



UNIVERSITÉ SULTAN MOULAY SLIMANE  
Faculté des Sciences et Techniques  
Béni-Mellal



---

**Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques**  
**Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé**

**THÈSE**

Présentée par :

**Lalla Aicha KARROUM**

Pour l'obtention du grade de :

**DOCTEUR**

Discipline : Géologie

Spécialité : Hydrogéochimie et Environnement

---

---

**Evaluation de la qualité des eaux de surface et des  
sédiments : Hydrogéochimie, processus de  
minéralisation et éléments traces métalliques. Cas des  
bassins versants : Oued El Abid, Oued Ahançal et Oued  
Srou (Haut et Moyen Atlas, Maroc).**

---

---

Soutenue le 23/01/2021 à 10h devant la commission d'examen composée de :

|                              |                                  |                         |
|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| <b>Président</b>             | <b>: Pr. Ahmed BOUKDIR</b>       | <b>FST-Béni-Mellal</b>  |
| <b>Rapporteur</b>            | <b>: Pr. Lahcen BENAABIDATE</b>  | <b>FST-Fès</b>          |
| <b>Rapporteur</b>            | <b>: Pr. Mohamed HSSAISOUNE</b>  | <b>FSA-Ait Melloul</b>  |
| <b>Rapporteur</b>            | <b>: Pr. Abdelkrim ARIOUA</b>    | <b>FST-Béni-Mellal</b>  |
| <b>Examineur</b>             | <b>: Pr. Samir NADEM</b>         | <b>FST-Béni-Mellal</b>  |
| <b>Directeur de thèse</b>    | <b>: Pr. Mohamed EL BAGHDADI</b> | <b>FST-Béni-Mellal</b>  |
| <b>Co-directeur de thèse</b> | <b>: Pr. Ahmed BARAKAT</b>       | <b>FST-Béni-Mellal</b>  |
| <b>Invité</b>                | <b>: M. Mustapha AFDALI</b>      | <b>ONEE-Béni-Mellal</b> |

## *Fiche présentative de la thèse*

**Nom et prénom de l'auteur :** Lalla Aicha KARROUM

**Intitulé du travail :** *L'évaluation de la qualité des eaux de surface et des sédiments : Hydrochimie et Eléments traces métalliques. Cas du bassin versant Oued El Abid, Oued Ahançal et Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc).*

**Directeur des travaux de recherche :** Mohamed EL BAGHDADI, Équipe de Géoressources et environnement, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Science et Technique, Béni-Mellal, Maroc.

**Co-Encadrant :** Ahmed BARAKAT, Équipe Géoressources et Environnement, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Technique, Béni-Mellal, Maroc

**Laboratoires où les travaux de cette thèse ont été réalisés :**

- Laboratoire Géoressources et Environnement à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal, Maroc.
- Centre d'analyse de l'Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc.
- L'office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE)- Béni-Mellal, Maroc

### ***Publications***

#### **Articles publiés**

- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, M. Aadraoui, H. Oumenskou, W Ennaji « **Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of the Srou River and its tributaries (Middle Atlas, Morocco) for drinking and agricultural purposes** » *Desalination and Water Treatment*, 146 (2019) 152–164.
- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, M. Aadraoui, H. Oumenskou, W Ennaji « **Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of El Abid River, Middle Atlas, Morocco** » *Desalination and Water Treatment*, 143 (2019) 118–125.

#### **Communications orales**

- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, H. Oumenskou, W. Ennaji, M. Aadraoui « **Suitability assessment of surface water of Oued El Abid basin (High Atlas, Morocco) for irrigation purposes** », la 6<sup>e</sup> édition de congrès international : Eaux, Déchets, Environnement (EDE6) « L'Afrique, État des lieux et perspectives d'avenir », 12-14 décembre 2017, Béni Mellal, Maroc.

- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, H. Oumenskou, W. Ennaji, M. Aadraoui « **Hydrogeochemical study of surface water resources of Srou Basin Middle Atlas, Morocco** » International Conference on Civil Engineering and Materials (ICCEM'2017) 11-12 May 2017, Al Hoceima, Morocco.
- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, M. Aadraoui, « **Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface de l'Oued Srou et des affluents, Moyen Atlas Maroc** », 1<sup>er</sup> colloque international « Environnement 2016, Eco-procédés, Traitement et/ou Valorisation des Déchets et des Effluents pour un Environnement Durable », Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali, El-Jadida- Maroc, 17-19 février 2016.

### **Communications par affiches**

- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, H. Oumenskou, W. Ennaji, M. Aadraoui « **Evaluation of the suitability of surface water from Srou River (Middle Atlas, Morocco) for irrigation purposes**», 7<sup>th</sup> international scientific agriculture symposium, Agrosym 2016, 16-9 October 2016, in Jahorina, Bosnia.
- **L. A. Karroum**, A. Chaou, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, W. Ennaji, H. Oumenskou, M. Aadraoui « **Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique et relation entre la matière en suspension et la turbidité des eaux de surface de l'Oued El Abid, Haut Atlas, Maroc** » international Conference on Geospatial Technologies for Water Resources GTW III, Scientific Association for Water Information Systems "SAWIS", 11 et 12 novembre 2016.
- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, H. Oumenskou, W. Ennaji, M. Aadraoui « **Analysis of the suitability of surface water of El Abid River And its tributaries for irrigation purposes, High Atlas, Morocco**» le Forum International sur les Changements climatiques sous le thème «La lutte contre le changement climatique, vecteur de développement économique et social durable et intégré», l'Université Sultan Moulay Slimane, les 18 et 19 octobre 2016.
- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, M. Aadraoui, « **Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'oued Ahançal (Moyen-Atlas-Maroc)** » Le premier congrès international des études sur l'eau et l'environnement-CI3E, l'école nationale des sciences appliquées d'Al-Hoceima-Maroc, 21- 22 avril 2016.

- **L. A. Karroum**, M. El Baghdadi, A. Barakat, R. Meddah, H. Oumenskou, W. Ennaji, M. Aadraoui, « **Assessment of surface water quality for irrigation: A case study in Oued Srou and its tributaries, Middle Atlas, Morocco** », 5<sup>ème</sup> colloque international du réseau “Eaux & Climats”, Université Sidi Mohamed Ben Adbellah, Faculté Sciences et Techniques, Fès, 12-13 Octobre 2016.

## ***Dédicace***

*A vous mes chers parents, je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils; assistance et soutien moral, en témoignage de ma reconnaissance et mon affection, dans l'espoir que vous en serez fiers.*

## Remerciements

La thèse est un long parcours personnel mais surtout une grande expérience collective. A l'issue de la rédaction de cette thèse, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes. Arrivant au terme de ce travail, il m'est tout particulièrement agréable de pouvoir remercier ici toutes ces personnes qui ont pris part d'une façon ou d'une autre à son aboutissement.

Je tiens à remercier spécialement, Monsieur le professeur **Mohamed EL BAGHDADI** mon *directeur de thèse*, pour la confiance qu'elle m'a accordée, pour sa constante disponibilité, pour son soutien et pour la fidélité à son engagement de directeur de thèse, pour m'avoir fourni les moyens de mener mon sujet de recherche à terme. Je vous remercie plus particulièrement pour vos remarques constructives, pour vos multiples conseils. J'aimerais également vous dire à quel point j'ai apprécié votre grande disponibilité et votre respect. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à vos qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude à mon co-directeur de thèse Monsieur le professeur **Ahmed BARAKAT**, ses remarques, son ouverture d'esprit, sa franchise et sa gentillesse sont autant d'éléments qui m'ont permis d'avancer dans mes travaux de recherches. Je lui rends grâce pour sa disponibilité et tout le temps qu'il m'a consacré malgré ses nombreuses responsabilités et engagements.

Je tiens à remercier Monsieur **Ahmed BOUKDIR** professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Beni-Mellal d'avoir accepté d'être président du jury. Je remercie également Monsieur **Lahcen BENAABIDATE**, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique, Fez, Monsieur **Mohamed HSSAISOUNE** Professeur a la Faculté des Sciences Appliquées, Ait melloul et Monsieur **Abdelkrim ARIOUA**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni-Mellal, d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je leur suis très reconnaissante pour l'intérêt qu'ils ont apporté à ces travaux de recherche, et ce, tout en ayant un regard critique, juste, avisé et constructif. Mes remerciements s'adressent aussi aux Professeur **Samir NADEM** Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni-Mellal, pour sa participation à mon jury de thèse en qualité d'examineur et pour ces remarques judicieuses. Je voudrai également remercier Monsieur **Mustapha AFDALI** responsable à ONEE-Béni-Mellal d'avoir accepté de faire lui-aussi partie du jury.

En parlant d'analyses, je souhaite remercier Monsieur **Redouane MEDDAH** responsable à l'office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE)- Béni-Mellal pour son aide et pour ses remarques constructives lors de l'analyse de mes échantillons.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, sans oublier le chauffeur de la Land Rover Monsieur **Mohamed BADAI**.

Je voudrais exprimer également ma reconnaissance à mes amis de l'équipe Géoressources et Environnement **Hakima Oumenskou, Mohamed Adraoui, Widad Ennaji, Afaf El Jazouli, Hassania El Hamzaoui et Abdessamad Hilali** qui m'ont soutenu tout au long de ces années de travail, pour l'aide qu'ils m'ont prodiguée chaque fois j'en avais besoin. Aussi je remercié mes amis de la faculté des Sciences Semlalia pour leurs soutien moral et affectif.

Je clos enfin ces remerciements en dédiant cette thèse de doctorat à mes **PARENTS** sans eux rien n'aurait été possible, merci à mes sœurs **Fatiha** et **Manar** mes frères **Abdeljalil, Morad** et **Adnan**, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

## *Résumé*

Suite au risque de pénurie en eau, la préservation des ressources en eau est devenue un souci majeur d'ordre mondial. Au Maroc, la qualité de cette ressource est un vrai challenge pour les responsables de ce secteur. Par exemple dans la région Béni-Mellal-Khénifra ce problème de pénurie et de qualité d'eau est accentué durant les dix dernières années. Pour aborder cette problématique d'ordre environnemental et social, trois oueds ont été choisis : (i) Oued El Abid comme affluent majeur de la rivière Oum Er Rbia, (ii) son affluent Oued Ahançal drainant la zone montagneuse du bassin versant El Abid, (iii) Oued Srou qui est un affluent important aussi de la rivière Oum Er Rbia dans sa partie haute Oum Er Rbia.

L'objectif de l'étude est d'évaluer spatialement les paramètres physico-chimiques et la concentration des éléments traces métalliques dans les eaux superficielles et dans les sédiments de ces trois cours d'eau. Pour atteindre cet objectif, quatre-vingt prélèvements d'eau et de sédiment de surface ont été effectués.

Les résultats du contrôle spatial de la qualité de l'eau de l'Oued El Abid ont révélé que la tendance générale des teneurs des paramètres analysés montre une détérioration significative de la qualité en aval du barrage de Bin El Ouidane jusqu'au point de confluence avec la rivière Oum Er Rbia. La dégradation observée est due principalement à une signature anthropique. Quant à l'Oued Ahançal, les analyses ont permis de déduire que la qualité est bonne à excellente et indemne de tout type de pollution. La qualité des eaux de l'Oued Srou est dégradée, résultant d'une forte salinité qui reflète bien l'intervention du contexte géologique en même temps aucun signe lié à la pollution organique n'a été détecté. L'aptitude de ces eaux à l'irrigation a été contrôlée via le calcul de plusieurs indices à savoir le SAR, la salinité, KI, et MH qui ont prouvé que l'eau est de bonne qualité et utilisable dans l'irrigation des terres agricoles pour Oued El Abid et Oued Ahançal, tandis que les eaux de l'Oued Srou ne sont pas recommandable dans l'irrigation vue les effets négatifs et les dommages irréversibles au sol et à la plante que peuvent engendrer leur utilisation.

L'évaluation des indices de contaminations métalliques des eaux des trois Oueds a permis de constater que ces eaux sont indemnes de toute contamination métallique du fait que les valeurs des indices relevées soient inférieures à 2.

Sur le plan hydrogéochimique, l'étude des échantillons a permis de caractériser le chimisme des eaux et l'origine de la minéralisation qui reflète bien les interactions eau-roche. Ces interactions dépendent principalement de la géologie du bassin versant, la nature des roches (formations carbonatées, salifères et/ou évaporitiques) et les conditions environnementales en termes de température, précipitations, CO<sub>2</sub>, etc.

L'évaluation de la qualité des sédiments de ces cours d'eau a montré que les teneurs des éléments métalliques (Cu, Zn, Fe, Cr, Al et Pb, Ni, et Mn) obtenus classent toujours les trois oueds comme un milieu aquatique non contaminé. En revanche l'intensité de la pollution métallique des sédiments a été évaluée par le calcul du facteur d'enrichissement (FE), facteur de contamination (FC) et de l'indice de géo-accumulation (Igeo). Des valeurs d'enrichissement obtenues pour Fe, Mn, et Pb montrent un enrichissement modéré par ces métaux au niveau de quelques stations de l'Oued El Abid et Oued Srou.

**Mots-clés :** Oued El Abid, Oued Ahançal, Oued Srou, Qualité, Paramètres physicochimiques, Hydrochimie, Éléments traces métalliques, Pollution métallique.



## *Abstract*

Preservation of water resources has worldwide become a major concern due to the risk of water shortage. In Morocco, responsible of water sector worrying about water quality. Three Moroccan oueds were selected as study framework: i) Oued El Abid is one of Oum Er-Rbia river major tributaries, ii) Oued Ahançal a tributary in upstream part of Oued El Abid basin, iii) Oued Srou an important tributary of Oum Er Rbia river in high Oum Er-Rbia part.

This study aims at assessing the spatial water quality and sediments in the Oued El Abid as well as its main tributary Oued Ahancal and Oued Srou. Several parameters were analyzed: the physicochemical parameters and Metallic trace metals. To carry out this study 80 samples of water and sediment surface were made.

The study reveals a significant deterioration of water quality in downstream part of Oued El Abid specially after Bin El Ouidane dam. This deterioration reflects a significant contribution of anthropogenic activities, whereas Oued Ahançal showed an excellent water quality. In Oued Srou, analysis showed a degraded water quality resulting from high salinity. Therefore, the high salinity is strongly related to natural phenomenon as well as the geological context. Suitability of irrigation has been envisaged by studying SAR, salinity, KI, and MH. Due to the low SAR, KI, and MH values, the water from Oued El Abid and Oued Ahançal is suitable for irrigation but in Oued Srou water case the high salinity can pose negative effects and further irreversible damage in plants and irrigated soils.

It is part of this study that the surface waters of the study area are free of contamination by metallic trace elements because of water indexes contamination are below 2.

Hydrogeochemically, the study samples allow the chemical characterization of water and specify the origin of chemical elements. The chemistry of water depends on the lithology of the basins and natural process such as soluble salts especially limestone, saliferous, and evaporite formations.

