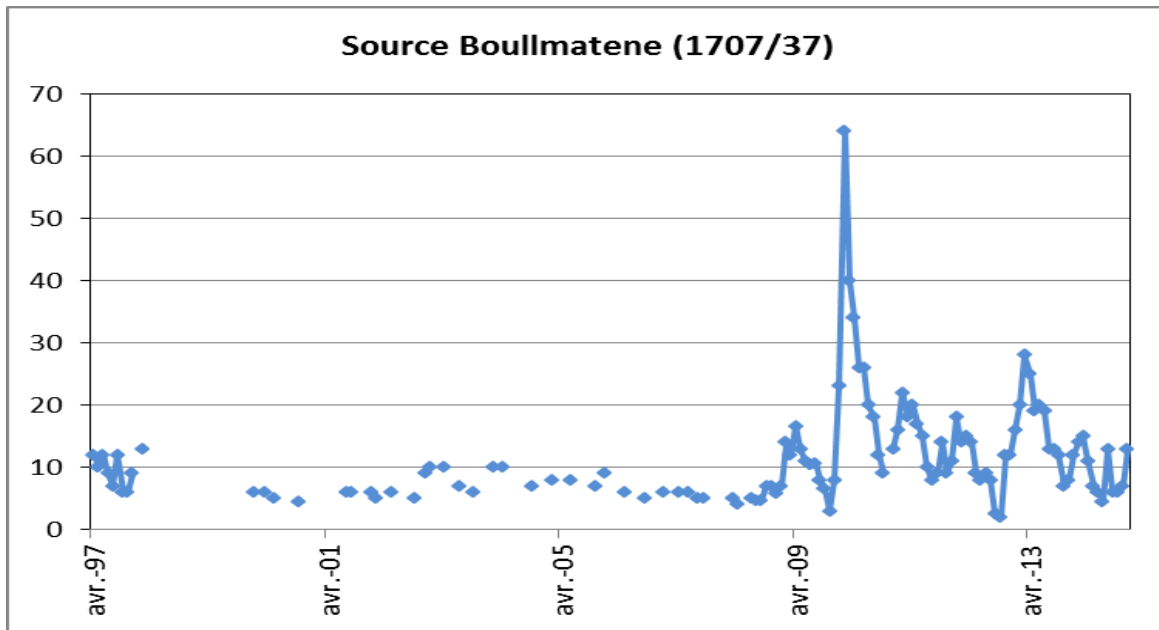
Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
2011	2,27	196	14,48
2014	6,07	196	38,71

#### e. Source de Boullmatene

La source Boullmatene est située dans le territoire de la Commune rurale de Dir El Ksiba. Elle présente les coordonnées suivantes :  $x = 447\ 239$  ;  $y = 222\ 159$  ;  $z = 943$ .

Le griffon de la source affleure dans les calcaires dolomitiques attribués au Lias. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable des douars riverains et l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias aménagées en béton dans ce sens et l'abreuvement du cheptel. La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

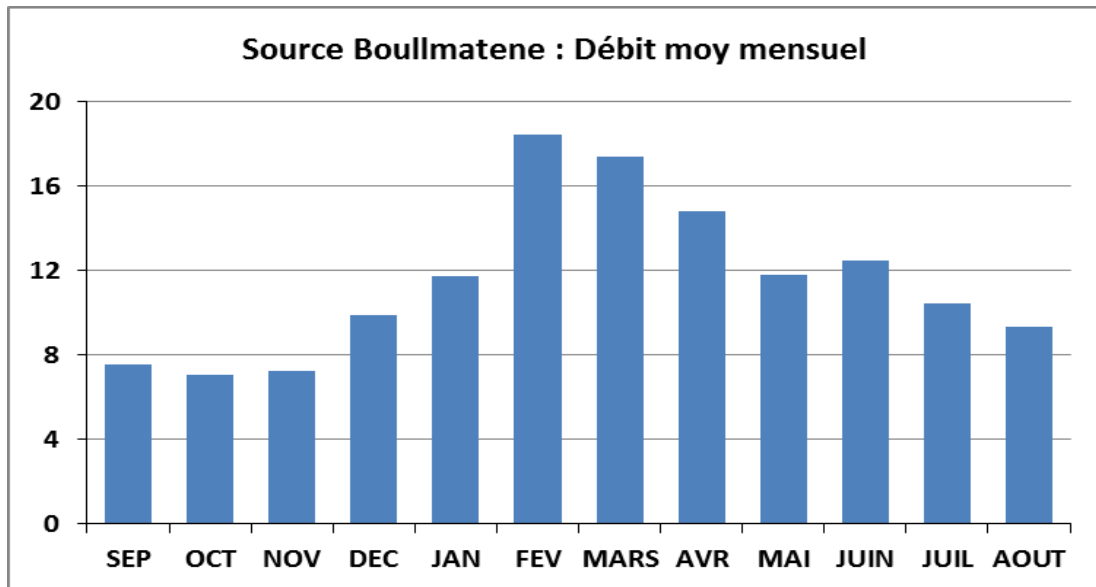
Le graphique de la figure 56, montre l'évolution du débit mensuel de la source Boullmatene durant la période 1997-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1978-1995 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires (5 valeurs sur 17 ans).



**Figure 56 : Evolution des débits mensuels de la source Boullmatene**

La source a enregistré un débit constant pendant la période 1997-2008. A partir de 2008, le débit de la source connaît une nette amélioration et change de comportement avec une activité type karstique intense et des histogrammes de crue de courte durée, mais d'intensité importante ce qui témoigne de circulations rapides d'eau à l'intérieur du réservoir aquifère.

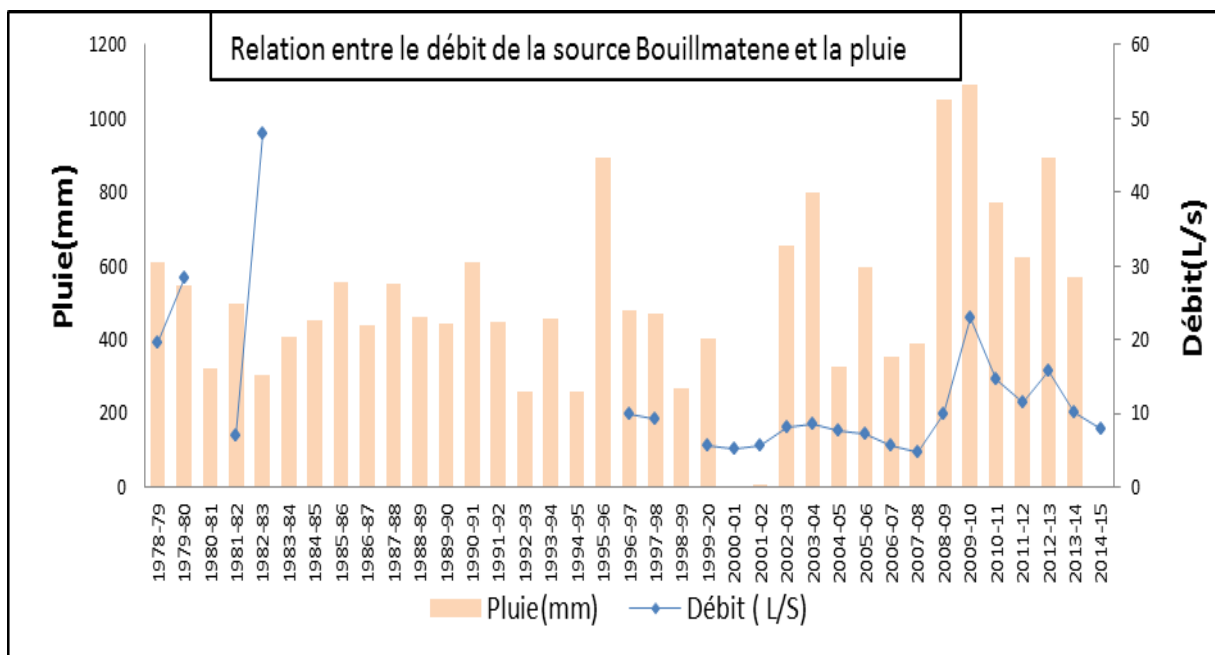
Le graphique de la figure 57, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1997-2014.



**Figure 57 :** Débits moyens mensuels de la source Boullmatene

Le graphique donne un seul profil d'hydrogramme de crue qui s'étale de Novembre à Août, ce qui témoigne d'un bassin versant très important et d'un temps de décrue très long et donc d'un réservoir important bien alimenté avec un système de karstification suffisamment développé.

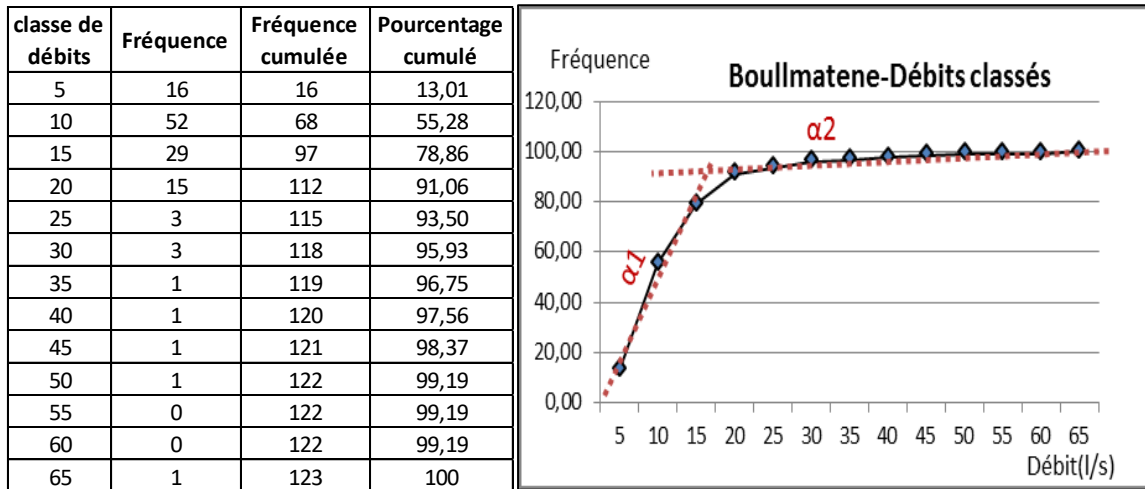
Le graphique de la figure 58 ci-dessous, montre la relation entre le débit de la source Boullmatene et la pluviométrie de la région.



**Figure 58 :** Relation entre débit de source Boullmatene et pluie

Durant la période 1997-2008, le débit de la source et malgré quelques fluctuations est resté stable, alors qu'à partir de 2008, le débit de la source change de comportement et on note une fluctuation importante avec deux épisodes d'histogrammes de crues de la source durant 2008-2012 et 2012-2014 qui sont corrélables avec les importantes dernières précipitations qu'a connue la région.

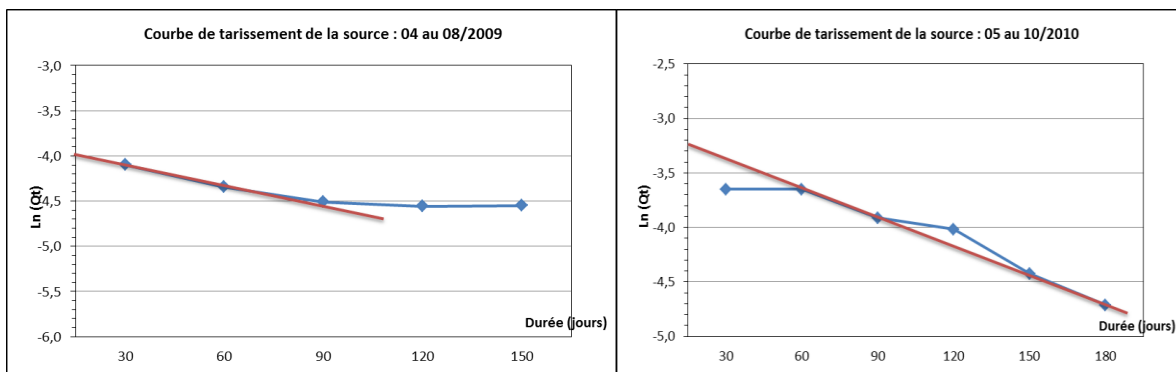




**Figure 59 :** Débits classés de la source Boullmatene

La courbe des débits classés de la figure 59, présente une rupture de courbe à 20 l/s avec, pour la deuxième classe, une pente plus faible que pour la première, témoigne d’apports d’eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d’eau piégée.

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Boullmatene pour les années 2009, 2010. Les graphiques de la figure 60 donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.



**Figure 60 :** Courbes de récession de la source Boullmatene

Le tableau 21 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 21 :** Réserve régulatrice de la source Boullmatene

Paramètres	2009	2010	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-4,1	-3,65	<b>0,25</b>
Ln(Qt)	-4,34	-3,91	
Coef. tariss	0,00921	0,00998	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	0,18	0,34	

La surface de l’aire d’alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L’aire d’alimentation ainsi calculée (tableau 22) est variable d’une année à une autre de 1,15 à 2,17 Km<sup>2</sup>. La valeur de 1,6 Km<sup>2</sup> sera retenue pour l’aire d’alimentation de cette source.

**Tableau 22 : Surface d'alimentation de la source Boullmatene**

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
2009	0,18	196	1,15
2010	0,34	196	2,17

#### f. Source Tamda

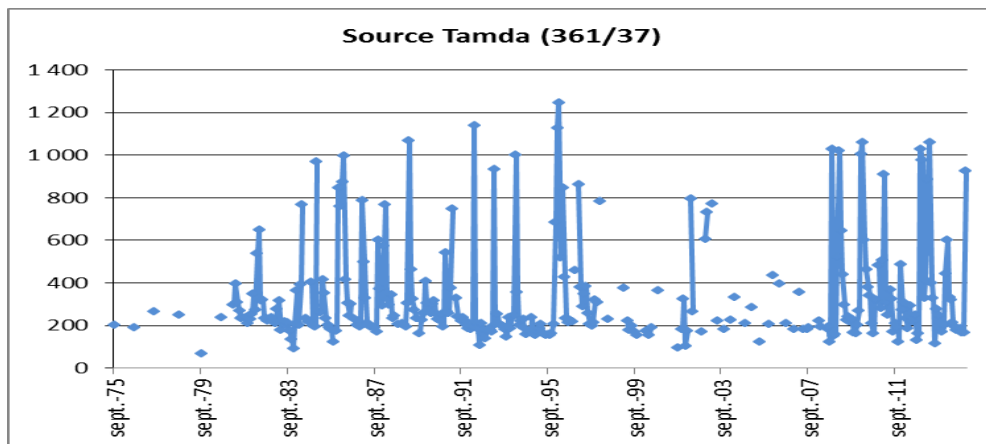
La source Tamda est située dans le territoire de la Commune urbaine de Zaouiat Echeikh. Elle présente les coordonnées suivantes : X= 451846 ; Y= 226990 ; Z = 731.

Le griffon de la source affleure dans les contacts entre les conglomérats plio-quaternaires et les formations liasiques. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation moyennant un système de seguias en béton bien aménagées.

La source coule naturellement sans pompage.

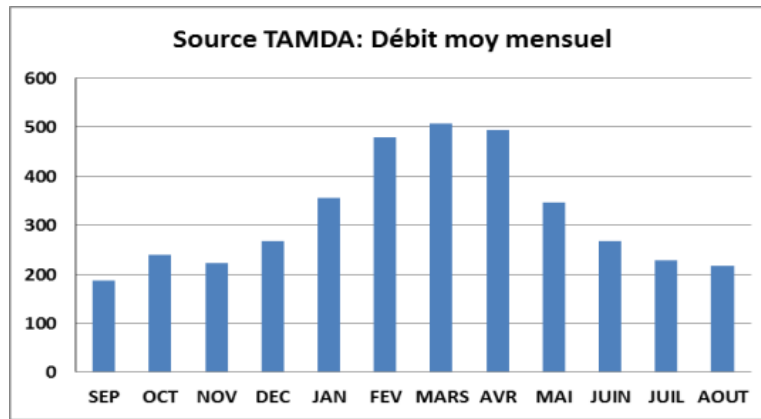
Le graphique de la figure 61, montre l'évolution du débit mensuel de la source Tamda durant la période 1975-2014.

La source présente un comportement similaire durant toute la période d'enregistrement. Elle présente aussi une activité karstique intense avec des histogrammes de crue de courte durée, mais d'intensité importante ce qui témoigne d'un bassin versant de faible étendue et des circulations rapides d'eau.



**Figure 61 : Evolution des débits mensuels de la source Tamda**

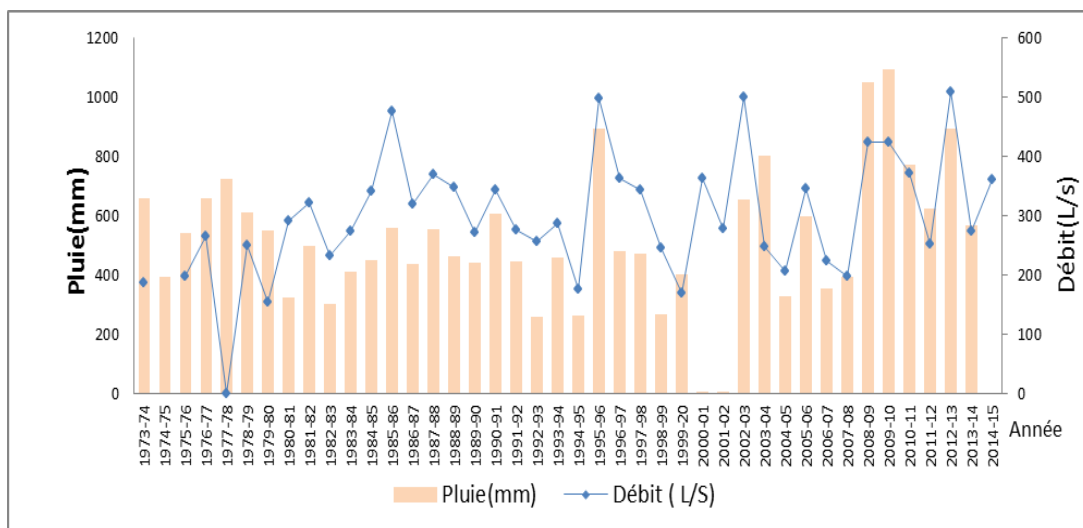
Le graphique de la figure 62 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.



**Figure 62 :** Débits moyens mensuels de la source Tamda

Le graphique donne un seul profil d'hydrogramme de crue qui s'étale de Novembre à Juillet, ce qui témoigne d'un bassin versant très important et d'un temps de décrue très long et donc d'un réservoir important bien alimenté avec un système de karstification suffisamment développé.

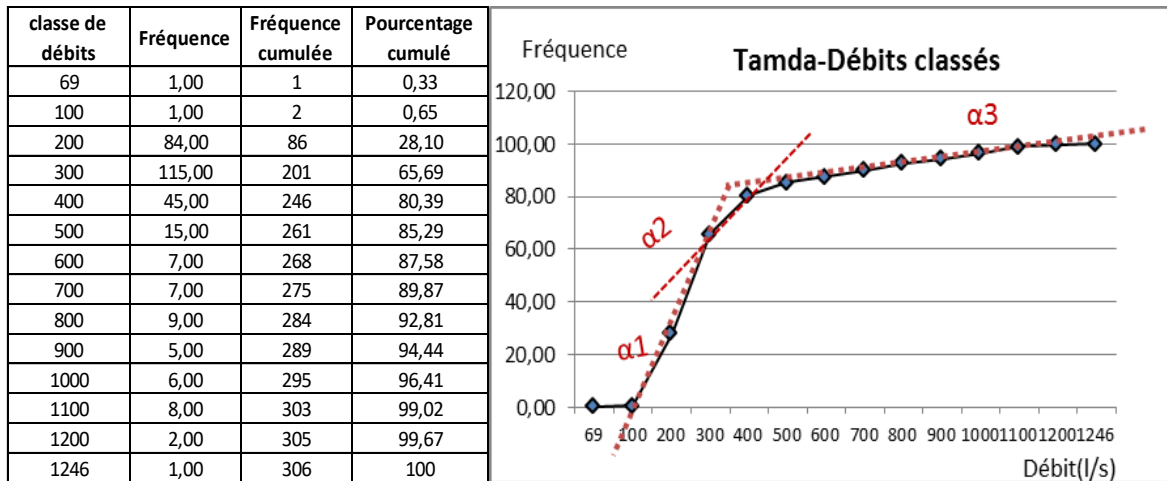
Le graphique de la figure 63, montre la relation entre le débit de la source Tamda et la pluviométrie de la région.



**Figure 63 :** Evolution des débits annuels de la source Tamda

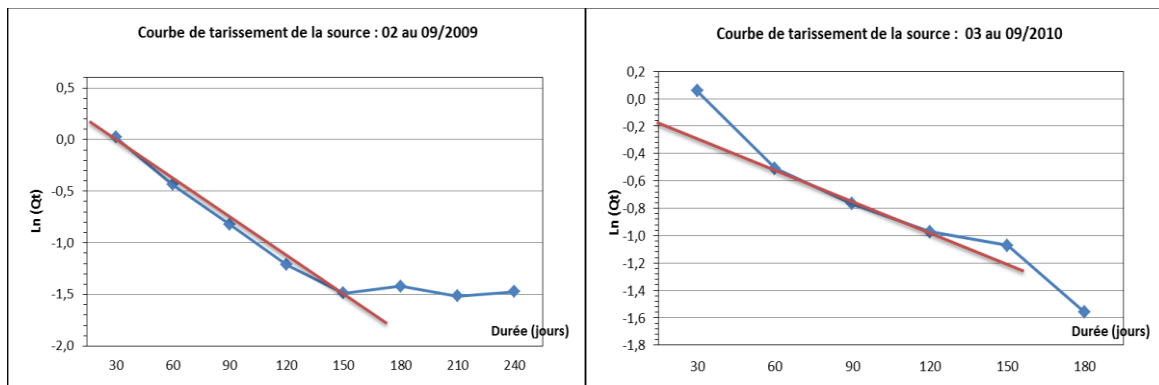
La source a enregistré un débit peu variable pendant toute la période de mesure 1975-2014. La source semble aussi avoir une réaction positive aux précipitations avec des fluctuations importantes en relation avec l'intensité des précipitations.

La courbe des débits classés de la figure 64, présente trois ruptures de courbe avec des pentes différentes. La seconde rupture de pente pourrait être associée à la provenance des eaux de la partie non saturée du système de la source lui-même. La troisième rupture à 400 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.



**Figure 64 :** Débits classés de la source Tamda

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Tamda pour les années 2009 et 2010. Les graphiques de la figure 65 donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.



**Figure 65 :** Courbes de récession de la source Tamda

Le tableau 23 donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 23 :** Réserve régulatrice de la source Tamda

Paramètres	2009	2010	Réserve moyenne
$\ln(Q_0)$	0,2	-0,51	<b>5,7</b>
$\ln(Q_t)$	-1,49	-0,77	
Coef. tariss	0,02594	0,00998	
$V_0$ (Mm <sup>3</sup> )	4,07	7,45	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 24) est variable d'une année à une autre de 38,14 à 47,51 Km<sup>2</sup>. La valeur de 43 Km<sup>2</sup> sera retenue pour l'aire d'alimentation de cette source.

**Tableau 24 : Surface d'alimentation de la source Tamda**

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
2009	4,07	196	38,14
2010	7,45	196	47,51

### V.1.2. Sources du Dogger

#### a. Source Ou Abdellah amont

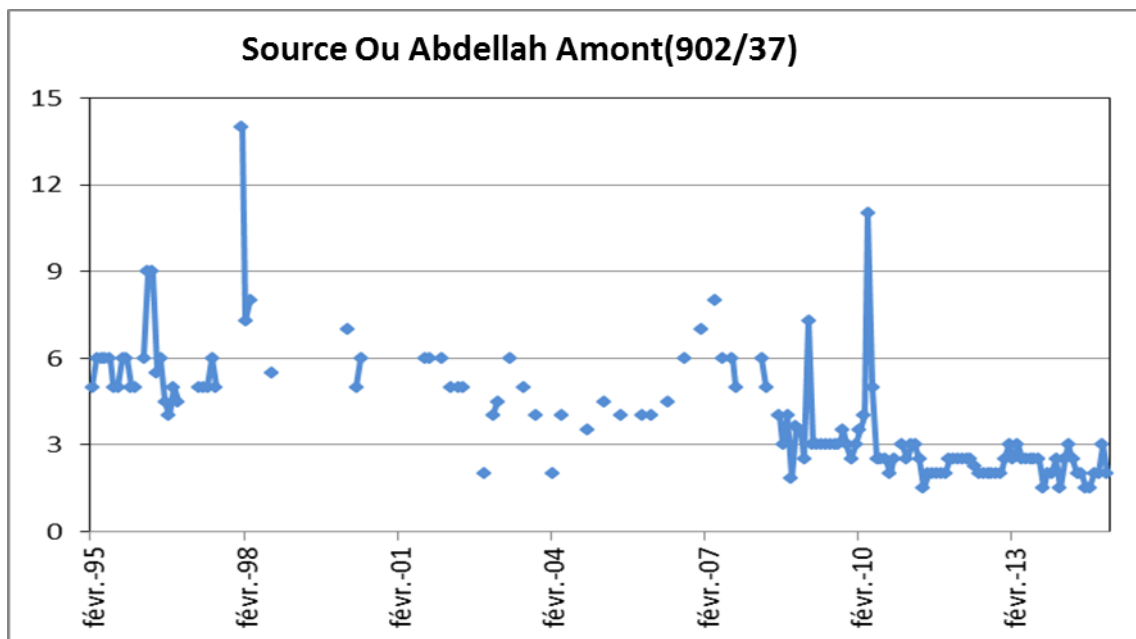
La source Ou Abdellah amont est située dans le territoire de la Commune rurale d'Ait Oum el Bekht. Elle présente les coordonnées suivantes :

x = 454 881 ; y = 226 397 ; z = 1081.

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Dogger. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation des terres du périmètre irrigué de Zaouiat Echeikh en aval moyennant un système de seguias en béton aménagées dans ce sens et l'abreuvement du cheptel.

La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

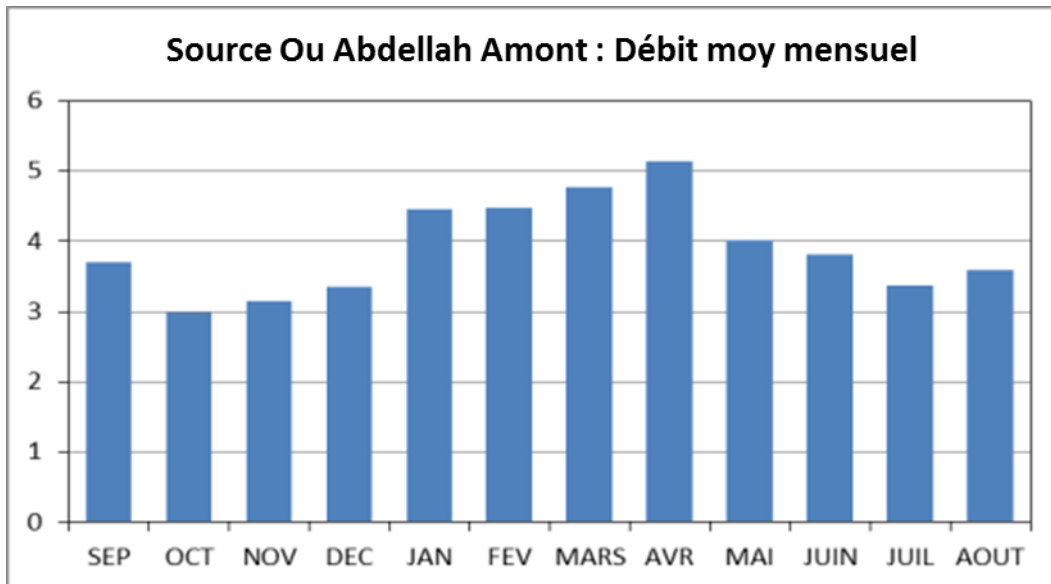
Le graphique de la figure 66, montre l'évolution du débit mensuel de la source Ou Abdellah amont durant la période 1995-2014.



**Figure 66 :** Evolution des débits mensuels de la source Ou Abdellah amont

L'évolution du débit de la source montre une baisse continue avec des histogrammes de crue de courte durée et faible intensité ce qui témoigne de circulations rapides d'eau à l'intérieur d'un réservoir aquifère de petite taille.

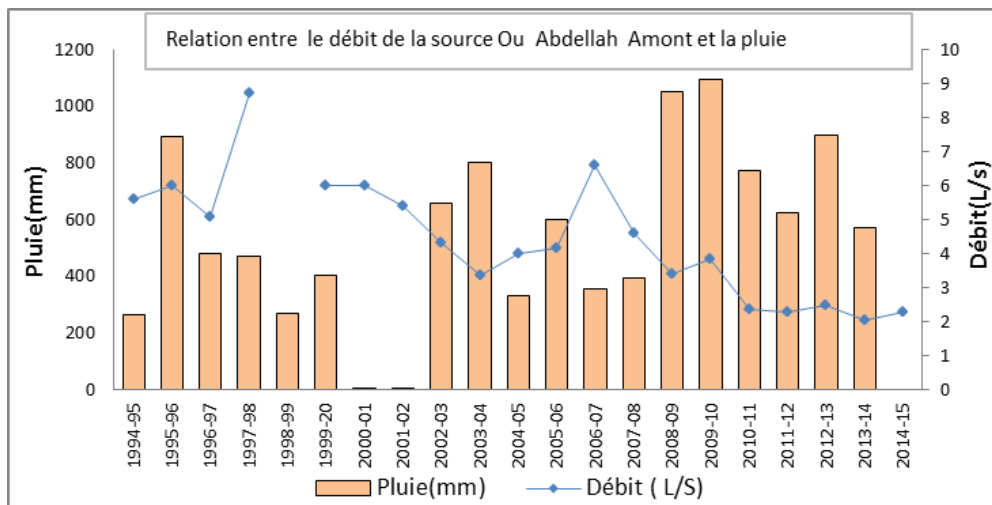
Le graphique de la figure 67, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.



**Figure 67 :** Débits moyens mensuels de la source Ou Abdellah amont

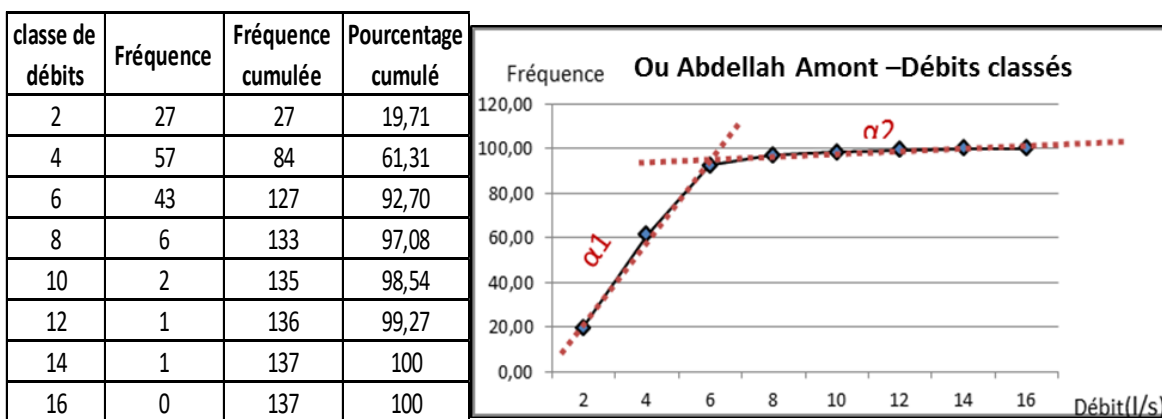
Le graphique montre un profil d'hydrogramme de crue qui s'étale de Novembre à Août, avec une période de décrue très court qui ne commence qu'à partir d'Avril, ce qui témoigne d'un réservoir important bien alimenté avec un système de karstification suffisamment développé.

Le graphique de la figure 68 ci-dessous, montre l'évolution des débits annuels de la source Ou Abdellah amont durant la période 1995-2014 et sa relation avec la pluviométrie de la région.



**Figure 68 :** Relation entre débit de source Ou Abdellah Amont et pluie

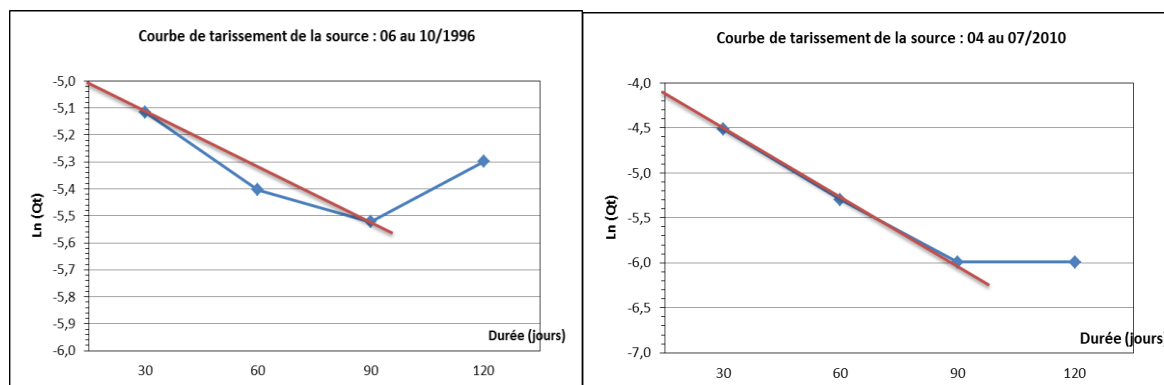
Le débit de la source enregistre une baisse continue depuis 2006 et le débit actuel n'est que 2 l/s soit une réduction de plus de 70% de son débit et ceci malgré les bonnes périodes de précipitations de 2008-2014, ce qui témoigne d'une origine des eaux du bassin d'apport de la source différente du bassin hydrologique.



**Figure 69 :** Débits classés de la source Ou Abdellah Amont

La courbe des débits classés de la figure 69 ci-dessus, présente une rupture de courbe à 6 l/s. La rupture avec une pente plus faible, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Ou Abdellah amont pour les années 1996 et 2010 (figure 70).



**Figure 70 :** Courbes de récession de la source Ou Abdellah Amont

Le tableau 25 donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 25 :** Réserve régulatrice de la source Ou Abdellah amont

Paramètres	1996	2010	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-5,12	-4,51	<b>0,05</b>
Ln(Qt)	-5,4	-5,3	
Coef. tariss	0,01075	0,03032	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	0,05	0,05	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 26) est de 0,31 Km<sup>2</sup>.

**Tableau 26 :** Surface d'alimentation de la source Ou Abdellah amont

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1996	0,05	196	0,32
2010	0,047	196	0,30

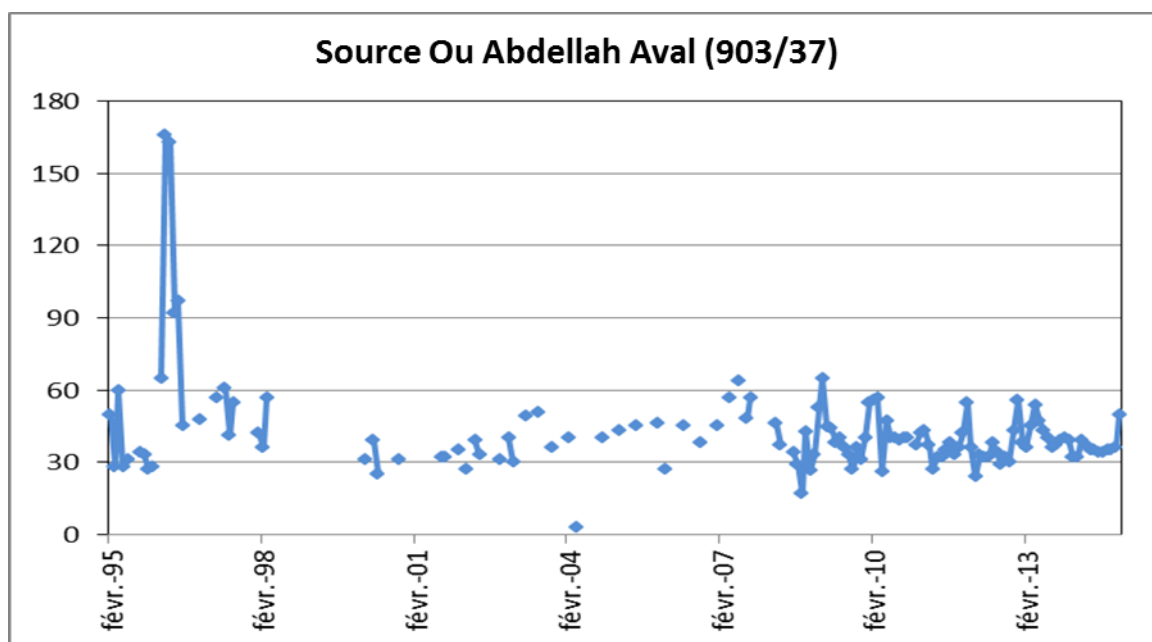
## b. Source Ou Abdellah aval

La source Ou Abdellah aval est située dans le territoire de la Commune rurale d'Ait Oum el Bekht. Elle présente les coordonnées suivantes :  
 $x = 454\ 673$  ;  $y = 226\ 441$  ;  $z = 1047$ .

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Dogger. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation des terres du périmètre irrigué de Zaouiat Echeikh en aval moyennant un système de seguias en béton aménagés dans ce sens.

La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

Le graphique de la figure 71 ci-dessous, montre l'évolution du débit mensuel de la source Ou Abdellah aval durant la période 1995-2014.