Another part of the work is devoted to assess the quality of sediments of Oued El Abid, Oued Ahançal and Oued Srou. The results show that this aquatic environment is free of contamination by metallic trace elements. Metallic pollution intensity has been evaluated by studying FE, FC and Igeo. A moderate level of contamination by Fe, Mn, et Pb was observed in some stations in Oued El Abid and Oued Srou

**Keywords:** Oued El Abid, Oued Ahançal, Oued Srou, quality, physicochemical parameters, hydrochemical, Metallic trace elements, Metallic pollution

## ملخص

أصبح الحفاظ على الموارد المائية مسألة مستعجلة على مستوى العالم بسبب الاخطار المتعلقة بنذرتها. على مستوى المغرب تشغل جودة الموارد المائية مسؤولي قطاع الماء ولهذه الغاية وقع الاختيار على ثلاثة وديان: واد العبيد ويعد من الروافد الرئيسية لنهر أم الربيع وواد أحنصال رافد مهم لواد العبيد يشغل عالية حوض واد العبيد وواد سرو أحد الروافد المهمة لنهر أم الربيع على مستوى عالية حوض نهر أم الربيع.

تهدف هذه الدراسة الى تقييم جودة المياه السطحية ورواسب الوديان الثلاثة وذلك استنادا الى مجموعة من المعلمات الفيزيائية والكيميائية بالإضافة الى المعادن الثقيلة. ولإجراء هذه الدراسة اخذت 80 عينة من الماء و الراسب.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن جودة المياه تتدهور بشكل ملحوظ في الجزء السفلي من واد العبيد مباشرة بعد سد بين الوديان حتى مصب الواد مع نهر أم الربيع. ويعكس هذا التدهور في الجودة تدخل عوامل أنثروبولوجية، فيما تتمتع مياه واد احنصال بجودة عالية جدا. كما أن جودة مياه واد سرو ضعيفة اذ تسجل نسبة ملوحة عالية جدا تسببت فيها عوامل جيولوجية محضة يتميز بها حوض سرو ونشير الى أنه لم يسجل أي مؤشر ناتج عن تلوث عضوي. وبخصوص قابلية هذه المياه لأغراض زراعية واعتمادا على مجموعة من المعايير مثل: نسبة الملوحة و SAR و KI و MH نستنتج أن جميعها ضمن النطاق القياسي المسموح به باستثناء واد سرو الذي سيتسبب السقي بمياهه بأضرار على مستوى المزروعات والتربة. من جهة أخرى اثبت تقييم المياه السطحية المحللة انها خالية من التلوث بالمعادن الثقيلة لأن عوامل التلوث التي تحصلنا عليها أصغر من 2.

ولفهم آلية التمدن والنوعية الكيميائية اثبتت نتائج التحليلات الهيدروجيوكيميائية أنها ترتبط بالطبيعة الجيولوجية للحوض وتفاعلات المياه والصخور المكونة للحوض عبر آلية دوبان الصخور الكربوناتيية والملحية والمبخرة المنتشرة على مستوى الحوض.

بالنسبة لتقييم مستويات التلوث بثمانية معادن ثقيلة (النحاس، الزنك، الحديد، الكروم، الألمنيوم، الرصاص، النيكل والمنغنيز) على مستوى رواسب الوديان الثلاثة تبين أن هذه الأخيرة تصنف وسطا مائيا خالي من التلوث، غير أنه تم تقييم كذلك شدة التلوث عبر حساب مجموعة من العوامل مثل: FE و FC و Igeo والتي اثبتت أن تركيز FE يتجاوز المعايير المقبولة للعناصر التالية: الحديد و المنغنيز والرصاص في بعض نقط الانتقاء على مستوى واد العبيد وواد سرو.

**الكلمات المفتاحية:** واد العبيد، واد احنصال، واد سرو، النوعية، المعلمات الفيزيائية والكيميائية، كمياء المياه، المعادن الثقيلة، التلوث المعدني.

## *Table des matières*

|  |      |
|--|------|
| <i>Fiche présentative de la thèse</i> .....                          | i    |
| <i>Dédicace</i> .....  | iv   |
| Remerciements .....  | v    |
| <i>Résumé</i> .....  | vii  |
| <i>Abstract</i> .....  | viii |
| ملخص .....   | ix   |
| <i>Liste des figures</i> .....                                       | xv   |
| <i>Liste des tableaux</i> .....                                      | xvi  |
| <i>Liste des annexes</i> .....                                       | xvii |
| <i>Liste des abréviations</i> .....                                  | xvii |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE .....  | 1    |
| PARTIE I : .....   | 4    |
| SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....                                       | 4    |
| CHAPITRE I : ÉTAT DES EAUX DE SURFACE AU MAROC .....                 | 5    |
| 1. Le contexte hydrologique des ressources en eau au Maroc .....     | 5    |
| 2. Eau de surface .....  | 8    |
| 3. Impact de la sécheresse sur la ressource en eau .....             | 9    |
| 4. Législation au Maroc sur l'eau .....                              | 9    |
| 5. Apports de la loi sur l'eau .....                                 | 10   |
| 6. Analyses de contrôle .....  | 11   |
| 7. Conclusion .....  | 11   |
| CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LA QUALITÉ DES EAUX .....              | 12   |
| I. Évaluation de la qualité des eaux de surface .....                | 12   |
| 1. Température (T°) .....  | 12   |
| 2. Potentiel d'Hydrogène (pH) .....                                  | 13   |
| 3. Oxygène dissous (OD) .....  | 13   |
| 4. Turbidité .....   | 13   |
| 5. Conductivité électrique (CE) .....                                | 13   |
| 6. Dureté totale (TH) .....  | 14   |
| 7. Éléments majeurs .....  | 14   |
| 8. Chlorures (Cl <sup>-</sup> ) .....                                | 14   |
| 9. Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) .....                   | 15   |
| 10. Azote (N <sub>2</sub> ) .....                                    | 15   |
| a. Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) .....                    | 15   |
| b. Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) .....                    | 15   |
| c. Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....                    | 16   |
| II. Pollution des eaux de surface .....                              | 16   |
| 1. Types de pollution .....  | 17   |
| a. Pollution physique .....  | 17   |
| b. Pollution chimique .....  | 17   |
| c. Pollution microbiologique .....                                   | 17   |
| III. Eaux usées .....  | 17   |
| IV. Impact sur l'environnement et la santé humaine .....             | 18   |
| 1. Sur l'environnement .....   | 18   |
| 2. Sur la santé humaine .....  | 18   |
| V. Conclusion .....  | 19   |
| CHAPITRE III : GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES ..... | 20   |
| I. Introduction .....  | 20   |
| II. Qu'est-ce qu'un élément trace métallique ? .....                 | 20   |

|   |  |    |
|---|--|----|
| III.  | Les sources des métaux .....   | 21 |
| 1.  | Origine naturelle des ETM .....  | 21 |
| 2.  | Origine anthropique des ETM .....  | 22 |
| IV.   | Sédiments .....  | 23 |
| a.  | Fraction fine .....  | 23 |
| b.  | Fraction grossière .....   | 24 |
| 1.  | Composition et comportement des sédiments .....                                  | 24 |
| 2.  | Pollution métallique des sédiments .....   | 25 |
| 3.  | Biodisponibilité des éléments trace métalliques dans les sédiments .....         | 25 |
| V.  | Caractéristiques des éléments traces métalliques analysés dans cette étude ..... | 27 |
| 1.  | Fer (Fe) .....   | 27 |
| 2.  | Plomb (Pb) .....   | 27 |
| 3.  | Cuivre (Cu) .....  | 27 |
| 4.  | Zinc (Zn) .....  | 27 |
| 5.  | Chrome (Cr) .....  | 27 |
| 6.  | Nickel (Ni) .....  | 27 |
| 7.  | Manganèse (Mn) .....   | 28 |
| 8.  | Cadmium (Cd) .....   | 29 |
| VI.   | Conclusion .....   | 29 |
| PARTIE II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE, .....            |  | 30 |
| MÉTHODOLOGIE ET TECHNIQUES .....                              |  | 30 |
| UTILISÉES .....   |  | 30 |
| CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET MATÉRIELS ET |  |    |
| MÉTHODES .....  |  | 31 |
| I.  | Introduction .....   | 31 |
| II.   | Présentation du bassin versant Oued El Abid .....                                | 32 |
| 1.  | Localisation géographique .....  | 32 |
| 2.  | Caractéristiques climatiques .....   | 33 |
| a.  | Précipitation .....  | 33 |
| b.  | Température .....  | 33 |
| c.  | Vent .....   | 34 |
| d.  | Humidité et Évaporation .....  | 34 |
| 3.  | Caractéristiques physiographiques .....  | 35 |
| a.  | Géologie .....   | 35 |
| b.  | Structure .....  | 36 |
| c.  | Topographie .....  | 37 |
| d.  | Réseaux hydrographiques .....  | 39 |
| e.  | Occupation du sol et couvert végétal .....                                       | 40 |
| III.  | Pollution dans le bassin versant Oued El Abid : État des lieux .....             | 41 |
| 1.  | Charge polluante de la zone d'étude .....  | 42 |
| a.  | Pollution liquide (Eaux usées) .....   | 42 |
| b.  | Pollution solide .....   | 42 |
| 2.  | Activités économiques (agriculture, tourisme et artisanat) .....                 | 43 |
| IV.   | Présentation du bassin versant de l'Oued Ahançal .....                           | 44 |
| 1.  | Localisation géographique .....  | 44 |
| 2.  | Caractéristiques climatiques .....   | 45 |
| a.  | Précipitations .....   | 45 |
| b.  | Température .....  | 45 |
| c.  | Vent .....   | 45 |
| 3.  | Caractéristiques physio-graphiques .....   | 45 |
| a.  | Géologie .....   | 45 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| b.  | Reliefs, pente et couvert végétal .....  | 46 |
| V.  | Présentation du bassin versant Oued Srou .....   | 46 |
| 1.  | Localisation géographique .....  | 46 |
| 2.  | Caractéristiques climatiques.....  | 47 |
| 3.  | Caractéristiques géologiques.....  | 47 |
| 4.  | Caractéristiques géométriques et topographiques .....  | 48 |
| 5.  | Occupation du sol et couvert végétal .....   | 49 |
| VI.   | Pollution dans le bassin versant Oued Srou : Etat des lieux .....  | 49 |
| 1.  | Activités économiques (agriculture, tourisme et artisanat).....  | 50 |
| VII.  | Matériels et méthodes.....   | 50 |
| 1.  | Méthodologie d'échantillonnage.....  | 50 |
| 2.  | Normes de qualité des eaux de surface adoptées. ....   | 51 |
| VIII.   | Techniques analytiques utilisées .....   | 52 |
| 1.  | Analyses physicochimiques .....  | 53 |
| 2.  | Photomètre à flamme .....  | 54 |
| 3.  | Spectrométrie d'émission atomique à plasma couplé par induction (ICP-AES).....                                     | 55 |
| 4.  | Techniques statistiques.....   | 55 |
| a.  | Analyse en Composantes Principales .....   | 55 |
| b.  | Classification hiérarchique : les dendrogrammes .....  | 56 |
| 5.  | Spectroscopie de fluorescence X (XRF) .....  | 56 |
| 6.  | Diffraction des rayons X (DRX) .....   | 56 |
| 7.  | Spectrométrie d'émission atomique à plasma couplé par induction (ICP-AES).....                                     | 57 |
| IX.   | Conclusion.....  | 57 |
| PARTIE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS .....   |  | 58 |
| CHAPITRE V : EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT<br>OUED EL ABID .....  |  | 59 |
| I.  | Description des paramètres physicochimiques.....   | 59 |
| 1.  | Acquisition des données.....   | 59 |
| 2.  | Évolution spatiale des paramètres physicochimiques des eaux superficielles du bassin<br>Oued El Abid.....          | 60 |
| 3.  | Évolution spatiale des éléments traces métalliques des eaux superficielles du bassin<br>versant Oued El Abid ..... | 66 |
| 4.  | Niveau de contamination des eaux de l'Oued El Abid .....   | 66 |
| 5.  | Identification du faciès chimique .....  | 67 |
| II.   | Étude des données par Analyse ACP .....  | 68 |
| 1.  | Matrice de corrélations (coefficient de Pearson r) .....   | 69 |
| 2.  | Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) : la similarité spatiale et le groupement<br>des sites .....          | 70 |
| 3.  | Analyse factorielle.....   | 72 |
| III.  | Aptitude des eaux à l'irrigation .....   | 75 |
| 1.  | Effet de la salinisation .....   | 75 |
| 2.  | Effet du Na <sup>+</sup> .....   | 76 |
| 3.  | Indice de Kelley .....   | 77 |
| 4.  | L'effet de magnésium.....  | 78 |
| 5.  | Classification des eaux par la méthode de RICHARDS .....   | 78 |
| IV.   | Conclusion.....  | 79 |
| CHAPITRE VI : EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT<br>OUED AHANÇAL ..... |  | 81 |
| I.  | Description des paramètres physicochimiques.....   | 81 |
| 1.  | Acquisition des données.....   | 81 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 2.  | Évolution spatiale des paramètres physicochimiques des eaux superficielles du bassin de l'Oued Ahançal .....    | 81         |
| 3.  | Évolution spatiale des éléments traces métalliques des eaux superficielles du bassin versant Oued Ahançal ..... | 86         |
| 4.  | Niveau de contamination des eaux du bassin versant Oued Ahançal .....   | 87         |
| 5.  | Identification du faciès chimique .....   | 87         |
| II.   | Analyse statistique par ACP.....  | 88         |
| 1.  | Matrice de corrélation de Pearson (r) .....   | 88         |
| 2.  | Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) : la similarité spatiale et le groupement des sites .....          | 90         |
| 3.  | Analyse factorielle.....  | 91         |
| III.  | Aptitude des eaux à l'irrigation .....  | 93         |
| 1.  | Effet de la salinisation .....  | 93         |
| 2.  | Effet de Na <sup>+</sup> .....  | 93         |
| 3.  | Indice de Kelley .....  | 94         |
| 4.  | Effet de Mg <sup>2+</sup> .....   | 94         |
| 5.  | Classification des eaux par la méthode de RICHARDS .....  | 94         |
| IV.   | Conclusion.....   | 95         |
| <b>CHAPITRE VII : EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT OUED SROU .....</b> |   | <b>96</b>  |
| I.  | Description des paramètres physico-chimiques .....  | 96         |
| 1.  | Acquisition des données.....  | 96         |
| 2.  | Evolution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux superficielles du bassin Oued Srou.....            | 97         |
| 3.  | Evolution spatiale des éléments traces métalliques des eaux superficielles du bassin versant Oued Srou .....    | 103        |
| 4.  | Niveau de contamination des eaux du bassin versant Oued Srou .....  | 103        |
| 5.  | Identification du faciès chimiques.....   | 104        |
| II.   | Etude des données par Analyse en Composantes Principales (ACP). .....   | 105        |
| 1.  | Matrice de corrélations (coefficient de Pearson r) .....  | 105        |
| 2.  | La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) : la similarité spatiale et le groupement des sites .....       | 107        |
| 3.  | Analyse factorielle.....  | 109        |
| III.  | Aptitude des eaux à l'irrigation .....  | 111        |
| 1.  | Effet de la salinisation .....  | 111        |
| 2.  | Effet de Na <sup>+</sup> .....  | 111        |
| 3.  | Indice de Kelley .....  | 112        |
| 4.  | Effet de magnésium (MR).....  | 112        |
| 5.  | Classification des eaux par la méthode de RICHARDS .....  | 112        |
| IV.   | Conclusion.....   | 114        |
| <b>CHAPITRE VIII : HYDROCHIMIE DES EAUX DE SURFACE.....</b>                               |   | <b>115</b> |
| I.  | Introduction .....  | 115        |
| 1.  | Hydrochimie : définition .....  | 115        |
| 2.  | Apports et origines des sels .....  | 115        |
| a.  | Origines géologiques .....  | 115        |
| b.  | Les roches carbonatées.....   | 116        |
| c.  | Les roches évaporitiques .....  | 116        |
| d.  | Les roches magmatiques et métamorphiques.....   | 116        |
| 3.  | Etat des lieux sur les éléments majeurs (sels). .....   | 116        |
| a.  | Ca <sup>2+</sup> et Mg <sup>2+</sup> .....  | 116        |
| b.  | K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> et Cl <sup>-</sup> .....   | 117        |

|   |     |
|---|-----|
| c. $\text{SO}_4^{2-}$ .....   | 117 |
| II. Acquisition de la minéralisation .....  | 118 |
| 1. Diagrammes binaires .....  | 118 |
| 2. Indices de saturation des minéraux .....                                       | 126 |
| A. Indice de saturation de l'Oued Ahançal : .....                                 | 127 |
| B. Indice de saturation de l'Oued Srou : .....                                    | 127 |
| III. Détermination des phases minérales par Diffractions des rayons X .....       | 128 |
| 1. Les carbonates .....   | 128 |
| 2. Les Argiles .....  | 128 |
| 3. Les grés rouges .....  | 128 |
| 4. Les marnes .....   | 128 |
| 5. Les basaltes .....   | 129 |
| IV. Conclusion .....  | 131 |
| CHAPITRE IX : EVALUATION DE LA CONTAMINATION METALLIQUE DES<br>SEDIMENTS .....    | 133 |
| I. Introduction .....   | 133 |
| II. Variations spatiales des éléments traces métalliques dans les sédiments ..... | 134 |
| III. Evaluation de l'intensité de la contamination métallique. ....               | 135 |
| 1. Facteur d'Enrichissement (EF) .....  | 135 |
| 2. Facteur de contamination (CF) .....  | 136 |
| 3. Indice de géo-accumulation (Igeo) .....  | 137 |
| IV. Etudes comparatives .....   | 138 |
| V. Conclusion .....   | 139 |
| CONCLUSION GENERALE ET .....  | 140 |
| PERSPECTIVES .....  | 140 |
| Référence bibliographique: .....  | 143 |

## *Liste des figures*

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle au Maroc.....   | 6  |
| Figure 2: Potentiel et état d'utilisation des ressources en eau au Maroc.....   | 7  |
| Figure 3: Cycle de l'azote .....  | 16 |
| Figure 4: Origines des ETM dans le sol (Chapman 1998).....  | 23 |
| Figure 5: Localisation des bassins versants étudiés au sein du bassin versant Oum Er Rbia ..                              | 31 |
| Figure 6: Localisation du bassin versant Oued El Abid.....  | 32 |
| Figure 7: Évaporation annuelle au niveau de la station de Tillouguite (en ml) entre la période de 1990-2016.....          | 34 |
| Figure 8: Carte géologique du bassin versant d'Oued El Abid (Source: carte de Rabat et Ouarzazate 1:500 000) .....        | 36 |
| Figure 9: Reliefs du bassin versant Oued El Abid .....  | 38 |
| Figure 10: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued El Abid .....  | 40 |
| Figure 11: Occupation du sol au niveau du bassin versant .....  | 41 |
| Figure 12: Évolution de la charge polluante globale au sein de la zone d'étude entre 1994 - 2024.....                     | 43 |
| Figure 13: Localisation du bassin versant Oued Ahançal .....  | 44 |
| Figure 14: Localisation du bassin versant Oued Srou.....  | 46 |
| Figure 15: Esquisse géologique du bassin versant Oued Srou.....   | 48 |
| Figure 16: Reliefs du bassin versant .....  | 49 |
| Figure 17: Points de prélèvements choisis pour suivre la qualité des eaux .....   | 59 |
| Figure 18: Représentation de l'évolution spatiale de T° et pH .....   | 60 |
| Figure 19: Représentation de l'évolution spatiale de la conductivité électrique et la dureté totale.....                  | 61 |
| Figure 20: Représentation de l'évolution spatiale de la turbidité et OD .....   | 62 |
| Figure 21: Représentation de l'évolution spatiale du Calcium et du Magnésium .....  | 63 |
| Figure 22: Représentation de l'évolution spatiale du Sodium et du potassium .....   | 64 |
| Figure 23: Représentation de l'évolution spatiale des sulfates et des Chlorures .....                                     | 64 |
| Figure 24: Évolution spatiale des HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et de l'Ammonium.....                                     | 65 |
| Figure 25: Évolution spatiale des concentrations en NO <sub>2</sub> et NO <sub>3</sub> .....                              | 66 |
| Figure 26: Diagramme de Piper des stations échantillonnées.....   | 68 |
| Figure 27: Dendrogramme du regroupement des stations échantillonnées de l'Oued El Abid.....                               | 71 |
| Figure 28: Scree plot déterminant le nombre de facteurs ou PCs à considérer.....  | 73 |
| Figure 29: Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation .....   | 79 |
| Figure 30: Points de prélèvements choisis pour suivre la qualité des eaux .....   | 81 |
| Figure 31: Représentation de l'évolution spatiale de T° et pH .....   | 82 |
| Figure 32: Représentation de l'évolution spatiale de CE et TH.....  | 83 |
| Figure 33: Représentation de l'évolution spatiale de la turbidité et OD.....  | 83 |
| Figure 34: Représentation de l'évolution spatiale de Ca <sup>2+</sup> et Mg <sup>2+</sup> .....                           | 84 |
| Figure 35: Représentation de l'évolution spatiale du Sodium et du potassium .....   | 84 |
| Figure 36: Représentation de l'évolution spatiale de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> et Cl <sup>-</sup> .....               | 85 |
| Figure 37: Représentation de l'évolution spatiale des NO <sub>3</sub> et NO <sub>2</sub> .....                            | 85 |
| Figure 38: Représentation de l'évolution spatiale des HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ..... | 86 |
| Figure 39: Diagramme de Piper des stations échantillonnées.....   | 88 |
| Figure 40: Dendrogramme du regroupement des stations échantillonnées de l'Oued Ahançal.....                               | 91 |
| Figure 41: Graphique des valeurs propres.....   | 92 |
| Figure 42: Diagramme de Richards de classification des eaux pour l'irrigation .....                                       | 95 |
| Figure 43: Points de prélèvements choisis pour suivre la qualité des eaux .....   | 96 |
| Figure 44: Représentation de l'évolution spatiale de la température et le pH .....  | 97 |
| Figure 45: Représentation de l'évolution spatiale de la température et le pH .....  | 98 |



|  |     |
|--|-----|
| Figure 46: Représentation de l'évolution spatiale de la Turbidité et l'Oxygène dissous.....                              | 99  |
| Figure 47: Représentation de l'évolution spatiale du Calcium et le Magnésium.....  | 100 |
| Figure 48: Représentation de l'évolution spatiale des Carbonates et les Bicarbonates .....                               | 100 |
| Figure 49: Représentation de l'évolution spatiale du Sodium et le Potassium .....  | 101 |
| Figure 50: Représentation de l'évolution spatiale du Chlorures et les Sulfates.....                                      | 102 |
| Figure 51: Représentation de l'évolution spatiale des nitrates et des nitrites .....                                     | 103 |
| Figure 52 : Diagramme de Piper des stations échantillonnées.....   | 105 |
| Figure 53: Dendrogramme du regroupement des stations échantillonnées du bassin versant Oued Srou.....                    | 108 |
| Figure 54: Graphique des valeurs propres.....  | 109 |
| Figure 55: Diagramme de Richards de classification des eaux pour l'irrigation.....                                       | 113 |
| Figure 56: Relation entre les teneurs en Cl et les teneurs en Na <sup>+</sup> des eaux.....                              | 120 |
| Figure 57: Relation entre les teneurs en HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et les teneurs en Ca <sup>2+</sup> des eaux.....  | 122 |
| Figure 58: Relation entre les teneurs en HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et les teneurs en Mg <sup>2+</sup> des eaux ..... | 123 |
| Figure 59: Relation entre les teneurs en SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> et les teneurs en Ca <sup>2+</sup> des eaux.....  | 124 |
| Figure 60: Relation entre les teneurs en SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> et les teneurs en Mg <sup>2+</sup> des eaux ..... | 125 |
| Figure 61: Relation entre les teneurs en Mg <sup>2+</sup> et les teneurs en Ca <sup>2+</sup> des eaux.....               | 126 |
| Figure 62: Spectres de diffraction de rayons X d'une roche carbonatée du bassin versant Oued Ahançal.....                | 129 |
| Figure 63: Spectres de diffraction de rayons X d'une argile du bassin versant Oued Srou...                               | 129 |
| Figure 64: Spectres de diffraction de rayons X d'un grès rouge du bassin versant Oued El Abid.....                       | 130 |
| Figure 65: Spectres de diffraction de rayons X d'une roche de marnes du bassin versant Oued El Abid .....                | 130 |

## ***Liste des tableaux***

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1: Exemples des teneurs du fond géochimique naturel observées dans la croûte continentale supérieure (UCC), la Rade de Toulon et l'étang de Berre (France). ..... | 22 |
| Tableau 2: Normes marocaine (2002) et de l'OMS (2011) de qualité des eaux de surface....  | 52 |
| Tableau 3: Teneurs maximales en ETM recommandées par l'OMS (2011) pour les eaux de surface. ....  | 52 |
| Tableau 4: Méthodes et matériels utilisés pour les analyses physicochimiques des eaux échantillonnées. ....   | 54 |
| Tableau 5: Statistiques descriptives des indices de contamination par les métaux des eaux de l'Oued El Abid. ....   | 67 |
| Tableau 6: Matrice de corrélation des différents paramètres physicochimiques. ....  | 69 |
| Tableau 7: Liaison Variables-Facteurs.....  | 74 |
| Tableau 8: Classification de la salinité des eaux (OMS, 2008) .....   | 76 |
| Tableau 9: Valeurs des indices calculés SAR, KI, et MH.....   | 76 |
| Tableau 10: Classification des eaux par niveau d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R (Durand, 1982) .....   | 77 |
| Tableau 11: Concentration des éléments traces métalliques .....   | 86 |
| Tableau 12: Valeurs des min, max, et moyenne de l'indice de contamination dans les eaux du bassin versant .....   | 87 |
| Tableau 13: Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques analysés .....   | 90 |
| Tableau 14: Liaison Variables-Facteurs.....   | 92 |
| Tableau 15: Valeurs des indices calculés SAR, KI, et MH.....  | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 16: Valeurs des min, max, et moyenne de l'indice de contamination dans les eaux du bassin versant .....  | 104 |
| Tableau 17: Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques.....  | 107 |
| Tableau 18: Liaison Variables-Facteurs.....  | 110 |
| Tableau 19: Valeurs des indices calculés SAR, KI, et MH.....   | 112 |
| Tableau 20: Concentrations des éléments métalliques dans la croûte continentale supérieure. ....   | 135 |
| Tableau 21: Echelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement facteur (FE), d'après Sutherland (2000) .....                      | 136 |
| Tableau 22: Echelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs du facteur de contamination (FC), d'après Hakanson (1980) .....                                | 137 |
| Tableau 23: Echelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs de l'indice de géo-accumulation (Igeo) d'après Muller (1969) .....                             | 138 |
| Tableau 24: Etude comparative entre les concentrations métalliques des sédiments de la présente étude et quelques rivières du Maroc et la croûte continentale supérieure (UCC).... | 139 |

### *Liste des annexes*

|                  |     |
|------------------|-----|
| Annexe 1 : ..... | 155 |
| Annexe 2 : ..... | 158 |
| Annexe 3 : ..... | 159 |
| Annexe 4 : ..... | 161 |

### *Liste des abréviations*

|                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| <b>T</b>              | : température                  |
| <b>pH</b>             | : Potentiel d'hydrogène        |
| <b>CE</b>             | : Conductivité électrique      |
| <b>OD</b>             | : Oxygène dissous              |
| <b>NTU</b>            | : Néphelométric Turbidity Unit |
| <b>TH</b>             | : Titre hydrométrique          |
| <b>Ca</b>             | : Calcium                      |
| <b>Mg</b>             | : Magnésium                    |
| <b>Cl</b>             | : Chlorure                     |
| <b>K</b>              | : Potassium                    |
| <b>Na</b>             | : Sodium                       |
| <b>SO<sub>4</sub></b> | : Sulfates                     |
| <b>NO<sub>2</sub></b> | : Nitrites                     |
| <b>NO<sub>3</sub></b> | : Nitrates                     |
| <b>NH<sub>4</sub></b> | : Ammonium                     |
| <b>Al</b>             | : Aluminium                    |
| <b>Fe</b>             | : Fer                          |
| <b>Pb</b>             | : Plomb                        |
| <b>Cu</b>             | : cuivre                       |
| <b>Zn</b>             | : Zinc                         |
| <b>Ni</b>             | : Nickel                       |
| <b>Cr</b>             | : Chrome                       |

|                |   |
|----------------|---|
| <b>Mn</b>      | : Manganèse   |
| <b>Cd</b>      | : cadmium   |
| <b>IS</b>      | : Indice de saturation                                      |
| <b>OMS</b>     | : Organisation Mondiale de la Santé                         |
| <b>DRX</b>     | : Diffraction des Rayons- X                                 |
| <b>ETM</b>     | : Élément Trace Métalique                                   |
| <b>FRX</b>     | : Fluorescence des rayons X                                 |
| <b>ICP-AES</b> | : Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry |
| <b>Igeo</b>    | : Indice de géoaccumulation                                 |
| <b>UCC</b>     | : Upper Continental Crust                                   |
| <b>r</b>       | : Coefficient de corrélation                                |
| <b>ACP</b>     | : Analyse en Composantes Principales                        |
| <b>AFNOR</b>   | : Association française de normalisation                    |
| <b>SAR</b>     | : Ratio d'Adsorption du Sodium                              |
| <b>PCI</b>     | : Indice de Kelly   |
| <b>IC</b>      | : Indice de contamination                                   |
| <b>MR</b>      | : Magnesium risque  |
| <b>EF</b>      | : Facteur d'Enrichissement                                  |
| <b>CF</b>      | : Facteur de contamination                                  |

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

L'eau est une ressource naturelle, indispensable à la vie sur terre. Elle constitue au premier plan un grand défi du XXI<sup>e</sup> siècle au même titre que les sols cultivables et l'énergie. Cette richesse est malheureusement soumise à des pressions qualitatives et quantitatives diverses en termes sanitaires, environnementaux, socio-économiques, financiers, politiques et géopolitiques (Salloum, 2013). En raison de l'augmentation de la population humaine, les besoins en eau ne cessent d'augmenter. En effet, les activités humaines incontrôlées, les rejets massifs d'effluents industriels, l'utilisation excessive des produits agricoles et les rejets urbains perturbent les milieux hydriques provoquant ainsi la diminution de la quantité des eaux et la dégradation des écosystèmes aquatiques (Li et al., 2017 ; Salloum, 2013). Cette situation est aggravée par les facteurs naturels, tels que la sécheresse ou les contraintes géologiques dont l'effet est incontestable sur la disponibilité à la fois des eaux de surface et des nappes souterraines (Salloum, 2013). Il est donc nécessaire de protéger d'une manière préventive les eaux superficielles et souterraines contre la pollution et de garantir une eau d'une qualité irréprochable afin d'assurer sa durabilité aux générations futures (Hilal, 2017).