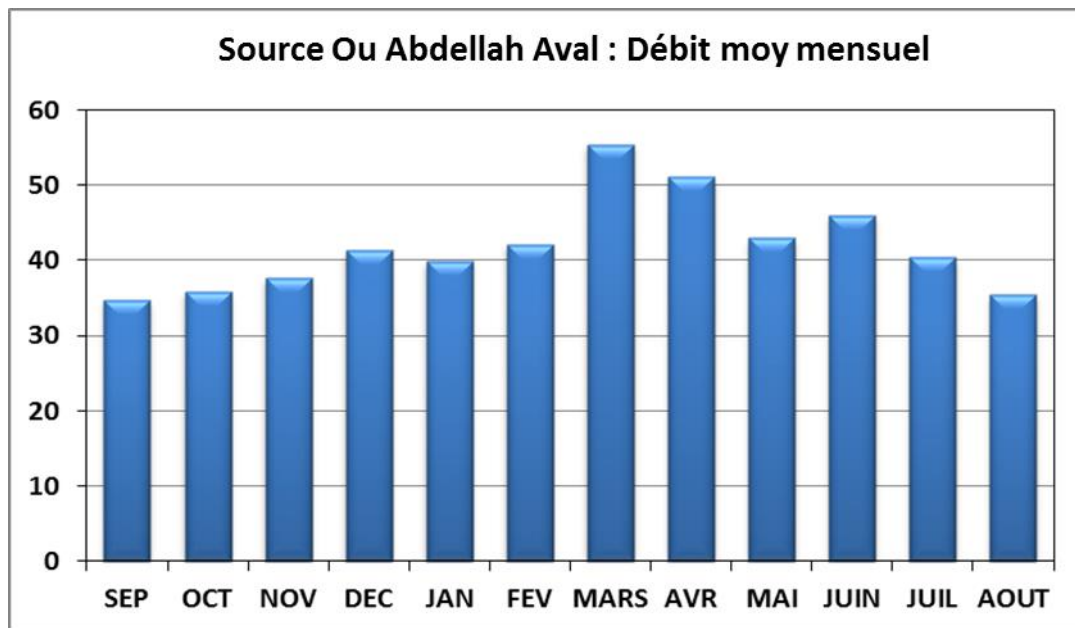


**Figure 71** : Evolution des débits mensuels de la source Ou Abdellah Aval

Le débit de la source est resté stable durant la période d'enregistrement avec des histogrammes de crue de courte durée et faible intensité ce qui témoigne de circulations rapides d'eau à l'intérieur d'un réservoir aquifère de petite taille.

Le graphique de la figure 72 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.

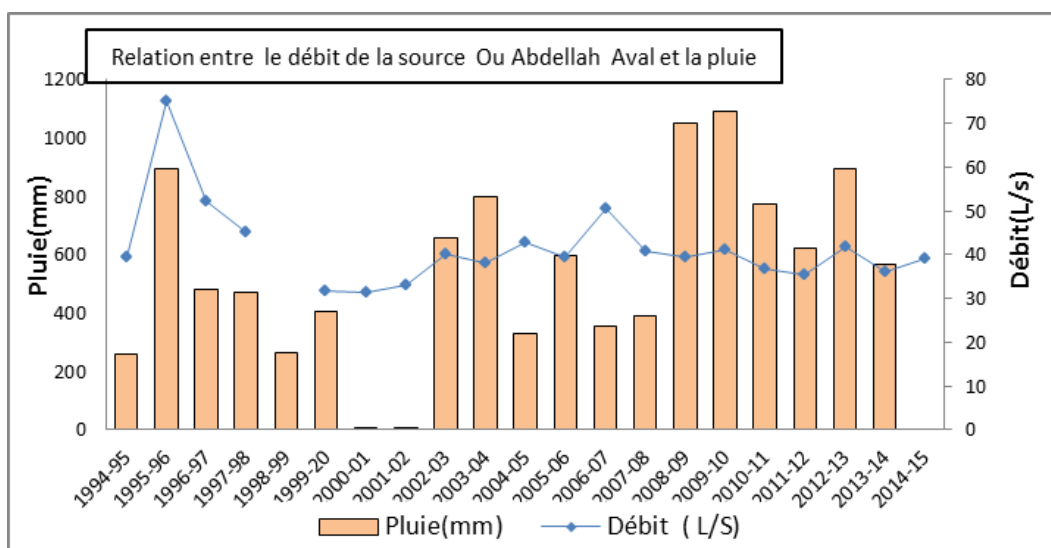




**Figure 72 :** Débits moyens mensuels de la source Ou Abdellah aval

Le graphique montre un profil d'hydrogramme de crue qui s'étale de Novembre à Août, avec une période de décrue qui ne commence qu'à partir d'Avril, ce qui témoigne d'un réservoir important bien alimenté avec un système de karstification suffisamment développé.

Le graphique de la figure 73 ci-dessous, montre l'évolution des débits annuels de la source Ou Abdellah aval durant la période 1995-2014 et sa relation avec la pluviométrie de la région.



**Figure 73 :** Relation entre débit de source Ou Abdellah Aval et pluie

Le débit de la source est resté stable durant la période d'enregistrement et ce malgré les bonnes périodes de précipitations de 2008-2014, ce qui témoigne d'une origine des eaux du bassin d'apport de la source différente du bassin hydrologique.

La courbe des débits classés de la figure 74, présente trois ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dûs aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde rupture de pente à 40 l/s pourrait être associée à l'exploitation d'un système karstique plus profond et plus transmissif.

La troisième rupture à 60 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

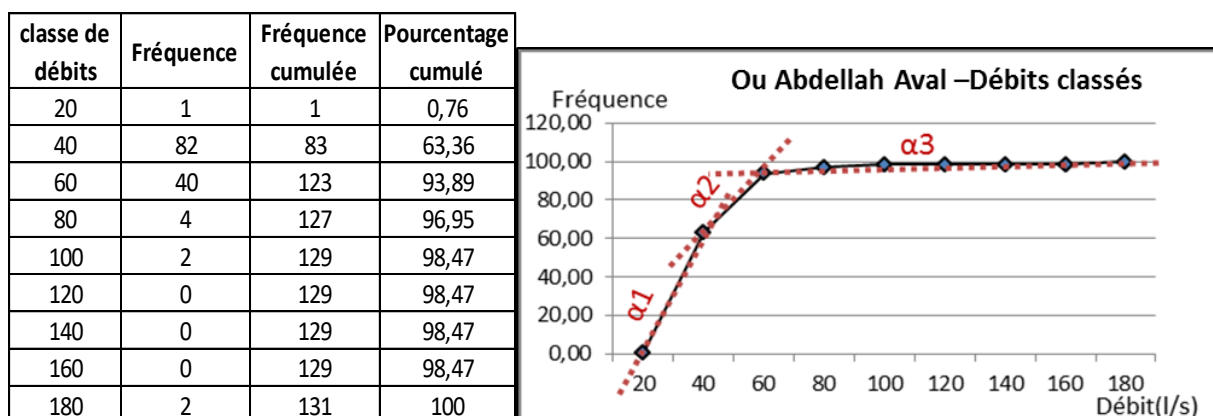


Figure 74 : Débits classés de la source Ou Abdellah aval

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Ou Abdellah aval pour les années 1996 et 2013 (figure 75).

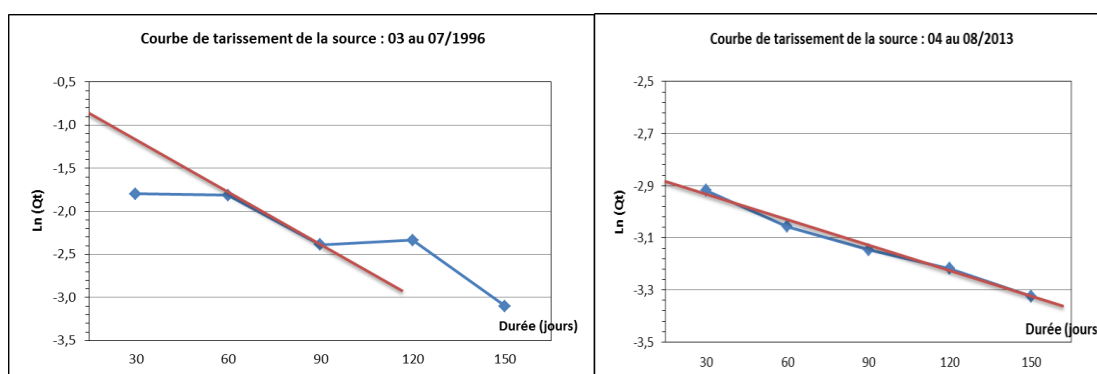


Figure 75 : Courbes de récession de la source Ou Abdellah aval

Le tableau 27 donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

Tableau 27 : Réserve régulatrice de la source Ou Abdellah aval

Paramètres	1996	2013	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-1,81	-2,92	<b>1,2</b>
Ln(Qt)	-2,39	-3,06	
Coef. tarissement	0,02226	0,00537	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	1,58	0,89	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 28) est variable d'une année à une autre de 5,7 à 10 km<sup>2</sup>. La valeur de 8 km<sup>2</sup> sera retenue pour l'aire d'alimentation de cette source.

**Tableau 28** : Surface d'alimentation de la source Ou Abdellah aval

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1996	1,58	196	10,08
2013	0,89	196	5,68

### c. Source Boutmariste

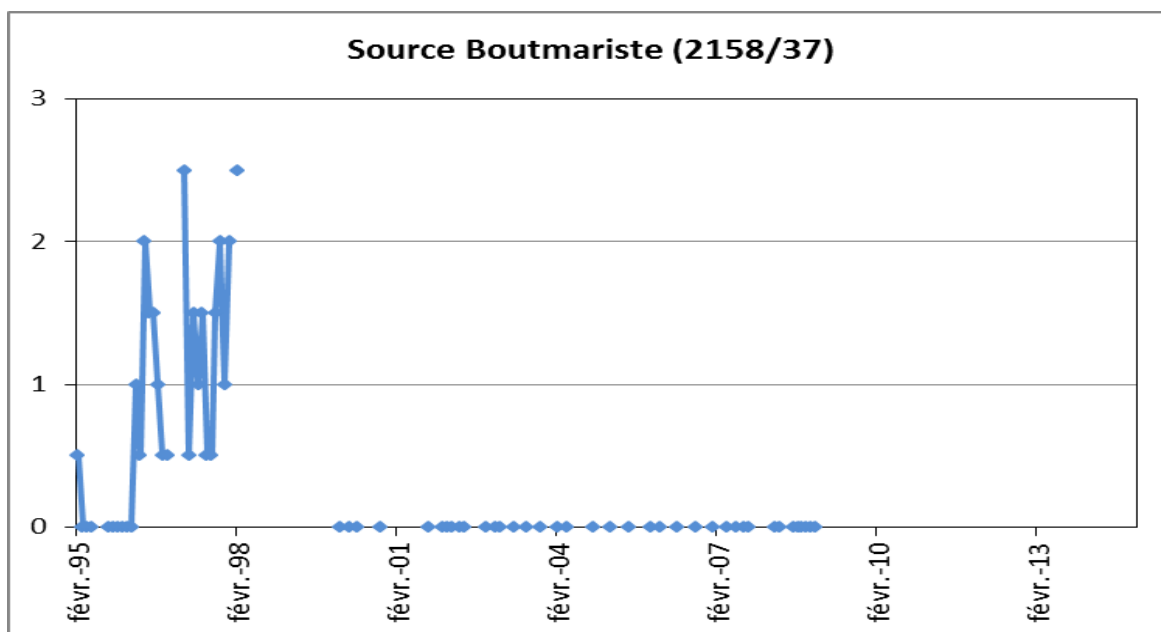
La source Boutmariste est située dans le territoire de la Commune rurale d'Ait Oum el Bekht. Elle présente les coordonnées suivantes :

$x = 457\ 141$  ;  $y = 227\ 114$  ;  $z = 1200$ .

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Dogger. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable et l'abreuvement du cheptel.

La source ne coule plus naturellement à la surface et elle a été développée en puits qui a été équipé en moyen de pompage au diésel.

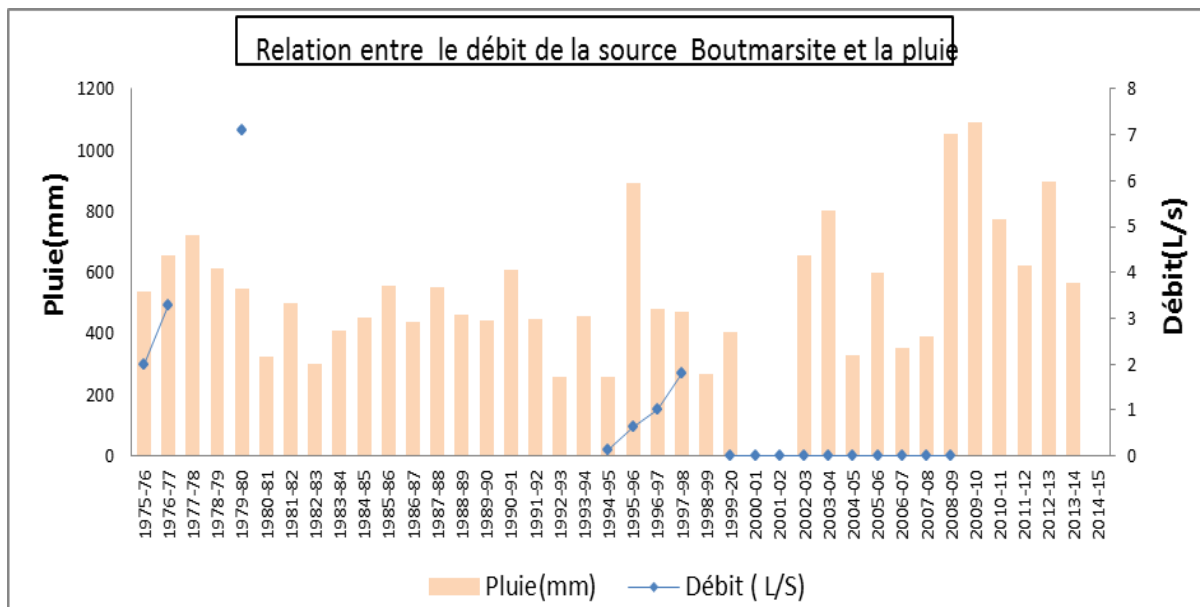
Le graphique de la figure 76, montre l'évolution du débit mensuel de la source Boutmariste durant la période 1995-2014.



**Figure 76** : Evolution des débits mensuels de la source Boutmariste

La source a tari à partir de février 1998 et le puisement se fait à partir d'un puits sur le même emplacement avec un niveau piézométrique de 4m/sol.

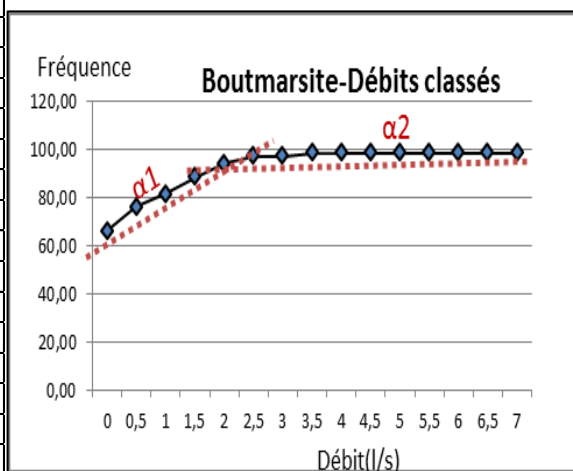
Le graphique de la figure 77, montre l'évolution des débits annuels de la source Boutmariste depuis 1975 et sa relation avec la pluviométrie de la région.



**Figure 77 :** Evolution des débits annuels de la source Boutmarsite

En dehors de la période 1994-1998, le débit de la source est nul depuis 1999. Par ailleurs, il ne ressort pas de relation entre l'évolution des apports précipitations durant la période et le débit de la source.

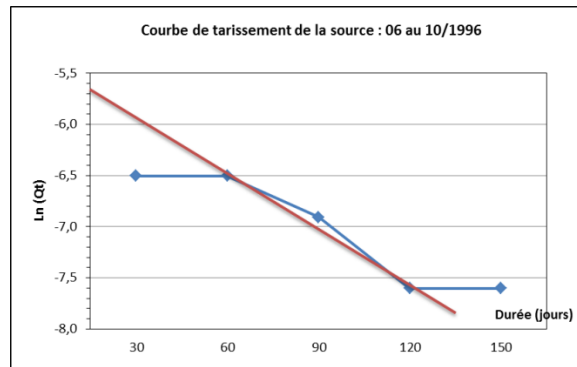
classe de débits	Fréquence	Fréquence cumulée	Pourcentage cumulé
0	47	47	66,20
0,5	7	54	76,06
1	4	58	81,69
1,5	5	63	88,73
2	4	67	94,37
2,5	2	69	97,18
3	0	69	97,18
3,5	1	70	98,59
4	0	70	98,59
4,5	0	70	98,59
5	0	70	98,59
5,5	0	70	98,59
6	0	70	98,59
6,5	0	70	98,59
7	0	70	98,59
7,5	1	71	100



**Figure 78 :** Débits classés de la source Boutmariste

La courbe des débits classés de la figure 78 ci-dessus, présente une rupture de courbe à 2,5 l/s. La rupture avec une pente plus faible, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

Une courbe de récession a été établie pour la source Boutmariste pour l'année 1996 (figure 79).



**Figure 79** : Courbe de récession de la source Boutmariste

Le tableau 29 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession. Pour un coefficient de tarissement de 0,01573, la réserve calculée est 0,02 Mm<sup>3</sup>.

A noter que ce volume est donné à titre indicatif étant donné que la source est actuellement asséchée et captée par un puits avec pompage.

**Tableau 29** : Surface d'alimentation de la source Boutmariste

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1996	0,019	196	0,12

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée est de 0,12 Km<sup>2</sup>.

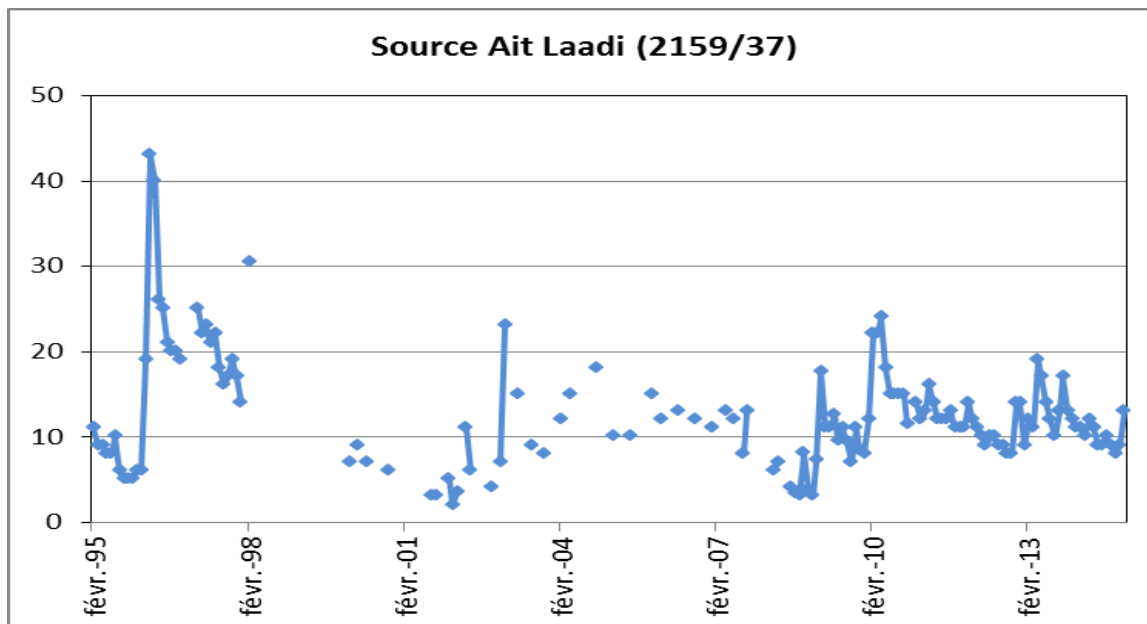
#### **d. Source Ait Laaidi**

La source Ait Laaidi est située dans le territoire de la Commune rurale d'Ait Oum el Bekht. Elle présente les coordonnées suivantes : x = 456414 ; y = 227038 ; z = 1166.

Le griffon de la source affleure dans les calcaires attribués au Dogger. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable, l'abreuvement du cheptel et l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias en béton aménagées dans ce sens.

La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

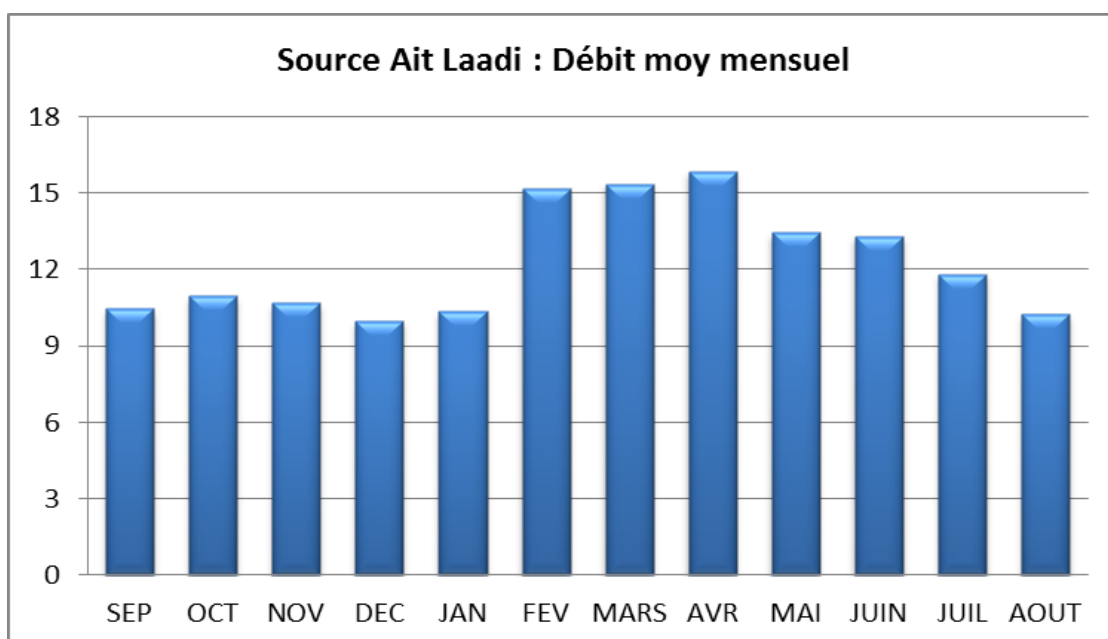
Le graphique de la figure 80, montre l'évolution du débit mensuel de la source Ait Laaidi durant la période 1995-2014.



**Figure 80 :** Evolution des débits mensuels de la source Ait Laaidi

Le débit de la source est resté stable durant la période d’enregistrement avec des histogrammes de crue de courte durée et faible intensité ce qui témoigne de circulations rapides d’eau à l’intérieur d’un réservoir aquifère de petite taille.

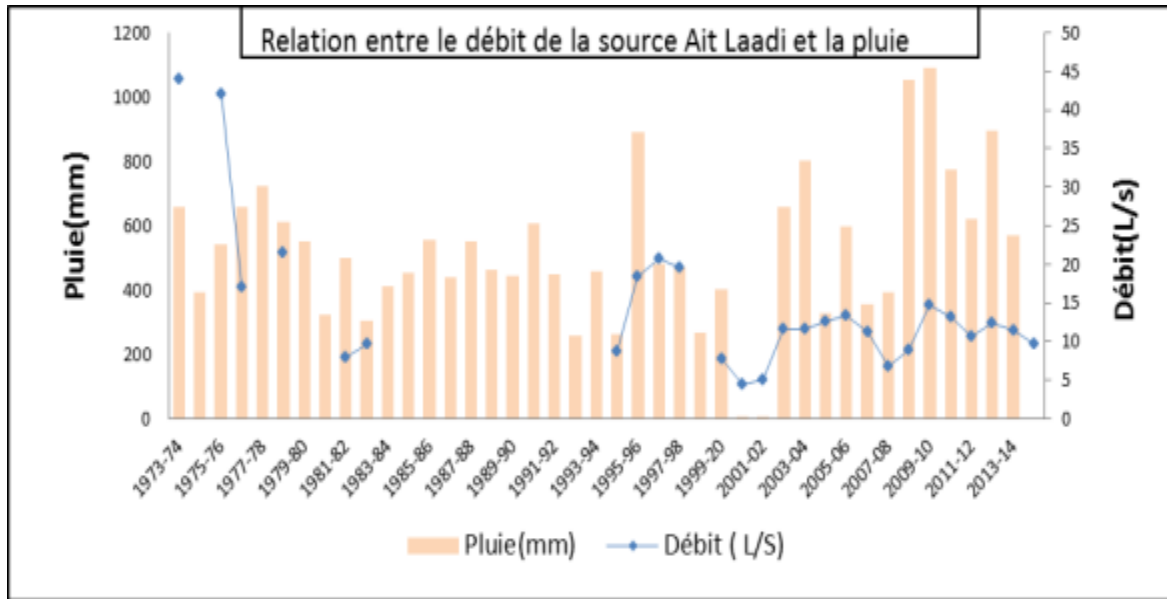
Le graphique de la figure 81 ci-dessous, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1995-2014.



**Figure 81 :** Débits moyens mensuels de la source Ait Laaidi

Le graphique montre un profil d’hydrogramme de crue suffisamment aplati qui s’étale de Décembre à Août, avec une période de décrue qui ne commence qu’à partir d’Avril, ce qui témoigne d’un réservoir important bien alimenté.

Le graphique de la figure 82 ci-dessous, montre l’évolution des débits annuels de la source Ait Laaidi durant la période 1973-2014 et sa relation avec la pluviométrie de la région.



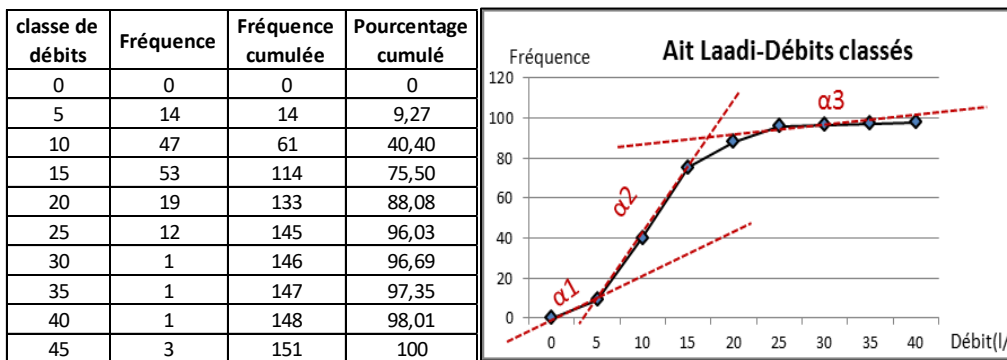
**Figure 82 :** Relation entre débit de source Ait Laaidi et la pluie

Durant la période 1993-2014, le débit de la source présente d'importantes fluctuations, mais il est considéré comme stable.

Une corrélation entre le débit de la source et les précipitations annuelles peut être notée surtout durant 1994-1996 et 2007-2013. Les précipitations importantes durant la période 2008-2010 s'identifient bien dans l'hydrogramme de la source Ait Laaidi dont le débit a triplé. Il a noté que l'origine de cette source est différente des quatre autres sources puisqu'elle émerge directement à travers les formations du Dogger.

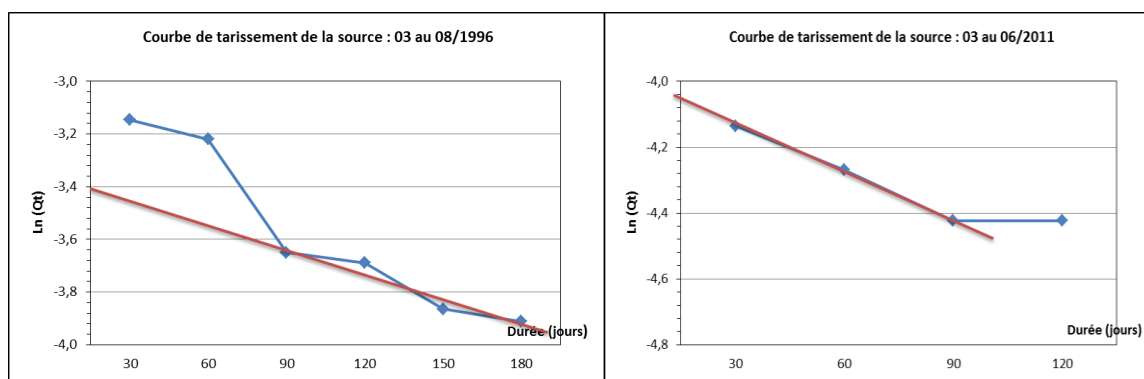
La courbe des débits classés de la source Ait Laadi de la figure 83, présente trois ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dûs aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde rupture de pente à 15 l/s pourrait être associée à l'exploitation d'un système karstique plus profond et plus transmissif.

La troisième rupture à 25 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.



**Figure 83 :** Débits classés de la source Ait Laadi

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Ait Laaidi pour les années 1996 et 2011 (figure 84).



**Figure 84** : Courbes de récession de la source Ait Laaidi

Le tableau 30 donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 30** : Réserve régulatrice de la source Ait Laaidi

Paramètres	1996	2011	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-3,69	-4,14	<b>0,4</b>
Ln(Qt)	-3,86	-4,27	
Coef. tariss	0,00652	0,00499	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	0,44	0,31	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 31) est variable d'une année à une autre de 1,98 à 2,81 Km<sup>2</sup>. La valeur de 3,8 Km<sup>2</sup> sera retenue pour l'aire d'alimentation de cette source.

**Tableau 31** : Surface d'alimentation de la source Ait Laaidi

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1996	0,44	196	2,81
2011	0,31	196	1,98

### V.1.3. Sources du Plio-quaternaires

#### a. Source Boudilite

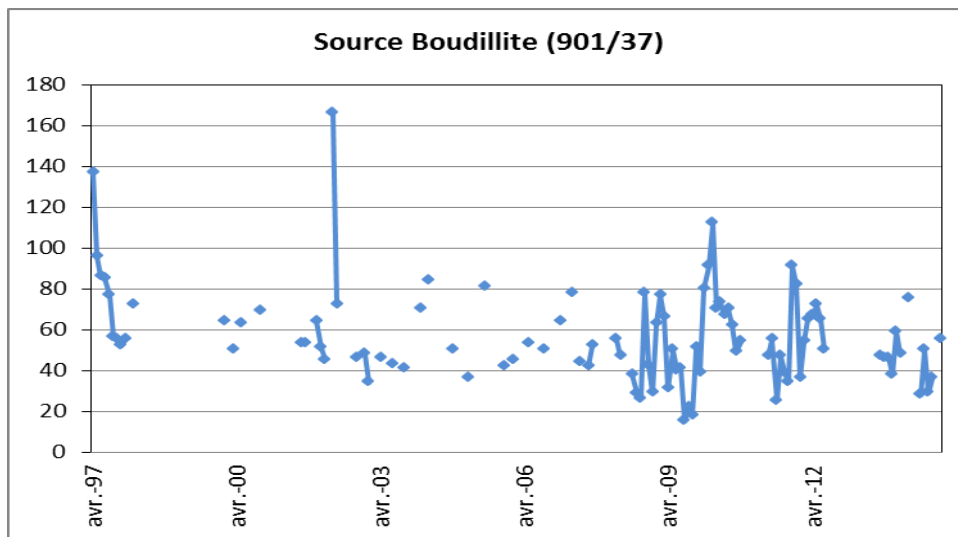
La source Boudilite est située dans le territoire de la Commune de Zaouit Ech Cheikh. Elle présente les coordonnées suivantes :

$$x = 450\ 938 ; y = 228\ 366 ; z = 640$$

Le griffon de la source affleure dans des conglomérats attribués au mio-plio-quaternaire. La source est utilisée pour l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias aménagées dans ce sens. La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

Le graphique de la figure 85, montre l'évolution du débit mensuel de la source Boudilite durant la période 1997-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1973-1994 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires.

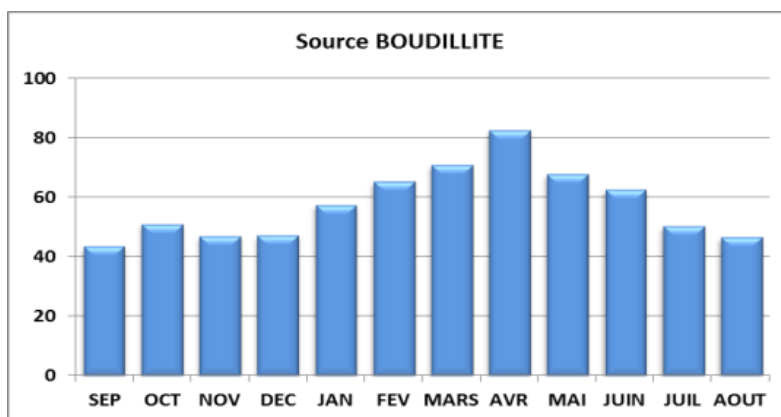




**Figure 85 :** Evolution des débits mensuels de la source Boudillite

La source a enregistré un débit peu variable en absolu pendant la période 1997-2014 avec une légère tendance à la baisse à partir de 2012. Par ailleurs, on note une fluctuation mensuelle importante du débit et des épisodes d’histogrammes de crues très courtes.

Le graphique de la figure 86, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1997-2014.

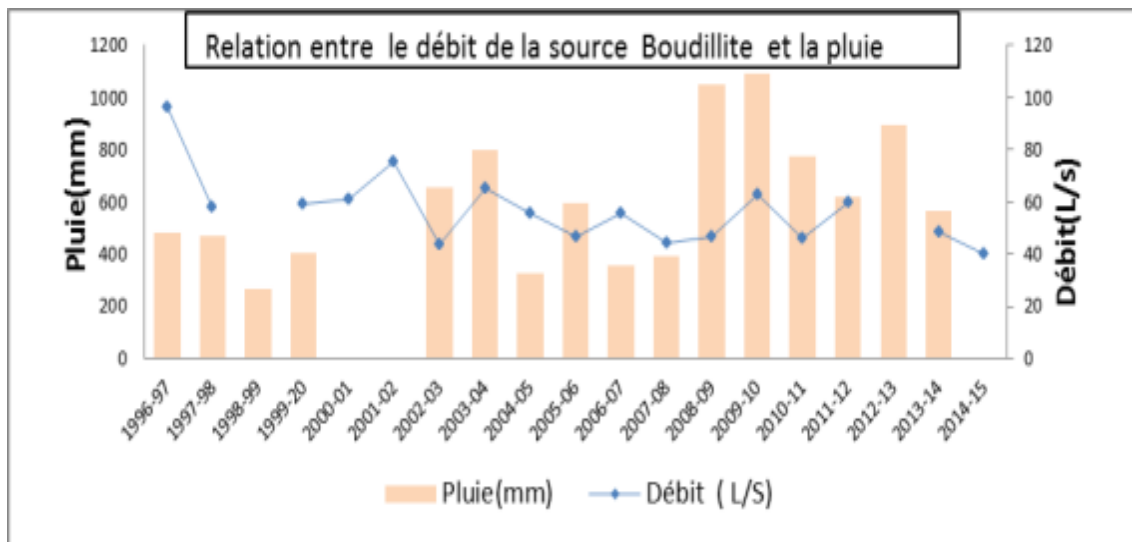


**Figure 86 :** Débit moyen mensuel de la source Boudillite

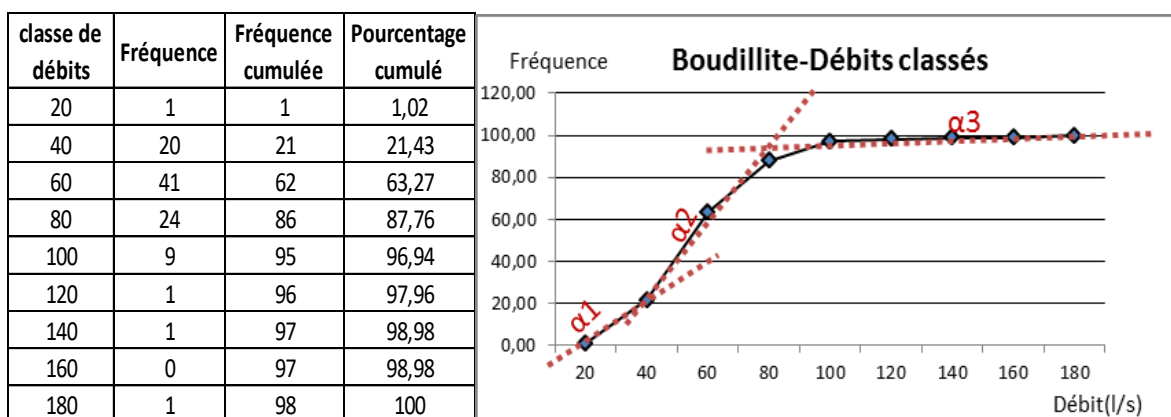
On note deux épisodes d’histogrammes de crues de septembre-Novembre et de Décembre-Juillet. Ces deux épisodes sont en liaison avec les périodes de pluviométrie de la région qui s’étalent de Novembre à Février. Le régime de la source est cependant soutenu grâce à la fonte des neiges dans les montagnes.

Le graphique de la figure 87, montre l’évolution des débits annuels de la source Boudillite durant la période 1996-2014 et sa relation avec la pluviométrie.

On note que le débit de la source est resté stable avec une légère tendance à la baisse. Par ailleurs, aucune corrélation n’est identifiée avec la pluviométrie mis à part durant les précipitations importantes durant la période 2008-2010 où la débitance de la source à augmenter sensiblement.



**Figure 87 :** Relation entre débit de source et pluie

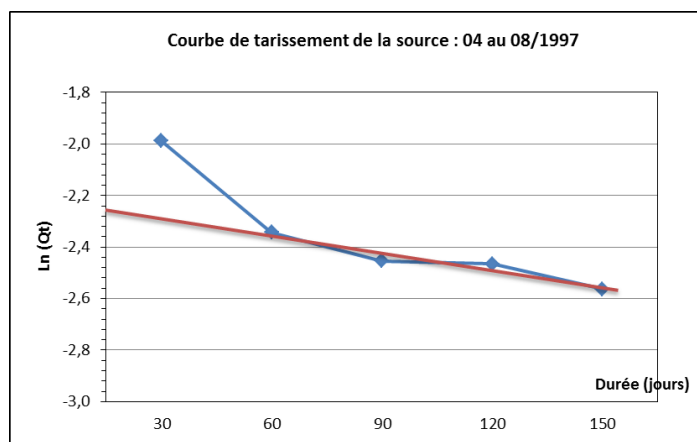


**Figure 88 :** Débits classés de la source Boudillite

La courbe des débits classés de la figure 88 ci-dessus, présente trois ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dus aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde rupture de pente à 60 l/s pourrait être associée à l'exploitation d'un système karstique plus profond et plus transmissif.

La troisième rupture à 100 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

Une courbe de récession a été établie pour la source Boudillite pour l'année 1997 (figure 89).



**Figure 89** : Courbe de récession de la source Boudilite

Le tableau 32 donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession. Pour un coefficient de tarissement de 0,00422, la réserve calculée est 2,2 Mm<sup>3</sup>.