Au Maroc, l'histoire de la gestion des ressources en eau disponible n'est pas récente, du fait que le contexte climatique et hydrologique du pays est extrêmement fragile marqué par une forte disparité de leur répartition géographique et des régimes hydrologiques très irréguliers à l'échelle saisonnière, annuelle ou interannuelle (Jellali, 1997). Depuis longtemps, l'impact de la sécheresse, des inondations et la pression d'une demande croissante sont autant des facteurs qui imposent que les stratégies de développement et de gestion des ressources en eau soient planifiées. Elles ont abouti depuis les années 1970 au lancement des premières études de planification des ressources en eau (Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau, 2016).

Afin d'agir en vue de protéger la ressource contre la dégradation et par la suite la dégradation de l'écosystème et la biodiversité, le Maroc a mis en œuvre une stratégie nationale, à l'horizon 2030, pour une gestion intégrée des ressources en eau. Elle vise essentiellement la gestion de l'offre et de la demande en eau, la préservation des milieux naturels, la réduction des impacts négatifs des phénomènes extrêmes, les réformes réglementaires et le renforcement des moyens et des compétences (Bouaicha et Benabdelfadel, 2010).

Le bassin versant l'Oum Er Rbia, a été considéré depuis longtemps comme l'un des grands châteaux du Maroc avec une ressource intarissable qui alimente les grands barrages du

pays (El Massira et El Hansali), irrigue les plaines agricoles les plus reproductives au pays et approvisionne d'autres régions en eau potable et en eau d'irrigation.

Les ressources en eau de ce bassin versant, zone d'étude, n'échappent pas au fléau de la pollution. Malheureusement selon les dernières campagnes réalisées par l'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Er Rbia (ABHOER), la qualité des eaux du bassin a commencé de changer ces dernières années, à la suite d'une succession de plusieurs facteurs perturbateurs. Les plus importants sont :

- La pollution domestique de provenance des agglomérations riveraines pour les affluents et les villes et les unités industrielles pour le cours d'eau principal (cas de la ville de Khenifra) ;
- L'effet des changements climatiques qui a conduit à une perturbation des quantités apportées (apparition des inondations catastrophiques et affaiblissement des débits permanents apportés par l'Oued (Cherifi and Loudiki, 1999a).
- La géologie des terrains traversés par les cours d'eau peut influencer la qualité de l'eau.

L'étude a été portée sur la partie haute Oum Er Rbia. Trois bassins versants constituent la zone d'étude et qui sont le bassin versant El Abid, le bassin versant Ahançal et le bassin versant Srou. Le choix de ces bassins versants réside dans le fait que ces bassins partagent presque le même contexte géologique les mêmes conditions climatiques et les mêmes conditions sociales de la population mais se divergent en ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux de ces oueds.

Par ailleurs l'objectif de notre étude sera l'évaluation de la qualité des eaux des trois oueds: Oued El Abid, Oued Ahançal et Oued Srou à travers trois composantes ; l'eau, le sédiment et la roche des affleurements traversés par les trois rivières. Dans ce contexte, l'étude consiste premièrement à évaluer la distribution spatiale de la qualité des eaux et d'identifier de possibles contaminations par les ETM. Les résultats sont soumis à une analyse statistique afin de comprendre le comportement et le fonctionnement des eaux de la zone d'étude, deuxièmement à déterminer les processus responsables de la minéralisation et la solubilité des éléments chimiques dans les eaux des rivières étudiées, et enfin, à évaluer la pollution métallique des eaux et des sédiments à travers le suivi spatial de huit éléments traces métalliques Fe, Pb, Cu, Zn, Cr, et Mn en calculant plusieurs indices de contamination.

Le manuscrit s'articule autour de trois parties :

La première partie est une synthèse bibliographique comprenant trois chapitres. *Le premier chapitre* s'intitule « Etat des eaux de surface au Maroc » qui fait un rappel sur l'état des ressources en eaux de surface au Maroc ainsi que l'apport de la législation sur l'eau. *Le second*

*chapitre* « Généralités sur la qualité des eaux » comprend une présentation bibliographique des différents paramètres physico-chimiques de l'eau, l'origine de la pollution et les types des polluants. *Le troisième chapitre* « Généralité sur les éléments traces métalliques » a constitué un rappel sur les éléments traces métalliques, leurs propriétés fondamentales, leurs sources naturelles et anthropiques et leur toxicité.

**La deuxième partie** comprend *un chapitre intitulé* « Présentation de la zone d'étude, méthodologie et techniques utilisées » qui évoque une description détaillée des bassins versants El Abid, Ahançal et Srou ainsi que l'intégralité des méthodes et techniques d'échantillonnage et d'analyse.

**La troisième partie** s'intéresse aux résultats et interprétations et comprend trois chapitres sur les oueds étudiées, *un chapitre* aborde les mécanismes et les processus de la minéralisation des trois oueds et *un dernier chapitre* sur l'évaluation de la contamination métallique des sédiments des trois Oueds.

Enfin une conclusion générale et des perspectives permettraient de formuler des recommandations adéquates aux problèmes posés clôture ce manuscrit.



**PARTIE I :**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**



Chapitre I : État des eaux de surface au Maroc

Chapitre II : Généralités sur la qualité des eaux

Chapitre III : Généralités sur les éléments traces métalliques

## **CHAPITRE I : ÉTAT DES EAUX DE SURFACE AU MAROC**

L'eau est devenue un enjeu stratégique mondial dont la gestion doit impérativement s'intégrer dans une perspective politique de développement durable. Certains affirment en effet qu'elle sera, au troisième millénaire, un enjeu de guerres comme le pétrole l'a été et l'est encore aujourd'hui. Des investissements considérables ont été consacrés à la construction de barrages. Cependant, ces eaux de surface sont vulnérables face aux diverses pollutions et sont souvent de qualité médiocre. Elles peuvent contenir des quantités non négligeables en matières organiques naturelles telles que les substances humiques, mais aussi des composés organiques issus de divers rejets polluants ou de pratiques agricoles intensives.

La protection préventive des eaux superficielles contre la pollution et la garantie d'une eau d'une qualité irréprochable constituent des enjeux majeurs en vue d'assurer aux générations futures un approvisionnement durable en eau potable. Elles constituent aussi un véritable projet de territoire et impliquent généralement plusieurs acteurs: collectivités, agriculteurs, industriels, services de l'état, gestionnaires de réseaux de transport...).

### **1. Le contexte hydrologique des ressources en eau au Maroc**

Soumis aux influences méditerranéennes au Nord, océaniques à l'Ouest, continentales, puis sahariennes de plus en plus vers l'Est et le Sud, le climat est principalement caractérisé par un été chaud et sec où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte et un hiver frais, parfois froid. La présence d'une chaîne de montagnes, conjuguée à des caractéristiques géologiques et géomorphologiques très diversifiées font que les ressources en eaux superficielles et souterraines sont réparties entre de nombreux systèmes hydrologiques individualisés et d'aire géographique limitée qui drainent l'essentiel des potentialités hydriques du pays (Riad, 2003).

Les précipitations sont concentrées pendant la saison humide qui totalise un maximum d'une centaine de jours de pluie par an. Des pluies diluviennes localisées peuvent dépasser 100 mm en moins d'une journée ; de même qu'une bonne partie des précipitations moyennes peuvent être concentrées en quelques jours de l'année.

Le climat varie du subhumide au Nord, semi-aride à aride au centre, à saharien au Sud, accompagné par des périodes de sécheresse de plus en plus répétitives causant de sérieux problèmes socio-économiques. Les régimes de précipitation restent dominés par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les hauteurs moyennes annuelles des précipitations se chiffrent parfois à plus de 1000 mm dans les zones montagneuses du Nord en bordure de la Méditerranée (Bassin du Rif, Tangérois et côtes méditerranéennes Ouest). Elles décroissent



progressivement en allant vers l'Est et le Sud à moins de 300 mm dans les bassins de la Moulouya, du Tensift, du Souss-Massa, des zones Sud atlasiques, et de la zone Saharienne. Des précipitations neigeuses sont également observées sur les hauts sommets des montagnes de l'Atlas et du Rif. En effet, la pluviométrie se répartit comme suit à l'échelle du Maroc (Figure 1).

- supérieure à 800 mm dans la zone arrosée du nord-ouest (zone 1) ;
- de 600 à 800 mm dans la zone nord et la zone atlasique (zone 2) ;
- de 400 à 600 mm dans la zone Sebou, Bouregreg et Oum Er-Rebia (zone 3) ;
- de 200 à 400 mm dans le Tensift, Souss Massa et l'Oriental (zone 4) ;
- inférieure à 200 mm dans les zones sud atlasiques et le Sahara (zone 5).

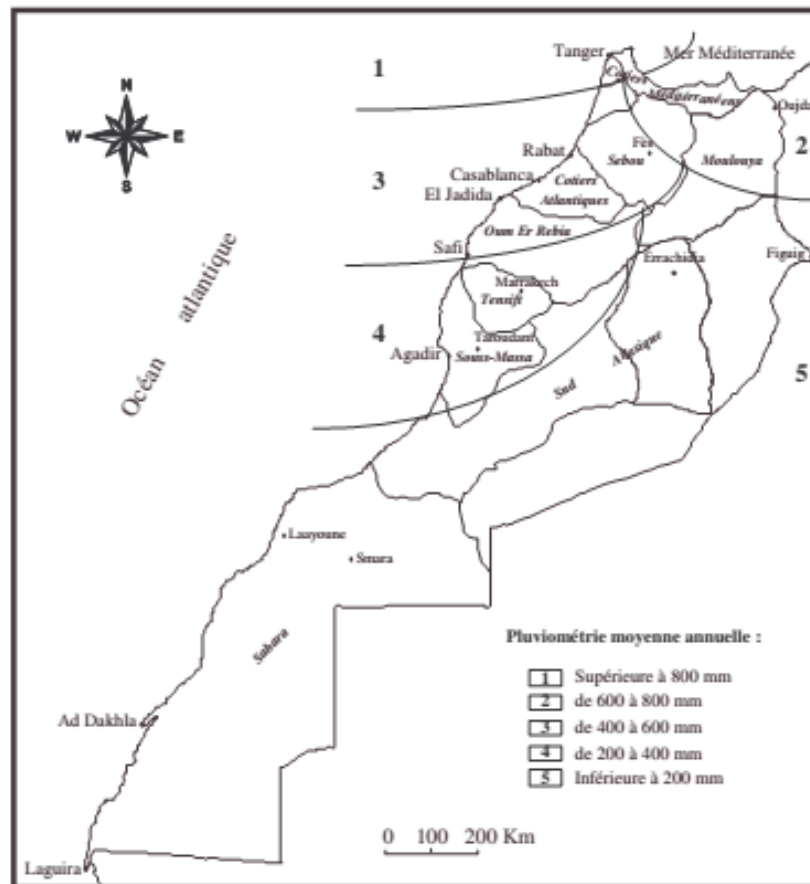
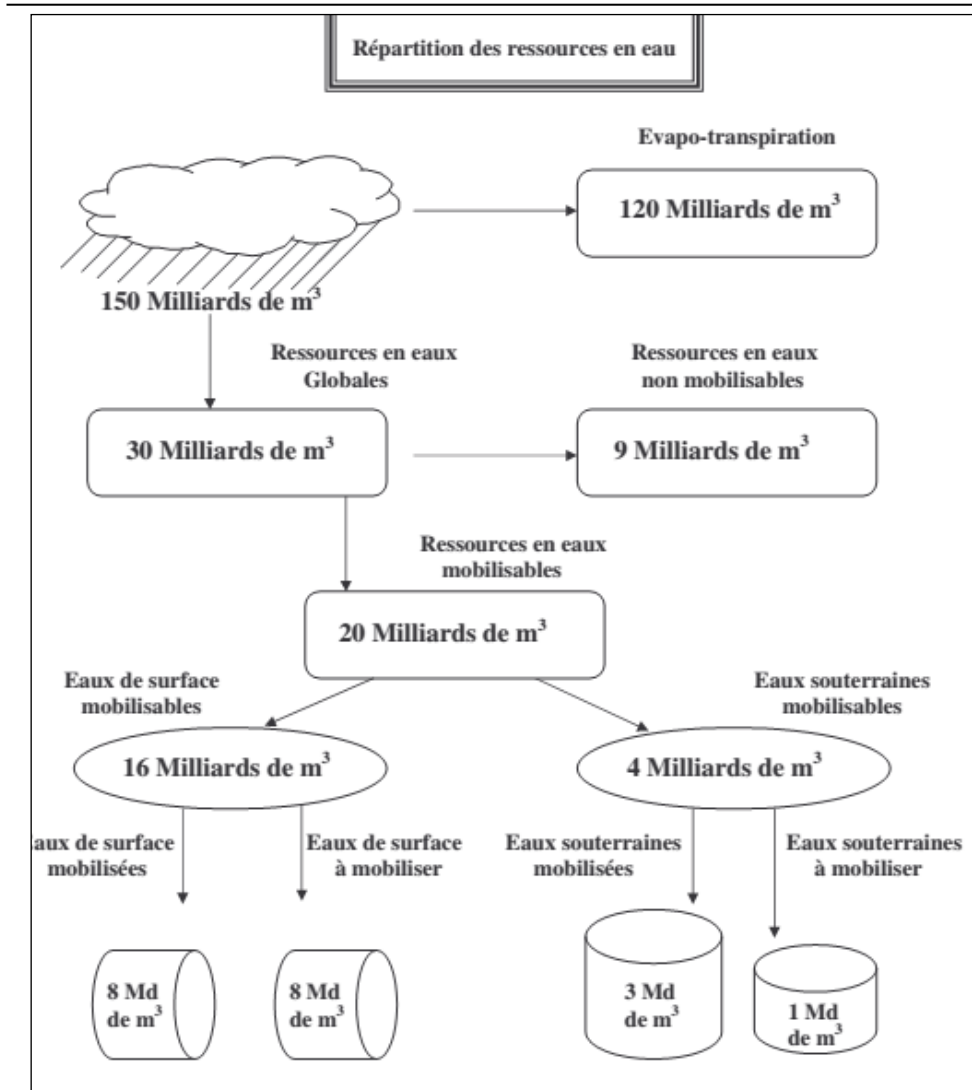


Figure 1: Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle au Maroc

Les précipitations totales sur l'ensemble du territoire sont évaluées en année moyenne à près de 150 milliards de m<sup>3</sup> sur lesquels près de 29 à 30 milliards de m<sup>3</sup> (environ 20%) sont considérés comme pluies efficaces réparties en eaux de ruissellement (20 milliards de m<sup>3</sup>) et en eaux infiltrées alimentant les nappes (9 milliards de m<sup>3</sup>) (Figure 2). Suite à l'accroissement démographique, le volume mobilisable par habitant qui était de 833 m<sup>3</sup> par an en 1994 se réduirait à moins de 500 m<sup>3</sup> en l'an 2020, ce qui place le Maroc dans la catégorie des pays pauvres en eau (fort stress hydrique).