**Tableau 32** : Surface d'alimentation de la source Boudilite

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1997	2,20	196	14,03

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée est de 14 Km<sup>2</sup>.

#### **b. Source Ouarnfaa**

La source Ouarnfaa est située dans le territoire de la Commune de Zaouit Echeikh. Elle présente les coordonnées suivantes : x = 449 631 ; y = 228 303 ; z = 647

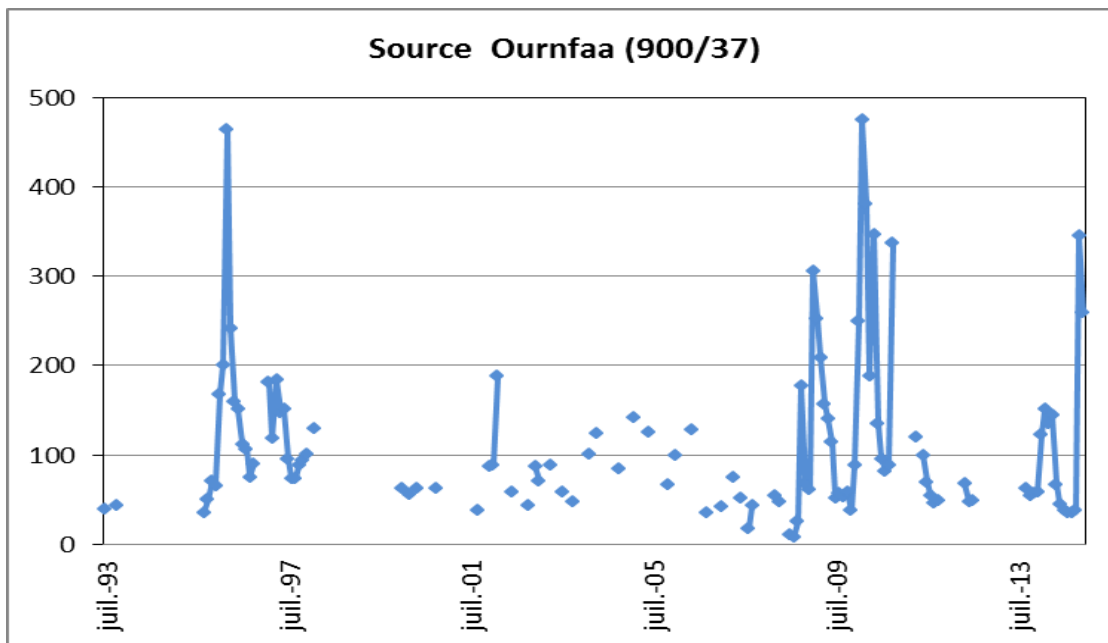
Le griffon de la source affleure dans des marnes calcaires attribuées au Villafranchien–Trias. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Zaouit Ech Cheikh et l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias aménagées dans ce sens.

La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

Le graphique de la figure 90, montre l'évolution du débit mensuel de la source Ournfaa durant la période 1993-2014. En effet, les enregistrements des débits durant la période de 1973-1994 n'ont pas été considérés puisqu'ils sont très fragmentaires.

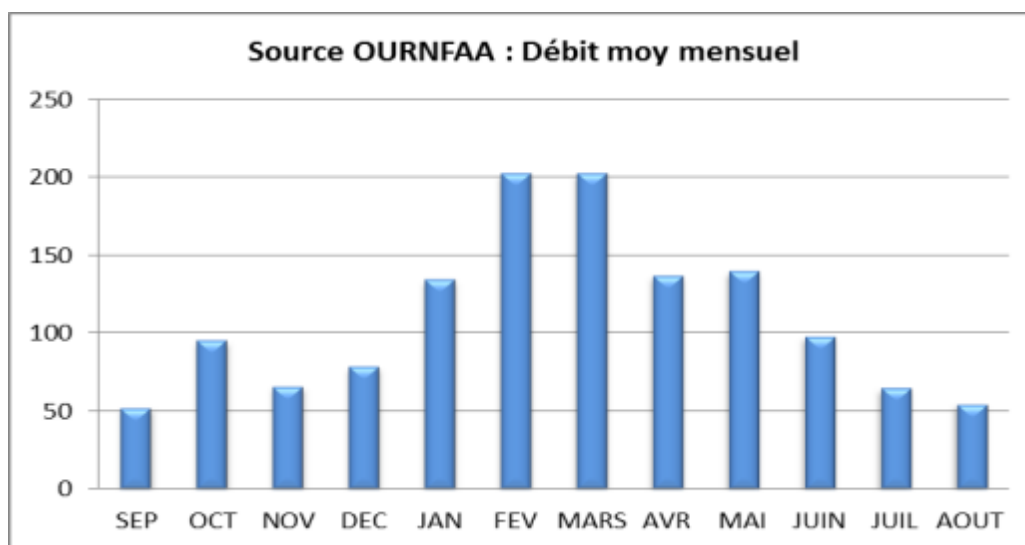
Le débit de la source Ouarnfaa montre une fluctuation importante durant toute la période d'enregistrement avec des variations mensuelles de plus de 5 fois lors d'un cycle de décrue de la source, ce qui témoigne d'une réponse très de la décrue et une période de vidange de la source très courte.

Par ailleurs, on note que la source n'enregistre pas de baisse de débit.



**Figure 90 :** Evolution des débits mensuels de la source Ournfaa

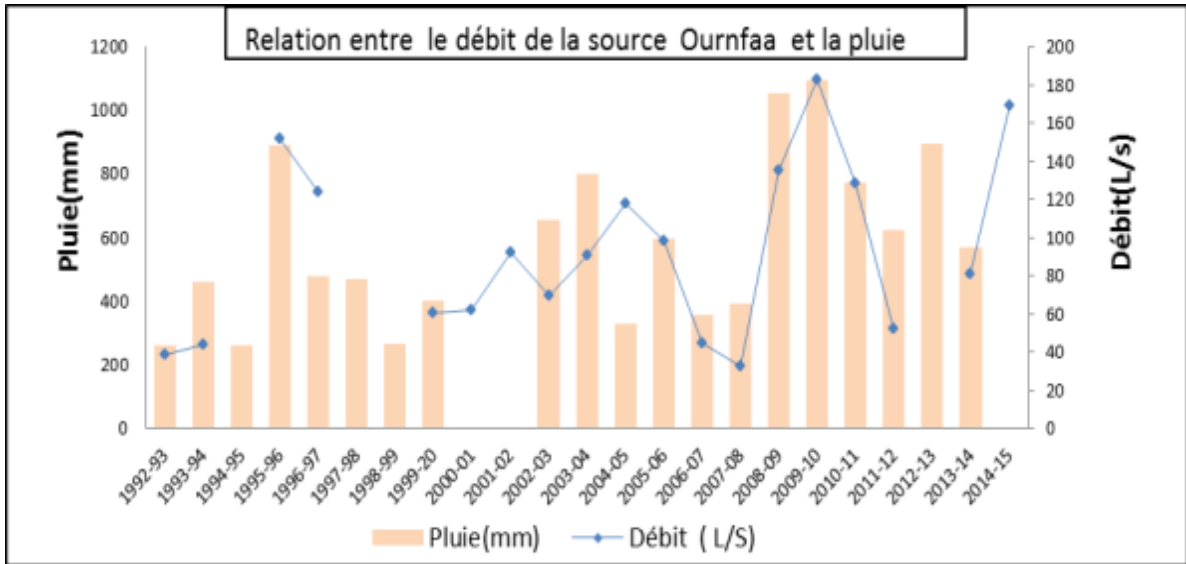
Le graphique de la figure 91, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1997-2014.



**Figure 91 :** Débit moyen mensuel de la source Ournfaa

On note deux épisodes d'histogrammes de crues de septembre-Novembre et de Décembre-Juin. Ces deux épisodes sont en liaison avec les périodes de pluviométrie de la région qui s'étalent de Novembre à Février. Le régime de la source est cependant soutenu grâce à la fonte des neiges dans les montagnes.

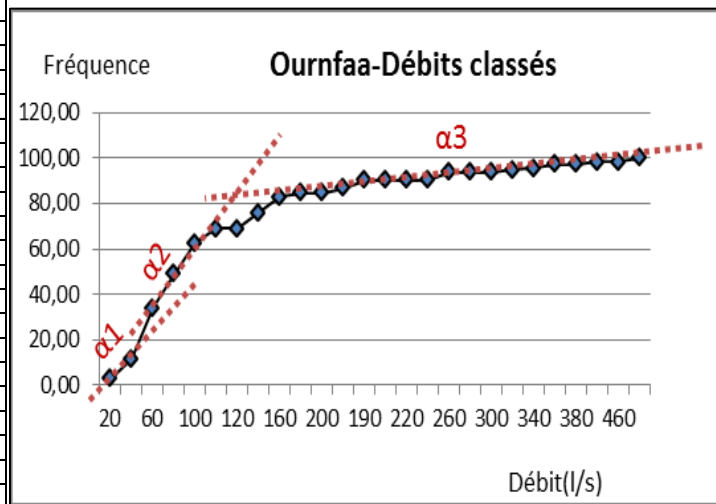
Le graphique de la figure 92, montre l'évolution des débits annuels de la source Ournfaa durant la période 1992-2014 et sa relation avec la pluviométrie. Ainsi, les mesures de débits de la source durant la période 1999-2014 montrent une corrélation positive avec les précipitations enregistrées durant la même période avec des réponses très rapides aux pluies.



**Figure 92 :** Relation entre débit de source et pluie

La courbe des débits classés de la figure 93 ci-dessous, présente trois ruptures de courbe avec des pentes différentes. La première rupture correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dus aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde rupture de pente à 60 l/s pourrait être associée à l'exploitation d'un système karstique plus profond et plus transmissif.

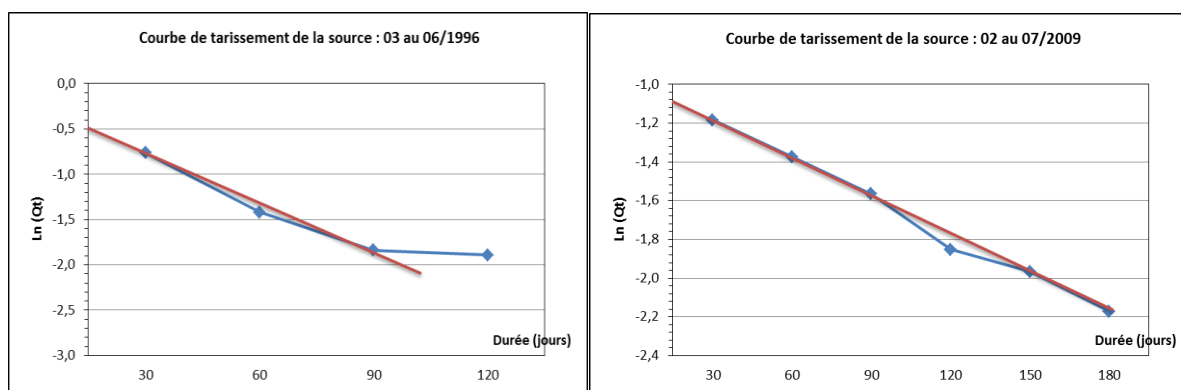
classe de débits	Fréquence	Fréquence cumulée	Pourcentage cumulé
20	3	3	2,68
40	10	13	11,61
60	25	38	33,93
80	17	55	49,11
100	15	70	62,50
120	7	77	68,75
120	0	77	68,75
140	8	85	75,89
160	8	93	83,04
180	2	95	84,82
200	0	95	84,82
220	2	97	86,61
190	4	101	90,18
200	0	101	90,18
220	0	101	90,18
240	0	101	90,18
260	4	105	93,75
280	0	105	93,75
300	0	105	93,75
320	1	106	94,64
340	1	107	95,54
360	2	109	97,32
380	0	109	97,32
400	1	110	98,21
460	0	110	98,21
480	2	112	100



**Figure 93 :** Débits classés de la source Ournfaa

La troisième rupture à 160 l/s, avec une pente plus faible que pour la première, témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Ournfaa pour les années 1996 et 2009. Les graphiques de la figure 94, donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.



**Figure 94 :** Courbes de récession de la source Ouarnfaa

Le tableau 33 ci-dessous donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 33 :** Réserve régulatrice de la source Ouarnfaa

Paramètres	1996	2009	Réserve moyenne
Ln(Qo)	-0,77	-1,18	<b>2,8</b>
Ln(Qt)	-1,42	-1,37	
Coeff. tariss	0,02494	0,00729	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	2,10	3,94	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 34) est variable d'une année à une autre de 13,4 à 25,1 Km<sup>2</sup>. La valeur de 18 Km<sup>2</sup> sera retenue pour l'aire d'alimentation de cette source.

**Tableau 34 :** Surface d'alimentation de la source Ouarnfaa

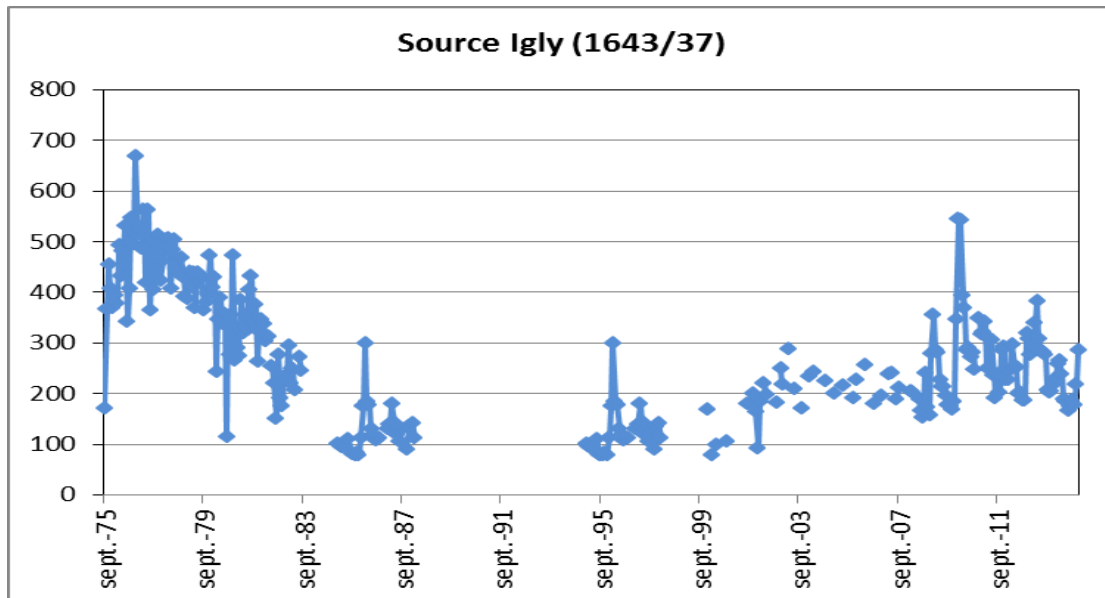
Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1996	2,1	196	13,39
2009	3,94	196	25,13

### c. Source Igly

La source Igly est située dans le territoire de la Commune de Zaouit Ech Cheikh. Elle présente les coordonnées suivantes : x = 449 925 ; y = 226 940 ; z = 695,7

Le griffon de la source affleure dans les conglomérats attribués au moi-plio-quaternaire. La source est utilisée pour l'alimentation en eau potable des douars riverains et l'irrigation des terres en aval moyennant un système de seguias aménagées dans ce sens. La source coule naturellement et l'irrigation se fait sans pompage.

Le graphique de la figure 95 ci-dessus, montre l'évolution du débit mensuel annuel de la source Igly durant la période 1975-2014.

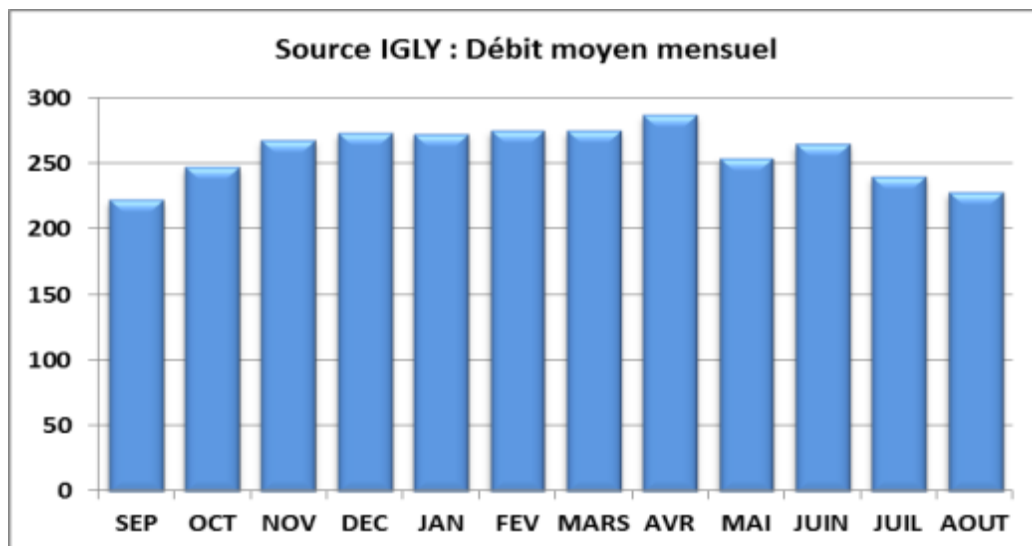


**Figure 95 :** Evolution des débits mensuels de la source Igly

On note ainsi qu’une baisse du débit de la source Igly de plus 80% a été enregistrée et probablement consécutive de la période de sécheresse des années 80. A partir du début des années 2000 une reprise du débit de la source a été observée et se maintient jusqu’à nos jours.

Par ailleurs, on note une fluctuation mensuelle importante du débit et des épisodes d’histogrammes de crues relativement longues.

Le graphique de la figure 96, donne le débit moyen mensuel interannuel durant la période 1994-2014.

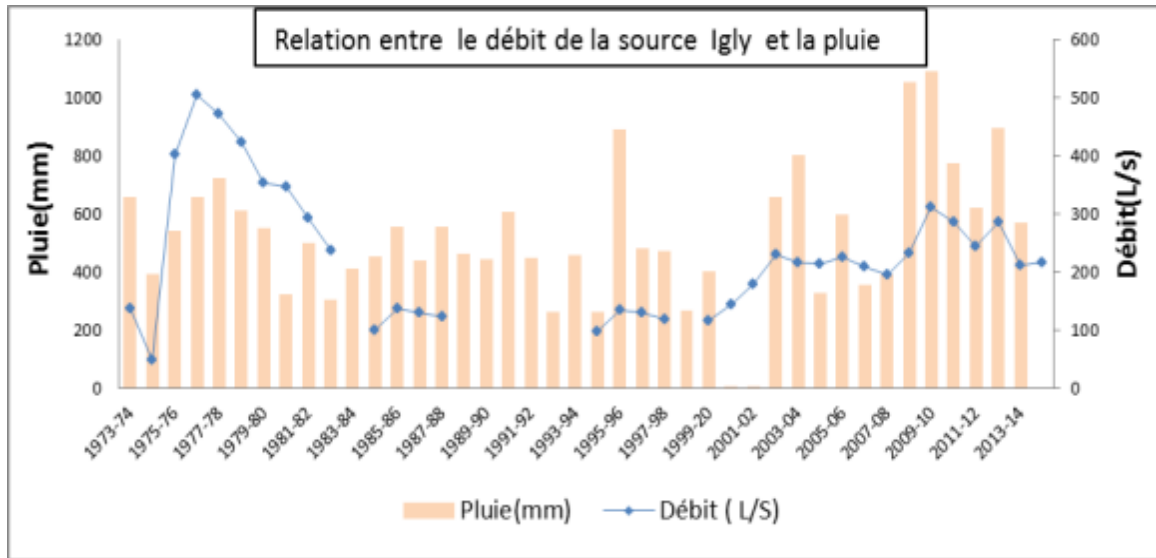


**Figure 96 :** Débit moyen mensuel de la source Igly

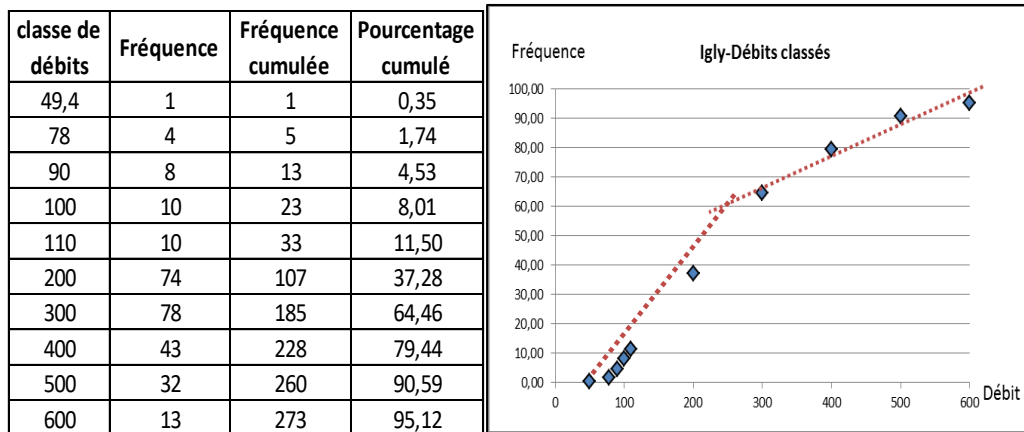
On note que le débit de la source Igly est soutenu durant toute l’année avec un histogramme aplati témoignant d’un apport soutenu ou d’un réservoir très puissant.

Le graphique de la figure 97, montre l’évolution des débits annuels de la source Igly durant la période 1996-2014 et sa relation avec la pluviométrie.

Selon les enregistrements continus à partir de 1994, le débit de la source s'améliore et augmente au fil des années. Par ailleurs, l'effet des pluies qui était bien identifié durant la période 1975-1982, est atténué durant la période 1994-2014 malgré l'amélioration de la pluviométrie. Cet effet est du probablement à la puissance de l'aquifère alimentant la source qui permet de maintenir et réguler le débit de restitution tout le long de l'année.



**Figure 97 :** Relation entre débit de source Igly et pluie

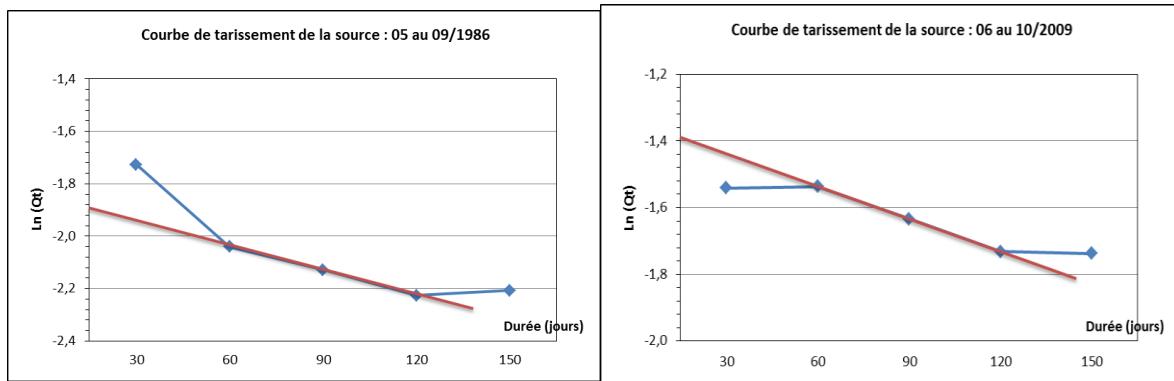


**Figure 98 :** Débits classés de la source Igly

La courbe des débits classés de la source Igly de la figure 98 ci-dessus, présente une rupture de courbe à 300 l/s qui témoigne d'apports d'eau supplémentaires au système ou de restitution au moment de la décrue, d'eau piégée.

Deux courbes de récession ont été établies pour la source Ouarnfaa pour les années 1986 et 2009. Les graphiques de la figure 99 donnent des coefficients de tarissement très faible et des réserves régulatrices relativement importantes.





**Figure 99** : Courbes de récession de la source Igly

Le tableau 35 donne la réserve régulatrice de la source calculée à partir la droite de la courbe de récession.

**Tableau 35** : Réserve régulatrice de la source Igly

Paramètres	1986	2009	Reserve moyenne
Ln(Qo)	-2,04	-1,54	<b>5</b>
Ln(Qt)	-2,13	-1,63	
Coef. tariss	0,00345	0,00345	
Vo (Mm <sup>3</sup> )	3,74	6,23	

La surface de l'aire d'alimentation de la source serait approchée en admettant que 80% de la pluie efficace sera infiltrée dans la zone de recharge de la nappe. L'aire d'alimentation ainsi calculée (tableau 36) est variable d'une année à une autre de 23,85 à 39,73 Km<sup>2</sup>. La valeur de 34 Km<sup>2</sup> sera retenue pour l'aire d'alimentation de cette source.

**Tableau 36** : Surface d'alimentation de la source Igly

Année	Volume moyen écoulé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Pluie efficace	Surface de l'aire d'alimentation
1986	3,74	196	23,85
2009	6,23	196	39,73

#### IV.2. Sources situées entre El Ksiba et Tanogha

Les sources situées entre El Ksiba et Tanogha, émergent principalement des formations dolomitiques et calcaires des lias et des travertins du plio-quaternaire. Ce type de formations se caractérise par le développement du phénomène de karstification, siège de conduites souterraines drainant les eaux d'infiltration des pluies. Il faut également souligner l'importance de l'effet de la tectonique sur la région. En effet, les formations chevauchantes (écaillés d'El Ksiba), seraient plus affectées par les mouvements tectoniques de compression et de translation. Elles seraient plus fragiles et donc plus exposées aux phénomènes d'altération de la surface. Cela conduirait dans certains cas à la présence de formations superficielles plus perméables facilitant l'infiltration des eaux de pluie. Ces zones altérées permettraient à la fois de réguler l'infiltration des eaux de pluie vers la zone noyée et, par le biais de failles et de ruptures topographiques, d'alimenter le ruissellement de surface, qui à son tour contribuerait en partie réinfiltrerait au ruissellement au niveau des cours d'eau, entre autres.

### **a. Source N'Oudaine**

La première mesure de débit de la source N'Oudaine a été effectuée en juin 1965. Cependant les jaugeages ne sont devenus systématiques et une cadence mensuelle qu'à partir du mois d'avril 1972.

Toutefois, il y'a lieu de souligner que des lacunes de mesures de l'ensemble des sources du Dir, à l'instar de la source N'Oudaine sont constamment constatés au fil du temps.

La source N'Oudaine qui est considérée comme la source la plus importante par rapport aux autres situées entre El Ksiba et Tanogha, émerge au bas d'une falaise et n'est dominé que par un faible bassin versant. Le risque d'influence de ces débits est donc insignifiant. La séguia aménagée depuis le griffon, permet le transfert de l'eau vers les lieux d'utilisations situés en zone de la plaine.

Le jaugeage de la source s'effectue au droit d'une section située à près de deux cents mètres du griffon.

Cette source se distingue des autres sources par l'importante de son débit et de sa faible sensibilisation relative aux aléas climatiques. Le panneau hydrogéologique de son alimentation demeurerait par conséquent, le plus important par comparaison à celui des autres sources.

A travers l'analyse de la courbe des débits classés, on constate qu'elle présente plusieurs ruptures de pente respectivement à 120 l/s, 140 l/s, et à 200 l/s.

La première rupture se produit à des périodes de basses eaux et à une fréquence cumulée de 15%. Pour les débits inférieurs à 120 l/s, le système est très inertiel et traduit globalement la vidange des réserves.

De 120 l/s à 140 l/s, la pente devient plus forte, ce qui traduit selon Alain MANGIN, la constitution de la réserve. Cette hypothèse paraît logique vu que pendant la période 1972-1980, les niveaux des plans d'eau étaient à des côtes supérieures à celle des années quatre-vingt. La rupture constatée au delà de 180-200 l/s, pour de forte fréquence, peut s'expliquer soit par un apport d'eau extérieur, eu égard à la possibilité de déversement des eaux de la nappe du lias vers l'écaïlle interne, d'où émergent le groupe des sources N'Oudaine, Ousafrou, Oucha, Ikhorba et Biha Ou hammou.

Les trois courbes de récession établies, donnent toutes des faibles coefficients de tarissement et des réserves régulatrices importantes. Ces données traduisent les dimensions relativement grandes du panneau d'alimentation de la source, et d'une karstification peu développée des formations réservoirs.

### **b. Source Ikhorba**

A l'instar de la source N'Oudaine, La source Ikhorba émerge au bas d'une falaise constituée de dolomies du lias, où des indices de karstification sont apparents. Aucune chaaba ou cours d'eau ne domine la source. De ce fait, les débits mesurés sont hors de risque d'influence par les eaux de surface.

La source est aménagée, et les eaux qui y sourdent sont véhiculées par une séguia bétonnée vers les lieux d'utilisations situés en aval. En plus du principal usage d'irrigation, la source Ikhorba est utilisée pour l'alimentation en eau potable du douar portant le même nom.

Cette source a été jaugée pour la première fois au mois de juillet 1971. Cependant la systématisation des mesures n'est devenue effective et à une cadence mensuelle qu'à partir du mois d'avril 1972.

Elle est classée au deuxième rang en matière d'importance de son débit et de résistance relative aux aléas climatiques derrière la source N'Oudaine.

Elle présente les mêmes ruptures de pentes aux mêmes fréquences (60% et 80%). Ce qui traduirait encore une fois l'appartenance des sources émergentes au pied du jbel Oum Lyader à la même unité hydrogéologique en l'occurrence l'échelle interne d'El Ksiba.

La première rupture observée à 60 l/s, met en évidence un apport d'eau provenant d'un autre système, qui serait associé à des eaux associées à la partie non saturée du système. La deuxième rupture constatée pour les hautes eaux (140 l/s), soit en période de fortes crues, pourrait traduire la prise en compte par la section de jaugeage d'apports externes, notamment les eaux de ruissellements. Cette hypothèse est fort probable vu que la section de jaugeage se situe loin du griffon de la source. D'ailleurs, le griffon de la source est dominé par un bassin versant drainé par un cours d'eau, passant près de la séguia en béton renfermant la section de jaugeage.

Les deux courbes de récession établies pour les périodes allant respectivement de septembre 1995 à septembre 1996, et de septembre 2012 à Décembre 2013, donnent de faibles coefficients de tarissement relativement forts que ceux de la source N'Oudaine, et des réserves régulatrices de l'ordre de 4 à 5 Mm<sup>3</sup>, beaucoup moins importantes que celle de ladite source. Les données déduites des courbes de tarissement de la source Ikhorba, traduisent un pouvoir régulateur moins important et une karstification assez développée par comparaison à la source N'Oudaine.

### **c. Source Ou Achcha**

La source Ou Achcha située à près d'un kilomètre au sud de la source Ousafrou, émerge de l'échelle atlasique interne, par le biais de la faille de direction NE-SW, portant en surface les formations marneuses du lias inférieur au pied du jbel Em Lyader. Au droit du site de la source, on observe des grottes importantes témoignant le développement de la karstification des formations de surface.

La source faisait l'objet de mesures des débits à partir du mois d'avril 1972, et les eaux qui y sourdent sont transférées via un réseau de séguias bétonnées, vers les lieux d'irrigation.

Le pseudo-régime hydraulique caractérisant la source de 1984 à 2008, malgré que cette période soit considérée comme largement déficitaire, trouverait son explication dans l'importance des réserves régulatrices du panneau lui donnant naissance et de son fort pouvoir régulateur.

Les ruptures de pentes de la courbe des débits classés de la source Ouacha, se manifestent pour les mêmes fréquences et pratiquement pour les mêmes débits, ce qui témoigne de leurs liaisons hydrauliques et leur émergence du même aquifère.

La première rupture de pente qui s'est manifestée à un débit de 80 l/s, pour une fréquence de 0.67, traduirait selon Alain Mangin, des apports d'eau à partir du système lui-même. Cette augmentation du débit est donc le résultat d'une recharge au niveau de la partie non saturée de la nappe. La deuxième rupture de pente constatée à un débit de 140 l/s au delà duquel, de fortes augmentations du débit sont observées pour de faibles fréquences. Cette rupture de pente traduirait une influence des débits de la source par des eaux provenant des ruissellements de surface. Ainsi, pour des événements pluviométriques exceptionnels il n'est pas exclue que des eaux drainées par un talweg situés en amont de la source arriveraient à augmenter les débits de la source.

L'exploitation des données existantes a permis de tracer une seule courbe de récession établie pour la source Ou Achcha, en raison des lacunes de mesures, ou à des incohérences les caractérisant. Les résultats déduits de l'interprétation de la droite de tarissement, donne une faible valeur du coefficient de tarissement, évalué à  $0,7 \cdot 10^{-3} /j$ , et une forte valeur des réserves régulatrices.

Ces paramètres sont caractéristiques d'un milieu à fort pouvoir régulateur, mais libérant moins facilement les eaux, donc un milieu moins karstifié et étendu.

La zone relativement peu karstifiée du système, serait fort probablement liée au niveau inférieur du réservoir aquifère. Cette hypothèse est confortée par la faible évolution des débits au pas du temps saisonnier.

#### **d. Source Ousafrou Rive droite**

Les sources Ousafrou composées de deux griffons, l'un appelé Ousafrou rive gauche et le deuxième nommé Ousafrou rive droite, compte tenu de la position de l'un par rapport à l'autre, vis-à-vis du sens des écoulements de surface,

La différence entre les deux griffons réside dans le fait, que la source Ousafrou rive gauche est dominée par le lit de l'oued Ousafrou, pouvant influencer les débits jaugés notamment en période des hautes eaux.

A l'instar des autres sources, la source Ousafrou a fait l'objet de la première mesure de jaugeage au mois de septembre 1970, mais les mesures ne s'effectuaient d'une façon systématique à une cadence mensuelle, qu'à partir d'avril 1972. Ces mesures sont également entachées de lacunes de temps à autres.

Les débits de la source Ousafrou rive droite connaissent de fortes fluctuations et sont influencés par les eaux de l'oued Ousafrou et des écoulements hypodermiques. De ce fait, le tracé de la courbe de récession est difficile à obtenir. On s'est contenté du tracé d'une seule courbe de récession correspondant à la période allant de septembre 1980 à septembre 1981.

La courbe des débits classés présente deux ruptures de pente. La première à un débit de 60 l/s pour une fréquence de 60%, et la deuxième pour un débit de 180 l/s, pour fréquence forte de 85%. La courbe présente une première cassure pour un débit de 60 l/s et une seconde à un débit de 80 l/s. la première rupture de pente se produit à une fréquence de non dépassement de 80%. A l'image de la source Noudain, la source Ousafrou comiait une phase de recharge entre les débits de 60 l/s à 160 l/s. Cette recharge qui se traduit par une augmentation de la pente de la courbe, est pleinement justifiée vu le débit de 60 l/s correspond au début de base d'étiage et par conséquent à la période des basses eaux. Aussi, la recharge peut être associée en partie aux infiltrations qui pourraient se produire le long du lit de l'oued ousafrou et de ses affluents. La seconde rupture atteinte à 180 l/s, peut expliquer le début d'une restitution des réserves reconstituées qui contribuent à l'augmentation des débits de la source.

La rupture à 280 l/s, s'expliquerait par la prise en charge de la section de jaugeages de débits provenant des eaux de surface, étant donnée que la source est dominée par un bassin versant drainé par l'oued portant le même nom que la source, et dont le lit du cours d'eau passe au niveau de la source.

L'exploitation de la courbe de tarissement donne une forte valeur du coefficient de tarissement de l'ordre de  $6,4 \cdot 10^{-3}/j$ , et une faible valeur des réserves régulatrices. Ces données traduisent la présence d'un système se caractérisant par la présence de formations de faibles capacités de régulation, et se vidangent rapidement. Ce système correspondrait à un milieu karstifié ou fracturé de faible étendue.

Aussi, l'analyse de l'évolution des débits mensuels sur plusieurs cycles hydrologiques, met en évidence des tarissements de la source sur de longues périodes, avec des pentes régulières et

identiques. Ces tarissements traduisent les déficits pluviométriques constatés pendant sur de longues périodes répétitives observées depuis 1980.

Les débits moyens mensuels interannuels de la source pour les périodes 1970-1980 et de 1980-2013, qui caractérisent deux cycles climatiques distincts. L'aire d'alimentation serait prise égale à 4.5 Km<sup>2</sup>.

#### **e. Source Ousafrou. Rive Gauche**

La première mesure du débit de la source ain ousafrou rive gauche, a été réalisée pendant le mois de septembre 1970. Cependant, la systématisation des jaugeages à une cadence mensuelle, n'est devenue effective qu'à partir du mois d'avril 1972. Toutefois, il y'a lieu de signaler de nombreuses lacunes entachent ces mesures de temps à autres.

Contrairement à la source Ousafrou rive droite, la source ousafrou rive gauche connaît de fortes fluctuations dues fort probablement aux influences émanant des eaux de ruissèlement de l'oued ousafrou passant à quelques mètres en amont immédiat du griffon de la source. De ce fait, le tracé des courbes de récession est difficile à obtenir. On s'est donc contenté du tracé d'une seule courbe de correspondant à la période allant de septembre 1980 à septembre 1981.

La source Ousafrou rive gauche distante de la source ousafrou rive droite d'une dizaine de mètres, présente deux ruptures de courbes. La première à un débit de 60 l/s pour une fréquence de 0.6 et la deuxième pour un débit de 80 l/s correspondant à une fréquence de 0.97. Selon Alain Mangin, ce type de rupture est fort probablement lié à des apports provenant d'un autre système ou à une prise en compte par la section de jaugeage des eaux n'appartenant pas au système.

La première rupture de pente pourrait être associée à la provenance des eaux de la partie non saturée du système lui-même. La deuxième rupture à 80 l/s, traduit la prise en compte de la section de jaugeage des eaux de ruissellements qui seraient attribuées au débordement des eaux drainées par les caniveaux de la route.

La forte valeur du coefficient de tarissement déduit de la courbe de récession, qui est de  $6.410^{-3}/j$  et la faible valeur des réserves régulatrices (1Mm<sup>3</sup>), traduisent la présence la présence d'un système aquifère caractérisé par des formations de faibles capacités de régulation, qui se vidangent rapidement. Ce système correspondrait à un milieu karstifié ou fracturé de faible étendue.

Aussi, l'analyse de l'évolution des débits sur plusieurs cycles hydrologiques, met en évidence des tarissements de la source sur de longues périodes à l'instar de la source Ousafrou rive gauche, avec des pentes régulières et identiques, traduisant l'homogénéité du système.

L'aire d'alimentation ainsi calculée varierait de 7 Km<sup>2</sup>.

#### **f. Source Biha ou hammou**

La source Biha Ou Hammou fait partie des sources qui émergent de l'écaille basique interne au pied de jbel Bou Guenouss. Elle se situe sur l'axe d'une chaaba drainant le bassin de l'oued Tabadout, et sourde sous forme de plusieurs griffons situés en rive droite du lit de l'oued.

La source Biha ou Hammou, a connu un assèchement total et répétitif depuis 1986, et se caractérise entre autres par de fortes variations de son débit au pas de temps mensuel.

Les fortes variations des débits pendant un cycle hydrologique, traduisent l'influence de la source par les eaux de surface drainées par l'oued Tabadout, ce qui signifie que la section de jaugeage intègre pendant la période des hauts eaux, des eaux n'appartenant au système alimentant la source.

La source Biha Ou Hammou située sur la même faille de direction NE-SW que les autres sources du groupe ousafrou, présente également comme illustré par le graphique ci-après des ruptures de pentes, qui se produisent pratiquement aux mêmes fréquences. Ce constat n'est pas un fait du hasard, mais témoigne de l'appartenance des dites sources au même panneau hydrogéologique (écaïlle inteme).

Au-delà de 60 l/s, l'augmentation des débits peut être associée à un apport provenant d'un autre système. Ce système ne peut être que la nappe du lias qui déverse ses eaux par le biais d'abouchements par endroits ou Lme continuité géologique entre le lias et l'écaïlle est assurée, ou par le biais de failles transverses.

A partir de 160 l/s, c'est-à-dire en phase de fortes crues, la rupture de la courbe comme pour le cas de la source ousafrou Rive gauche, les débits jaugés sont fort probablement influencés par les eaux de ruissellements.

Les deux courbes de récession élaborées donnent des coefficients de tarissement assez forts et des réserves régulatrices relativement faibles. Ces données traduisent la faible étendue du réservoir donnant naissance à la source, et à un développement de la karstification du milieu, ce qui peut expliquer l'influence de la source par les écoulements de surface.

On retiendra la valeur de 3 Km<sup>2</sup> comme surface de l'aire d'alimentation de la source.

#### **g. Source Tamoudjoute amont et milieu**

Les sources de Tamoudjoute amont et milieu attribuées à l'aquifère basique, sont distantes l'une de l'autre de près de 400 mètres environ. Les deux sources émergent au contact des argiles rouges du trias et des calcaires et dolomies basiques par le biais d'une faille de direction NE-SW passant au pied de jbel Bou Guenouss.

Entre les deux griffons dont les débits étaient relativement faibles lors de la visite du mois de décembre 2018, apparaissent de petits griffons dont la débitance avoisine 1l/s, et qui sont le plus souvent captés pour l'alimentation en eau potable des populations du douar.

En matière d'évolution des débits dans le temps, les deux sources présentent de très fortes similitudes, ce qui témoigne de leur appartenance au même aquifère, et au même panneau d'alimentation. La source Tamoudjoute milieu, se caractérise toutefois par une inertie relative à la sécheresse, comparativement aux sources amont et aval qui ont connues des tarissements répétitifs depuis 1980. Ce constat peut s'expliquer par la position relativement basse de la source de Tamoudjoute amont par rapport au niveau du plan d'eau de l'aquifère lui donnant naissance, et fort probablement en raison de situation sur une faille drainée.

Les dites sources furent jaugées pour la première fois en mai 1968, mais ce n'est qu'à partir du mois d'octobre 1972 que les mesures ont été entamées d'une façon régulière à une cadence mensuelle, mais elles demeurent entachées à l'instar des autres sources du Dir par des fréquentes lacunes.

Les débits moyens mensuels interannuels et les volumes écoulés correspondants relatifs à la source de Tamoudjoute milieu sont beaucoup plus importants que ceux des deux autres sources, traduisant ainsi une importance relative de son bassin d'alimentation par comparaison à ceux des deux autres griffons.

La courbe de la source Tamoudjoute amont attribuée aux formations dolomitiques du lias, présente deux ruptures de pente. La première à 40 l/s pour une fréquence de 65%, et une deuxième à un débit de 80 l/s pour une fréquence de 90%.

Ainsi, la source de Tamoudjoute qui émerge des dolomies du lias au contact des argiles permotriasiques, présente le même fonctionnement que les autres sources du lias.

La première rupture correspondrait à des apports provenant certainement des infiltrations au niveau de la zone non saturée de l'aire d'alimentation de la source.

La seconde qui se manifeste pour de très fortes fréquences pourrait être associée une influence des débits de la source par des écoulements de surface, drainés par une chaaba passant près du griffon.

La comparaison des courbes des débits classés de la source Tamoudjoute amont et aval, montre que les deux sources présentent le même fonctionnement hydrologique en manifestant les mêmes impulsions aux événements pluviométriques. Les ruptures de pentes se passent aux mêmes valeurs de débits et de fréquences, que ce soit en période des basses eaux ou en période de fortes crues.

Ainsi, la première rupture de pente serait attribuée à des infiltrations des eaux au niveau de la zone non saturée du panneau d'alimentation des sources. La deuxième rupture ne peut être due qu'à une influence des eaux de ruissellement.

La courbe de récession établie pour la période allant de sept 1980 à Sept 1981, donne un coefficient de tarissement de  $2,5 \cdot 10^{-3}/j$ , et des réserves régulatrices assez importantes évaluées à  $2.2 \text{ Mm}^3$ .

Pour le calcul de la surface de l'aire d'alimentation de la source, on s'est basé sur les mesures de débits de la période 1972-1980, lors de laquelle les débits moyens fluctuent peu. La surface de l'aire d'alimentation de la source est évaluée à près de  $5 \text{ Km}^2$ .

La source Tamoudjoute amont est la source dont la débitance est la plus faible du groupe de sources de Tamoudjoute. L'analyse du diagramme donnant l'évolution de ses débits, permet de conclure que ladite source est une source de trop plein, eu égard à sa forte sensibilité vis-à-vis des déficits pluviométriques, et à sa tendance au tarissement sur plusieurs années depuis 1980 jusqu'en 2008.

La courbe de récession établie pour les périodes allant respectivement de sept 1982 à Juil 1983, donne des coefficients de tarissement trop forts variant entre  $10 \cdot 10^{-3}/j$  des réserves régulatrices faibles oscillant entre  $0.2$  et  $0.5 \text{ Mm}^3$ . Ces données traduisent la présence d'un milieu qui se vidange rapidement, de faible dimensions, et se caractérisant par un faible pouvoir régulateur des eaux.

Les débits de la source observés de 1984 à 2008, période pendant laquelle, l'influence des écoulements de surface sont sans aucun impact significatif. Ces débits relativement faibles, témoignent de la faible importance des dimensions du panneau d'alimentation de la source.

#### **h. Source de Tamoudjoute aval**

L'analyse de ces diagrammes met en évidence la forte relation existante entre les débits de la source et la pluviométrie, ainsi que la forte sensibilité de ces derniers aux aléas climatiques. Aussi, les fortes chutes des débits de la source de 1979 à 1984, ne pourrait s'expliquer que par :

- une origine de la source qui serait à fortiori une source de trop plein ;
- un bassin hydrogéologique de faible étendu ;
- une structure et une texture favorisant l'évacuation des eaux.

A l'image de la cadence de la baisse des débits de la source, leur régénération nécessiterait plusieurs années excédentaires. D'ailleurs, les excédents pluviométriques enregistrés pendant ces quatre dernières années, ont juste amorcé un début modeste de la reconstitution des réserves du niveau aquifère alimentant le groupe des sources Tamoudjoute, et par conséquent, une légère amélioration des débits.

Autre constat, les débits de la source de Tamoudjoute aval sont fortement influencés par les ruissellements, De ce fait, ils connaissent de fortes variations saisonnières, comme illustré par les diagrammes suivants permettant de comparer l'évolution des débits observés de la source de septembre 2009 à Août 2010, et des hauteurs des pluies enregistrées pendant la même période.

A l'instar de la source Tamoudjoute amont, la source de Tamoudjoute aval, pourrait être considérée comme une source de trop plein, fortement attaché à la pluviométrie. Ladite source a connu un assèchement total à plusieurs reprises, de 1990 à 2008, alors que les deux autres sources n'ont pas connu de tarissement total, malgré leurs faibles débits observés pendant la même période.

La courbe des débits classés de la source de Tamoudjoute aval, montre que cette dernière présente des particularités par comparaison aux deux autres sources. Cette particularité réside dans la présence de plusieurs ruptures de pentes positives et négatives.

La première rupture se produit à 20 l/s pour une fréquence de 0.52, la deuxième à un débit de 40 l/s, la troisième à 80 l/s et la quatrième à 110 l/s. La première rupture qui se produit en période de basses eaux, correspondrait comme pour l'ensemble des sources à des apports dûs aux infiltrations au niveau de la zone non saturée, et par conséquent, à une recharge du panneau d'alimentation de la source. La seconde anomalie correspond à une augmentation plus importante des débits que des classes de fréquence. Cela indique qu'au delà de 40 l/s, soit que les écoulements exploitent un système de drainage plus transmissif, soit que le système est alimenté par un autre bassin versant.

L'exploitation des données de jaugeage, ont permis le tracé de deux courbes de récession, pour la période allant de 2008 à 2012. Les résultats déduits des droites de tarissement, donnent des coefficients de tarissement forts de l'ordre de  $11.10^{-3} /j$ , et des réserves régulatrices faibles. Ces données traduisent le rattachement de la source à un milieu de faible pouvoir régulateur et de faible étendue.

Pour le calcul de Taire d'alimentation de la source, on s'est basé sur l'exploitation des données relatives aux périodes de 1980-2009, pendant lesquelles les écoulements de la source ne sont pas influencés par les ruissellements de surface.

### **i. Source N'Ygourramen**

Les griffons des sources Moha Ou Khity et N'Ygourramen sont distants l'un de l'autre de près de 200 m environ. Elles émergent de la nappe du lias, par le biais d'une faille mettant en contact les formations triasiques et celles du lias moyen. Cependant, l'analyse de l'évolution de leurs débits, montre que les deux sources ont des comportements différents. La source N'Ygourramen connaît de fortes variations et une tendance au tarissement d'une façon accélérée lors de chaque séquence sèche.

La dite source est dominée par une petite dépression drainée par une chaâba à peine visible sur le terrain, et dont Taxe passe au niveau du griffon.

Les niveaux géologiques drainés par les deux sources, seraient fort probablement de textures différentes. La source Moha Ou Khity est certainement dominée par un milieu ayant un pouvoir régulateur important des eaux, alors que le milieu alimentant la source N'Ygourramen se



caractériserait par un faible pouvoir régulateur des eaux, et une karstification très développée, permettant un drainage des eaux de pluies, lui assurant ainsi, de forts débits dépassant ceux de la source Moha Ou Khity en périodes fortement humides. La source Ygourramen fonctionnerait ainsi comme une source de trop plein.

En matière de suivi, les premières mesures des débits de la source Ygourramen ont été entamées pour la première fois en mai 1968, puis interrompues pour être reprises d'une façon systématique à partir du mois d'octobre 1972, à une cadence mensuelle entachée de temps à autre de lacunes. Les débits de la source varient de 4l/s comme minimum observé, à 129 l/s correspondant au débit maximum enregistré.

Les deux courbes de récession établies pour la période de septembre 2012 à octobre 2013, fournissent des coefficients de tarissement élevés de l'ordre de  $4,7 \cdot 10^{-3}/j$  et  $7 \cdot 10^{-3}/j$ , et des réserves régulatrices de l'ordre de  $1 \text{ Mm}^3$ . Ces données militent en faveur de la présence d'un système peu étendu et permettant l'évacuation facile des eaux. Les dolomies karstifiées du lias sont caractéristiques de ce type de milieu.

Pour l'évaluation de la surface de l'aire d'alimentation de la source, nous nous sommes basés sur les débits relevés de 1972 à 1980 et de 2008 à 20013, correspondant à des périodes humides, pendant lesquelles le tarissement de la source est peu prononcé.

#### **j. Source Moha Ou Khity**

Comme signalé plus haut, la source Moha Ou Khity jumelle de la source N'Ygourramen, émerge des formations basiques. Ses débits connaissent de faibles fluctuations par comparaison à ceux de la source N'Ygourramen, et demeurent moins sensibles aux effets de la sécheresse.

Les premières mesures de la source Moha Ou Khity, date de mai 1968, cependant la systématisation des jaugeages n'est devenue effective que depuis mars 1972, à une cadence mensuelle connaissant des lacunes de temps à autre.

La courbe des débits classés de la source Moha Ou Khity qui émerge directement des formations dolomitiques du lias, présente une rupture de pente à un débit 80 l/s, soit en période des hautes eaux, et pour une fréquence de 95%. Selon Alain Mangin, ce type de rupture correspondrait à un apport d'eau du système. Ces apports pourraient provenir des infiltrations au niveau de la zone non saturée, par le biais des ruissellements des eaux de surface. A signaler, que les deux sources Aghbalou Moha Ou Khity et Aghbalou N'Ygourramen sont dominées par la petite cuvette drainée par une chaaba, passant par la source N'Ygourramen.

Les deux courbes de récession établies, donnent des coefficients de tarissement de réserve régulatrice de  $0,5 \text{ Mm}^3$  pour la période de septembre 2009 à octobre 2010 et  $1,7 \text{ Mm}^3$  pour la période allant du mois d'aout 2012 à décembre 2013.

L'analyse de la source Aghbalou N'Moha ou Khity située à une centaine de mètre par rapport à la source Ygourramen, fait ressortir une similitude en matière de fonctionnement, qui se traduit par des ruptures de pentes pratiquement au même débit, et à la même fréquence de 95%, constatée pendant les périodes de crues.

Les valeurs élevées des coefficients de tarissement caractérisent un milieu évacuant facilement les eaux comme le témoigne les fortes variations des réserves régulatrices de 2009 à 2012. Aussi les réserves régulatrices modestes traduisent le faible pouvoir régulateur des formations constitutives du panneau d'alimentation de la source.

Pour l'évaluation de la surface de son aire d'alimentation, nous nous sommes basés comme pour la source Aghbalou N'Ygourramen, sur l'exploitation des débits relevés de 1972 à 1980 et de 2008 à 2013, correspondant à des périodes humides, pendant lesquelles le tarissement de la source est peu prononcé.

#### **k. Sidi Chami amont**

La source sidi Chami amont émerge au niveau de la base de l'écaïlle interne, au contact des formations primaires et permo-triasiques affleurant au droit de Jbel Bou Genouss. Elle est composée de deux griffons principaux et de petites résurgences de faibles débits. La section de jaugeage se situe sur l'axe d'un cours d'eau drainant un bassin versant qui prend naissance au nord-est de la source Gafer.

Il est fort probable que les débits de la source soient fortement influencés par les écoulements de surface, et aux ruissellements hypodermiques inhérents à l'écaïlle interne. Cette hypothèse est fort probable eu égard à l'importance des ruptures de pentes caractérisant la zone amont dominant la source, et de la situation de la section de jaugeage dans le lit du cours d'eau drainant le bassin amont.

La courbe des débits classés de la source de sidi Chami amont, présente deux ruptures de pentes. La première à 60 l/s pour une fréquence basse et la deuxième à 120 l/s pour une fréquence de 85%. La première rupture est observée pendant la période normale d'écoulement (60 l/s correspondant un débit voisin du moyen mensuel interannuel de la source). Les apports constatés au-delà du débit de 60 l/s, serait attribués à des infiltrations eau niveau de la zone non saturée du panneau de son alimentation.

Au-delà de 120 l/s, soit en période de forte crue, la rupture de la pente traduisant une augmentation du débit pour de faible fréquence, les apports ne peuvent être associés qu'à une prise en compte lors des jaugeages, des eaux de ruissellement. D'ailleurs, la section de jaugeage est située en plein lit d'un cours d'eau.

Egalement, l'hypothèse d'une influence des débits de la source par les ruissellements de surface et écoulements hypodermiques, peut s'expliquer par le tarissement continu de la source, de 2008 à 2012.

Aussi, à travers l'analyse des débits de la source, il se dégage une forte baisse de ces derniers évaluée à près de 65%, et ce depuis 1980. Cette baisse ne concorde pas avec la baisse ayant affectée les autres sources pour la même période et qui est de l'ordre de 30%. Ce constat confort l'hypothèse d'une influence des débits de la source par les eaux de surface.

Le déficit d'écoulement a donc affecté les débits de la source, dont la section, de jaugeage intègre les ruissellements de surface.

La source Sidi Chami amont est caractérisée par un assèchement total répétitif, ce qui constitue un inconvénient pour l'élaboration des courbes de récession. La seule courbe établie pour la période de septembre 2011 à juillet 2012, donne un coefficient de tarissement de  $7.5 \cdot 10^{-3}/j$ , et des réserves régulatrices très faibles de l'ordre de  $0.183 \text{ Mm}^3$ . Ces données traduisent sur le terrain la présence d'un milieu de faible étendue, permettant une évacuation rapide des eaux, par le biais d'un réseau de karts et de failles affectant les formations constitutives du panneau d'alimentation de la source sidi Chami amont.

## **l. Sidi Chami aval**

La source sidi Chami aval située à près de 3Km en aval de la source sidi Chami Amont. Son griffon émerge au niveau du lit d'une chaaba prenant naissance en amont de Gafer. Elle est dominée par une falaise marquée par la présence de grotte témoin de la karstification développée de la zone. Son griffon est légèrement désaxé par rapport au lit de l'oued.

Contrairement à la source sidi Chami amont, la source sidi Chami aval, se caractérise par des débits soutenus, bien que connaissant des fluctuations saisonnières qui peuvent être en partie attribuées à une influence partielle des eaux de ruissellement en période humide (écoulements hypodermiques et de surface).

Aussi, l'analyse des débits moyens mensuels de la source, met en exergue leur constance relative pour les périodes 1972-80 et 1980-2013, et que la chute de la hauteur des pluies qui est de l'ordre de 35% à partir de 1980.

A l'image de la source sidi Chamí amont, la courbe de la source sidi Chamí aval offre deux ruptures de pente. La première à un débit de 60 l/s et pour une fréquence de 60%, et la deuxième à un débit de 80 l/s. Le même raisonnement serait donc appliqué pour la source sidi Chamí aval.

On assisterait donc à des apports provenant des infiltrations au niveau de la Zone non saturée à partir de 60 l/s jusqu'à 80 l/s, et au-delà de ce débit, la section de jaugeage serait influencée par des eaux de ruissellements, vu que celle-ci est située au droit du lit majeur du cours d'eau.

La seule courbe de récession établie pour la période de septembre 2011 à septembre 2012, donne un coefficient de tarissement de  $1,6 \cdot 10^{-3}/j$ , faible par rapport à celui obtenu pour sidi Chami amont, et des réserves régulatrices de l'ordre de  $2.17 \text{ Mm}^3$ , beaucoup plus importante rapport à la source amont. Ces données traduisent l'importance relative à la fois de l'étendu de l'aquifère dominant la source, et de son pouvoir régulateur.

L'évaluation de la surface de l'aire d'alimentation de la source, calculée en faisant le rapport du débit moyen écoulé sur la hauteur de pluie efficace, correspondant au cycle pris en considération pour l'élaboration de la courbe de récession est de  $6 \text{ Km}^2$ .

## **m. Ghorm Nih**

La source Ghorm Nih associée au groupe des sources émergeant de l'écaïlle extrême attribuée au plio-quatenaire, se caractérise par des assèchements répétitifs et son débit peut être considéré comme le plus faible de toutes les sources situées entre El Ksiba et Tanogha.

Ce dernier est surplombé de deux maisons, ce qui représente un risque permanent et une source de pollution accidentelle des eaux à tout moment.

La source Ghorm Nih est jaugée d'une façon systématique depuis octobre 1972. Toutefois, il y'a lieu de signaler l'existence de nombreuses lacunes de mesures constatées au fil des années.

L'analyse de la courbe des débits classés de la source Ghorm Nih, met en évidence la présence d'une anomalie de la droite représentative à un débit de 20 l/s. Cette anomalie accompagnée d'une augmentation des débits pour de faibles fréquences, traduirait l'existence d'apports d'eau externe au système.

Les deux courbes de récession établies pour les périodes allant respectivement de sept 1974 à nov 1975, et de janv 1996 à oct 1996, donnent des coefficients de tarissement relativement forts variant entre  $6,7$  et  $9 \cdot 10^{-3}/j$ , et des réserves régulatrices très faibles.

Ces données traduisent la présence de formations de faibles dimensions, relativement perméables assurant facilement l'infiltration et à la restitution des eaux de pluies. L'attribution de la source Ghorm Nih aux formations plio-quaternaires sur le plan géologique, est confirmée par les éléments fournis par les courbes de récessions (faibles réserves régulatrices).

#### **n. Source Ghorm Al Alam**

La source Ghorm Al Alam est partiellement exploitée pour l'alimentation en eau potable du centre. Son griffon se situe en plein habitation. Bien qu'il soit entièrement couvert, il est constamment exposé aux risques de pollution accidentelle. Les eaux qui y sourdent sont canalisées par le biais d'une séguia enterrée, qui réapparaît en surface en aval immédiat de la route reliant le centre au douar Tighboula.

L'analyse des débits de la source, fait ressortir une baisse de ces derniers de l'ordre de 30% à partir de 1980. Cette baisse des débits est en harmonie avec la chute de la hauteur moyenne des pluies enregistrées depuis 1980 à 2013.

La courbe des débits classés de la source Ghorm Al Alam, est identique à celle de Ghorm Nih. Ce qui témoigne de leur appartenance au même système. La seule rupture de pente mise en évidence, se caractérise par une diminution de la pente de la droite représentative, pour de fortes fréquences de classes de débits. Ainsi, la forte augmentation des débits pour de faibles fréquences en périodes des hautes eaux, traduirait l'existence d'apports d'eau externe au système.

L'exploitation des débits de la source, ont permis de tracer deux courbes de récession établies pour les périodes allant de septembre 1976 à octobre 1977, et de septembre 2011 à septembre 2012. Les résultats déduits de l'analyse de la droite de tarissement, donnent des coefficients de tarissement relativement élevés de l'ordre de  $3.10^{-3} /j$ , et des réserves régulatrices faibles de l'ordre de  $0.7 \text{ Mm}^3$ .

Ces valeurs concordent avec celles des autres sources attribuées à l'écaïlle externe. Elles traduisent la faible étendue du réservoir aquifère et sa faible aptitude à la régulation des eaux.

#### **o. Source Ait Daoud**

La source Ait Daoud émergeant aussi des formations plio-quaternaires, se caractérise à l'instar des autres sources de l'écaïlle externe par son faible débit. Ladite source est également jaugée d'une façon systématique à partir du mois d'octobre 1972, à une cadence mensuelle entachée de quelques lacunes.

Le griffon de la source se situe au bas d'une falaise, ce qui le met à l'abri des risques de pollution associée aux rejets domestiques. Cependant, la cimenterie installée sur la route Tighboula, exploite les calcaires plioquaternaires et le permis d'extraction s'étend jusqu'au niveau de la source, ce qui constitue un risque pour le devenir de la source.

L'analyse des séries de jaugeages n'a mis en évidence aucun tarissement total de la source. Cependant, il y a lieu de signaler que les minimums observés atteignent par moment des valeurs voisines de 1.5 l/s.

La courbe des débits classés de la source Ait Daoud est identique à celles de Ghorm Nih et de Ghorm Al Alam. Ceci explique leur appartenance au même système. La rupture de la droite représentative des débits classés, qui se manifeste par une diminution de la pente à un débit de 30 l/s, pour de fortes fréquences, traduit la présence d'apport d'eau au système.

Les deux courbes de récession établies pour la période allant de sept 2011 à oct 2012, et de sept 1995 à oct 1996, fournissent des coefficients de tarissement élevés de l'ordre de  $7,5 \cdot 10^{-3}/j$  à  $9,5 \cdot 10^{-3}/j$ , et des réserves régulatrices très faibles de l'ordre de  $0,09 \text{ Mm}^3$  à  $0,054 \text{ Mm}^3$ . Ces données sont caractéristiques d'un milieu de faible étendue, présentant des caractéristiques facilitant l'évacuation et l'infiltration des eaux.

#### **p. Source Sidi El Maati**

La source Sidi El Maati dont le griffon se situe en bordure de la route reliant le centre de Ghorm Al Alam et le centre El Ksiba, est de même ordre de grandeur en matière d'importance de débit, que la source d'Ait Daoud. Les jaugeages de ladite source, ont été entamés d'une façon systématique et régulière depuis octobre 1972, à la même cadence que l'ensemble des autres sources.

La série de jaugeage dont nous disposons, ne mettent en évidence aucun tarissement de la source, même en période d'extrême sécheresse à l'image de celle de 1980-81 et de 1990-91.

Comme pour les autres sources de l'écaïlle externe, la source de Sid El Maati qui émerge des formations plio-quadernaires, présente une courbe des débits classés caractérisée par deux anomalies liées à une diminution de pente de la droite représentative. La première anomalie constatée à un débit de 20 l/s, pour une fréquence de 60%, correspondrait à des apports d'eau liés à l'infiltration des eaux de pluie au niveau de la zone non saturée du panneau d'alimentation de la source Sidi El Maati.

Les deux courbes de tarissement établies pour les cycles hydrologiques correspondant à la période septembre 1978-août 1979 et Août 1980 - juill 2009, offrent des coefficients de tarissement de même ordre de grandeur évalué à  $4,8 \cdot 10^{-3}/j$ , et des réserves régulatrices vingt fois plus importantes que celle de la source Ait Daoud.

Les valeurs des coefficients de tarissement et des réserves régulatrices, militent en faveur de la présence d'un milieu peu étendu, facilitant l'évacuation des eaux et caractérisé par un faible pouvoir de régulation des eaux. A cet égard, il y a lieu de signaler que les formations plio-quadernaires, d'où émerge la source sont constituées de travertins et calcaires altérés fortement perméables.

#### **q. Source Zriouil**

La source Zriouil composée de plusieurs griffons, est considérée comme la plus stable et la plus régulière parmi les sources du dir associées l'écaïlle externe. Ces griffons sourdent au bas du talus de la route liant Ghorm Al Alam au centre de Tighboula. Ces débits moyens n'ont connu que de faibles fluctuations depuis 1972, par comparaison aux autres sources étudiées.

Aussi, l'analyse des données relatives aux séries de débits de la source Zriouil, fait ressortir que cette dernière a été jaugeée depuis le mois d'octobre 1972 à une cadence mensuelle, entachée de lacunes de temps à autre.

La source Zriouil est la plus régulière parmi l'ensemble des sources du groupe Ghorm Al Alam. Sa courbe de récession présente une première rupture à 40 l/s pour une fréquence de 84%, traduisant un appel d'eau provenant du système lui-même. Ces apports sont à attribuer aux infiltrations au droit de la zone non saturée de l'alimentation de la source.

La deuxième rupture au-delà de 50 l/s, traduisant des augmentations de débits pour des faibles variations de fréquences, est fort probablement liée à des apports externes au système, que généreraient des précipitations à caractère exceptionnel, notamment des ruissellements de surface.

Ces données ont permis de tracer deux courbes de récession, relatives aux périodes s'étendant respectivement de décembre 1976 à octobre 1977, et de septembre 2009 à octobre 2010. L'exploitation des résultats des droite de tarissement obtenus, a permis d'obtenir des coefficients de tarissement de l'ordre de  $3.10^{-3}$  l/j, et des réserves régulatrices de  $0.5 \text{ Mm}^3$  pour la première période et de  $1 \text{ Mm}^3$  pour la seconde.

Les fortes valeurs relatives du coefficient de tarissement et les faibles valeurs des réserves régulatrices sont caractéristiques d'un milieu peu étendu et facilitant l'évacuation des eaux.

Les formations plio-quadernaires d'où émerge la source zriouil, s'inscrivent dans ce cadre, ce qui permet de confirmer l'attribution de ladite source à ces formations.

Aussi, l'examen de ces données, met en relief une discordance entre la pluie efficace et le débit de la source. En théorie, les débits correspondants à la période 1970-80, devraient être beaucoup plus supérieurs à ceux observés de 1980 à 2013, comme c'est le cas pour toutes les sources du dir. Cette anomalie permet de se poser la question sur la concordance des sections de jaugeage pour ces deux périodes et les griffions réellement jaugés.

### IV.3. Sources situées entre Tagzirt et Timoulilt

Une étude hydrogéologique des sources situées entre Tagzirt et Timoulilt a été réalisée à l'université de Franche-Comté Besançon, dans le cadre de la thèse de Lhoucine Bouchaou en 1988. Ces sources sont nombreuses et émergent en général dans le Dir. L'exutoire principal est la source d'Ain Asserdoune dont le débit peut atteindre  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  en hautes eaux. Le choix a été fait pour toutes les sources présentent une importance en termes de débit pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ou le tourisme.

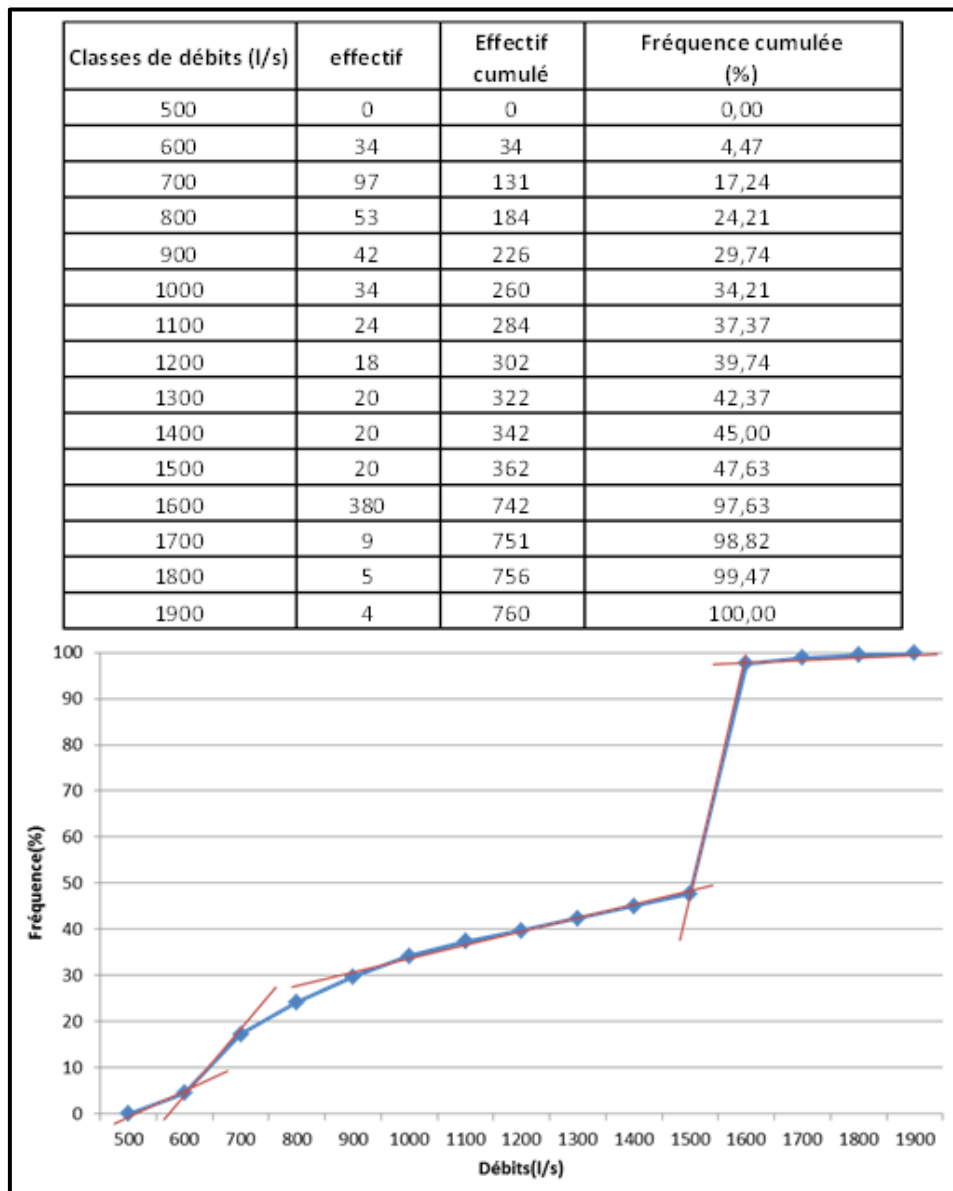
Les colorations ont été réalisées (Bouchaou et al., 1995) sur l'aire d'alimentation des sources d'Ain Asserdoune montrent la possibilité d'un drainage rapide en hautes eaux (vitesse  $> 100 \text{ m/h}$ ). De telles vitesses traduisent généralement une circulation dans les drains principaux.

Les débits moyens mensuels interannuels (1979-2013) des principales sources suivies par l'ABHOER sont résumés dans le **tableau 37** ci-dessous :

**Tableau 37** : Débit moyens mensuels interannuels (en l/s)

Sources \ Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy.
Ain Asserdoune	737,2	719	781	876,9	994,8	1118,7	1161	1146	1121	1006	858,7	769,7	926,3
Tamegnounte	95	78,9	90,9	114,6	115,7	187,9	176,1	187	186,6	163,7	143,9	112,3	130,7
Sidi Bouyakoube	17,5	17,3	23,5	31,1	35,6	48,4	40,6	38,8	42,8	32,3	26,3	19,8	29,5
Ourbiaa	78,1	85,8	92,9	109,6	94,7	109,7	104,2	109	115,3	118,5	100,9	90,4	100
Fechtalla	107,9	102,7	103,2	103,9	100,1	115,4	113,5	119,6	118,2	107,7	107,7	103,9	106,2
El Ksabi	7,4	8,1	9,4	8,7	11,8	17,9	18,7	23,6	22,4	13,8	13,6	11,2	13,2
Sebk	1,5	1,8	2,6	6,9	12,5	26,3	21,2	19,3	16,7	9,9	6,1	3,8	10,3
Foum El Ancer	32,1	37	27,9	34,8	25,4	31,5	22,8	31,7	30,1	37,8	24,4	41,1	40,6
Fechtala	123,8	114	116	119,3	119	129,9	127,8	147	143,9	135,2	132,1	123,2	131,6
Foum Oudi	59,6	48,9	56,8	36,7	49,8	78	132	77,8	80,6	142,3	100,7	79,6	57,9

L'observation des débits souligne l'importance primordiale de la source d'Ain Asserdoune avec un débit moyen interannuel de l'ordre de 926.3 l/s.



**Figure 100 :** Courbe des débits classés de la source d'Ain Asserdoune

L'analyse de la courbe de débits classés de la source d'Ain Asserdoune montre qu'au delà de 600 l/s le karst noyé reçoit un apport significatif du karst superficiel par le biais des drains. Ce fonctionnement d'un karst superficiel permet d'expliquer les circulations rapides mises en évidence par les tracages artificiels en hautes eaux. Au-dessus de 1500 l/s (figure 100), d'autres systèmes contribuent à l'alimentation de l'hydrosystème des sources d'Ain Asserdoune. Ces systèmes se manifestent dans les unités de Tagleft et Ben Charrou (Bouchaou et al., 1995).

#### IV.4. Sources situées entre Timoulilte et Bzou

Les sources situées entre Timoulilte et Bzou se sont développées à la faveur des failles. A la différence des sources précédentes, ces sources représentent les plus faibles émergences en termes de débit (inférieur à 10 l/s) (Album photo en Annexe). Cependant, elles ont eu une grande importance pour l'approvisionnement en eau potable des habitats voisins et l'irrigation.

## V. DELIMITATION DES AIRES D'ALIMENTATION DES SOURCES

La définition des conditions aux limites constitue une étape primordiale de la présente méthode, quoique celle-ci nécessite des données de différentes sources telles que les données isotopiques, géophysiques et spéléologiques. Ces dernières sont indisponibles pour notre cas, vu le manque total de certaines données et la présence des lacunes dans les autres, d'une part. D'autre part, la complexité des aquifères vis-à-vis des éléments à la fois tectoniques et morphologiques, rend la délimitation précise du bassin difficile. La délimitation de ces limites est effectuée en se basant sur la structure géologique (Vernoux et al., 2007, 2014).

Au niveau des aquifères karstiques, l'eau circule dans les fractures, les pores des roches et dans les conduits résultants de la dissolution des masses carbonatées (Bussard, 2005). L'anisotropie de la conductivité hydraulique ne permet généralement pas de comprendre les écoulements par la méthode adaptée au milieu poreux. La portion de la nappe qui alimente les captages sera donc généralement déterminée sur la base des structures du massif (Bussard, 2005).

Pour le cas des sources situées entre Tagzirt et Timoulilte, les études de traçage antérieures ont permis une première approche sur la délimitation de l'aire d'alimentation. Elles montrent qu'ils existent deux directions d'écoulement, l'une transverse qui suit les grandes fractures NS et l'autre qui concentre les écoulements latéraux vers la source d'Ain Asserdoune (Bouchaou, 1988 ; Bouchaou et al. 1995). Elles montrent également la présence des interconnexions entre plusieurs sources situant sur des mêmes axes de drainage. Pour les autres cas, la délimitation des aires d'alimentation a été faite par la structure géologique.

L'alimentation de ces systèmes aquifères se fait de différentes manières : les précipitations constituent l'apport essentiel et en particulier l'enneigement qui intéresse les hautes rides anticlinales du Haut Atlas de Beni Mellal. Les pertes d'oueds participent également à leur alimentation et enfin des abouchements par failles entre les systèmes aquifères. Ainsi que des circulations hydro-karstiques profondes sont toujours possibles et peuvent participer à l'alimentation des systèmes aquifères dans les différents sens.

## VI. CONCLUSION

L'étude hydrogéologique de la zone d'étude a permis d'identifier et de comprendre le fonctionnement de différentes sources de la région. En effet, trois systèmes aquifères contribuent dans la région de l'étude :

- L'aquifère du Lias.
- L'aquifère du Jurassique moyen (Dogger).
- L'aquifère du plio-quadernaire local du Dir.

Les sources constituent les principales manifestations hydrogéologiques de ces trois aquifères. Elles se sont développées à travers les fractures et les karsts, caractérisant ces terrains aquifères. Les eaux de ces sources sont de faciès bicarbonaté-calcique et magnésien.

L'analyse en composante principale a permis de classer les sources en trois groupes :

- groupe des eaux très minéralisés,
- groupe des eaux à origine météorique et superficielle,
- groupe des eaux exclusivement liées à l'aquifère carbonaté.

Les débits classés des sources ont permis d'identifier les différents niveaux aquifères karstiques avec la possibilité d'existence de niveau d'Epikarst et des niveaux profonds permettant d'alimenter les niveaux supérieurs et d'assurer une longue durée de décrue des sources.