**Figure 2: Potentiel et état d'utilisation des ressources en eau au Maroc**

Les précipitations moyennes sont supérieures à 500 mm dans la région Nord-Ouest et dépassent 1500 mm dans certains hauts reliefs en bordure de la Méditerranée. Elles décroissent progressivement en allant vers l'Est et le Sud pour ne pas dépasser 200 mm dans l'Oriental, 100 mm dans les zones présahariennes et sahariennes. Des précipitations neigeuses sont également observées sur les hauts sommets des montagnes de l'Atlas et du Rif.

Les précipitations totales sur l'ensemble du territoire sont évaluées en année moyenne à près de 150 milliards de m<sup>3</sup> sur lesquels près de 30 milliards de m<sup>3</sup> seulement constituent l'écoulement efficace total en eau superficielle et souterraine (Ministère de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement, 2001, Ben Aakame, 2015).

Les apports pluviométriques sont aussi caractérisés par une forte irrégularité de leur distribution dans l'espace, diminuant fortement du nord au sud et de l'ouest à l'est. Ces apports sont inégalement répartis sur les différentes régions du pays. Ainsi 15% de la superficie totale reçoit plus de 50 % des apports pluviométriques. Les régions du Nord et le bassin de Sebou,

bien que n'occupant que 8,5% de superficie totale, reçoivent plus de 29,3 % des précipitations globales et participent pour 51,1 % des écoulements, alors que le bassin de la Moulouya, situé à l'Est et occupant 8,1 % de cette superficie, ne reçoit que 9,4 % de la pluviométrie globale et ne participe que pour 8,7 % des écoulements moyens.

## **2. Eau de surface**

Les ressources en eau de surface sont marquées par une forte disparité de leur répartition géographique et des régimes hydrologiques très irréguliers à l'échelle saisonnière, annuelle ou interannuelle. Ces régimes hydrologiques sont marqués par des étiages prononcés avec souvent des débits nuls l'été et des crues fortes et rapides en saison humide. Ces crues favorisent l'érosion des sols à l'amont des bassins versants et provoquent des inondations à l'aval. Par ailleurs, l'occurrence d'épisodes secs de durées plus ou moins longues est également une donnée structurelle essentielle des régimes hydrologiques de la production agricole en mesure de contribuer à la satisfaction des besoins nutritionnels d'une population en croissance rapide (Jellali, 1997 ; Riad, 2003).

L'écoulement total en eau de surface est estimé à près de 21 milliards de m<sup>3</sup> dont la moitié environ est concentrée dans les deux bassins du Sebou et de l'Oum Er Rbia. En années de sécheresse sévère, les potentialités en eau de surface sont sujettes à des baisses importantes d'environ 50 à 90%. Les régions de l'oriental, du Tensift, du Souss-Massa et les zones sud-atlasiques sont généralement les plus touchées. Mais les bassins hydrologiques du Nord sont également très sensibles aux sécheresses, d'autant que leurs ressources en eau souterraine sont souvent limitées (Ben Aakame, 2015).

Le potentiel des eaux superficielles se répartit selon les régions, comme suit :

- Bassins rifains du nord, l'ensemble des oueds de cette zone enregistre en moyenne un apport de 4.200 M m<sup>3</sup>/an soit 20 % environ des ressources superficielles du pays ;
- Bassins atlantiques du nord et du centre : ce sont les grands bénéficiaires des ressources en eau produites sur les chaînes montagneuses du Rif et de l'Atlas. Ces bassins renferment 56% des ressources en eaux superficielles du Maroc soit 11.300 M m<sup>3</sup>/an ;
- Bassins de l'Oriental, la région enregistre un apport moyen annuel estimé à 1.650 M m<sup>3</sup>/an ;
- Bassins du Sud Atlantique Ouest, ces bassins totalisent un apport moyen annuel de 780 millions de m<sup>3</sup>/an ;
- Bassins présahariens sud atlasiques et sahariens : Ils couvrent le sud de l'Atlas et sont caractérisés par l'aridité de leur climat présaharien à saharien. La quasi-totalité des apports, estimés à 240 millions de m<sup>3</sup>, est due à des crues rapides et violentes en provenance de l'Atlas.

Selon les dernières évaluations du Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement, les ressources en eau naturelle par habitant à l'échelle du pays se situeraient autour de 720 m<sup>3</sup>/hab/an vers l'horizon 2020. À cette date 14 millions d'habitants, soit 35% de la population totale du pays, disposeraient de moins de 500 m<sup>3</sup>/hab/an. Ces indicateurs montrent que la pénurie chronique d'eau est une donnée structurelle dont il faut tenir compte, à l'avenir, dans les politiques et les stratégies de gestion des ressources en eau (DRPE, 2004 ; Riad, 2003).

### **3. Impact de la sécheresse sur la ressource en eau**

Indépendamment de tout changement climatique, la gestion de l'eau est l'un des grands problèmes qui conditionne l'avenir du Maroc. Le pays devrait être en situation de stress hydrique et devra, au-delà de 2025, se retrouver en situation de pénurie d'eau, car des problèmes importants de qualité se poseront en relation avec l'érosion, la salinisation et la pollution. Les changements climatiques pourraient exacerber les impacts négatifs de la rareté, de la disparité spatio-temporelle et de la forte dégradation qui caractérise les ressources en eau sur le développement socio-économique. Une analyse de l'évolution de la température ainsi que la variabilité temporelle de la pluviométrie, a été faite, ces dernières décennies pour plusieurs stations par la direction de la météorologie nationale (Agoumi, 1999). Elle fait ressortir une élévation de la température moyenne de l'ordre de 2°C ainsi qu'une baisse très importante, d'environ 30% du cumul, des précipitations durant 1978-1994 par rapport à la période 1961-1977. La saison 1994-1995 a été la plus sèche du siècle au Maroc (Hassani, 1998).

L'examen des années de sécheresse vécues par le Maroc durant le vingtième siècle fait ressortir une fréquence plus élevée et une extension spatiale plus importante des sécheresses entre 1982 et 2000 : cinq épisodes de sécheresses au Maroc sur les 11 du siècle passé ont eu lieu en effet durant cette période. Globalement, les apports pluviométriques annuels moyens sur l'ensemble du territoire sont évalués à 150 milliards de m<sup>3</sup>, très inégalement répartis sur les différentes régions du pays. Ainsi 15% de la superficie reçoit plus de 50% des apports pluviométriques. Sur ces apports utilisables, la pluie ne représente que 20%, soit 29 Milliards de m<sup>3</sup>. Si l'on déduit les pertes par évaporation et les écoulements non maîtrisables vers la mer, le potentiel hydrique mobilisable, dans les conditions techniques et économiques actuelles, est estimé à 20 milliards de m<sup>3</sup>, dont 16 milliards à partir des eaux superficielles et 4 milliards en provenance des eaux souterraines (Ben Aakame, 2015).

### **4. Législation au Maroc sur l'eau**

Les nécessités du développement social et économique imposent de recourir à l'aménagement de l'eau pour satisfaire les besoins des populations. Ces besoins sont eux-

mêmes en continuelle croissance, souvent concurrentiels, voire contradictoires, ce qui rend le processus de gestion de l'eau fort complexe et de mise en œuvre difficile.

Pour faire face à cette situation, il est indispensable de disposer notamment d'instruments juridiques efficaces, en vue d'organiser la répartition et le contrôle de l'utilisation des ressources en eau et d'en assurer également la protection et la conservation de tous types de pollution.

Les règles qui régissent le domaine public hydraulique sont de diverses origines. Toutefois, au Maroc, le premier texte se rapportant à l'eau est le dahir du 7 chaabane 1332 (1er juillet 1914) sur le domaine public qui, complété par les dahirs de 1919 et 1925, intègre toutes les eaux, quelle que soit leur forme, au domaine public hydraulique.

## **5. Apports de la loi sur l'eau**

Le développement des ressources en eau doit assurer une disponibilité en eau suffisante en quantité et en qualité au profit de l'ensemble des usages conformément aux aspirations d'un développement économique et social harmonieux. Depuis cette date, les ressources en eau ne peuvent faire l'objet d'une appropriation particulière, à l'exception des eaux sur lesquelles des droits ont été légalement acquis.

La loi sur l'eau vise à mettre en place une politique nationale de l'eau basée sur une vision prospective qui tient compte d'une part de l'évolution des ressources et d'autre part des besoins nationaux en eau. Elle prévoit des dispositions légales visant la rationalisation de l'utilisation de l'eau, la généralisation de l'accès à l'eau, la solidarité interrégionale, la réduction des disparités entre la ville et la campagne dans le cadre de programme dont l'objectif est d'assurer la sécurité hydraulique sur l'ensemble du territoire du Royaume.

Elle contribuera également de manière efficace à créer le cadre adéquat au partenariat entre l'administration et les communes rurales en vue de réduire rapidement les écarts dans l'accès à l'eau potable entre les communes urbaines et rurales. La loi 10-95 a représenté un saut qualitatif important dans la manière d'approcher la ressource hydraulique. Elle est venue rassembler et mettre à jour une série de textes épars datant du protectorat, et aussi introduire des innovations qui énoncent dans plusieurs domaines une volonté politique explicite d'introduire une vision stratégique qui associe des préoccupations de conservation et de gestion rationnelle de la ressource. Cette loi a été révisée en 2015 vers la loi 36-15

À cet égard, la loi sur l'eau constitue la base légale de la politique de l'eau du pays et se fixe, en conséquence, les objectifs suivants :

\* Une planification cohérente et souple de l'utilisation des ressources en eau, tant à l'échelon du bassin hydraulique ;

- \* Une protection et une conservation quantitative et qualitative du domaine public hydraulique dans son ensemble ;
- \* Une mobilisation optimale et une gestion rationnelle de toutes les ressources en eau, en tenant compte des priorités fixées par le Plan National de l'Eau ;
- \* Une protection et une conservation quantitative et qualitative du domaine public hydraulique dans son ensemble ;
- \* Une valorisation des ressources en eau et une rentabilisation des investissements y afférents tout en prenant en considération les droits à l'eau acquis.

Concernant la prévention de la pollution des eaux, la formulation explicite du libellé de l'article 54 interdit "*de rejeter des eaux usées ou des déchets solides dans les oueds à sec, dans les puits, abreuvoirs et lavoirs publics, d'effectuer tout épandage ou enfouissement d'effluents susceptibles de polluer par infiltration les eaux souterraines ou par ruissellement les eaux de surface*".

Concernant les pesticides, un ensemble de textes réglemente cet usage (Yahya, 2017) :

- Loi n° 42-95 du 21 janvier 1997 relative au contrôle et à l'organisation du commerce des produits pesticides à usage agricole ;
- Décret n°2-99-105 du 5 mai 1999 relatif à l'homologation des pesticides à usage agricole ;
- Décret n°2-01-1343 du 17 décembre 2001 instituant la commission des pesticides à usage agricole ;
- Arrêté de 1984 relatif à l'interdiction des pesticides chlorés.

## **6. Analyses de contrôle**

La législation prévoit des analyses de contrôle pour suivre l'évolution de la qualité et des caractéristiques de l'eau. Au Maroc, la qualité des analyses (physicochimiques, bactériologique et radioactive), leur fréquence et le personnel qualifié sont du ressort du Ministère de la Santé, à travers les deux départements d'Hydrologie-Toxicologie et d'Hygiène Alimentaire à l'Institut National d'Hygiène et les laboratoires régionaux d'hygiène du milieu.

## **7. Conclusion**

L'existence de l'être humain et de son environnement dépend de la présence de l'eau. La pollution de cette ressource a attiré l'attention de plusieurs chercheurs, et la lutte contre cette pollution est au centre des discussions et des débats à l'échelle nationale et mondiale. Et pour remédier aux abus irrespectueux des exigences environnementales, le Maroc a mis depuis longtemps des textes réglementaires qui vise à contrôler l'utilisation des ressources hydriques et d'en assurer la protection et sa durabilité.

## **CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LA QUALITÉ DES EAUX**

Au cours de son ruissellement et de son infiltration dans le sol, l'eau au contact des terrains qu'elle rencontre se charge en divers éléments qui vont influencer sur sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol, et vont définir la qualité naturelle de l'eau brute (Berner et Berner, 1987 ; Bricker et Jones, 1995). En conséquence, la qualité des eaux continentales dépend de la concentration d'un certain nombre d'éléments qui y sont présents en solution ou en suspension. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir des matières organiques, des matières dissoutes provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds,...), des particules en suspension et d'autres éléments d'origine anthropique (Touhari, 2015).

L'eau doit être testée donc pour différents paramètres physico-chimiques. La sélection des paramètres pour déterminer la qualité de l'eau dépend du but de l'utilisation de l'eau. En premier temps, les principaux tests physico-chimiques qui sont effectués pour déterminer l'apparence physique de l'eau sont : la température, le pH, la conductivité électrique, la turbidité, la dureté et l'oxygène dissous. En deuxième temps, la qualité de l'eau doit être testée et contrôlée afin d'étudier la teneur en cations et anions (Patil et Deshmukh, 2012). De ce fait, des normes établies par différentes associations déterminent les limites à ne pas dépasser pour que l'eau reste potable.

Dans ce qui suit, nous détaillerons chaque paramètre, en indiquant sa définition, ses origines, et ses effets nocifs.

### **I. Évaluation de la qualité des eaux de surface**

La qualité d'une eau de surface est évaluée en mesurant différents types de paramètres.

#### **1. Température (T°)**

La température est un facteur écologique important pour les milieux aqueux. Elle est liée d'une part, aux variations saisonnières et journalières de la température ambiante et d'autre part, aux rejets des activités anthropiques (eaux de refroidissement). Sa perturbation peut influencer la vie aquatique (pollution thermique). Elle joue un rôle important dans les processus bactériens comme la nitrification et la dénitrification (Leynaud, 1968). La nitrification est optimale pour des températures variant de 28 à 32°C, par contre elle est fortement diminuée pour des températures comprises entre 12 et 15°C. Les températures inférieures à 5°C sont défavorables à ce phénomène. Plusieurs paramètres dépendent de la température de l'eau comme le pH et l'oxygène dissous (Johnson, 2015).