## VII. CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

La zone d'étude est située dans le Dir du Haut Atlas de Beni Mellal entre Ouaoumana et Bzou dans les provinces de Béni Mellal et Azilal. Elle est caractérisée par une topographie relativement accidentée et une géomorphologie karstique.

L'étude géologique a été faite à travers la carte géologique synthétique de la région et la bibliographie existantes et qui ont permis de montrer la dominance des formations carbonatés calcaires dolomitiques du lias et du jurassique moyen en plus des formations du plioquaternaire. L'étude structurale a permis de confirmer deux directions principales de fracturation, N40-70, parallèle à la direction de la chaîne atlasique et N150-180, transverse à la chaîne (direction alpine).

Selon l'origine géologique, on peut classer les sources en trois groupes :

- sources du Lias ;
- sources du Dogger ;
- sources du Plio-quaternaire.

L'étude des débits de ces sources et leur relation avec les précipitations a montré des comportements variables des différentes sources avec des hydrogrammes de crues et surtout des périodes de décrues très variables selon l'intensité des pluies.

L'augmentation de l'intensité des pluies durant la période de 2008-2014 a été bénéfique pour la plupart des sources dont le débit s'est nettement amélioré.

Malgré que l'intensité des débits des sources ait diminué au fil des années, le débit moyen des sources n'a pas subi de baisses notables.

**CHAPITRE V : ETUDE DE LA VULNERABILITE DES SOURCES SITUEES ENTRE  
OUAOUMANA ET BZOU**

## I. INTRODUCTION

L'étude de vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution est un outil qui permet d'identifier les régions les plus susceptibles à la contamination dans un aquifère donné. Ce chapitre a pour objectif de la cartographie et l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des sources situées entre Ouaoumana et Bzou. Pour ce faire, la vulnérabilité a été cartographiée en se basant sur la méthode EPIK.

Vu l'étendu de la zone d'étude et selon la structure des bassins d'alimentation des sources, quatre cas ont été adoptés:

1. cas des sources situées entre El Ksiba et Ouaoumana,
2. cas des sources situées entre El Ksiba et Tanogha,
3. cas des sources situées entre Tagzirt et Timoulilt,
4. cas des sources situées entre Timoulilt et Bzou.

## II. INVENTAIRE DES SOURCES DE POLLUTION

Dans le secteur des sources du Dir situées entre Ouaoumana et Bzou, les sources potentielles de pollution sont principalement d'origine domestique, industrielle et agricole. Il s'agit des carrières, des huileries, des matériaux de construction, d'agriculture et des décharges sauvages, rejets liquides et déchets solides et accidentelle (figure 101).

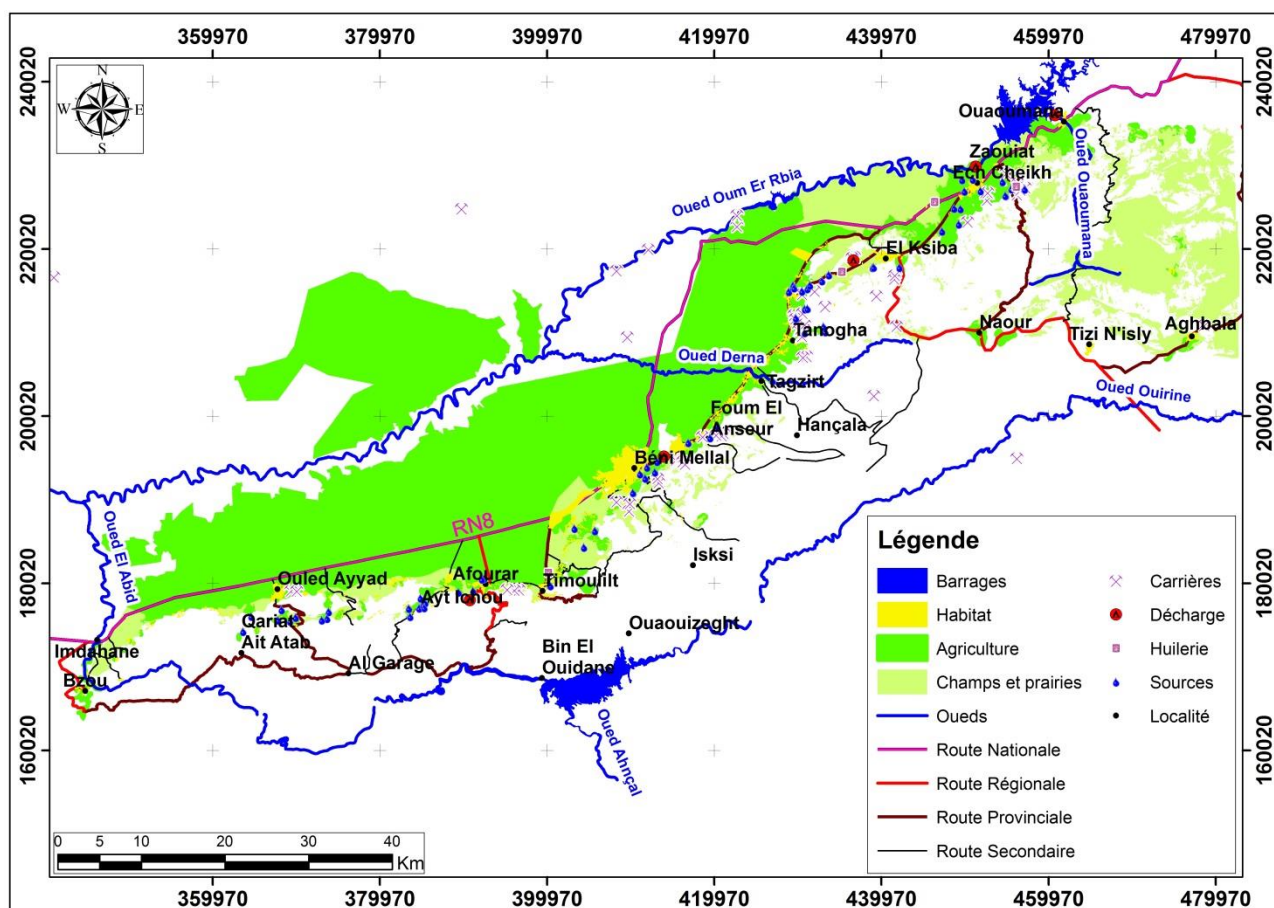


Figure 101 : Carte des foyers de pollution

### **III. ETUDE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DES SOURCES**

#### **III.1. Evaluation des paramètres de la méthode EPIK**

##### **III.1.1. Epikarst**

La carte Epikarst montre une vulnérabilité élevée (E1) qui s'étend sur les endroits affectés par les éléments morphologiques et tectoniques intenses, tandis qu'une zone de vulnérabilité moyenne (E2) sur le piémont. Le reste de bassin est nommé sous une zone protectrice (vulnérabilité faible) vis-à-vis Epikarst.

##### **III.1.2. Couverture protectrice**

La carte P montre une zone large de vulnérabilité très élevée (P1) dans les zones d'affleurements karstiques du Haut Atlas de Beni Mellal, une zone de vulnérabilité élevée (P2) au Dir où une couche mince des argiles est disposée directement sur les calcaires, les zones occupées par les couches superficielles marneuses et argileuses sont considérées comme les zones de vulnérabilité moyennes (P3) et les zones de dépôt quaternaires sont fortement protégées (P4).

##### **III.1.3. Condition d'infiltration**

La réalisation de la carte d'infiltration est basée sur la localisation des éléments morphologiques, la pente et les éléments d'occupation. Comme on a indiqué plus haut, toutes les pertes et les dolines ainsi leur bassin d'alimentation sont cartographiés comme zone très vulnérables.

##### **III.1.4. Développement du réseau karstique**

Les hydrogrammes des sources du Dir sont réagissent de manière similaire. Les sources émergentes (exutoire unique) montrent la présence d'un réseau karstique bien développé. Les vitesses d'écoulement en hautes eaux au cours des essais de traçage effectués sur l'Atlas de Beni Mellal par Bouchaou atteignent quelques 100 m/h. Ces vitesses indiquent la présence d'un réseau karstique bien développé.

#### **III.2. Vulnérabilité globale**

##### **III.2.1. Cas des sources situées entre El Ksiba et Ouaoumana**

La carte de la vulnérabilité globale (figure 106) montre que les valeurs du facteur de protection varient entre 12 et 31. Les secteurs à vulnérabilité très élevée (21%), avec un facteur de protection compris entre 12 et 19, correspondent aux champs de lapiez et aux zones occupées par les dolines et pertes, affectant les calcaires relativement nus du Haut Atlas. Ils occupent la zone Sud Est de Zaouit Echeikh. Des grandes plages à vulnérabilité élevée (47%), avec un facteur de protection de 20 à 25, correspondent aux zones de passage entre le Haut Atlas et les formations de plio-quaternaires du Dir où la karstification est moins développée avec une infiltration moins importante vis-à-vis de la pente. Les secteurs les mieux protégés (32%) caractérisés par des formations argileuses et marneuses. Le facteur de protection associé à ces zones est de 25 à 31.

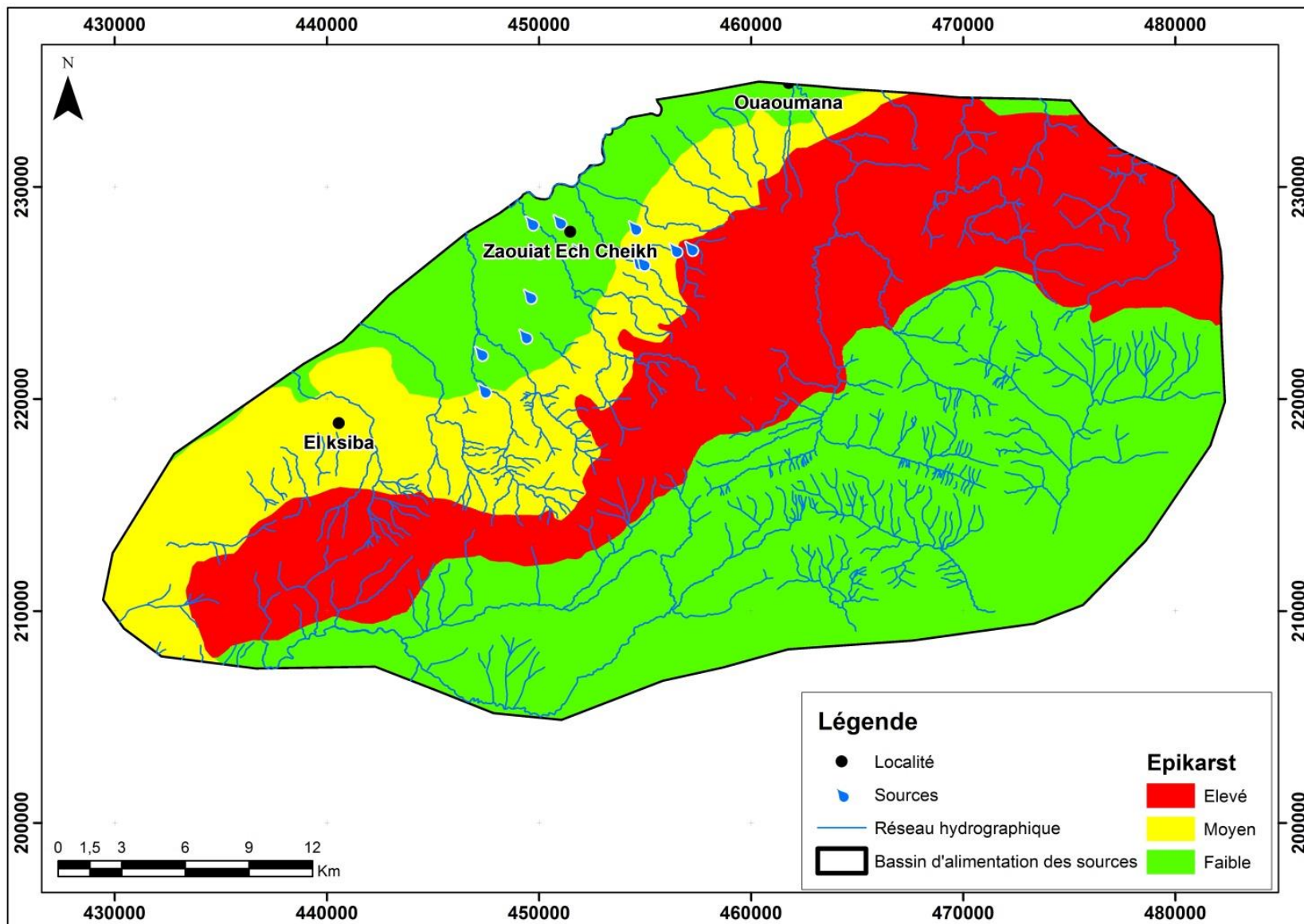


Figure 102 : Carte de l'Epikarst (El Ksiba -Ouaoumana)

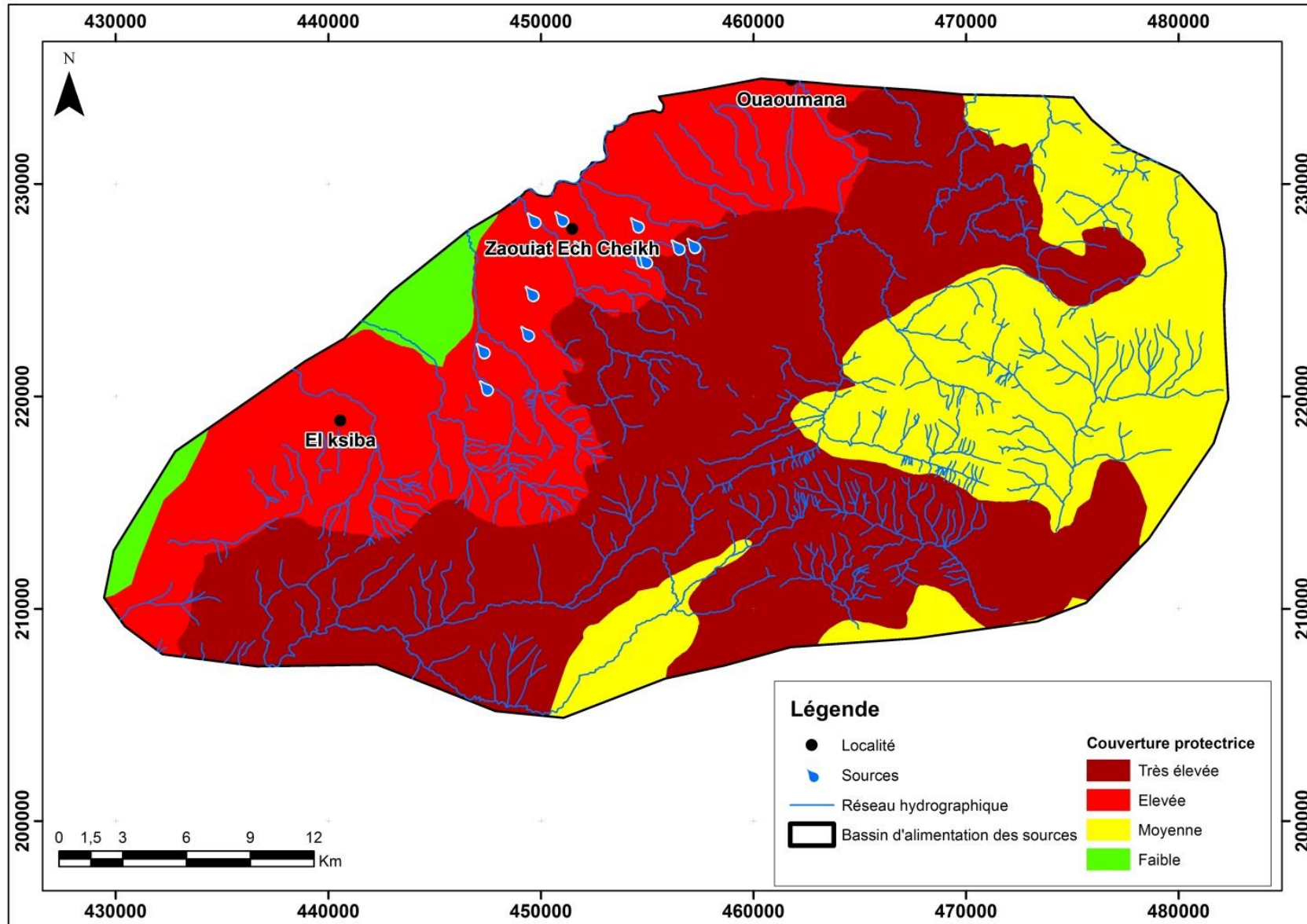


Figure 103 : Carte de la couverture protectrice (El Ksiba -Ouaoumana)

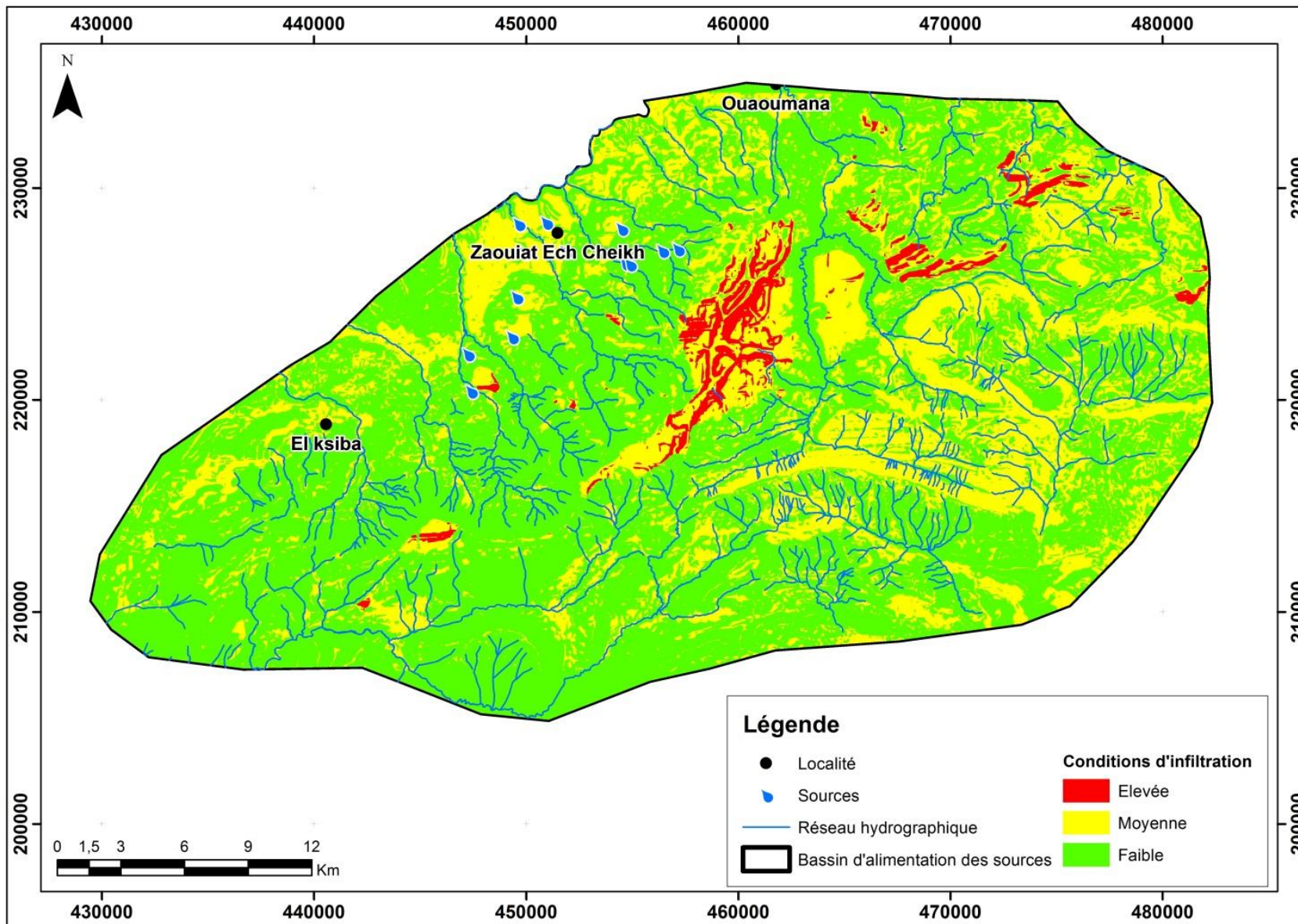


Figure 104 : Carte des conditions d'infiltration (El Ksiba -Ouaoumana)

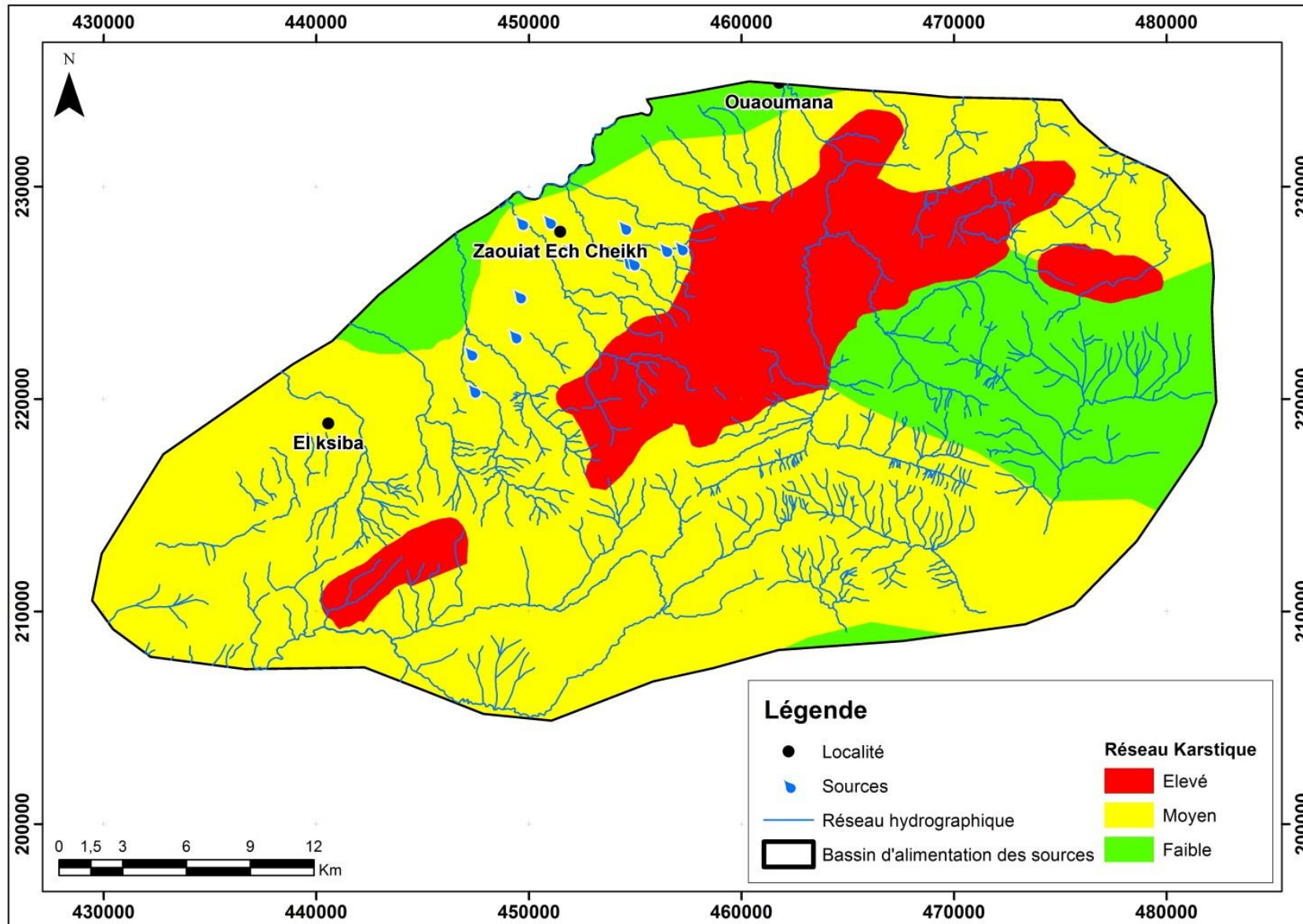


Figure 105 : Carte du réseau karstique (El Ksiba -Ouaoumana)



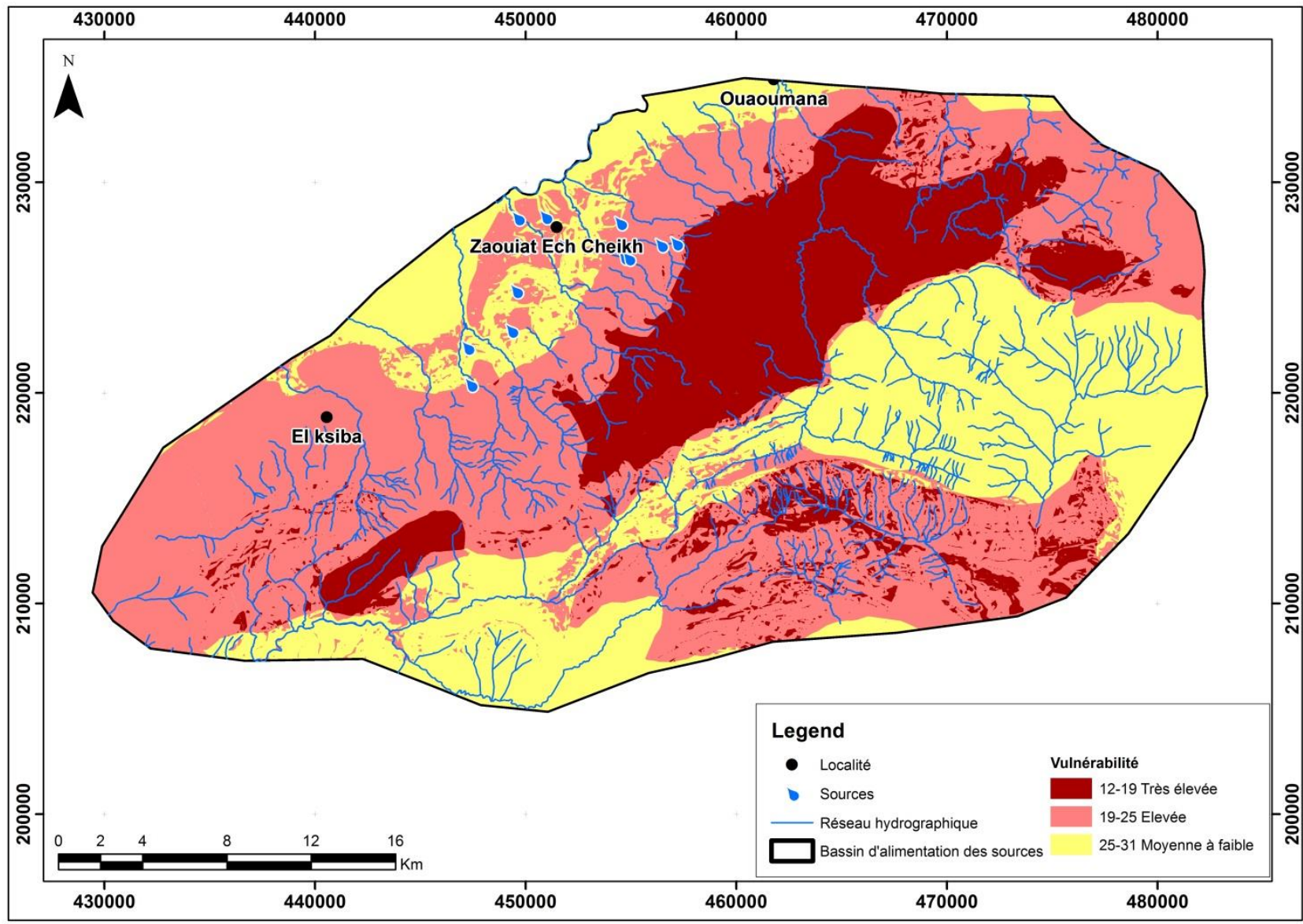


Figure 106 : Carte de la vulnérabilité globale (El Ksiba-Ouaoumana)

### III.2.2. Cas des sources situées entre El Ksiba et Tanogha

La carte de vulnérabilité globale (figure 111) montre généralement trois classes de vulnérabilité interprétées selon le pourcentage :

- Vulnérabilité moyenne à faible : cette classe représente environ 15% de la superficie totale du bassin. Cette classe domine la partie nord-ouest du centre d'El Ksiba, la partie nord du bassin qui représente les formations du quaternaire ;
- Vulnérabilité forte : cette classe correspondant à 28% de la superficie totale du bassin ; les zones de forte vulnérabilité englobent les secteurs sud du centre d'El ksiba, l'extrémité de la localité Tamoudjoute et l'Est de Tanogha ainsi que les zones de passage entre les formations liasique du Haut Atlas et les formations de plio-quaternaires du Dir ;
- Vulnérabilité très forte : représente près de 57% de l'étendue de la zone.

Généralement, ces zones sont situées dans la partie sud et sud ouest du centre d'El Ksiba et les zones de passage entre les formations liasique du Haut Atlas et les formations de plio-quaternaires du Dir.

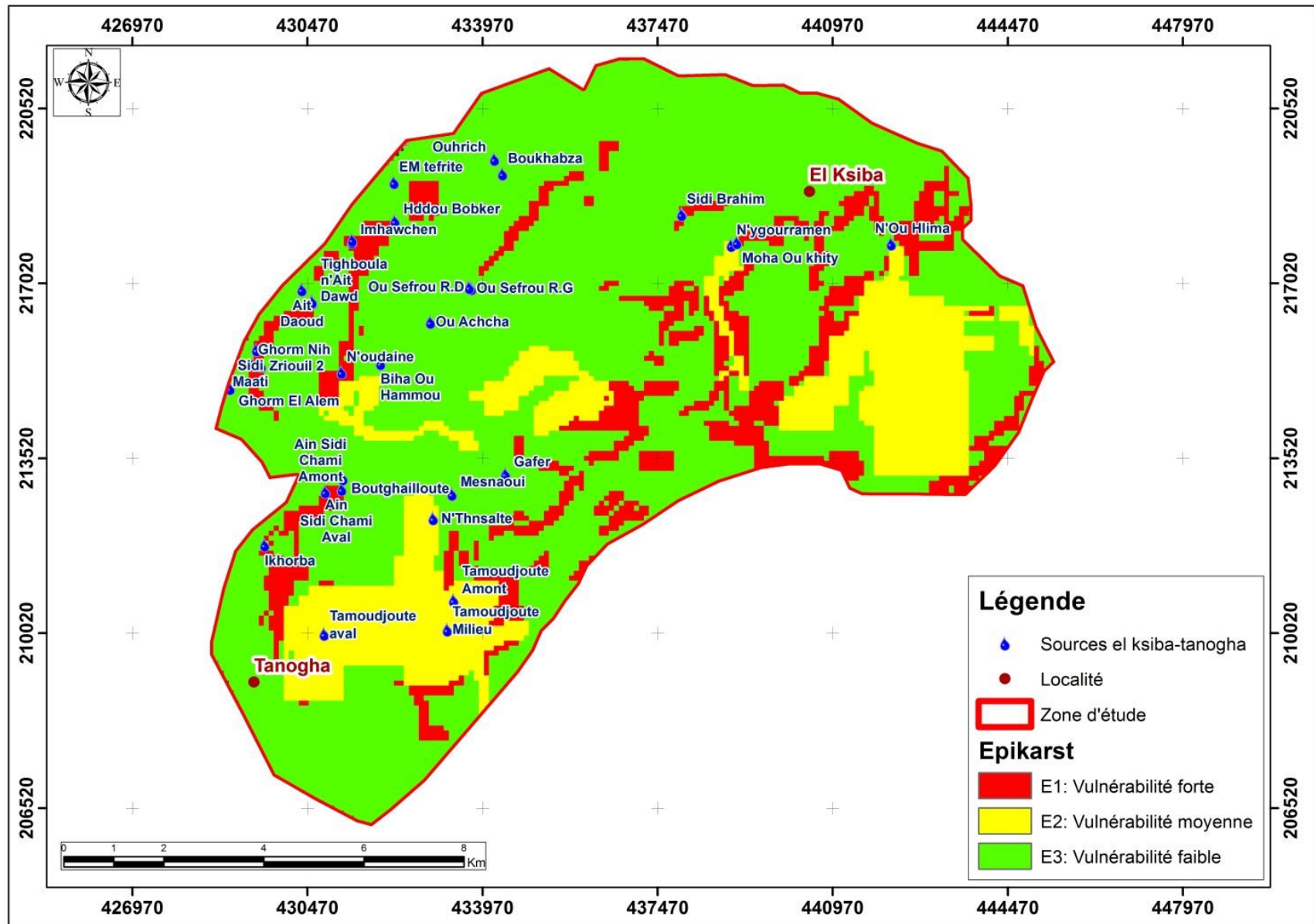


Figure 107 : Carte de l'Epikarst (El Ksiba -Tanogha)

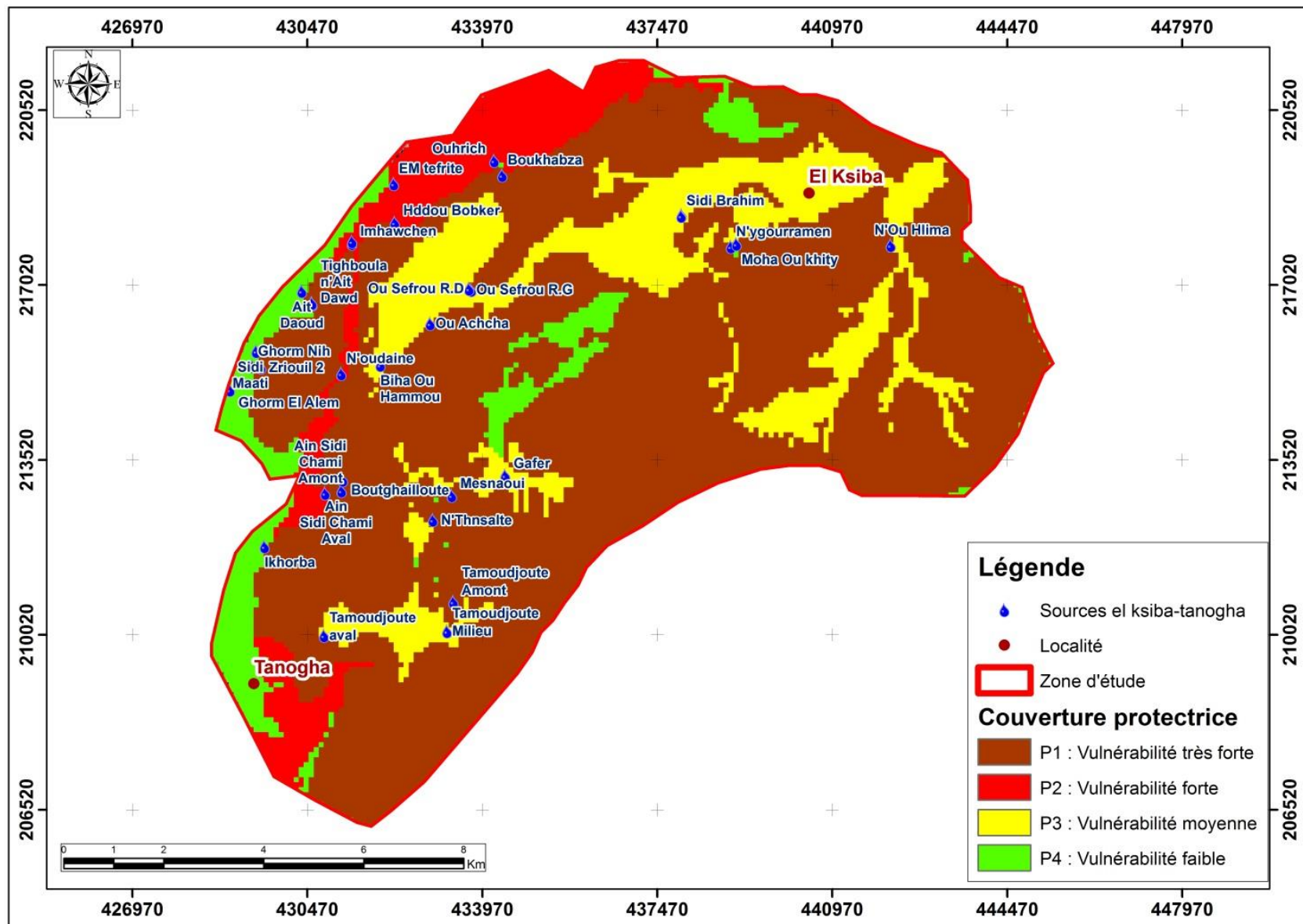


Figure 108 : Carte de la couverture protectrice (El Ksiba -Tanogha)

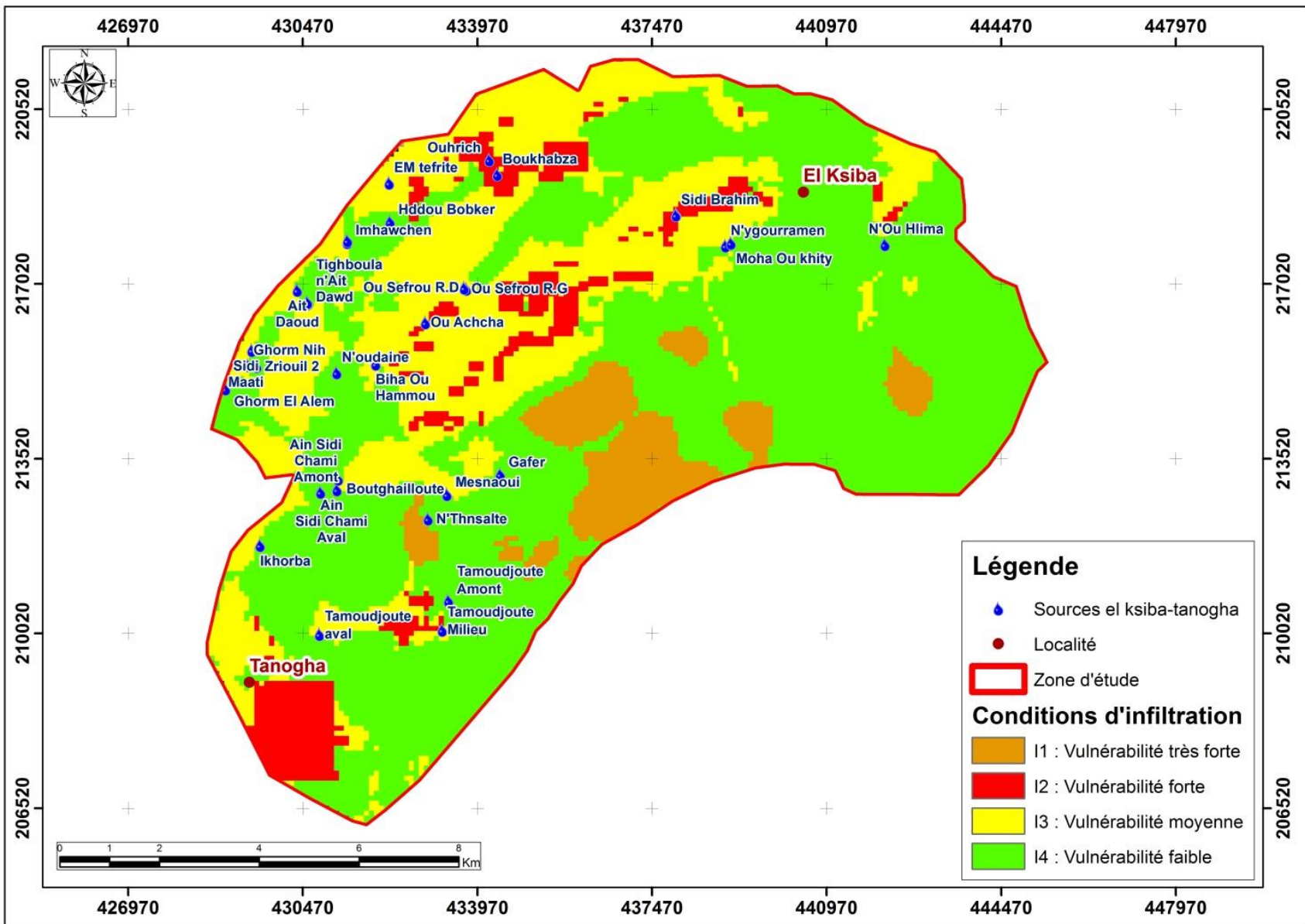


Figure 109 : Carte des conditions d'infiltration (El Ksiba -Tanogha)

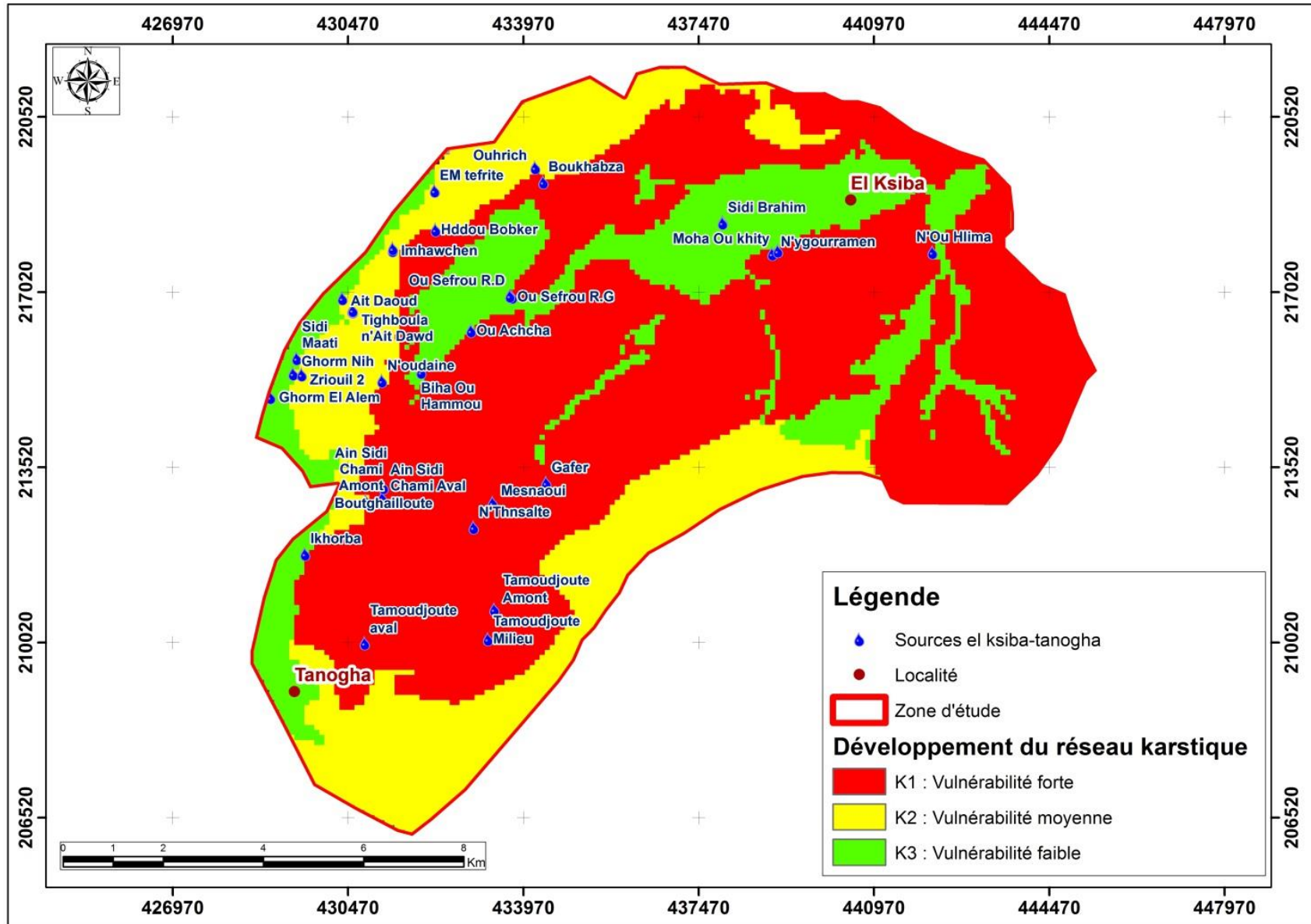


Figure 110 : Carte du réseau karstique (El Ksiba -Tanogha)

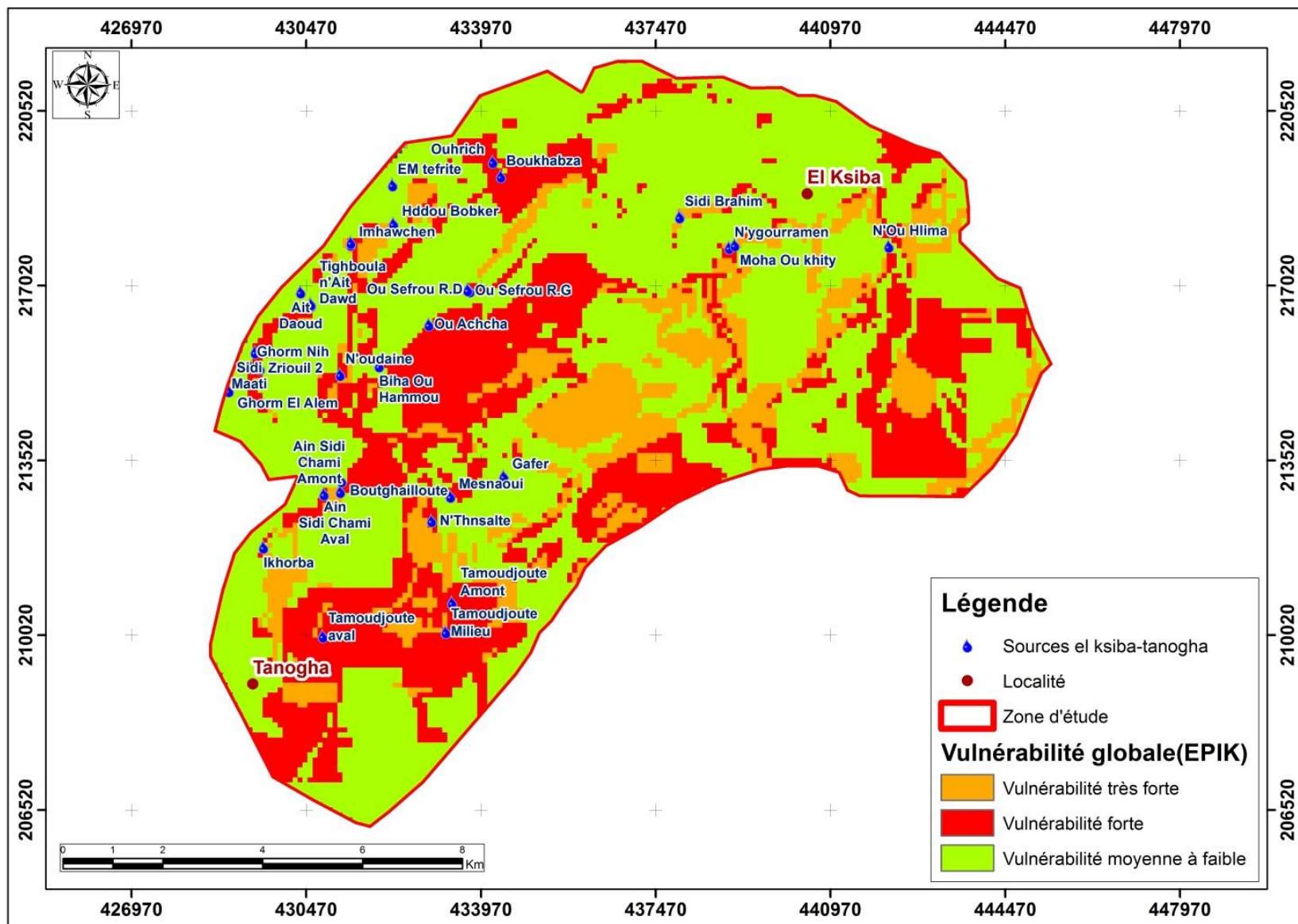


Figure 111 : Carte de la vulnérabilité globale (El Ksiba-Tanogha)

### **III.2.3. Cas des sources situées entre Tagzirt et Timoulit**

La carte de la vulnérabilité globale (figure 116) montre que 78% de la superficie du bassin présente une vulnérabilité très élevée et élevée. Ces régions sont concentrées dans les affleurements du lias où le ruissellement est limité et l'infiltration est beaucoup plus accentuée. Le reste du bassin (22%) présente une vulnérabilité moyenne à faible. Les zones de vulnérabilité moyenne à faible englobent les formations de quaternaire de la plaine de Tadla et les marnes et grès rouge du Dogger.



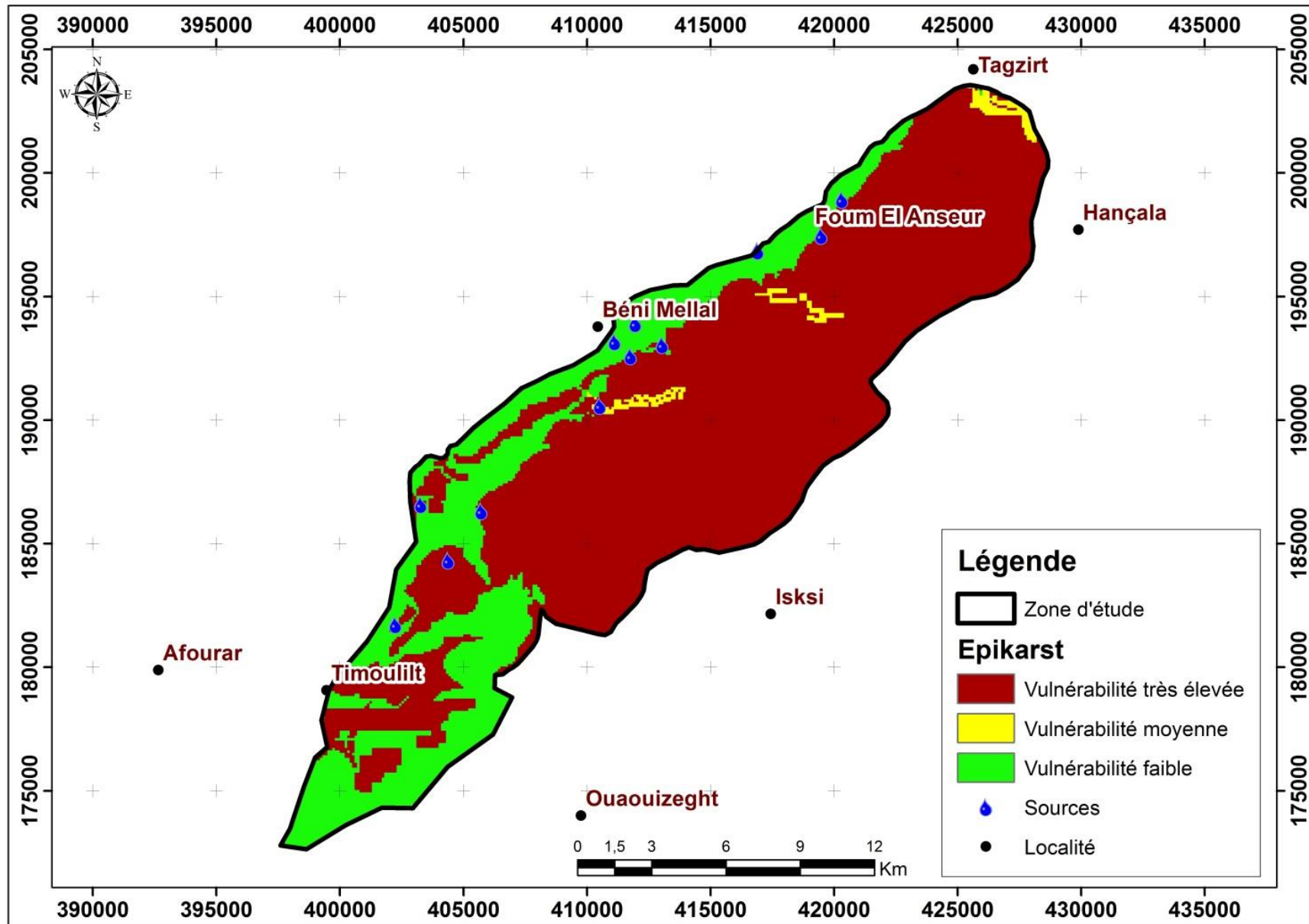


Figure 112 : Carte de l'Epikarst (Tagzirt -Timouilt)

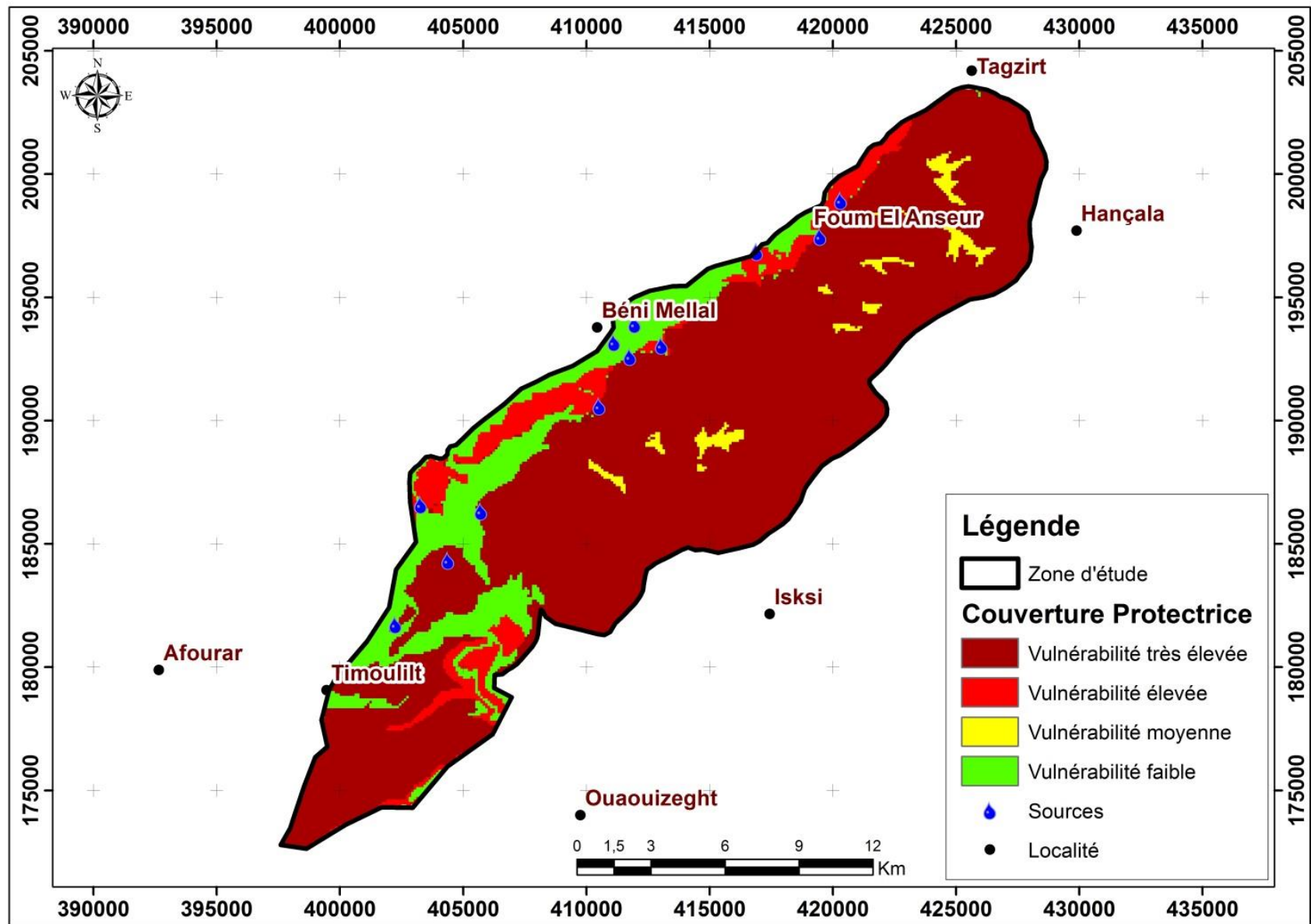


Figure 113 : Carte de la couverture protectrice (Tagzirt -Timouilt)

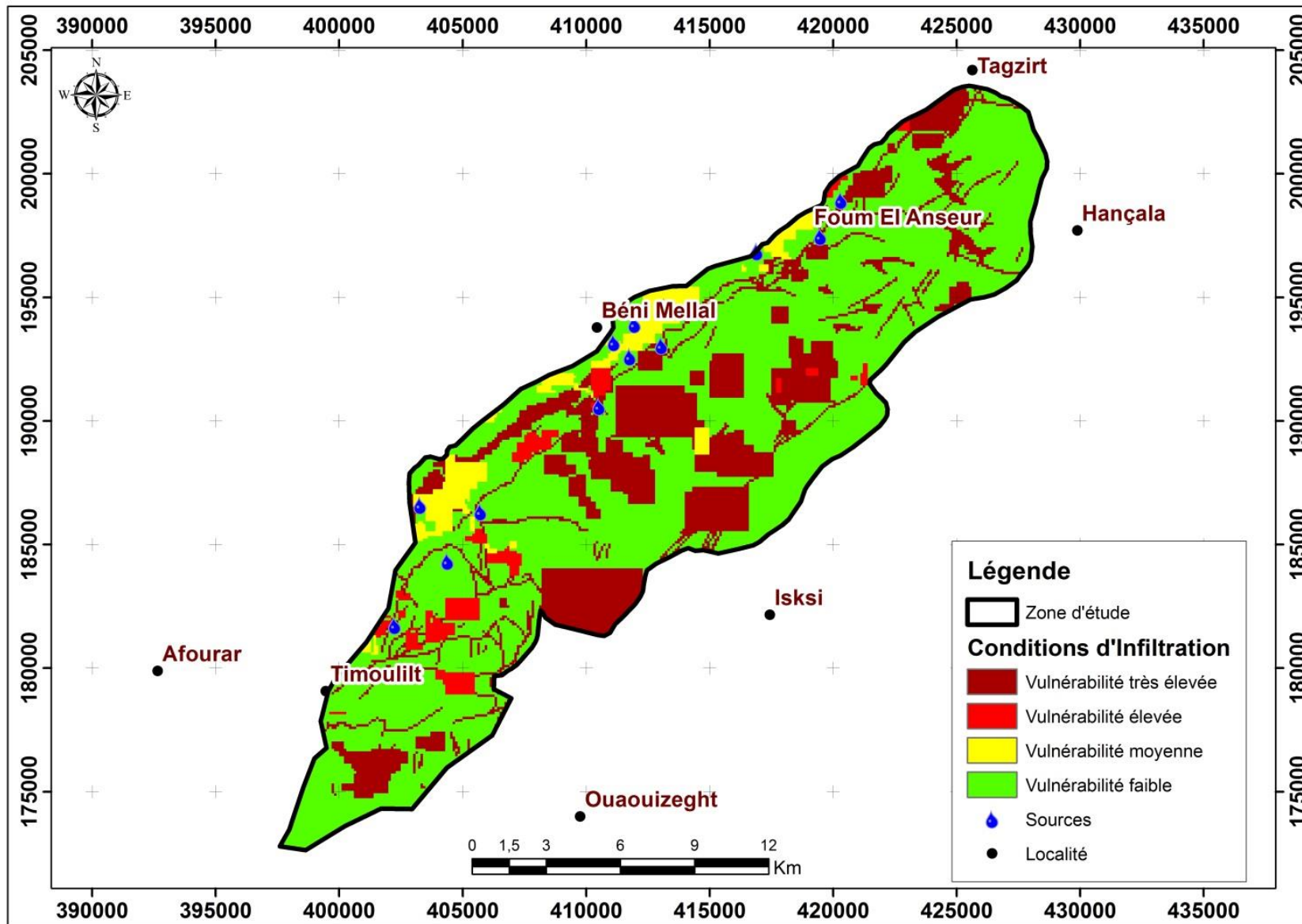


Figure 114 : Carte des conditions d'infiltration (Tagzirt -Timouilt)

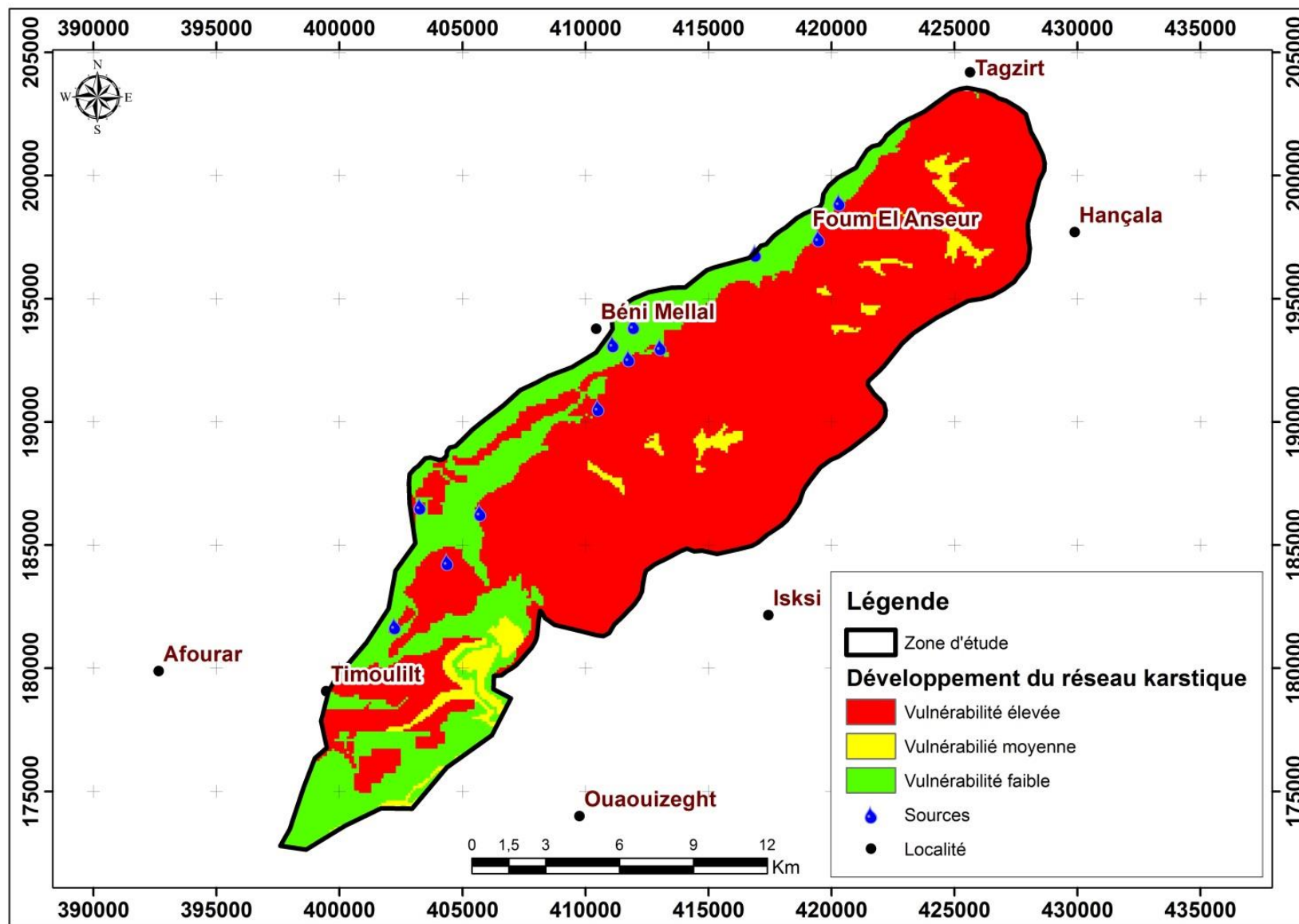


Figure 115 : Carte du réseau karstique (Tagzirt -Timouilt)

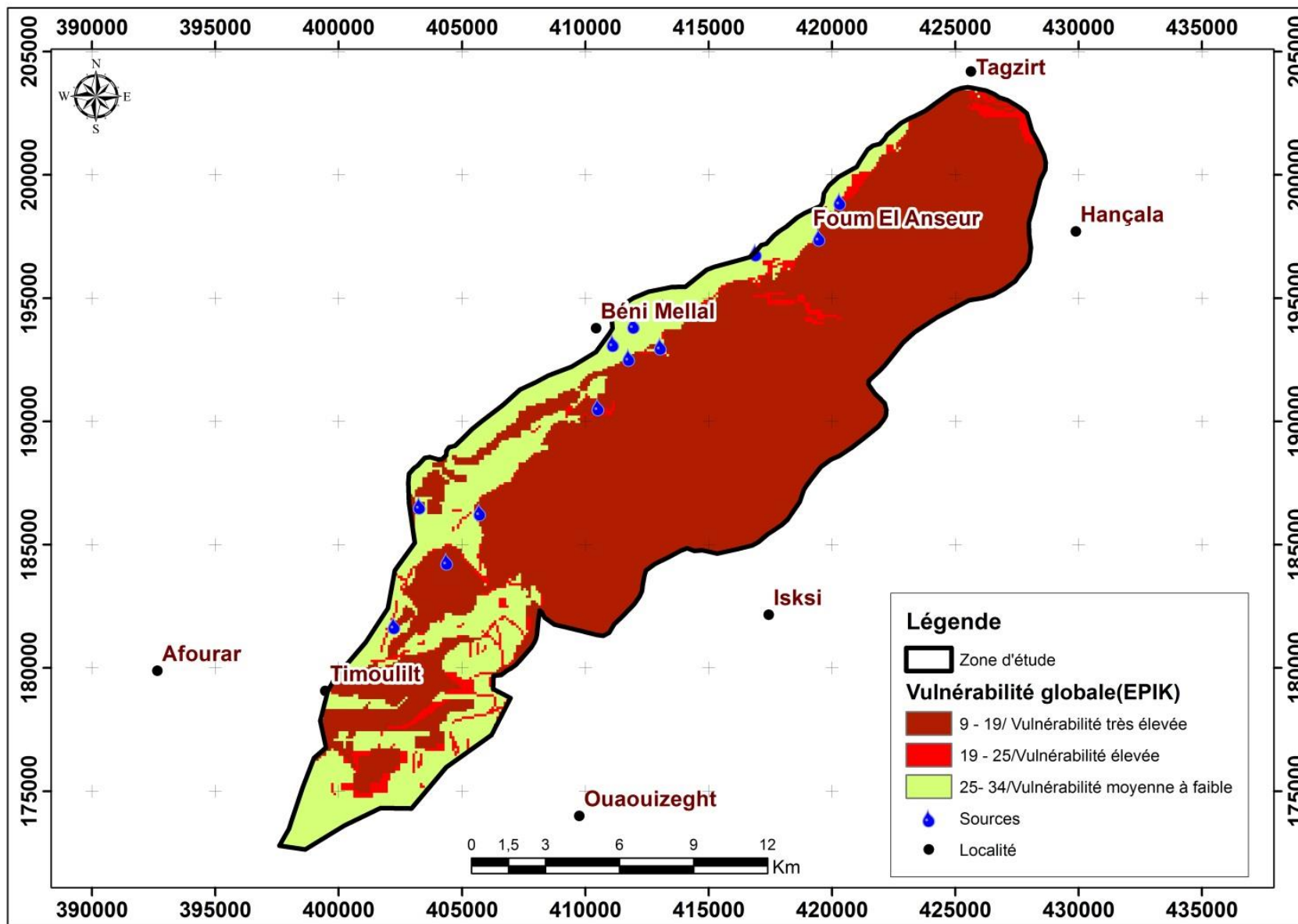


Figure 116 : Carte de la vulnérabilité globale (Tagzirt -Timoulilt)

#### **III.2.4. Cas des sources situées entre Timoulilt et Bzou**

La carte de la vulnérabilité obtenue (figure 121) pour ce cas a permis de constater que 33 % de la surface du système est en zone à vulnérabilité très élevée, de 46% en vulnérabilité élevée, 21% avec une vulnérabilité modérée à faible. Les zones très vulnérables englobent les secteurs sud du centre d'Afourer et sud de la localité d'Ait ichou, les zones de vulnérabilité élevée concentrent à l'Est du bassin et les zones de vulnérabilité moyenne à faible sont situées généralement au centre du bassin.

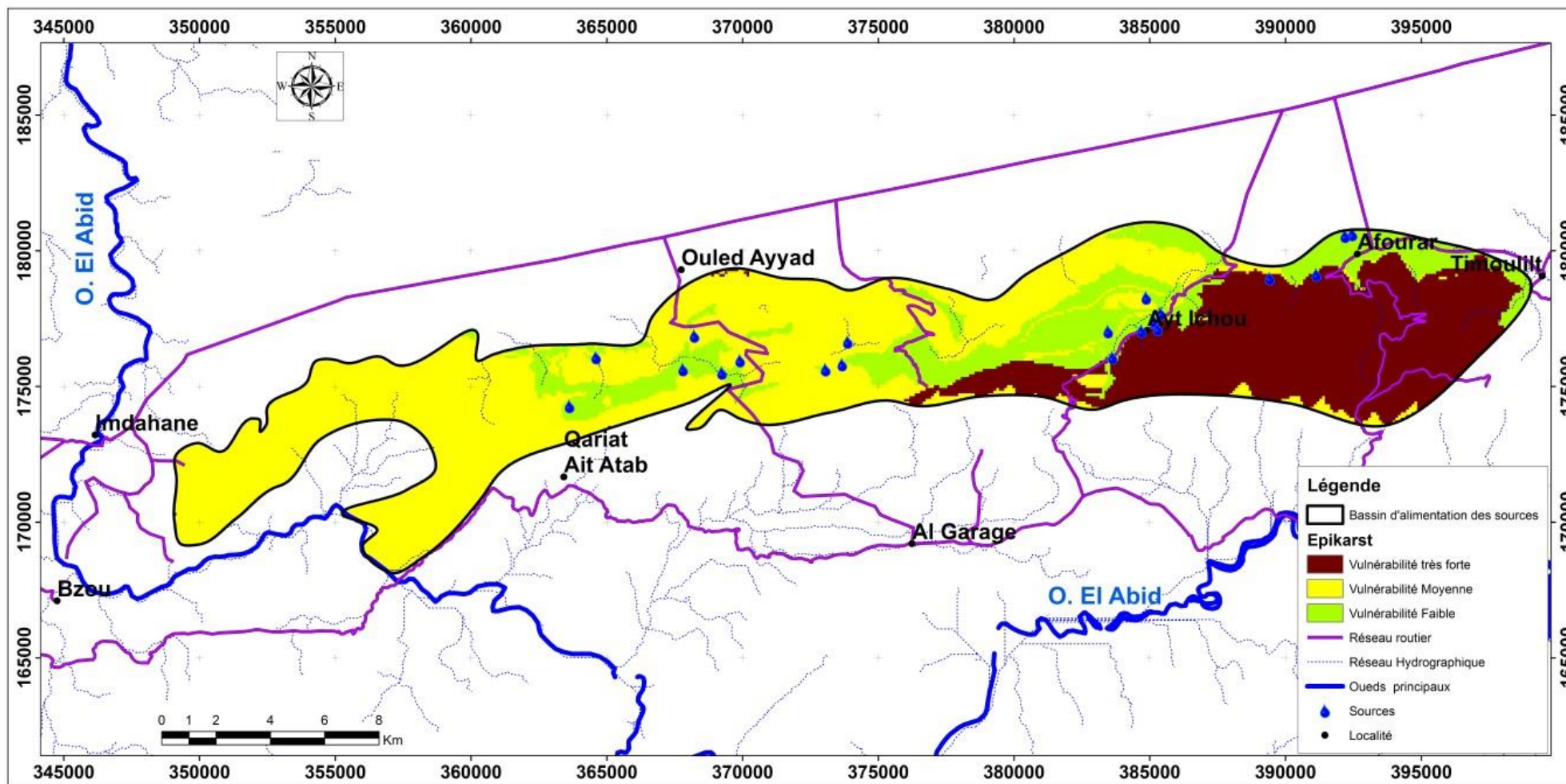


Figure 117 : Carte de l'Epikarst (Timouilt- Bzou)

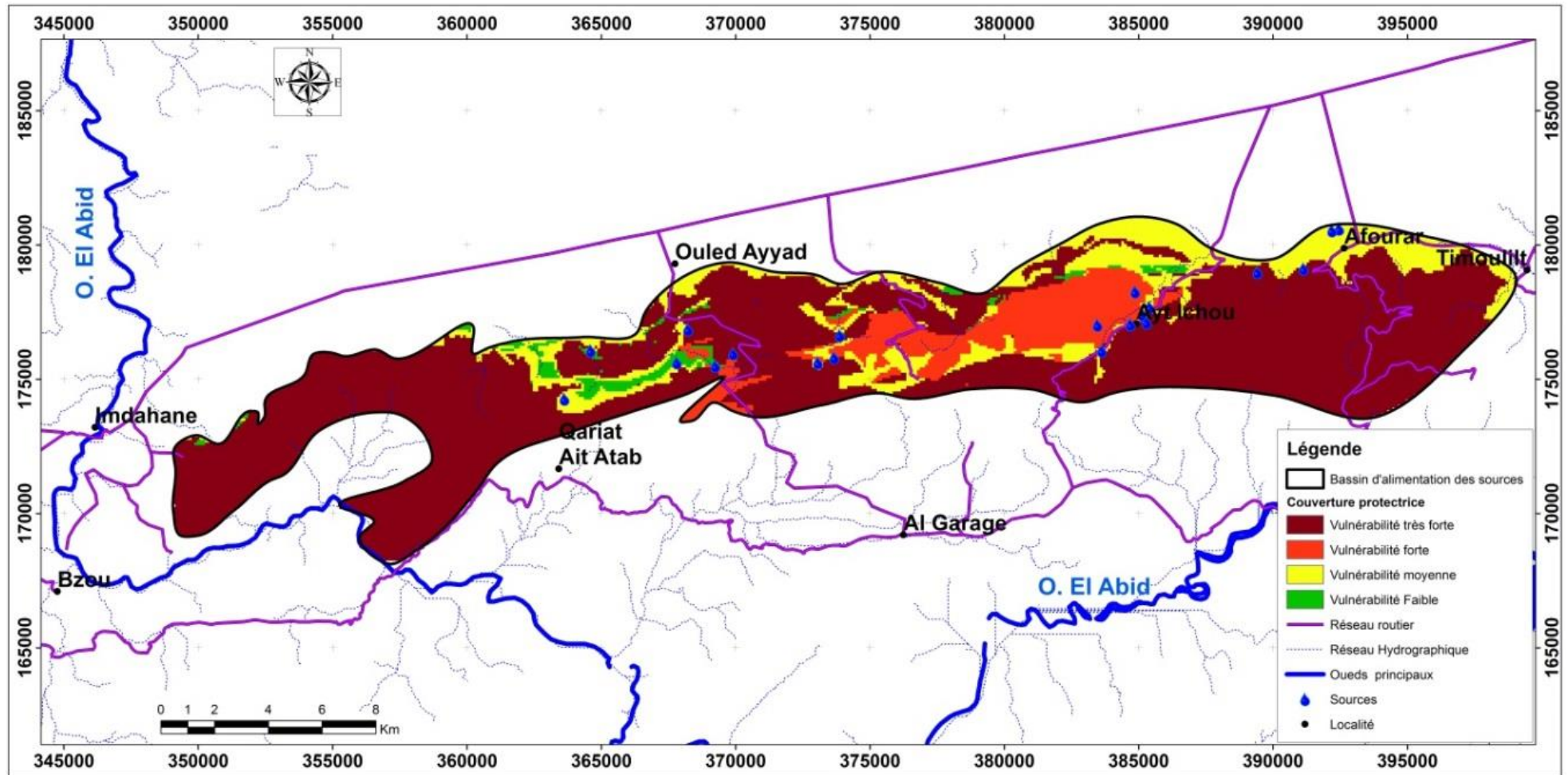


Figure 118 : Carte de la couverture protectrice (Timoult- Bzou)