## **2. Potentiel d'Hydrogène (pH)**

C'est un paramètre qui permet la mesure de la concentration des protons  $H^+$  dans un milieu aqueux en déduisant sa nature (acide, basique ou neutre) (Nehme, 2014), ce paramètre joue un rôle très important dans le développement de la vie aquatique. De plus, le pH influe sur le comportement de certains éléments comme les métaux dont il peut diminuer ou augmenter la mise en solution et donc la toxicité en rendant les métaux biodisponibles. Généralement, les valeurs de pH des eaux naturelles sont comprises entre 6 et 8,5 (Derwich, 2010).

Le pH et la température de l'eau sont mesurés grâce à un pH-mètre équipé d'une électrode combinée et d'une sonde pour mesurer aussi la température.

## **3. Oxygène dissous (OD)**

C'est une grandeur importante de l'écologie des milieux étudiés. OD est essentiel pour la respiration des organismes vivants hétérotrophes. La concentration d'oxygène gazeux qui se trouve à l'état dissous dans l'eau est exprimée en mg/l. Le dioxygène dissous provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. OD disponible est limité par la solubilité de l'oxygène (maximum 9 mg/l à 20°C) (Dufour, 1975). Il dépend de nombreux facteurs comme la température de l'eau, le taux des éléments dissous dans le milieu, ainsi que la pression partielle en oxygène dans l'atmosphère (Nehme, 2014). De plus, la présence des quantités importantes de matières organiques dans les eaux, souvent d'origine anthropique, peut provoquer un déficit d'oxygène dissous dans le milieu aquatique. Cela est lié à la consommation de l'oxygène du milieu par les microorganismes qui dégradent des matières organiques (Hull, 2008 ; Diaz, 2001).

La quantité d'oxygène dissous est mesurée grâce à un oxymètre du terrain.

## **4. Turbidité**

C'est un paramètre indiquant la réduction de la limpidité de l'eau. Cela est dû à la présence des matières en suspension (MES) non dissoutes provenant de l'érosion et du lessivage des sols, ou des matières particulières issues de la dégradation de la matière animale et végétale (Hayzoun, 2014). Elle est exprimée généralement en NTU (NéphelométricTurbidity Unit) ou FTU (FormazinTurbidity Unit) (Nehme, 2014).

## **5. Conductivité électrique (CE)**

Elle indique le taux des sels dissous présents dans une eau et par conséquent son pouvoir conducteur. La plupart des eaux naturelles sont caractérisées par une conductivité comprise entre 10 et 1000  $\mu S\ cm^{-1}$  (Chapman, 1996). Des changements notables des valeurs de la conductivité peuvent traduire des apports importants de sels minéraux issus du bassin versant



ou un apport ponctuel important (rejet industriel). CE est mesurée à l'aide d'un conductimètre, et ses valeurs sont exprimées en  $\mu\text{s}/\text{cm}$  avec une marge d'erreur de 2%.

## 6. Dureté totale (TH)

La dureté a un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés (Bernard, 1966). Elle correspond à la somme des concentrations en cations alcalino-terreux. Elle est souvent due aux ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux (De Villers et al., 2005). On distingue la dureté carbonatée ou dureté temporaire qui provient des carbonates et bicarbonates et la dureté non carbonatée ou dureté permanente qui provient des sulfates et chlorures. Une eau très dure présente des inconvénients d'utilisation, tels que la diminution des propriétés détergentes des lessives et savons et les dépôts de tartre sur les parois des canalisations d'eau. Une eau trop douce est une eau corrosive. Elle attaque les parois des canalisations d'eau et contribue à la dégradation de la qualité de l'eau à la suite de la dissolution de métaux lourds tels que le plomb (Bremond et Vuichard, 1973 ; Dib, 2010).

## 7. Éléments majeurs

Les espèces majoritairement présentes dans les eaux naturelles, appelées éléments majeurs, sont :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . Elles sont présentes à des concentrations de l'ordre du  $\text{mg l}^{-1}$  et représentent généralement près de 99% de la matière minérale dissoute (Livingstone, 1963). Le calcium et le magnésium sont les ions dominants dans les rivières traversant les bassins riches en carbonates (calcaires, dolomies) alors que celles s'écoulant au travers de roches cristallines (gneiss, granites, basaltes, etc.) présentent des concentrations faibles en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , mais sont plus chargées en  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . Le sodium et le potassium proviennent des feldspaths et des micas, le sulfate du gypse ou de la pyrite, le phosphate et le fluorure de l'apatite.

Dans les bassins sous fortes pressions anthropiques, les changements de la composition chimique des rivières peuvent être imputés aux rejets d'eaux usées. Les activités agricoles sont aussi responsables de l'altération de la qualité des eaux et entraînent une augmentation des concentrations de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , et  $\text{SO}_4^{2-}$  (Meybeck, 2003).

## 8. Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution (Gouaidia, 2008). Les eaux trop riches en chlorures sont laxatives et corrosives (Tarik, 2005). La concentration des chlorures dans l'eau dépend aussi du terrain traversé (roches magmatiques contenant des minéraux de chlore). Ces teneurs sont susceptibles de subir des variations provoquées :

- Dans les zones arides par un lessivage superficiel en cas de fortes pluies.

- En zone côtière par des infiltrations d'eau de mer dans les nappes en particulier lors des pompages excessifs et d'origine atmosphérique (Gaujous, 1995).

## 9. Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Les origines naturelles sont l'eau de pluie (évaporation d'eau de mer:  $1 < c < 20$  mg/l), et la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ), mais également de la pyrite ( $\text{FeS}$ ) et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite).

Les origines anthropiques sont la combustion de charbon et de pétrole qui entraîne une production importante de sulfures (qu'on retrouve dans les pluies), et l'utilisation d'engrais chimiques (El Wartiti et al, 2012). Parmi les minéraux qui contiennent du sulfate on peut citer le sulfate de sodium, le sulfate de magnésium et le sulfate de calcium (gypse).

## 10. Azote ( $\text{N}_2$ )

L'azote se trouve naturellement dans l'environnement (air, eau et sol). Il joue un rôle primordial dans de nombreux processus biologiques. Dans le milieu aquatique, l'azote est présent sous trois formes gazeuses, organique et minérale.

La forme gazeuse ou l'azote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) provient principalement de l'atmosphère terrestre contenant 78% d'azote (Mariotti, 1982). L'azote atmosphérique n'est utilisé que par certaines bactéries et quelques algues unicellulaires qui sont capables de le fixer. Cette fixation permet de convertir l'azote atmosphérique en azote minéral ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ). L'azote minéral peut être également originaire de la décomposition de l'azote organique composé de protéines, de l'urée des acides humiques, etc. La minéralisation de l'azote organique donne lieu à la formation d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) qui sera transformé en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et après en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) (Figure 3).

### a. Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )

Il est assez souvent rencontré dans les eaux superficielles. Il a pour origine la matière organique végétale et animale des cours d'eau. La nitrification des ions ammonium se fait en milieu aérobie faible. En général, l'ammonium se transforme assez rapidement en nitrites et nitrates par oxydation bactérienne (Bremond et Vuichard, 1973).

L'ammonium en lui-même n'est pas nuisible. Lorsque le pH augmente, on retrouve de l'ammoniac, un gaz soluble dans l'eau et toxique pour la vie aquatique. Des problèmes apparaissent à partir d'une concentration de 0,1 mg  $\text{NH}_3$ /l (De Villers et al., 2005).

### b. Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )

Les nitrites constituent une étape importante dans la métabolisation des composés azotés; ils s'insèrent dans le cycle de l'azote entre l'ammoniac et les nitrates. Leur présence est due, soit à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac, soit à la réduction des nitrates. Ils ne représentent

qu'un stade intermédiaire et sont facilement oxydés en nitrates (par voie chimique et bactérienne) (Merabet, 2010).

Des concentrations élevées en nitrites témoignent souvent de la présence de matières toxiques. Les nitrites sont surtout nuisibles pour les jeunes poissons à partir d'une concentration de plus de 3 mg/l. En absence d'oxygène, des bactéries anaérobies transforment les nitrates et produisent de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) ou de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (De Villers et al., 2005).

### c. Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Les nitrates sont présents naturellement dans les eaux par lessivage des produits azotés dans le sol constituant le bassin versant (Merabet, 2010), par décomposition des matières organiques ou des engrais de synthèse ou naturels (Samake, 2002). Ils sont absorbés par les plantes lors de leur croissance et servent à la synthèse de composés azotés. C'est un excès de la production de nitrate qui déséquilibre le cycle naturel de l'azote et entraîne l'accumulation dans les sols et sa migration dans les ressources en eau. Les pratiques agricoles intensives avec l'usage d'engrais azotés et l'élevage intensif restent les grands pourvoyeurs de nitrates. Les nitrates ne représentent qu'une des multiples formes de l'azote présent dans l'eau, tout en constituant, en général, la forme la plus abondante de l'azote minéral.

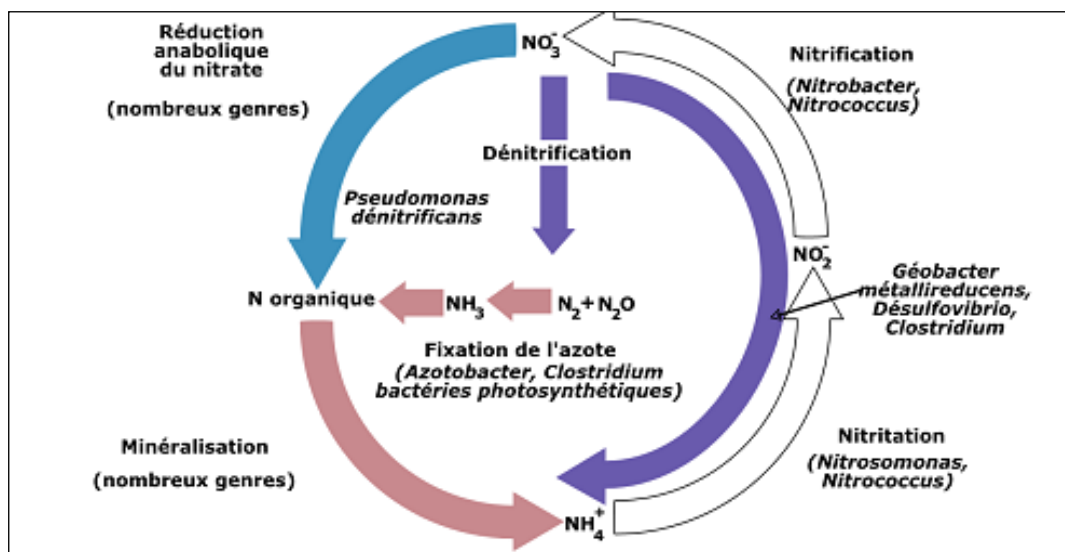


Figure 3: Cycle de l'azote

## II. Pollution des eaux de surface

La pollution de l'eau superficielle est la dégradation de sa qualité en modifiant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les effets indésirables de ce phénomène sur les organismes vivants ont fait l'objet de nombreux travaux (Adjagodo et al. 2017 ; Bougherira et al. 2017 ; N'guessan et al. 2016 ; Kpoda et al. 2013).

Cette pollution provient de plusieurs sources d'origine anthropique (Mekhalif, 2009), les principales sont :

- urbaines (activités domestiques ; eaux d'égout, eaux de cuisine...),
- agricoles (engrais, pesticides),
- industrielles (agroalimentaire, chimie-pharmacie, pétrochimie, raffinage...).

## 1. Types de pollution

Trois grandes familles caractérisent la pollution :

### a. Pollution physique

Elle résulte de différents éléments solides entraînés par les rejets domestiques et industriels.

On distingue :

- **Pollution solide** : elle provient des particules solides apportées par les eaux industrielles ainsi que les eaux de ruissellement et issue des décharges de déchets à ciel ouvert.
- **Pollution thermique** : causée généralement par les eaux des circuits de refroidissement des usines, en effet tout changement de température de l'eau a des conséquences significatives sur l'équilibre écologique du milieu aquatique naturel et la survie des organismes vivants.
- **Pollution radioactive** : liée aux rejets des éléments radioactifs par les installations et les centrales nucléaires ainsi que les usines de traitement de déchets radioactifs (Mekaoussi, 2014).

### b. Pollution chimique

Elle est due aux polluants chimiques de nature organique et minérale générés par les différentes activités anthropiques. Ce type de pollution regroupe les solvants, les métaux (Zn, Pb, Cd...), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les produits pharmaceutiques, les pesticides, les sels, etc.

### c. Pollution microbiologique

Elle provient de plusieurs sources comme les rejets des hôpitaux, l'agriculture ainsi que les rejets d'eaux usées. L'eau se charge alors de microorganismes pathogènes (bactéries, virus, parasites) qui peuvent être dangereux pour l'environnement et pour la santé humaine (Lounnas, 2009).

## III. Eaux usées

Une eau usée ou résiduaire est une eau issue des activités anthropiques (domestiques, industrielles, agricoles) qui a été dégradée après usage. Le rejet direct de ces eaux dans le milieu naturel représente la forme de pollution la plus dommageable pour l'ensemble des écosystèmes. Ces eaux transportent des concentrations élevées en matières polluantes (azote, phosphore,

matière organique, métaux lourds, bactéries pathogènes...), ce qui détériore la qualité des eaux pour les milieux récepteurs (rivières, lac...) (Taghzout, 2015).

Suivant l'origine des substances polluantes, on peut classer ces eaux usées en 3 catégories les :

**1- eaux usées domestiques :** comme leur nom l'indique, elles résultent des activités humaines (les excréments humains, les eaux ménagères, etc.). Ces eaux sont généralement chargées en matière organique, azote et phosphore ;

**2- eaux usées industrielles :** Elles proviennent essentiellement des usines et des installations industrielles ; ces eaux peuvent contenir des éléments traces métalliques (As, Pb, Cr...), des solvants, des colorants, etc. ;

**3- eaux usées agricoles :** Elles proviennent du lessivage des terres cultivées et traitées avec des engrais et des pesticides, l'utilisation extensive de ces produits est à l'origine de la présence des nitrates et des éléments traces métalliques (Zn, Cu, Pb...) dans ces eaux (Metahri, 2012).

#### **IV. Impact sur l'environnement et la santé humaine**

Les eaux usées rejetées dans les milieux aquatiques sans traitement préalable peuvent occasionner des dégâts irréversibles sur la santé du vivant et sur les écosystèmes.

##### **1. Sur l'environnement**

Le déversement des eaux usées directement dans l'environnement cause de nombreux dangers pour la survie des organismes vivants et l'équilibre écologique. Par exemple, la présence de quantités excessives d'azote et de phosphore engendre un phénomène appelé eutrophisation, qui favorise la prolifération de végétaux et diminue la quantité d'oxygène dissous, ce qui provoque à long terme la mort de nombreux organismes vivants au sein du milieu aquatique (poissons, crustacés, etc.) (Ivanowsky, 2016)

La présence des éléments traces métalliques comme le mercure et l'arsenic dans ces eaux peut avoir un impact négatif sur les organismes vivants les plus fragiles en raison de leur toxicité même à faibles doses, provoquant des dysfonctionnements et des troubles dans leurs fonctions physiologiques (nutrition, respiration et reproduction) (Ivanowsky, 2016).

La qualité de l'eau des nappes phréatiques peut être également dégradée par l'infiltration des eaux usées à travers le sol, qui permet la migration des polluants présents dans ces eaux usées vers les eaux souterraines (Metahri, 2012).

##### **2. Sur la santé humaine**

L'eau est un élément indispensable à la vie humaine. L'insuffisance ou la mauvaise qualité de l'eau est à l'origine de nombreuses maladies dans le monde, notamment dans les pays en développement ou 80% des maladies sont dues à l'eau (Adjagodo, 2017 ; Sy, 2017).

Les maladies hydriques peuvent être classées selon six catégories différentes :

- Maladies transmises par l'eau (parasites, bactéries, virus) ;
- Infections de la peau et des yeux, dues au manque d'eau ;
- Maladies causées par un organisme aquatique invertébré ;
- Maladies causées par un insecte fourmillant à proximité de l'eau.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), chaque année 4 milliards de cas de diarrhée, en plus des millions d'autres cas de maladies, sont liés à un manque d'accès à l'eau propre pour la consommation humaine. Chaque année, il y a 1,7 million de personnes qui meurent à la suite de diarrhées, la plupart étant des enfants âgés de moins de cinq ans. La santé humaine est gravement touchée par les maladies liées à l'eau, de même que par la pollution due à des rejets de produits chimiques dans l'eau issus des différentes activités humaines. D'après l'UNICEF 60% de la mortalité infantile dans le monde est due à des maladies infectieuses ou parasitaires, majoritairement liées à la pollution de l'eau (Rouamba, 2016 ; Some, 2014).

## **V. Conclusion**

Les eaux de surface acquièrent de nombreux éléments chimiques au cours de leurs trajets ce qui détermine leurs caractéristiques et elles sont sujettes à des pollutions au fur et à mesure de leur ruissellement, mais la décontamination étant très difficile, il faut agir en priorité sur la prévention contre la pollution de l'eau de surface.

Une eau de surface est considérée comme polluée si elle contient des substances autres que celles liées à la structure des terrains où elle a séjourné. Ces contaminants soient physiques, chimiques, organiques ou micro biologiques sont le plus souvent issus des activités humaines (agricoles, industrielles, et domestiques).

## **CHAPITRE III : GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES**

### **I. Introduction**

La contamination des écosystèmes aquatiques par des éléments toxiques notamment par les métaux lourds a attirer l'attention de plusieurs chercheurs, et la lutte contre cette pollution est au centre des discussions et des débats à l'échelle mondiale. Ainsi ce type de pollution constitue en effet l'un des aspects de la pollution le plus menaçant pour les milieux récepteurs (Azzaoui, 2002). Les dégradations résultant de cette pollution compromettent l'équilibre des écosystèmes concernés, le renouvellement des ressources naturelles ainsi que le bien-être et la santé de la population humaine (El Mohrit, 2005).

Parmi les substances chimiques susceptibles de constituer un danger pour la vie aquatique, nous signalons les métaux lourds, dont certains, comme le chrome, le nickel, le plomb sont toxiques. Certains métaux non toxiques le deviennent vu leur pouvoir bioaccumulateur dans le milieu aquatique et notamment dans les sédiments. Les éléments métalliques qui ne sont pas totalement éliminés par voie biologique (El Mohrit 2005) constituent l'un des aspects de pollution les plus menaçants pour les milieux aquatiques (Serghini, 2001), d'où le choix d'évaluer le contenu des éléments Fe, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb et Mn dans l'eau et le sédiment.

### **II. Qu'est-ce qu'un élément trace métallique ?**

L'appellation d'éléments traces métalliques (ETM) désigne les métaux et métalloïdes dont la teneur est inférieure à 1g/kg de matière sèche dans la croûte terrestre (0.1%) ou inférieure à 0.1g/kg de matière sèche chez les organismes vivants (Bourrelier et Berthelin, 1998). Cette appellation est préférentiellement utilisée par les scientifiques par rapport à celle de « métaux lourds », terme défini selon la convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance (1979, ONU/CEE) comme étant tout métal ou métalloïde dont la densité est supérieure à 4.5 et possédant des risques de toxicité pour les organismes vivants. Cette expression est employée à tort et amène à certaines confusions dans son utilisation. Dans les écosystèmes aquatiques, les ETM peuvent être sous forme dissoute, colloïdale et particulaire. Sous cette dernière forme, ils peuvent se déposer au fond de la colonne d'eau et s'accumuler dans les sédiments.

Les métaux ont des effets très différents sur le milieu vivant. Par exemple, certains métaux, dits oligoéléments, sont indispensables aux êtres vivants (fer, cuivre, chrome, zinc...), mais en très faible quantité ; ils permettent le bon fonctionnement de certains métabolismes aussi bien chez les végétaux, les animaux que chez l'Homme. En quantité insuffisante, ils peuvent entraîner des carences qui provoquent des maladies et entravent le fonctionnement ou empêchent le développement d'un organisme alors que leur présence en forte concentration peut engendrer

des effets indésirables, voir toxiques (Baize, 1997). D'autres éléments tels que le plomb, le cadmium, le mercure, n'ont pas ce caractère indispensable, « dits éléments non essentiels »; ils ont la propriété de s'intégrer et de s'accumuler dans la chaîne alimentaire, et ainsi de devenir toxiques pour l'homme, consommateur final (Freiberg et al 1979 ; Alloway et Ayres, 1997). Un équilibre doit donc être trouvé entre excès et défaut de ces éléments dans l'organisme des êtres vivants.

En raison de leurs propriétés physiques et chimiques (ductilité, malléabilité) et leurs bonnes conductivités thermiques et électriques, les éléments métalliques ont été largement utilisés dans différentes activités humaines principalement en industrie. Ainsi, l'utilisation des métaux a augmenté de 300 % dans les cinquante dernières années et les émissions anthropiques des éléments métalliques tels que Pb, Hg, Zn, Cd, Cu et Cr ont été multipliées par trois depuis le début de l'ère industrielle (Rollin et Quiot, 2006). Ces émissions proviennent des activités métallurgiques et minières, de l'incinération d'ordures ménagères, de la combustion des matériaux fossiles et des carburants, de l'agriculture (amendements et engrais commerciaux), des effluents domestiques et industriels, etc.

### **III. Les sources des métaux**

La contamination en éléments traces métalliques (ETM) pourrait avoir une origine naturelle (géogénique) et/ou anthropogénique (Figure 4).

#### **1. Origine naturelle des ETM**

Contrairement à la plupart des contaminants organiques, les ETM sont des constituants naturels dans les roches. Ces éléments se trouvent normalement à de faibles teneurs dans les sols, les sédiments, les eaux et les organismes vivants (Alloway, 1995). Afin d'évaluer l'impact d'un métal lourd dans l'environnement, la présence seule n'est pas suffisante. Cet impact est potentiel si le métal donné se trouve à des concentrations anormalement élevées par rapport aux normes.

Généralement, les ETM présents dans l'environnement sont d'une part émis dans l'atmosphère par les processus naturels et anthropogéniques, et ensuite, se déposent sur terre (sol, végétation et milieu aquatique) suite au processus de dépôts et d'interception. Les gouttes de pluie et les poussières grossières se déposent sous l'effet de la gravité. Les poussières fines et les gaz en suspension dans l'air sont interceptés et déposés au contact des feuilles et des aiguilles des arbres. D'autre part, les éléments métalliques sont libérés dans le sol par l'altération des minéraux des roches, par les activités anthropiques et par des dépôts atmosphériques qui vont être dispersés dans les systèmes aquatiques à cause de l'érosion hydrique qui dépend du fond géochimique naturel de la croûte continentale supérieure (Tableau 1), de l'héritage minéralogique, de la dynamique propre de l'élément chimique, des



précipitations et de la pente des versants. Les conséquences environnementales de ces processus sont non seulement les pertes en éléments nutritifs des sols, mais également le transport vers les eaux de surface des polluants fixés sur des particules solides (Baize, 1997).

**Tableau 1: Exemples des teneurs du fond géochimique naturel observées dans la croûte continentale supérieure (UCC), la Rade de Toulon et l'étang de Berre (France).**

| ETM | Fond géochimique naturel UCC ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) | Fond géochimique naturel Rade de Toulon ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) | Fond géochimique naturel dans l'étang de Berre ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) |
|-----|---|--|---|
| As  | 2   | 8,1  | $5.6 \pm 2.0$ (Giorgetti, 1981)   |
| Cd  | 0,1   | 0,042  | $0.123 \pm 0.013$ (RNO, 1998)   |
| Cr  | 35  | 13   | $47 \pm 10$ (Georgeaud, 1997)   |
| Cu  | 14,3  | 6,8  | $11.6 \pm 1.5$ ( Giorgetti, 1981)                                       |
| Hg  | 0,06  | 0,025  | $0.14 \pm 0.03$ ( Giorgetti, 1981)                                      |
| Ni  | 18,6  | 10,7   | $17.6 \pm 2.8$ ( Arnoux, 1987)  |
| Pb  | 17  | 13,6   | $11 \pm 4$ ( Giorgetti, 1981)   |
| Zn  | 52  | 20   | $80 \pm 28$ (Arnoux, 1987)  |

## 2. Origine anthropique des ETM

Au cours des dernières décennies, le monde entier a connu un développement important dans les secteurs urbains, industriels et agricoles dont les différents rejets ont engendré une augmentation remarquable de l'apport des métaux traces dans les sédiments, estimé actuellement dans le monde à 22 000 t en Cd, 939 000 t en Cu, 783 000 t en Pb et 1 350 000 t en Zn (Singh et al., 2003). Les différentes sources anthropiques responsables de ces teneurs élevées en ETM sont:

- La pollution atmosphérique qui provient essentiellement des rejets d'usine, des gaz d'échappement des véhicules, des poussières et aérosols des chauffages, etc.
- La pollution agricole, qui résulte de l'usage des produits phytosanitaires (pesticides, herbicides...) destinés à protéger les cultures, et des engrais et boues de stations d'épuration dans le but de fertiliser les sols. Souvent ces produits contiennent des métaux traces comme le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le zinc (Zn)...
- La pollution industrielle concerne les rejets des différents types d'industries (chimique, agroalimentaire...), des activités de métallurgie, minières, etc. On y retrouve plus particulièrement le zinc, le plomb et le cadmium. On peut y ajouter les rejets des centrales nucléaires.

Les métaux naturels ou issus des différentes activités humaines, citées précédemment, sont des éléments non biodégradables. Par conséquent, l'accumulation de certains entre eux comme

Cd, Cr, Pb ... dans la colonne sédimentaire cause de véritables risques pour le milieu naturel et indirectement sur la santé humaine via la consommation des poissons contaminés via la chaîne trophique (Huynh, 2009).

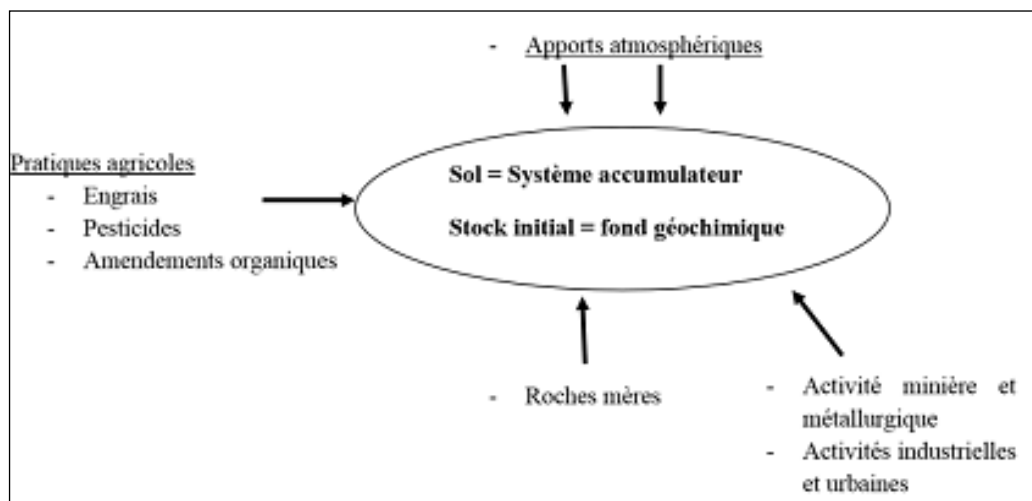


Figure 4: Origines des ETM dans le sol (Chapman 1998)

#### IV. Sédiments

Le compartiment sédiment fait une partie intégrante du continuum de l'eau et ne devrait pas être négligé dans la surveillance des écosystèmes aquatiques, SedNet (2006). Le choix des sédiments réside dans le fait qu'ils reflètent bien les divers processus physicochimiques ayant eu lieu non seulement en milieu aquatique, mais aussi à l'échelle du bassin versant et sont d'excellents indicateurs de l'état de la qualité des plans d'eau grâce à leur pouvoir accumulateur (Pasternak, 1969 ; Mathis et Cummings, 1973 ; Friant, 1979) ; les polluants émis sont rapidement pris en charge par le sédiment où ils peuvent s'accumuler.

Les sédiments sont le résultat de la déposition des particules en suspension dans l'eau qui dérivent de l'érosion des roches et des sols et de la floculation d'éléments colloïdaux. Ces particules parviennent au milieu aquatique par les cours d'eau ou bien par voie atmosphérique (Geffard, 2001). En outre, le sédiment est un véritable piège pour de nombreux polluants organiques et métalliques, dont le relargage constitue une véritable menace pour l'environnement (Larrose, 2011).

Les sédiments se déversent en fractions fine et grossière.

##### a. Fraction fine

La fraction fine a une granulométrie inférieure à 50µm. Nous distinguons généralement les limons grossiers (entre 20 et 50µm), les limons fins (entre 2 et 20µm) et les colloïdes ou argiles (< 2µm) (Nehme, 2014).

La fraction fine est caractérisée par une grande cohésion, une charge électrique donnant un grand pouvoir adsorbant vis-à-vis des contaminants métalliques. De même, cette fraction peut

contenir de la matière organique (Geffard, 2001). En effet, plusieurs études ont montré que les sédiments à grains fins ont une grande capacité à adsorber les éléments traces métalliques en les comparant avec les sédiments à grains gros (Xua et al., 2015 ; Paramasivama et al., 2015).

## **b. Fraction grossière**

La fraction grossière ayant une granulométrie supérieure à 50 $\mu$ m, se compose des sables fins (entre 50 et 200 $\mu$ m), des sables grossiers (entre 200 $\mu$ m et 2mm), et des débris et agrégats (>2 mm) (Nehme, 2014). Cette fraction est donc principalement constituée de sable et de matériaux inorganiques. Elles ont généralement une faible propriété de cohésion et elles sont peu associées aux contaminants (Wacila. 2012).