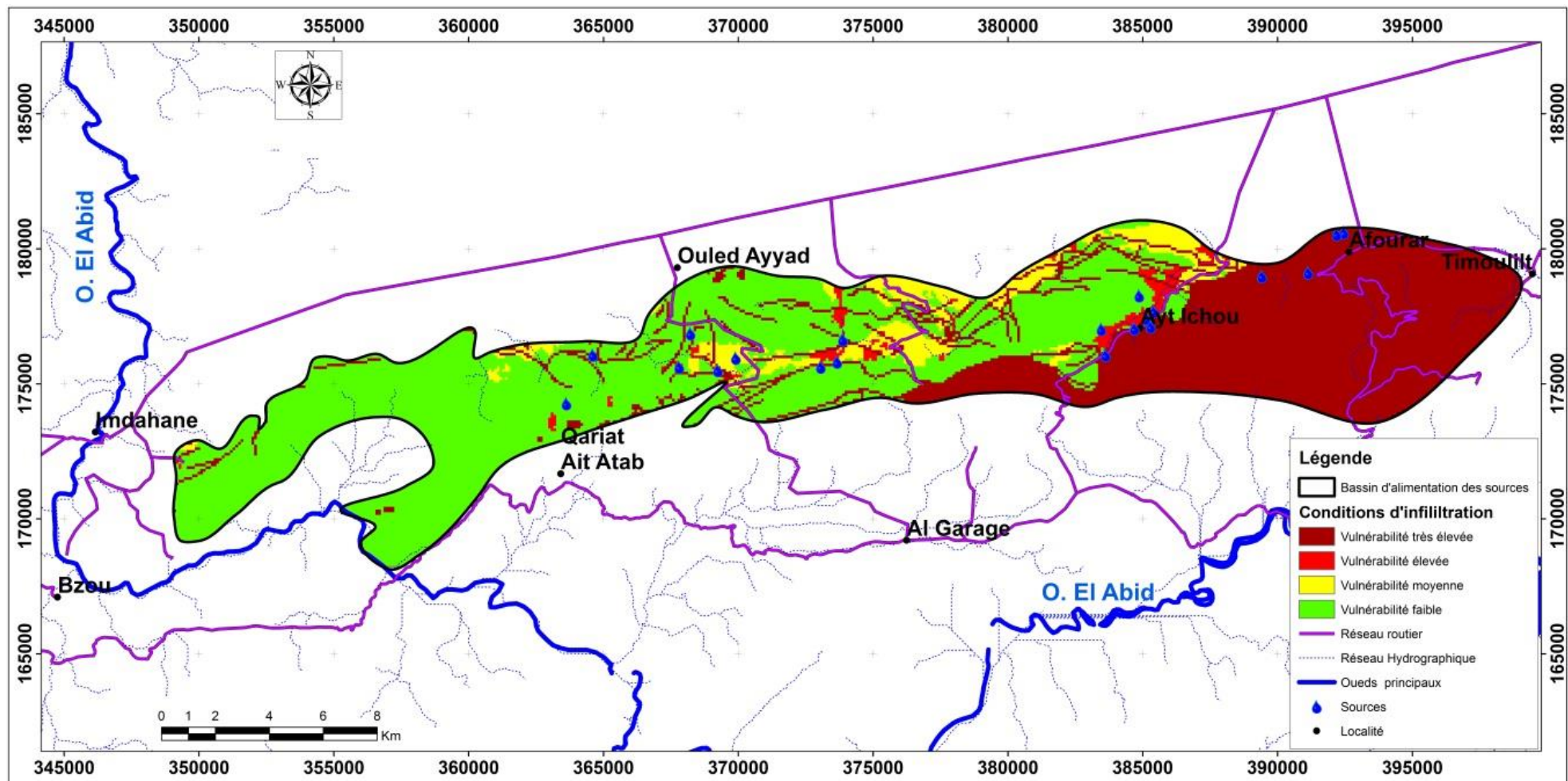


Figure 119 : Carte des conditions d'infiltration (Timoulilt- Bzou)

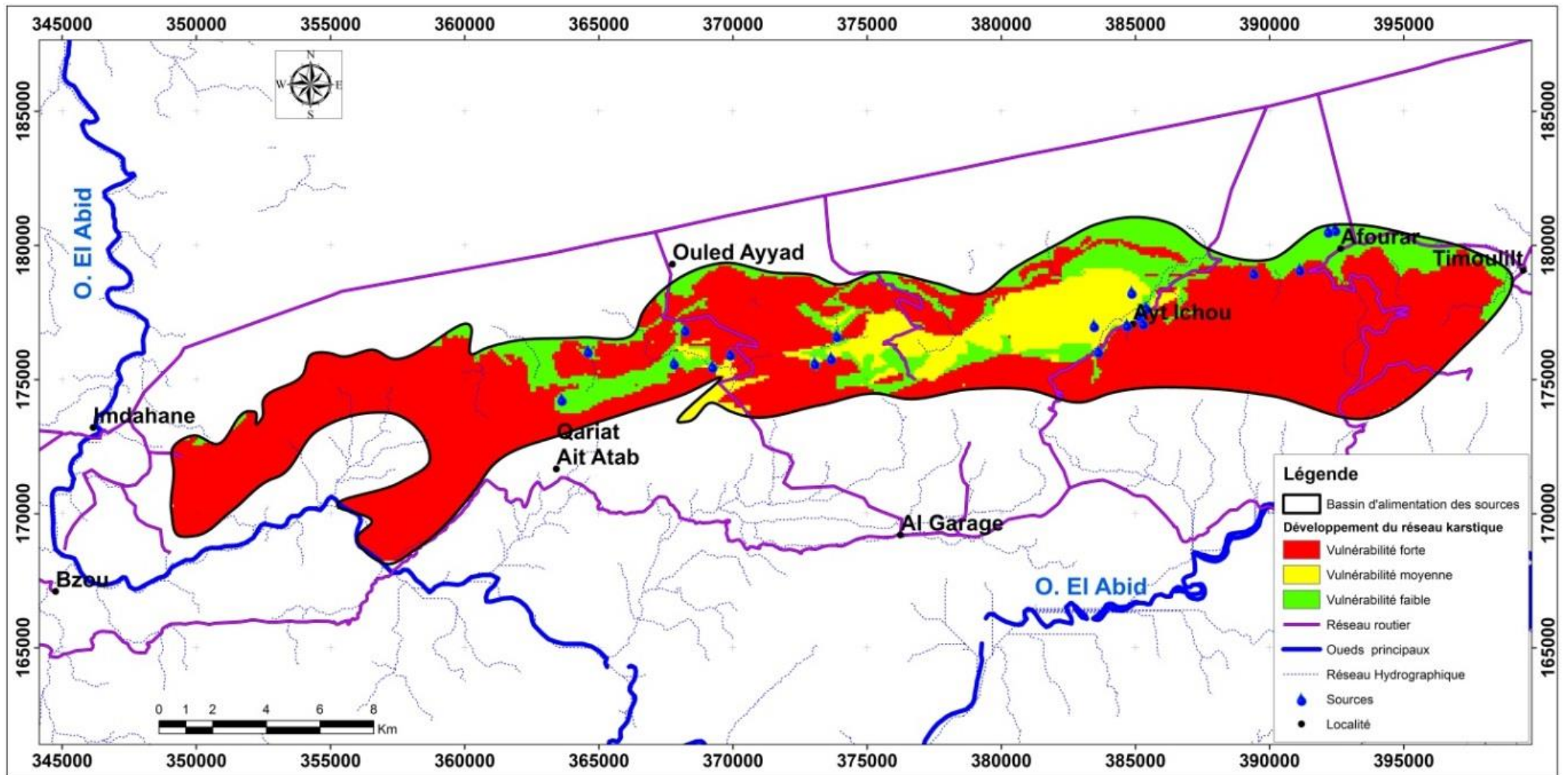


Figure 120 : Carte du réseau karstique (Timoullit- Bzou)

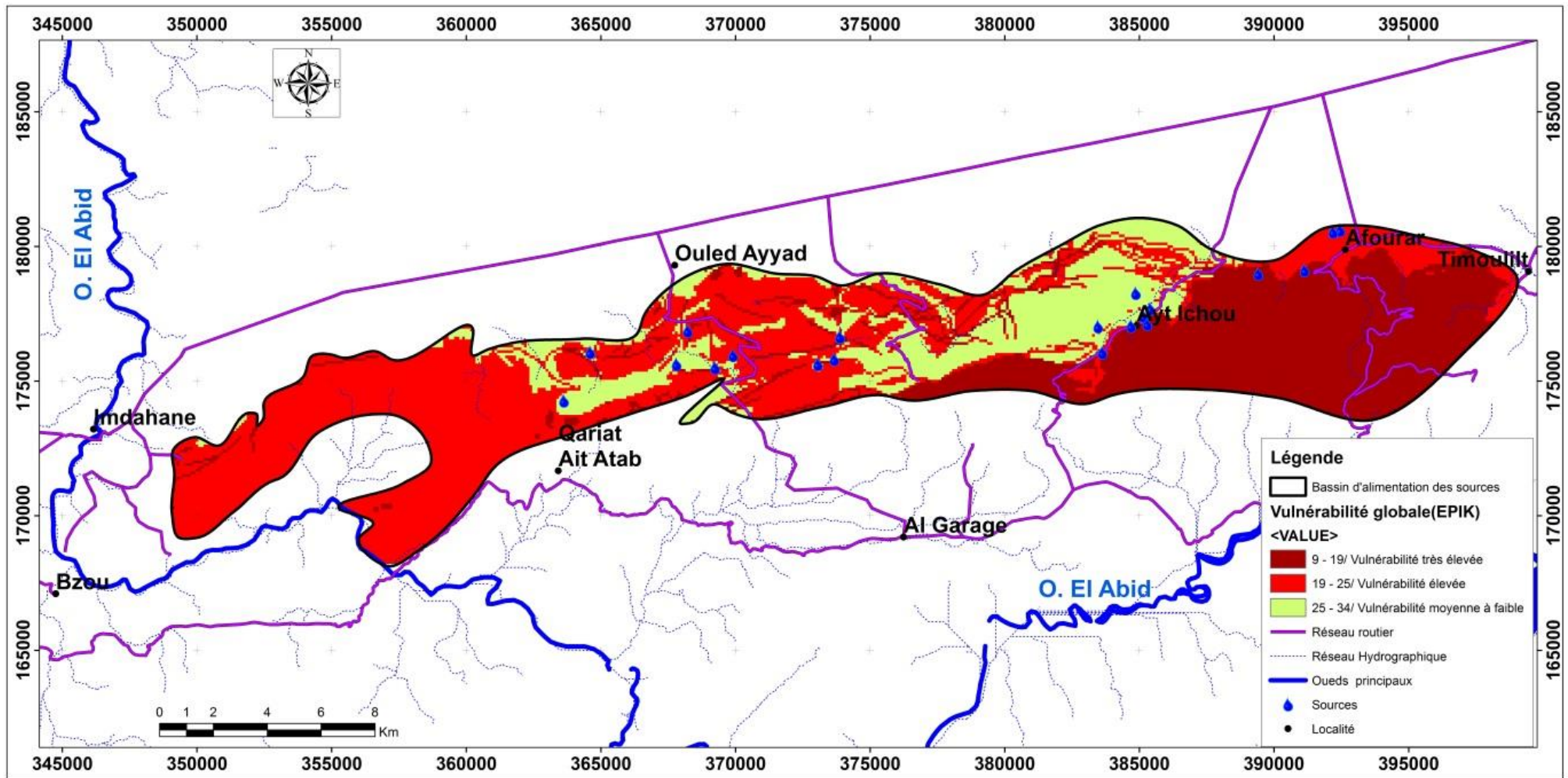


Figure 121 : Carte de la vulnérabilité globale (Timoulilt- Bzou)

### III.3. Validation des résultats

Les analyses bactériologiques des eaux des sources ont permis de valider les résultats obtenus. Le tableau 38 montre qu'à part les trois sources Tamda, Tamescourt et Boutmarsite qui ne présentent aucune contamination bactériologique, les dix autres sources présentent des germes allant de 4 à 62 UFC/100ml d'eau.

**Tableau 38 :** Résultats des analyses bactériologiques (ABHOER, 2018)

Sources	Coliformes à 36°C UFC/100ml	Coliformes Thermotolérants à 44°C UFC/100ml	Entérocoques intestinaux UFC/100ml
Tamda	0	0	0
Ouarnfaa	49	49	8
Boudilit	62	62	11
Ou Abdellah Amont	11	11	13
Ou Abdellah Aval	46	46	22
Tamescourt	0	0	0
Tiguemate	21	21	0
N'ougziza	29	29	0
Igly	13	13	4
Boulmatene	31	31	0
Ait Athmane	9	9	18
Boutmarsite	0	0	0
Ait Laaidi	16	16	<4

Si les caractéristiques physico-chimiques étudiées précédemment montrent une bonne qualité, il n'est pas de même pour les analyses bactériologiques. Parmi les bactéries susceptibles de se trouver dans les eaux souterraines, nous citons les germes de contamination fécale. Le tableau 39 montre les résultats des analyses bactériologiques des eaux d'Ain Asserdoune en 2011.

**Tableau 39 :** Bactériologie saisonnière des eaux d'Ain Asserdoune (ONEP, 2011)

Paramètre	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Coliformes totaux (nb/100ml)	09	07	00	15	75	07	04	04	43	00	11	12
Coliformes fécaux (nb/100ml)	09	04	00	04	43	04	00	00	04	00	04	75
Streptocoques fécaux (nb/100ml)	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	04

La comparaison des données bactériologique (tableau 38) à ceux des précipitations montre que l'apparition des bactéries est liée à la pluviométrie. Cette relation laisse supposer une contamination des eaux d'Ain Asserdoune à partir de foyers de pollution existante suite au lessivage par les eaux de pluies notamment en période très pluvieuses.

Le tableau 40 classe les différentes sources en fonction de leur degré de contamination, faible, moyen et forte. On constate qu'il y a 3 groupes de sources :

- les sources de Taghbalout Nhalima, Aghbalou Nygourramen et Ghorm Nih, présentent des

- quantités insignifiantes des coliformes, coliformes thermotolérants et entérocoques intestinaux ;
- les sources d'Ali Oujdid, Ghorm El Alem, N'Oudaine, et Zriouil, présentent des indices importants ;
- les sources d'Oussefrou Rive Gauche, Ait Daoud et Sidi Maati, sont celles qui présentent les valeurs de contamination les plus élevées.

**Tableau 40** : Degré de contamination en bactéries des différentes sources testées  
(ABOER, 2016)

<b>Contamination (en bactéries)</b>		
<b>Faible</b>	<b>Moyenne</b>	<b>forte</b>
Taghbaloute Nouhalima Aghbalou Nygourramen Ghorm Nih	Ali Oujdid Ghorm El Alem Noudaine Zriouil	Oussefrou R.G Ait Daoud Sidi Maati

La contamination des sources en bactérie confirme la vulnérabilité à la pollution des systèmes aquifères étudiés.

#### **IV. SENSIBILITE A LA POLLUTION**

La nature géologique des réservoirs (calcaire et calcaire dolomitique du jurassique inférieur et moyen), la morphologie externe et interne (épikarste et endokarste) de ces formations et la fracturation affectant les réservoirs et la disparition des foyers de pollution dans toute la région rendent les systèmes karstiques étudiés sensibles à toute sorte de pollution solide et/ou liquide.

#### **V. CONCLUSION**

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des sources situées entre Ououmana et Bzou a été réalisée par l'application de la méthode EPIK (L'épikarst, la couverture protectrice, les conditions d'infiltration et le développement du réseau karstique). Les résultats obtenus montrent que les bassins d'alimentation des sources sont vulnérables à la pollution.

Les cartes de vulnérabilité obtenues montrent que les systèmes aquifères étudiés sont vulnérables à la pollution. En effet, les analyses bactériologiques effectuées confirment la contamination des sources en bactéries. Ces cartes constituent une étape vers une meilleure détermination des zones de protection des eaux souterraines en milieu karstique objet du chapitre suivant.

**CHAPITRE VI : DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION  
ET DE SAUVEGARDE DES SOURCES SITUEES ENTRE OUAOUMANA ET BZOU**

## **I. INTRODUCTION**

Après la compréhension du fonctionnement hydrogéologique et la cartographie de la vulnérabilité des aquifères alimentant les sources, l'objectif de ce chapitre est la délimitation des périmètres de protection et de sauvegarde de ces sources. Pour ce faire, l'intégration et l'analyse des différentes données collectées notamment topographiques, hydroclimatologiques, géologiques, hydrogéologiques, images satellitaires, occupations du sol et vulnérabilité dans un système d'information géographique ArcGis, nous a permis de délimiter des périmètres de protection (Immédiat, Rapproché et éloigné) des sources du Dir situées entre Ouaoumana et Bzou. Plusieurs servitudes seront également proposées dans chaque périmètre pour bien protéger ces ressources en eau.

## **II. DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION ET DE SAUVEGARDE DES SOURCES**

### **II.1. Périmètre de protection immédiat**

Le PPI vise à protéger des sources et ses équipements. Puisque les sources sont karstiques, on propose une distance de 40m autour de chacune. Le terrain doit être acquis et protégé par l'exploitant du captage. L'aménagement actuel de la plupart des sources se forme d'un périmètre sanitaire, sans clôture, ce qui permet à tous d'atteindre le bassin de la collecte d'où ils prennent de l'eau. Donc on recommande de construire dans ce secteur une clôture de 2 m de hauteur avec une porte qui empêche l'accès direct à la source.

### **II.2. Périmètre de protection rapproché**

Le périmètre de protection rapproché doit protéger les sources contre les pollutions bactériologiques et donne une marge de sécurité pour une intervention en cas d'une pollution chimique ou accidentelle.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques des sources du Dir (aquifères karstiques avec un faible pouvoir épurateur de la nappe) ne permettent pas de fixer la limite de cette zone de protection sur l'isochrone 50 jours (temps de transfert de la pollution au captage retenu). A cet effet, la délimitation est réalisée conformément à la méthode de la vulnérabilité EPIK. L'évaluation de cette dernière permette de considérer le périmètre de protection rapproché comme périmètre de protection de l'ensemble des zones très vulnérables et vulnérables.

La délimitation en suivant les lignes d'accès (routes, oueds, pistes, servitudes, parcelles ...etc.) a été faite pour faciliter la gestion, le suivi et la surveillance de ces périmètres dans le terrain. Ces périmètres sont renforcés par le périmètre de protection éloigné.

Il comprend l'ensemble des aires d'alimentation des sources situées entre El Ksiba et Timouilte. A l'intérieur de ce périmètre, des servitudes et des mesures de police sont instaurées, ayant pour objectif de protéger le captage vis-à-vis de la migration souterraine des substances polluantes. Sont concernés : l'habitat humain (assainissement autonome et collectif), les installations et activités agricoles, les voies routières, les activités ou installations divers (dépôts d'ordures ménagères, lavage et vidange des véhicules), les activités et aménagements futurs.

De plus, il ne faut pas oublier les pratiques agricoles sur le bassin d'alimentation des sources notamment des élevages (brebis, bovins ou volailles) qui sont installés le long du Dir.

Notons que la délimitation des périmètres de protection en zone karstique n'est pas aisée. En effet, les écoulements et les vitesses de restitution des traçages sont plus ou moins grands selon

que le système est en basses eaux ou en hautes eaux, il va exister des reliefs de surface (avens, pertes) qui feront que les précipitations arriveront plus rapidement à des sources. De plus, la géologie elle-même ne facilite pas cette délimitation : le calcaire fissuré et karstifié qui constitue la majorité du Haut Atlas de Beni Mellal rend toutes les sources très sensibles à toute pollution. La présence d'argile au fond de certaines dolines rend relativement imperméable leur surface et de ce fait, les rend moins sensibles que le reste de la surface des bassins.

### **II.3. Périmètre de protection éloigné**

Le PPE doit assurer la protection des sources étudiées vis à vis des influences négatives à long terme notamment des polluants chimiques et radioactifs qui sont peu dégradables. Vu le contexte hydrogéologique des sources, ce périmètre est confondu avec la limite d'aires d'alimentation des sources.

Les résultats obtenus ont été divisés en quatre cas sont représentés dans les figures 122, 123, 124 et 125.



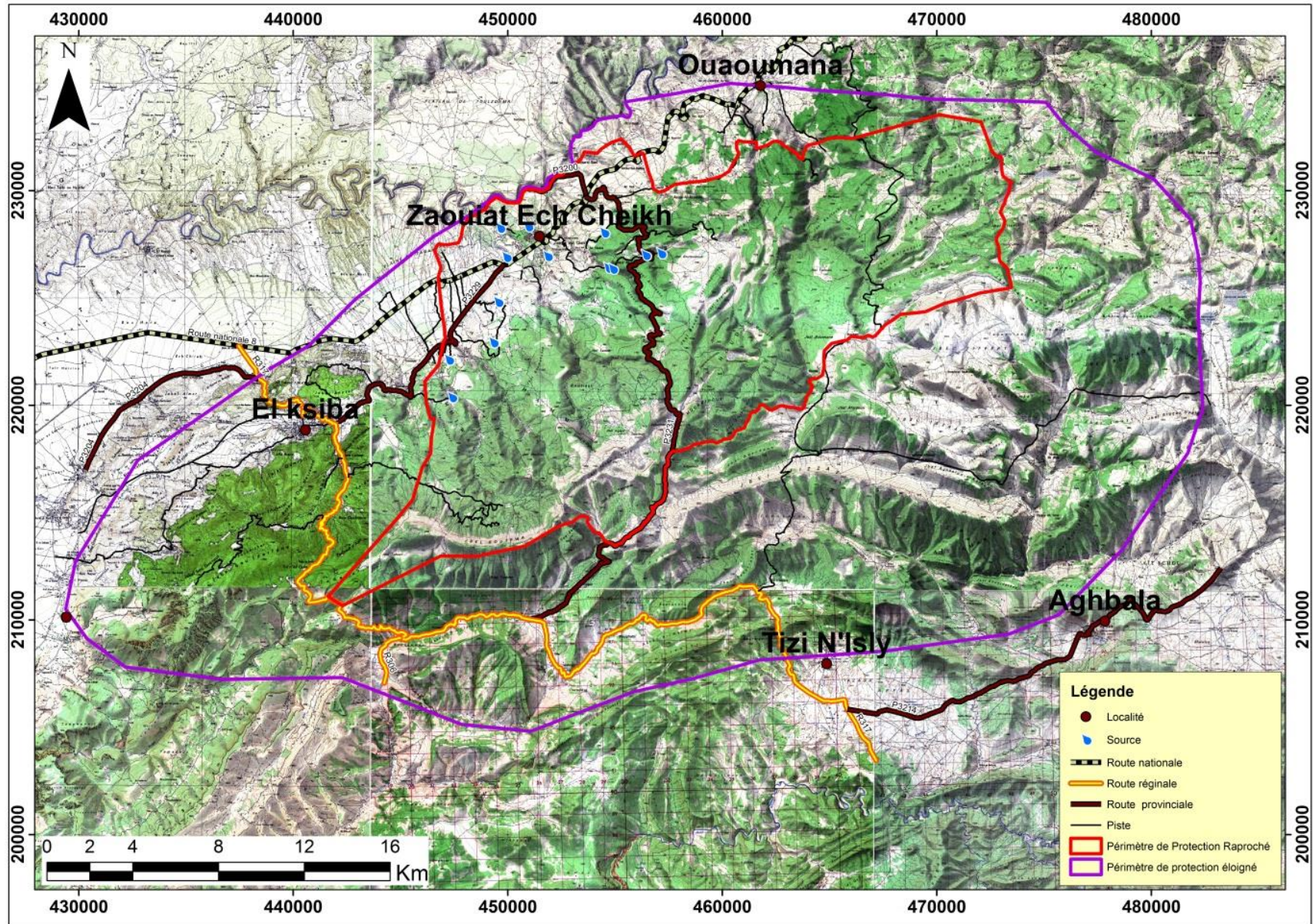


Figure 122 : Carte des périmètres de protection des sources situées entre El Ksiba et Ouaoumana

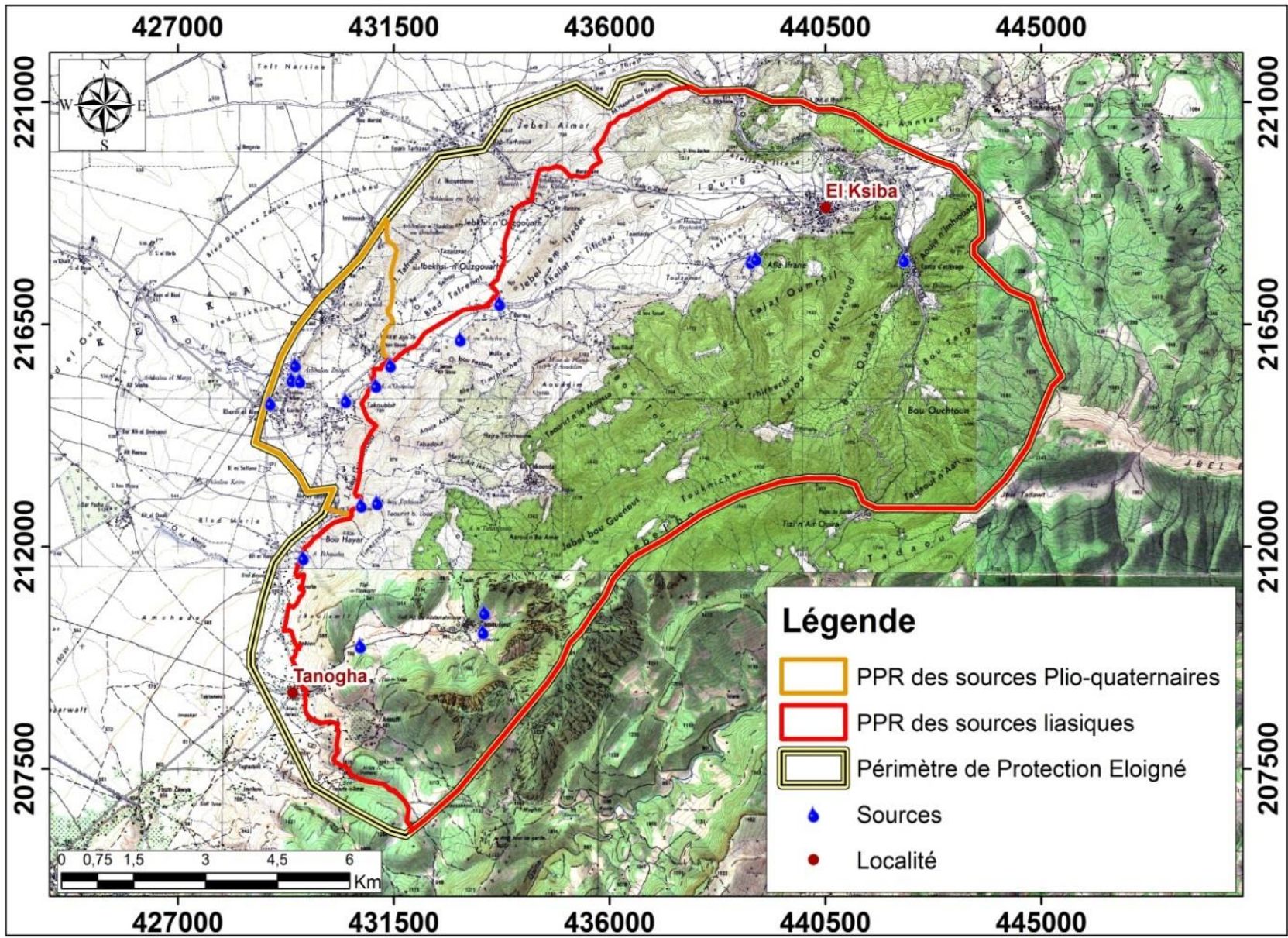


Figure 123 : Carte des périmètres de protection des sources situées entre El Ksiba et Tanogha

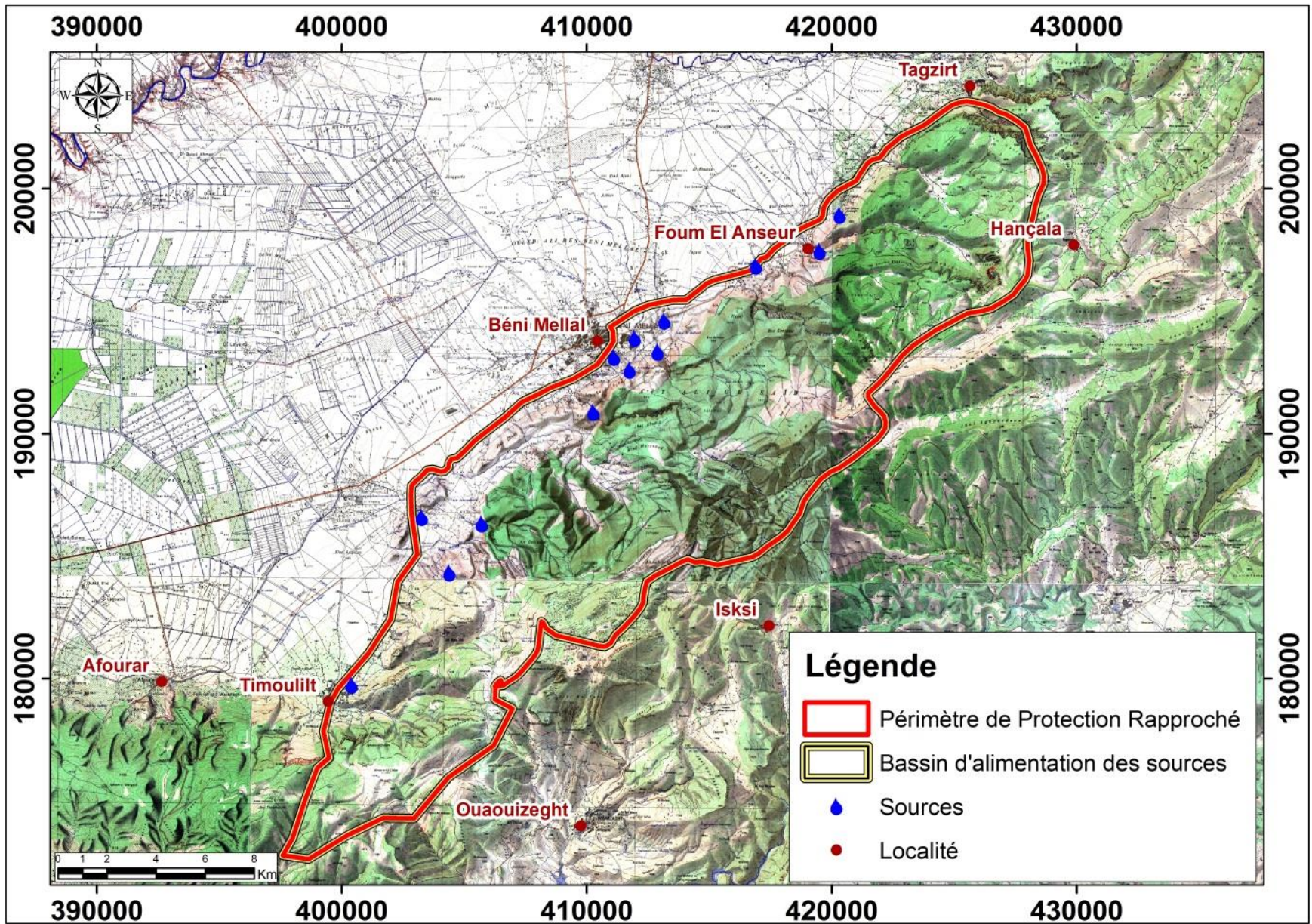


Figure 124 : Carte des périmètres de protection des sources situées entre Tagzirt et Timoulilt

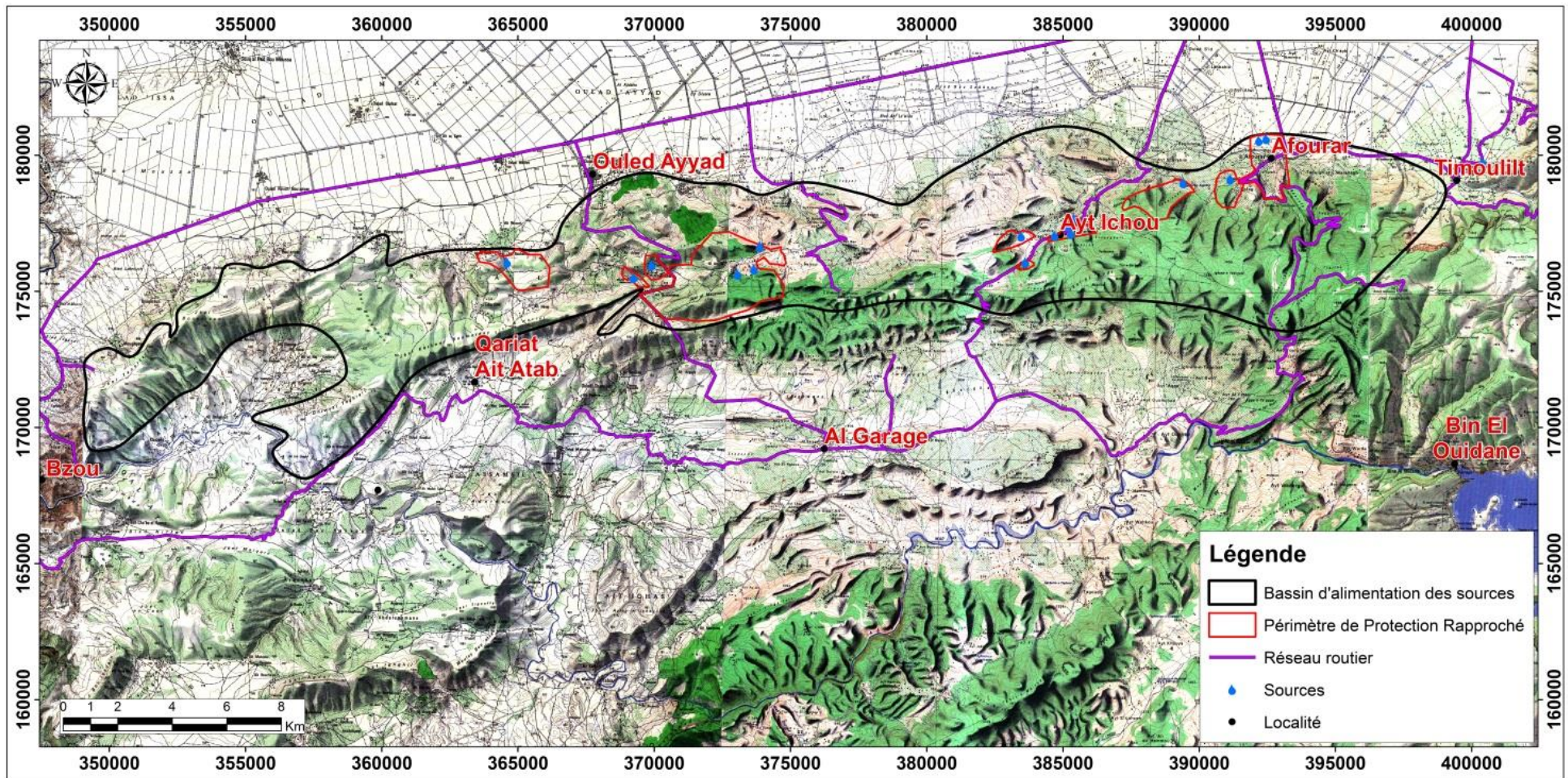


Figure 125 : Carte des périmètres de protection des sources situées entre Timoulilt et Bzou

### III. SERVITUDES DANS LES ZONES DE PROTECTION

#### III.1. Introduction

Après la délimitation des trois périmètres de protection, des servitudes doivent être formulées pour chaque zone. L'installation de ces périmètres présente donc une possibilité de protéger efficacement les ressources en eau et de prolonger la durée de leur exploitation. Ceci entraîne également une plus grande rentabilité des investissements et infrastructures réalisés.

#### III.2. Périmètre de protection immédiat

Dans ce périmètre, les servitudes ont pour objet d'assurer la protection contre la pollution de l'eau des sources et éviter des déversements ou des infiltrations de substances polluantes à l'intérieur ou à proximité immédiat des sources. La dimension de cette zone doit permettre également d'intervenir aisément en cas d'accident.

Au sein du périmètre immédiat sont interdits tous les dépôts, installations ou activités autres que ceux strictement nécessaires à l'exploitation et à l'entretien des sources. Les terrains formant ce périmètre font partie du domaine public. Nous proposons également de :

- mettre en place des panneaux indiquant un périmètre de protection immédiat de chaque source en différentes langues ;
- sensibiliser le public à la valeur et à la vulnérabilité des aquifères karstiques ;
- implantation d'une zone de végétation à vocation protectrice ;
- interdire le creusement des puits et des forages.

#### III.3. Périmètre de protection rapproché

Dans ce périmètre, il faut donner la priorité à la protection contre des pollutions et d'autres détériorations résultant des diverses activités et aménagements humains, dont la proximité pourrait mettre en danger les eaux des sources. Ainsi, il faut tenir compte de la vulnérabilité des aquifères alimentant de ces sources.

Par conséquent, à l'intérieur de ce périmètre :

**a. Sont interdits :**

- l'installation de dépôts d'ordures ménagères, d'immondices, de détritiques et de tous les produits et matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux ;
- l'épandage ou l'infiltration d'eaux usées d'origine domestique ou industrielle.
- l'implantation de canalisations d'hydrocarbures liquides ou de tous autres produits liquides reconnus toxiques ;

**b. Doivent être déclarées avant toute exécution, en vue de la fixation des conditions particulières de réalisation imposées pour la protection des eaux des sources :**

- l'implantation ou la construction de tous les établissements industriels ou agricoles, qui relèvent de la législation sur les établissements classés, notamment les dépôts et stations d'hydrocarbures ;
- l'implantation d'ouvrages de transport des eaux usées d'origine domestique ;
- l'ouverture et le remblaiement d'excavations susceptibles de mettre en cause la protection des eaux des sources à l'exemple des carrières ;
- la construction ou la modification de voies de communication ainsi que leurs conditions d'utilisation.

**c. Limiter la vitesse des camions transportant des produits nocifs (hydrocarbures, produits**

chimiques, toxiques etc.) sur le tronçon des routes où celles-ci pénètrent dans le périmètre de protection rapproché.

**d. Mettre en place des panneaux indiquant un périmètre de protection rapproché des sources en différentes langues.**

#### **III.4. Périmètre de protection éloigné**

Dans ce périmètre, la protection contre les détériorations étendues doit être assurée, en particulier les pollutions persistantes ou difficiles à éliminer ainsi que la pollution chimique.

#### **IV. CONCLUSION**

Au terme de cette étude, trois périmètres de protection au tour des sources situées entre Ouaoumana et Bzou sont délimitées : périmètre de protection immédiat, rapproché et éloigné.

La méthode de délimitation entreprise dans le cadre de ce travail, nous a permis de délimiter trois périmètres de protection différente :

- le périmètre de protection immédiat qui a été délimité autour de chaque source. Leur dimensions sont de l'ordre de 40x40 m, soit une superficie de 1600 m<sup>2</sup> ;
- le périmètre de protection rapproché qui a été délimité sur la base de la cartographie de la vulnérabilité, le comportement hydrogéologique des sources ;
- le périmètre de protection éloigné qui correspond au bassin d'alimentation des sources. Il a été délimité à partir de la structure géologique.

#### **V. CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE**

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est une méthodologie qui est devenue indispensable afin d'assurer la gestion qualitative et la protection des sources. Elle apparaît donc essentielle, car elle permet d'identifier facilement les zones sensibles à des pollutions potentielles. Elle permet aussi d'orienter l'aménagement du territoire. Cependant, l'usage de ces cartes de vulnérabilité pour la délimitation efficace des périmètres de protection des eaux souterraines doit tenir compte du comportement hydrodynamique de l'aquifère concerné qui ne compromet pas inutilement la planification et la gestion du territoire.

## CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a porté sur la délimitation des périmètres de protection des sources du Dir, situées entre Ouaoumana et Bzou (Haut Atlas de Beni Mellal, Maroc). Elle a combiné plusieurs outils et méthodes de travail, dont nous pouvons citer : topographie, hydroclimatologie, géologie, hydrogéologie, réglementation, et méthode de vulnérabilité EPIK. Plusieurs enquêtes ont été effectuées sur le terrain, pour affiner et actualiser les données sur l'occupation des sols, les foyers de pollution existants au voisinage de sources).

Géographiquement, la zone d'étude est située dans le piémont du Haut Atlas de Beni Mellal entre Ouaoumana et Bzou. Elle est caractérisée par une topographie relativement accidentée dont les altitudes varient entre 500 m et 2411 m.

Du point de vue hydroclimatologique, la zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride. Caractérisée par les précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 527mm, la température moyenne annuelle est de 20 °C, la vitesse de vents est inférieure à 2 m/s et l'évaporation annuelle est de 2188 mm. La pluie efficace retenue est 196 mm.

Il ressort des études géologique et hydrogéologique que les nappes d'eau souterraines les plus importantes de la région étudiée, circulent dans les terrains karstifiés du Jurassique inférieur et moyen et du Plio-quatenaire du Dir. Ce paysage karstique donne la naissance d'une centaine de sources de débits variant entre 1l/s à 1.25 m<sup>3</sup>/s.

L'analyse en composante principale a permis de classer les sources en trois groupes : eaux très minéralisées, eaux à origine météorique et superficielle et eaux exclusivement liées à l'aquifère carbonaté.

L'analyse des débits classés des sources montre la présence des différents niveaux aquifères karstiques avec la possibilité d'existence de niveau d'Epikarst et des niveaux profonds permettant d'alimenter les niveaux supérieurs et d'assurer une longue durée de décrue des sources.

L'étude de la vulnérabilité montre que les systèmes aquifères étudiés sont vulnérables à la pollution.

La méthode de délimitation des périmètres de protection entreprise dans le cadre de ce travail, nous a permis de délimiter trois périmètres de protection différentes :

- les périmètres de protection immédiats qui ont été délimités autour de chaque source. Leurs dimensions sont de l'ordre de 40x40 m, soit une superficie de 1600 m<sup>2</sup> ;
- les périmètres de protection rapprochés qui ont été définis, en se basant sur le comportement hydrogéologique des sources et la vulnérabilité à la pollution ;
- les périmètres de protection éloignés qui correspondent au bassin d'alimentation des sources. Il a été délimité à partir de la structure géologique.

En général, le processus de développement local du Dir intègre plusieurs décideurs et facteurs interactifs qu'on ne peut séparer ; un seul élément ne peut réaliser le développement local individuellement et isolément du reste des facteurs. Ainsi les ressources en eau du Dir, qui sont considérées comme un élément essentiel et une clé du développement du Dir, ont besoin des autres conditions : climatiques et gouvernance de l'eau et d'une assistance technique appropriée afin de les protéger et de fonctionner de manière optimale.

Cette étude se termine par quelques recommandations :

- installation des autres stations pluviométriques et stations de mesure de neige dans la zone d'alimentation des sources ;
- suivi des débits des sources situées entre Timoulilt et Bzou ;

- limiter la vitesse de circulation d'engins transportant des produits dangereux qui au cas d'accident contaminera sans aucun doute les systèmes aquifères des sources ;
- interdire l'installation de tout projet industriel générant des déchets solides et/ou liquides (carrières ou autres) au voisinage des sources ;
- contrôler l'utilisation intensive des engrais et pesticides ;
- application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et l'étude des formes karstiques dans le Haut Atlas ;
- étude géochimique et isotopique des aquifères du Haut Atlas ;
- études hydrogéologiques du Haut Atlas ;
- réalisation des études d'impacts sur l'environnement des futurs projets.



## BIBLIOGRAPHIE

Albinet, M. (1970). Carte de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France à 1/1000000. DATAR-BRGM, Orléans, France.

Albinet, M. Margat, J. (1970). Cartographic de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull BRGM 2nd Series, 3(4) 13-22.

ALILI L., BOUKDIR A., Younsi A., Aghazzaf B., MASLOUHI M. R., BEN-SAID E.(2019). Delimitation of the Protection Perimeters of Dir Springs (El Ksiba-Ouaoumana, High Atlas, Morocco).Article, JOWSET, 2019 (04), N°01, 465-471.

ALILI L., BOUKDIR A., MASLOUHI M. R. and IKHMERDI H. (2018). Karst groundwater vulnerability mapping to the pollution: Case of Dir springs located between El Ksiba and Ouaoumana (High Atlas, Morocco). Proceedings, E3S Web of Conferences, the Sixth International Congress "Water, Waste and Environment" (EDE6-2017), Beni Mellal. Volume 37, 01004.

Amoussou, E. (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire mono-ahémé-couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie.

Andreo B, Goldscheider N, Vadillo I, Vias JM, Neukum C, Sinreich M, et al. (2006). Karst groundwater protection: first application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (Southern Spain). Sci Total Environ, 357:54–73.

Andreo B., Ravbar N., Vias J.M. (2009). Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. Hydrogeol J 17:749 – 758

Awawdeh, M., Nawafleh, A. (2008). A GIS-based EPIK model for assessing aquifer vulnerability in Irbid Governorate, North Jordan: Jordan Journal of Civil Engineering, 2(3): 267-278.

Baccini A. (2010). Statistique Descriptive Multidimensionnelle (pour les nuls), Toulouse, Institut de mathématiques de Toulouse, , 33 pages.

BOUKDIR A. (2007). Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère du Turonien du bassin du Tadla-Plateau des Phosphates-Tassaout aval (Maroc)- approche pluridisciplinaire et étude d'impact. Thèse d'état, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, 190 p.

Bakalowicz M. (2018). Le karst, ressource en eau renouvelable dans les roches calcaires. Article, Encyclopédie de l'environnement.

Bakalowicz M. (1977).Etude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquiferes carbonatés par une méthode hydrocinétique nouvelle. C.R.Acad.Sc.Paris284, 2463-2466.

Bakalowicz, M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification, Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie-Paris IV.

Bakalowicz, M. (1994). Water geochemistry : water quality and dynamics. In: J. Standford, Gibert, J., Danielopol, D. (Editor), Groundwater Ecology. Academic Press, San Diego, pp. 97-127.

Barrocu G., Muzzu M., Uras G. (2006). Hydrogeology and vulnerability map (Epik method) of the "Supramonte" karstic system, north-central Sardinia. Environ Geol 51:701–706. doi:10.1007/s00254-006-0382-2

- Ben Othman D., Luck J.-M. and Tournoud M.-G. (1997). Geochemistry and water dynamics: application to short time-scale flood phenomena in a small Mediterranean catchment: I. Alkalis, alkali-earths and Sr isotopes. *Chemical Geology*, 140(1-2): 9-28.
- Bienfait P. (1978). Note relative aux cavités dans la région de Béni Mellal (Maroc). Direction de la région Hydraulique de Béni Mellal (D.R.H), 27p.
- Bouchaou L. (1995). Fonctionnement des aquifères atlasiques et leur relation avec les aquifères de la plaine de Tadla : Cas de l'Atlas de Béni Mellal et de la plaine de Tadla (Maroc). Doctorat d'Etat, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Semlalia, 154p.
- Bouchaou, L., Michelot, J.L., Chauve, P., Mania, J., Mudry, J. (1995). Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride: cas de l'atlas de Beni Mellal (Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, pp43–55.
- Bouchaou L. (1997). Contribution à la connaissance de l'aquifère karstique de l'Atlas de Béni Mellal (Maroc) - Karst Hydrology (Proceedings of Workshop W2 held at Rabat, Morocco, IAHS Publ. no. 247.
- BREDE R. (1992). Structural aspects of the Middle and the High Atlas (Morocco), Phenomena and causalities. *Geol. Rundsch.*, 81, 171-184.
- Brown C.E. (1998). *Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences*". Springer.
- Bouchaou L. (1988). Hydrogéologie du bassin des sources karstiques du complexe calcaire haut-atlasien du Dir de Béni Mellal (Maroc). Doct. Univ. Franche-Comté, Besançon, 179 p.
- Bussard T. (2005). Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants. Thèse Doc. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005, p 172.
- Combe M. (1977) - Haut-Atlas calcaire. In : Ressources en eau du Maroc. Tome 3 : Domaines atlasique et sud atlasique, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, Rabat, n° 231, p. 116-139.
- Choubert, G., and Faure-Muret, A. (1962). Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paleozoïques, in *Livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot: Soc. Géol. France Mém.*, Tome 1, p. 447-527.
- Chafiki, D. (1994). Dynamique sédimentaire à l'articulation plate-forme bassin: exemple du Lias de la région de Beni-Mellal (Haut Atlas central, Maroc). Thèse de 3 ième cycle, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 189p.
- Choubert G. (1952). Gisement des vertébrés de l'Atlas de Beni Mellal. 19 ème Congrès géol. Alger série Mai n° 4, 74 p.
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S. et al. (2002). Main concepts of the European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10(2) : 340-345.
- Dassi L. (2011). Investigation by multivariate analysis of groundwater composition in a multilayer aquifer system from North Africa: A multi-trace approach, *Applied Geochemistry*, Volume 26(8):1386-1398, 13 pages. doi 10.1016/j.apgeochem.2011.05.012.

- Davis A.D., Long A.J., Wireman M. (2002). KARSTIC: a sensitive method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environ Geol*, 42:65 – 72
- Deffontaines B. (1990). Développement d'une méthodologie morphoetectonique et morphostructurale, analyse des surfaces enveloppes du réseau hydrographique et des MNT. Thèse de l'Université Paris VI, 229 p.
- Dörfliger N. (2010). Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes ; BRGM RP- 58237-FR, 246 pp., 82 ill., 5 ann.
- Dörfliger N., Jeannin P.Y., Zwahlen F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environ Geol* 39(2):165 – 176.
- Dörfliger N, Zwahlen F. (1998). Practical guide: groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). *Environment in practice*, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 56 pp.
- Dörfliger, N. (1996). Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping. These de doctorat inedite, Université de Neuchatel en Suisse.
- Dörfliger N., Plagnes V., Kavouri K. (2009a). PaPRIKa a multicriteria vulnerability method as a tool for sustainable management of karst aquifers, example of application on a test site in SW France. International interdisciplinary scientific conference “ Sustainability of the Karst Environment: Dinaric Karst and other karst regions ”, Plitvice Lakes, Croatia, 23 – 26 September 2009.
- Dörfliger N., Plagnes V., Kavouri K., Balayre S., Paris C., Muet P., Subias C., Jaunat J., Huneau F., Prévost V., Marchet P., Gouin J. (2009b). PaPRIKa, une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité pour une gestion des ressources et des captages en milieu karstique : exemples d'application dans le Sud-Ouest de la France. *Géologues* 163:86 – 92.
- Dörfliger N. (2010). Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes ; BRGM RP- 58237-FR, 246 pp., 82 ill., 5 ann.
- Dresnay R. (1975). Données topographiques, stratigraphiques et paléontologiques concernant une ammonite citée dans la formation d'El Mers (Moyen Atlas, Maroc), et leurs conséquences sur l'âge attribué à cette formation. *Bull. Soc. géol. France*, (7), XVII, 6, 1144-1146.
- DROGUE C. (1971). Coefficient d'infiltration ou infiltration efficace, sur les roches calcaires. *Actes Coll. d'Hydrol. En Pays Calcaires*, Besançon.
- Ducommun, R. (2010). Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse.
- El Bardai R., Targuisti K., Maate A., Maatouk M., et Stitou J. (2006). Évaluation de la vulnérabilité à la contamination des nappes karstiques des environs de Chaouen (Rif septentrional, Maroc): méthode EPIK. En: Durán, J.J Andreo, B. y Carrasco, F (Eds.). *Karst, cambio climático y aguas subterráneas*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Volume 18, 239-247.

- El Bardai R., Targuisti K., Aluni K. (2015). A Contribution of GIS Methods to Assess the Aquifer Vulnerability to Contamination: A Case Study of the Calcareous Dorsal (Northern Rif, Morocco). *Journal of Water Resource and Protection*. 2015, 7, 485-495.
- EL-OUAFI M. (1993). Tarsissement et vidange des réservoirs de la Liane (Nord de la France). *Hydrologie Continentale*, 8 (2), pp. 103-112.
- El Garouani A., Merzouk A. (2004). Approche géomatique pour la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau souterraines (champ captant). *Science et changements planétaires/sécheresse*, volume 1e, numéro 2.
- El Khalki Y. et Hafid A. (2002). Turbidité, indicateur du fonctionnement perturbé du géo système karstique de l'Atlas de Beni Mellal. In *Karstologia*, n° 40, 2, pp : 39- 44.
- El Mansouri B., Y. Loukili et D. Esselaoui., (1999). Une approche numérique des périmètres de protection des captages des eaux souterraines. *Académie des Sciences*, 328 : 695 - 700.
- El Khammari K., Najine A., Jaffal M., Aïfa T., Himi M., Vásquez D., Casas A. & Andrieux P. (2007). Imagerie combinée géoélectrique–radar géologique des cavités souterraines de la ville de Zaouit Ech Cheikh (Maroc), *C. R. Geoscience*, 339, 460-467
- Ettaki, M., Ibouh, H., Chellai, E.H. et Milhi, A. (2007). Les structures « diapiriques » liasiques du Haut-Atlas Central, Maroc: exemple de la ride d'Ikerzi. *Africa Geosci. Rev.*, 14, 73–99.
- Farfa'n-Gonza'lez H., Plagnes V. (2013). First outcomes in the application of PaPRIKa method to assess aquifer vulnerability in tropical Karst Mountain: Santo Toma's Watershed—Vinãles National Park, Cuba. In: Farfa'n Gonza'lez H., Corvea Porras J.L., de Bustamente Gutie'rrez I, Lamoreaux JW (eds) *Management of water resources in protected areas*. Springer, Berlin Heidelberg, pp 95–101. doi:10.1007/978-3-642-16330-2\_11.
- Finigue A. (2017). Les ressources en eau dans le dir de l'atlas de Béni Mellal: problèmes de gestion et développement local. Thèse, Université d'Angers sous le sceau de l'Université Bretagne Loire, 143p.
- Fiorillo F. (2014). The recession of spring hydrographs, focused on karst aquifers. *Water Resour Manag* 28:1781–1805. doi:10.1007/s11269-014-0597-z
- Fournier M., Massei N., Bakalowicz M., Dussart-Baptista L., Rodet J., Dupont J. P. (2007). Using turbidity dynamics and geochemical variability as a tool for understanding the behavior and vulnerability of a karst aquifer, *Hydrogeology Journal*, 15(4):689-704, 16 pages, doi 10.1007/s10040-006-0116-2
- Fournier, M., 2003. Impact anthropique sur le fonctionnement et les propriétés de transport d'un aquifère crayeux karstique exploité pour l'AEP, Rapport de DEA, Université de Montpellier II.
- Gogu Radu C. & Dassargues A. (2001). Intrinsic Vulnerability maps of a Karstic Aquifer as obtained by five different assessment techniques: Comparison and comments, Department of Cartography. Swiss: Press University of Zurich Switzerland.
- Gogu RC, Hallet V, Dassargues A (2003) Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques: application to the Neblon river basin (Belgium). *Environ Geol* 44:881–892. doi:10.1007/s00254-003-0842-x

- Guezal J., El Baghdadi M., Barakat A. (2013). Les basaltes de l'Atlas de Béni-Mellal (Haut Atlas Central, Maroc): un volcanisme transitionnel intraplaque associé aux stades de l'évolution géodynamique du domaine atlasique. *Anu Inst Geocienc* 36(2): 70 – 85
- Goldscheider N., Hötzl H., Fries W., Jordan P. (2001). Validation of a vulnerability map (EPIK) with tracer tests: 7th conference on limestone hydrology and fissured Media. *Besançon* 20 – 22:167 – 170.
- Goldscheider N. (2004). Artificial tracers. In: Zwahlen F, editor. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*, EUR 20912. Brussels 7 European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; 2004b. p. 135–6.
- Goldscheider N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeol J* 13:555 – 564
- Grasso D.A. (1998). *Interprétation des réponses hydrauliques et chimiques des sources karstiques*, Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel.
- Hamdan I., Margane A., Ptak T., Wiegand B. and Sauter M. (2016) *Groundwater Vulnerability Assessment for the Karst Aquifer of Tanour and Rasoun Springs Catchment Area (NW-Jordan) Using COP and EPIK Intrinsic Methods*. *Environmental Earth Sciences*, 75.
- Hailwood E.A. et Mitchell J.G. (1971). Paleomagnetic and radiometric dating results from Jurassic intrusions in South Morocco. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 24, 351-364.
- Hakim B. (1982). *Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens : Liban, Svrrie et Maroc*. Thèse d'État de géographi. physique, université Aix-Marseille II en 4 vol., 667 p.
- Hafid M. (2006). *Styles structuraux du Haut Atlas de Cap Tafelney et de la partie septentrionale du Haut Atlas occidental: tectonique salifère et relation entre l'Atlas et l'Atlantique*. *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, 465, 172 p.
- ISSS, ISRIC, FAO (1998). *World Reference Base for soil resources (WRB)*. ISSS, ISRIC, FAO.
- Jenny. J., Le Marrec A., Monbaron. M. (1981): *Les Couches Rouges du Jurassique moyen du Haut Atlas central (Maroc): corrélations lithostratigraphiques. Éléments de datations el cadre tectono-sédimentaire*. - *Bull. Soc. géol. France*, sous presse.
- Jenny, J. (1988). *Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc au 1/100.000 (feuille d'Azilal, Haut- Atlas central)*. *Notes et Mem. Serv. Géol. Rabat*, 339 bis, 104. *Notes & Mémoires du Service Géologique du Maroc* 339 bis.
- Jossen J. A. (1988). *Carte géologique de Zawiāt Ahançal*. 1/100.000. *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 355.
- Kattaa B., Al-Fares W., Al Charideh A.R. (2010). *Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method*. *J Environ Manag* 91:1103–1110. doi:10.1016/j.jenvman.2009.12.008
- Kavouri K., Plagnes V., Tremoulet J., Dörfliger N., Rejiba F., Marchet P. (2011) *PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability-application to the Ouyse karst system (southwest France)*. *Hydrogeol J* 19:339–353. doi:10.1007/s10040-010-0688-8

- Lallemand-Barrès A. et Roux J.-C. (1999). Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine – Guide méthodologique et réglementaire. Manuels et méthodes, n o 33, BRGM, France, 334 pages.
- Laville E. (1978). Incidence des jeux successifs d'un accident synsédimentaire sur les structures plicatives du versant nord du Haut Atlas central (Maroc). - Bull. Soc. géol. France 20/3. 221-228.
- Laville, E., Zayane, R., Honnorez, J. & Piqué A. (1994). Le métamorphisme jurassique du Haut Atlas central (Maroc) ; épisodes synschisteux et hydrothermaux, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 318(II) : 1349–1356.
- Löwner, R. (2009). Recherches sédimentologiques et structurales à l'articulation entre Haut et Moyen Atlas et la Haute Moulouya, Maroc. Master Thesis, Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, 201p.
- Malik P., Svasta J. (1999). REKS: an alternative method of Karst groundwater vulnerability estimation. Hydrogeology and Land Use Management, Proceeding of the XXIX Congress of the International Association of Hydrogeologists, Bratislava, Slovakia, pp 79 – 85.
- Maqsoud, A., 1996. Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Lille, 324 pp.
- Marchet, P., 1991. Approche de la structure et de l'évolution des systèmes aquifères karstiques par analyse de leur fonctionnement: application au NW du causse de Martel (Quercy-France). Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Margat, J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater vulnerability to contamination) (in French). Base de la cartographie. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France.
- Mudry J. (1991). L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. Revue Se. de l'Eau, 4(1991), pp. 19-37.
- Mudry, J. and Blavoux, B., 1986. Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. Hydrogéologie, 1: 53-59.
- Melloul, A. and collin M. (1992). The 'principal components' statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israël. Journal of Hydrology, 140,49-73.
- Michard, A. (1976). Eléments de géologie marocaine. Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, 252: 408.
- Michard, A., Ibouh, H. & Charrière, A. (2011). Syncline-topped anticlinal ridges from the High Atlas: a Moroccan conundrum, and inspiring structures from the Syrian Arc, Israel. Terra Nova, 23, 314–323.
- Mattauer, M., Tapponier, P. and Proust, F. (1977). Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. Bulletin de la Société Géologique de France, 7(3): 521-526.

- Mangin A. (1971). Etude des débits classes d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Annales de spéléologie*, 28/1: 21-40.
- Mangin A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. Se. Nat. Dijon, France.
- Mangin A. (1984) Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. Hydrol* 67:25–43.
- Marchal (2007). Eaux destinées à la consommation humaine .Guide pour la protection des captages publics, départements du Gard et de l'Hérault. BRGM
- Marsaud B. (1996). Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse, Université de Paris XI Orsay, Document du BRGM n° 268,1997, Editions BRGM.
- Medina F. (1991). Superimposed extensional tectonics in the Argana Triassic formations (Morocco), related to the early rifting of the Central Atlantic. *Geol. Mag.*, 128, 5, 525-536.
- Mari'n A., Andreo B., Mudarra M. (2015). Vulnerability mapping and protection zoning of karst springs. Validation by multitracer tests. *Sci Total Environ* 532:435–446. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.05.029
- Monbaron. M. (1980). Le magmatisme basique de la région de Tagalft. dans son contexte géologique régional (Haut Allas central. Maroc). - C. R. Acad. Sci. (Paris) (D) 290. 1337- 1340.
- Monbaron, M. (1981). «Sédimentation, tectonique synsédimentaire et magmatisme basique: l'évolution paléogéographique et structurale de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc) au cours du Mésozoïque; ses incidences sur la tectonique tertiaire.» *Eclogae Geologicae Helveticae* 74(3): 625-638.
- Monbaron M. (1983). Dinosauriens du Haut Atlas central (Maroc) : état de recherche et précision sur la découverte d'un squelette complet de grand Cétiosaure.- Actes de la Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy, p. 203-234.
- Monbaron M. (1985). Carte géologique du Maroc au 1/100 000. Feuille de Béni Mellal. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 341, Rabat.
- Mudarra M., Andreo B. (2011). Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: the case of Alta Cadena (Southern Spain), *Journal of Hydrology*, 397(3-4):263-280, 18 pages, doi 10.1016/j.jhydrol.2010.12.005
- Mudarra M., Andreo B., Baker A. (2011).Characterisation of dissolved organic matter in karst spring waters using intrinsic fluorescence: Relationship with infiltration processes, *Science of Total Environment*, 409(18):3448-3462, 15 pages doi 10.1016/j.scitotenv.2011.05.026.
- Neukum C., Hotzl H., Himmelsbach T. (2008). Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modelling. *Hydrogeol J* 16:641–658. doi:10.1007/s10040-007-0249-y
- Oosterbaan J.M. (2000). Utilisation des méthodes de l'analyse exploratoire de données environnementales pour l'établissement de descripteurs macroscopiques de la dynamique des termes sources polluants dans la géosphère. Application à la caractérisation de la pollution par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) de sites industriels anciens ayant utilisés la

pyrolyse de la houille (usines à gaz et cokeries) ». Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris. 332 p., 2000

Pranville J., Plagnes V., Rejiba F., Trémoulet J. (2008). Cartographie de la vulnérabilité sur la partie sud du causse de Gramat: application de la méthode RISKE 2 [Vulnerability mapping in the southern part of the Causse of Gramat: application of the method RISKE 2]. *Géologues* 156:44 – 48

Pételet-Giraud E., Dörfliger N., Crochet P. (2000). RISKE: méthode d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, Sud de la France). *Hydrogéologie* 4:71 – 88

Plagnes V., Théry S., Fontaine L., Bakalowicz M., Dörfliger N. (2005). Karst vulnerability mapping: improvement of the RISKE method. *KARST 2005, Water Resources and Environmental Problems in Karst*, 14 – 19 September 2005 Belgrade-Kotor, Serbia.

Plagnes, V., 1997. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques: caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, 376 pp.

Powers S.E., J.F. Villaume & Ripp. J.A., (1997). Multivariate analysis to improve understanding of NAPL pollutant sources. *GWMR spring 1997*. pp. 130-140

Ravbar N., Goldscheider N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsol* 36:397–411

Ravbar N., Goldscheider N. (2009). Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeol. J.* 17(3), 725–733.

Ravbar N., Kovacic G., Marin AI. (2013). Abandoned water resources as potential sources of drinking water—the Korentan karst spring near Postojna. *Acta Geographica Slovenica* 53(2):296–309.

Ravbar N, Kovačič G. (2015). Vulnerability and protection aspects of some Dinaric karst aquifers: a synthesis. *Environ Earth Sci.* 74:129–141.

Ratha D.S., G. Venkataraman & Pahala Kumar S. (1994). Soil contamination due to open cast mining in Goa : a statistical approach. *Environmental Technology* 15 (9) pp. 853-862, 1994

Reisenhofer E., Adami G. and Barbieri, P. (1998). Using chemical and physical parameters to define the quality of karstic freshwaters (Timavo river, North-Eastern Italy): A chemometric approach. *Water Research*, 32(4): 1193-1203.

Ribeiro L., and Macedo M.E. (1995). Application of multivariate statistics, trend- and cluster analysis to groundwater quality in the Tejo and Sado aquifer. In: *Groundwater Quality: Remediation and Protection. Proceedings of the Prague Conference, May 1995.* IAHS a Publ. No. 225,39-47

Rolley J.-P. (1973a). Sur quelques paléoreliefs récifaux du Lias de TA lias de Beni Mellal (Maroc). *Notes Serv. géol. Maroc* 34/254. 113-120.

— (1973b). Etude géologique de l'Atlas d'Alfourer. Haut Atlas central. Maroc. - Thèse 3' cycle, Grenoble D.



— (1978). Carte géologique du Maroc au 1:100000. Feuille Ajourer. Notice explicative. - Notes et Mém.Serv. géol. Maroc 247 et 247bis.

Ravbar N. (2007). The protection of karst waters: a comprehensive slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping. Ins'titut za raziskovanje krasa ZRC SAZU. ISBN: 9789612540104.

Ravbar N., Goldscheider N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsol* 36(3):461 – 475.

Saley M.B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semimontagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 209p.

Savane I., Coulibaly K.M., Gioan P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 4 (12), pp. 231-237.

Souhel A. (1987). Dynamique sédimentaire des couches rouges intercalcaires (Bathonien-Cénomanién) dans l'Atlas de Beni Mellal (Haut Atlas central, Maroc). Thèse du 3 ième cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, *Strata* 2/8, 173p.

Souhel A., El Bchari F., El Hariri K., Lage B., Canerot J., Chafiki D., Ettachfini E. & Löwner R. (2011). Haut atlas central, partie nord-ouest north-western Central High Atlas, Nouveaux guides géologiques du Maroc, Volume 7, Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 562, Rabat.

Schnebelen, N., Patel JP., Lenindre Y., Baudry D., Hoarau A., Dufour P., Benhammouda, S. (2002). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine année 5.opération sectorielle. Protection de la nappe BRGM/RP-51178-FR.

Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., Guo, C., Farnham, I.M. and Johannesson, K.H. (2001). Geochemical and statistical evidence of deep carbonate groundwater within overlying volcanic rock aquifers/aquitards of southern Nevada, USA. *Journal of Hydrology*, 243(3-4): 254-271.

Stetzenbach, K.J., Farnham, I.M., Hodge, V.F. and Johannesson, K.H. (1999). Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentrations to evaluate groundwater flow in a regional aquifer. *Hydrol. Process.*, 13: 2655-2697.

Teixell A., Arboleya M.-L., Julivert M. et Charroud M. (2003). Tectonic shortening and topography of the central High Atlas (Morocco), *Tectonics* 22, 1051, doi :10.1029/2002TC001460.

Thüler L. (2014). Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Thèse, l'Université de Neuchâtel , 183p.

Valdes, D. (2005). Variabilité spatiale du fonctionnement hydrologique de l'aquifère karstique de la craie (département de l'Eure, France). Thèse de Doctorat, Université de Rouen.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J. et Dörfliger N. (2007). Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : Synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-55332-FR, 128 p., 125 illustrations, 8 annexes.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Perrin J. (2014). Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique, rapport BRGM/RP-63311-FR, 133 p., 69 illustrations.

Vrba J., Zaporoz'ec A. (eds) (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International contributions to hydrogeology, vol 16. Verlag Hienz Heise, Hannover

Vias JM., Andreo B., Peles MJ., Carrasco F., Vadillo I., Jimenez P. (2002). Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In: Carrasco F, Duran JJ, Andreo B (eds) Karst and environment. 2nd Nerja Cave Geological Symp., Nerja, Spain, 2002, pp 75 – 83

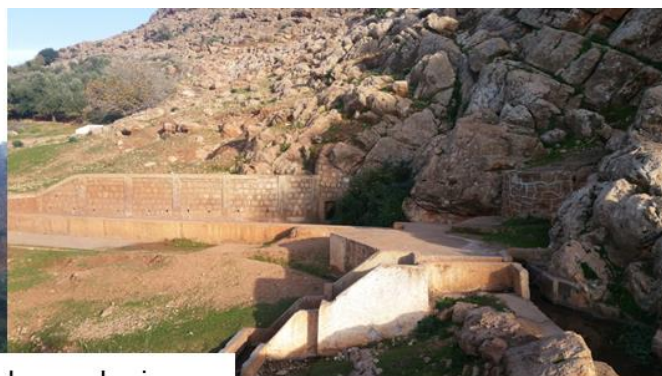
VIAS JM., ANDREO B., PERLES MJ., CARRASCO F., VADILLO I., JIMENEZ P. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: Application in two pilot sites in Southern Spain Hydrogeology Journal 14:912-925

Westphal. M.. Montigny. R. Thuizat. R. Bardon. C. Bossert. A. Hamzeh. R.. & Rolley. J.-P. (1979). Paléomagnétisme et datation du volcanisme permien. Triasique et crétacé du Maroc. - Canad. J. Earth Sci. /6/11.2150-2164.

Zwahlen, F. (2003). Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (karst) Aquifers - Final Report. Brussels, Belgium.

# **ANNEXES**

## Annexe 1 : Album Photos



Affleurements des calcaires



Source d'Ait Bouali



**Ait Accou**



**Echorfa**



**Tibadine**



**Ait Bouhmza**



**Ait Ichou milieu**



**Saghden**



**Sources situées entre Timouilt et Bzou**



Source Ait Alouane



Source Boutmarsite sèche

Creusement des puits au voisinage des sources



Echelle limnimétrique pour mesure de débit de la source d'Ain Asserdoune



Matériels des analyses physico-chimiques des eaux au laboratoire d'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er R'bia

## Annexe 2 : Coefficient de correction en fonction de la latitude

Latitude Nord	Jan	Fev	Ma	Av	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
15	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94
25	0,93	0,89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
26	0,92	0,88	1,03	1,06	1,15	1,15	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
27	0,92	0,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	0,99	0,90	0,90
28	0,91	0,88	1,03	1,07	1,16	1,16	1,18	1,13	1,02	0,98	0,90	0,90
29	0,91	0,87	1,03	1,07	1,17	1,16	1,19	1,13	1,03	0,98	0,90	0,89
30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
31	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
32	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	1,03	0,98	0,88	0,87
33	0,88	0,86	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	0,97	0,88	0,86
34	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86
35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
36	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,86	0,84
37	0,86	0,84	1,03	1,10	1,22	1,23	1,25	1,17	1,03	0,97	0,85	0,83
38	0,85	0,84	1,03	1,10	1,23	1,23	1,25	1,17	1,04	0,96	0,84	0,83
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	0,96	0,84	0,82
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,80
42	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,26	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
43	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,20	1,04	0,95	0,81	0,77
44	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,30	1,20	1,04	0,95	0,80	0,76
45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,80	1,02	1,14	1,30	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73
48	0,76	0,80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,77	0,72
49	0,75	0,79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	0,93	0,76	0,71
50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70
<b>latitude sud</b>												
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29
42	1,28	1,07	1,07	0,92	0,85	0,76	0,82	0,92	1,00	1,16	1,22	1,31
44	1,30	1,08	1,07	0,92	0,83	0,74	0,81	0,91	0,99	1,17	1,23	1,33
46	1,32	1,10	1,07	0,91	0,82	0,72	0,79	0,90	0,99	1,17	1,25	1,35
48	1,34	1,11	1,08	0,90	0,80	0,70	0,76	0,89	0,99	1,18	1,27	1,37
50	1,37	1,12	1,08	0,89	0,77	0,67	0,74	0,88	0,99	1,19	1,29	1,41



### Annexe 3 : Qualité physico-chimique des sources d'eau étudiées

N°	Nom	T°	pH	CE	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	Tamda	15,9	7,5	552	5,64	0,51	31,2	75,8	10,7	8,11	377,6	5,99
2	Ouarnfaa	16,4	7,22	687	15,8	1,18	36,3	86,9	22,8	16,1	416,7	12,9
3	Boudilit	16,6	7,13	752	16	2,45	34,5	97,8	23,5	16,2	421,6	51
4	Ou Abdellah Amont	14,6	7,31	590	2,88	0,6	34	80,2	8,21	7,31	399,6	13,2
5	Ou Abdellah Aval	15,2	7,41	589	2,64	0,45	33,6	77,3	8,18	7,11	392,3	10,04
6	Tamescourt	17,9	7,36	668	10,2	0,65	46,1	83,2	17,4	9,88	446	14
7	Tigmate	16,5	7,15	695	14,4	0,66	38,9	71	20	13,7	394,7	6,18
8	N'ougziza	16,4	7,46	834	16,3	0,27	50,6	92,1	26,2	47,1	455,7	10,8
9	Igly	16,7	7,19	635	14,2	0,38	37,7	73,1	21,3	15,3	387,4	9,45
10	Boulmatene	17,6	7,26	600	6,55	0,41	43,2	65,7	9,79	15,4	380,1	19,9
11	Ait Athmane	18,1	7,42	735	21,6	0,36	47,8	72,6	38,3	53	365,4	20,6
12	Boutmarsite	15,4	7,24	580	2,75	0,14	37,6	74,3	7,36	6,93	399,6	13,2
13	Ait Laaidi	15,8	7,21	638	3,82	0,15	40,5	82,5	9,7	6,24	433,8	14
14	Taghbaloute Nhalima	15,8	7,07	710	3,69	1,2	49,25	87,18	7,55	17,69	475,24	4
15	Gafer	14,5	7,37	580	5,96	2,43	40,6	71,4	24,2	13,78	384,96	6,98
16	Ali Oujdid	18,5	7,26	680	31,2	2,56	40,91	84,63	58	14,58	389,84	38,9
17	Ikhourba	15,4	7,93	540	12,6	2,04	37,22	63,64	31,4	14,99	350,8	7,04
18	Moha ou Khity	15,3	7,19	600	1,45	1,08	38,5	76,25	5,53	16,46	404,48	4
19	Tamoudjoute Milieu	14,8	7,51	550	2,61	0,98	37,44	63,62	7,73	14,87	360,56	3,02
20	Tamoudjoute aval	17,2	7,64	560	3,02	1,12	37,9	63,61	5,69	14,91	365,44	5,45
21	NYgourramen	15,7	7,2	510	5,06	1,38	40,08	74,16	5,62	14,64	411,8	5,3
22	Oussefrou RG	19	7,33	680	4,08	1,15	44,94	80,72	10,1	14,22	411,8	22,91
23	Oussefrou RD	19	7,5	550	5,6	0,9	49,85	64	10,7	3,52	433	10,37
24	N'oudaine	18,3	7,45	610	3,03	1,03	41,47	70,07	8,29	15,19	382,52	13,37
25	Ouchcha	18	7,51	630	3,28	1,1	41,86	73,9	8,2	14,21	392,28	18,22
26	Biha Ou Hammou	18,5	7,47	620	3,56	1,27	42,45	71,68	8,66	14,54	387,4	16,29
27	Ait Daoud	20,1	7,46	560	19,5	3,29	36,03	63,96	42,7	16,81	336,16	20,32
28	Zriouil	18,5	7,49	630	25,5	4,96	44,76	70,37	48,6	15,16	384,96	21,44
29	Sidi El Maati	20	7,63	660	6,47	6,38	43,59	61,71	10,5	20,24	404,48	20,5
30	Ghorm El Alam	18,3	7,21	710	6,55	1,35	48,68	81,08	12,6	14,2	406,92	36,05
31	Sidi Chami amont	18	7,75	590	2,69	1,03	42,43	63,24	7,26	17,11	377,64	10,25
32	Ghrom Nih	18,8	7,36	660	5,25	1,4	45,68	73,48	9,37	14,46	414,24	15,44
33	Ain Asserdoune	15,7	7,4	509	22	1,6	27,23	56,8	32	40,51	323,3	4,67
34	Tamegnounte	17	7,3	596	24	0,8	25,77	58,4	32	41,16	353,8	5,69
35	Sidi Bouyakoub	18,4	7,3	755	30	1,3	38,91	64	60,4	44,41	457,5	4,93
36	Ourbiaa	19	7,5	869	74	0,9	52,53	47,2	117	41,65	402,6	14,67
37	Fou Elancer	17,4	7,9	492	3,5	0,7	29,67	57,6	10,7	36,6	335,5	6,14
38	Fechtala	18,7	7,9	503	2,6	1,1	32,58	56,8	24,9	38,55	335,5	8,48
39	El Ghazi	18,4	7,5	523	3,6	0,8	33,07	51,2	10,7	37,42	353,8	17,9
40	El Ksabi	19,9	7,9	523	28	1,2	43,28	40	46,2	42,13	408,7	4,7
41	Ouchrah	14,7	7,7	558	4,7	1,2	35,5	62,4	21,3	44,74	353,8	0,1
42	Foum Oudi	19,4	7,9	629	8,8	1,1	36,48	56	28,4	38,39	372,1	10,68
43	Ait Alouane	17,7	7,5	567	3,5	1,4	24,8	64	10,7	38,55	347,1	15,95
44	Ait Boujou	15,8	7,7	492	3,5	0,9	31,12	58,4	14,2	39,04	292,8	19,01
45	Ait Bouali	20,2	7,2	970	50	3,6	37,45	100	28,4	206,5	366	19,41
46	Timoullit	18,9	7,1	583	5,6	1,7	24,32	67,2	24,9	46,69	341,6	1,83