### **1. Composition et comportement des sédiments**

La composition des sédiments est divisée en trois classes :

- L'eau interstitielle : c'est l'eau présente entre les particules sédimentaires. Le pourcentage de cette eau est différent d'un sédiment à un autre, il dépend de la composition et de la granulométrie de la colonne sédimentaire : par exemple dans les boues argileuses, l'eau interstitielle représente plus de 90% du volume total du sédiment (Négre et Rigollet, 2011) ;
- La phase inorganique : elle est composée de minéraux issus de l'érosion des roches (argiles, carbonates, silicates, hydroxydes métalliques ...) ;
- La phase organique : elle comprend les acides organiques, les amines, les polysaccharides produits par les microorganismes, elle occupe souvent une faible partie du sédiment, mais elle joue un rôle primordial dans la mobilité et la biodisponibilité des différents polluants (Diab, 2016).

Certains composés organiques hydrophobes ont la particularité d'avoir des affinités avec la fraction organique présente dans les sédiments, ce qui permet leur transport et leur fixation à la phase particulaire. Ils sont déposés sur le fond et les berges des rivières, des estuaires et des zones côtières peu profondes sous réserve de certaines conditions hydrodynamiques. De plus, les métaux présentent une grande affinité pour la matière organique et les oxy-hydroxydes contenus dans les matières en suspension ou les sédiments (Chapman et al., 1998). En effet, ces propriétés leur procurent un pouvoir de fixation aux matières en suspension dans la colonne d'eau pour être piégés par la suite dans les fonds sédimentaires. Cependant, les différents polluants stockés dans le compartiment sédimentaire peuvent être remobilisés dans la colonne d'eau soit par les effets naturels comme les tempêtes, les crues... ou par les effets anthropiques comme le trafic fluvial, le dragage...

Les substances toxiques présentes dans les sédiments (métaux, HAP, PCB, pesticides) proviennent généralement des activités industrielles, urbaines et agricoles ainsi que du transport

atmosphérique (Bombardier, 2007). La contamination des sédiments a plusieurs conséquences parmi lesquelles :

- Des effets néfastes chez les animaux et les plantes associés aux sédiments (croissance, reproduction, fonctions biologiques essentielles) ;
- La bioamplification des produits chimiques chez les organismes tout au long de la chaîne trophique.

Enfin, cette contamination peut également altérer la qualité de l'eau des milieux aquatiques et compromettre certaines utilisations (irrigation, baignade, consommation de l'eau et de produits aquatiques), ce qui engendre de véritables risques pour l'environnement et la santé humaine.

## **2. Pollution métallique des sédiments**

Le sédiment est considéré comme une source endogène de polluants parmi lesquels on trouve les métaux, qui peuvent être classés selon deux types :

- Les éléments majeurs qui représentent 99% de la croûte terrestre qui sont : oxygène (O), silicium (Si), aluminium (Al), fer (Fe), calcium (Ca), sodium (Na), potassium (K), magnésium (Mg), titane (Ti), hydrogène (H), phosphore (P) et manganèse (Mn).
- Les éléments traces dont la plupart ont une concentration inférieure à 0,01%, ceux-ci incluent des métaux (cadmium (Cd), cuivre (Cu), chrome (Cr), nickel (Ni), plomb (Pb), des métalloïdes ou des semi-métaux (bore (B), Sélénium (Se), arsenic (As)) ou des non-métaux (azote (N), fluor (F), chlore (Cl) ou brome (Br)). Ces éléments traces peuvent être accumulés et piégés dans les sédiments, ce qui peut induire des effets toxiques lors de la remise en suspension des particules sédimentaires (Strachan, 2010), ou bien ils peuvent être présents à l'origine dans la roche mère ce qu'on appelle le fond géochimique.

## **3. Biodisponibilité des éléments trace métalliques dans les sédiments**

Les métaux sont présents dans les milieux aquatiques sous deux formes : dissoute et particulaire. Ces éléments sont majoritairement associés aux particules et se sont accumulés dans les sédiments (Hayzoun, 2014). Leur biodisponibilité dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels le pH, le taux de matière organique, le potentiel redox (Eh), les activités biologiques, etc.

- Le pH est un facteur très important qui influence le comportement des métaux dans le milieu, ce qui permet de contrôler la répartition des ETM entre la colonne d'eau et la phase sédimentaire (Stevenson et Humus, 1994). En milieu acide, les cations métalliques adsorbés à la surface de la matière organique, des particules d'argile et des oxydes de fer et de manganèse sont relargués dans la phase dissoute par compétition

entre les cations et les protons (Förstner et al., 1989). Au contraire, un milieu basique favorise l'adsorption des ETM en diminuant la concurrence sur ces mêmes sites réactionnels entre les protons et les ions métalliques.

- Le taux de matière organique joue un rôle primordial dans la mobilisation et la disponibilité des métaux. Les ETM peuvent être complexés par la matière organique en formant des composés organométalliques, ce qui permet l'assimilation des métaux par les organismes vivants. La matière organique peut limiter la toxicité de certains métaux en changeant leurs formes chimiques dans le milieu comme c'est le cas pour le cuivre, le plomb ou le chrome. Ce n'est pas le cas pour d'autres métaux comme le mercure, dont le transfert en phase organique augmente sa toxicité et sa capacité de bioconcentration et bioamplification dans les milieux aquatiques (Bensefa-Colas et al., 2011).
- Le potentiel redox (Eh) : la variation du potentiel d'oxydoréduction peut avoir une influence sur la mobilité des métaux dans la colonne d'eau et dans le sédiment. Par exemple, en conditions réductrices les sulfates sont réduits en sulfures, ce qui permet le piégeage de quelques éléments métalliques comme le plomb, le cadmium et le zinc limitant leur mobilité (Deneux-Mustin et al., 2003). Alors que, dans les conditions oxydantes la décomposition de la matière organique sera favorisée entraînant la libération des ETM y sont acheminés vers la colonne d'eau (Calmano et al., 1993 ; Stephens et al., 2001).
- Les activités biologiques : elles sont principalement basées sur la dégradation de la matière organique présente dans le sédiment par des microorganismes (populations bactériennes et fongiques). Cette action est considérée comme le moteur principal de ce qu'on appelle « la diagenèse précoce » (Huynh, 2009), qui présente l'ensemble des processus diagenétiques mis en jeu lors de la formation du dépôt sédimentaire (Négre et Rigollet., 2011). Ces processus s'appuient sur des réactions d'oxydoréductions contrôlées par l'activité bactérienne. L'oxydation de la matière organique libère des espèces réduites dans les eaux interstitielles comme  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  qui peuvent contribuer à d'autres réactions secondaires (Stumm et Morgan, 1970). Ces mêmes réactions dépendent de la composition ionique des eaux interstitielles ainsi que d'autres paramètres tels que le pH et le potentiel d'oxydoréduction. Tout cela influence le comportement des ETM et leur répartition entre la colonne d'eau par l'effet de relargage et le sédiment par l'effet de piégeage (Canavan et al., 2007 ; Audry, 2006).

## **V. Caractéristiques des éléments traces métalliques analysés dans cette étude**

### **1. Fer (Fe)**

C'est un métal indispensable à la survie des êtres vivants. En effet, le fer donne sa couleur rouge au sang. Il est utilisé pour la fabrication des globules rouges, et sert à produire l'hémoglobine, laquelle apporte l'oxygène aux cellules. Malgré cela, des concentrations élevées en fer peuvent causer des maladies neuro-dégénératives.

De plus, le fer peut être entraîné dans les eaux par diverses voies dont principalement la dissolution superficielle des roches, le lessivage des terrains miniers, les rejets industriels directement dans les eaux ou bien dans l'atmosphère et les particules émises retombant à la surface de la Terre avec les pluies.

### **2. Plomb (Pb)**

Il présente une affinité avec les carbonates, les sulfates et les sulfures, il provient de plusieurs sources : métallurgie, sidérurgie, traitement des minerais, ruissellement sur les toitures, carburants. C'est un élément toxique pour l'être humain, il empêche la synthèse de l'hémoglobine et il provoque des perturbations du système nerveux (saturnisme) (De Burbure et al., 2005).

### **3. Cuivre (Cu)**

C'est un métal facilement complexé par la matière organique, il dérive principalement des composés agrochimiques (engrais) et des déchets résidentiels (les câbles électriques). La présence d'un excès de cuivre cause des maladies neuro-dégénératives (Abdel-Mageed, 1990).

### **4. Zinc (Zn)**

Il forme des complexes avec les ligands organiques, il est souvent d'origine agricole (insecticides, pesticides), ou industrielle (imprimeries, raffinage). À de fortes doses, il devient toxique pour le pancréas et peut même causer des problèmes pulmonaires et des perturbations lors de la synthèse de l'hémoglobine (Zerahn et al., 1999).

### **5. Chrome (Cr)**

Il est sous formes réduites trivalentes ou oxydées hexavalentes, il est issu des traitements de surface, de l'industrie textile, des tanneries. Cet élément est cancérigène sous sa forme oxydée hexavalente (Keegan et al., 2008).

### **6. Nickel (Ni)**

Ni est le 24<sup>e</sup> élément le plus abondant de la croûte terrestre avec une concentration moyenne de 75  $\mu\text{g g}^{-1}$  (Alloway, 1995). Il est particulièrement abondant dans certaines roches

ultramafiques où sa teneur moyenne peut atteindre  $1450 \mu\text{g g}^{-1}$  (Turekian, 1978). Le nickel provient de minerais sulfurés (pentlandite, pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite) extraits du sous-sol et représentant 65% de la production mondiale, et des minéraux silicatés souvent exploités en surface. Les principales sources anthropiques sont la combustion de charbon ou de fuel, l'incinération des déchets, la production d'acier et divers alliages, les procédés de fabrication des batteries, etc.

Dans les systèmes aquatiques, le nickel forme des complexes stables en présence de MOD (Baes et Mesmer, 1976 ; Mandal et al., 2002 ; Doig et Liber, 2006).

Le nickel est un élément indispensable à faibles concentrations, mais il peut avoir des effets toxiques sur les organismes à fortes concentrations (Rooney et al., 2007 ; Lock et Janssen, 2002 ; Kozlova et al., 2009). Chez l'homme, l'intoxication au Ni et ses composés (tétracarbonyl nickel) se fait principalement par voie respiratoire et peut entraîner des inflammations des muqueuses nasales, des organes respiratoires et même des cancers des voies respiratoires (Templeton, 1990).

## **7. Manganèse (Mn)**

Mn est un élément chimique métallique, blanc argenté, de symbole Mn et de NA 25. Il existe à l'état soluble dans les eaux, mais une fois collecté, il s'oxyde rapidement, précipite de la solution échantillonnée ou s'adsorbe sur les parois du récipient. Il occupe la 12<sup>e</sup> place des éléments dans la croûte terrestre.

C'est un oligo-élément indispensable : on le trouve dans tous les tissus. Il catalyse les réactions d'oxydoréduction et la phosphorylation et favorise aussi l'hydrolyse des esters d'acides aminés et des peptides car il est indispensable au métabolisme des lipides : il stimule la synthèse du cholestérol.

Ses propriétés caractéristiques sont principalement les points d'ébullition et de fusion très élevés ainsi que des chaleurs de vaporisation et de fusion élevées.

On le trouve dans la nature sous forme d'oxyde (pyrolusite, braunite, manganite), de sulfure, oxyde de carbonate et de silicate.

Le Manganèse peut être relégué dans les eaux, de manière naturelle par lessivage des terrains miniers. Il est intéressant également de signaler que le drainage des sols et litières peut entraîner une certaine quantité de manganèse dans les eaux (Kirchner et Brabowxski, 1972).

D'après Wilson (1972), le manganèse aurait un effet sur le métabolisme du phytoplancton ; seule la photosynthèse serait affectée et pas la respiration ni la formation de chlorophylle. Une déficience en manganèse réduirait considérablement le taux de photosynthèse en faible lumière, cet effet étant moins marqué en lumière forte. D'autre part Hecker (1972) émet une hypothèse que le Mn est impliqué dans le système de libération de

l'O<sub>2</sub> durant la photosynthèse. Chez les poissons, le manganèse se concentre principalement dans les parties du squelette. L'introduction quotidienne de Mn dans l'organisme humain par l'eau est d'ordinaire de 0.01 mg et dépasse très rarement 1 mg et son élimination par le corps humain se fait presque exclusivement par le tractus gastro-intestinal et très largement à travers la bile, l'élimination par l'urine est très faible et ne représentant que 0.1 à 3 % du total. Le manganèse peut être toxique pour l'homme quand il est inhalé, et ce sont les travailleurs exposés dans l'industrie du manganèse qui sont particulièrement touchés. De ce fait, des normes ont été établies par la communauté européenne de telle manière à limiter le taux de manganèse dans l'eau domestique à 0.05ppm.

### **8. Cadmium (Cd)**

Cd est souvent sous forme oxydée, avec les chlorures ou les sulfates, il se trouve dans l'industrie chimique, les produits phytosanitaires, les peintures. C'est un élément très toxique, il est la cause de plusieurs maladies chez l'être humain dont des dysfonctionnements des systèmes rénal et gastro-intestinal (Nishijo et al., 1995).

## **VI. Conclusion**

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique sur les éléments traces métalliques a été présentée concernant leur origine, leurs caractéristiques chimiques et les problèmes associés à leur introduction excessive dans les systèmes aquatiques.

Une attention particulière a été portée au comportement et au devenir des ETM dans le milieu aquatique. Leur distribution entre la phase dissoute et particulaire, ainsi que les différents types d'interactions associant les ETM aux particules en suspension et aux sédiments ont été détaillés ainsi que les facteurs abiotiques ou biotiques contrôlant les échanges entre les sédiments et la colonne d'eau ont été décrits.



**PARTIE II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE,  
MÉTHODOLOGIE ET TECHNIQUES  
UTILISÉES**

## CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans ce chapitre nous allons s'intéresser à la description détaillée du contexte général des trois bassins versants objet de cette étude (bassin versant El Abid, bassin versant Ahançal et bassin versant Srou), puis on évoque les différentes approches utilisées pour déterminer la qualité des eaux, des sédiments et la nature des affleurements des trois sous bassins versant.

### I. Introduction

Les bassins versants étudiés appartiennent au bassin versant Oum Er Rbia qui occupe une superficie de 35,000 Km<sup>2</sup> et s'étend en latitude entre 31°15' et 33°22' nord et en longitudes 5°00' à 9°20' ouest. Il se limite au Nord par le bassin de Bouregreg, au Nord-Est par le bassin du Sebou, au Sud par les bassins de Tensift et de Draa, à l'Est par les bassins du Ghris et Moulouya et l'océan atlantique à l'Ouest. (Figure 5).

Son bassin versant est drainé par l'Oum Er-Rbia, l'un des fleuves les plus importants du Maroc. Il prend naissance dans le massif montagneux du Moyen Atlas à 1800 m d'altitude, s'écoule sur 550 Km et traverse la chaîne du Moyen Atlas, la plaine du Tadla et la Meseta côtière avant qu'il se jette dans l'Océan Atlantique à environ 16 km au Nord de la ville d'El Jadida. (Figure 5).

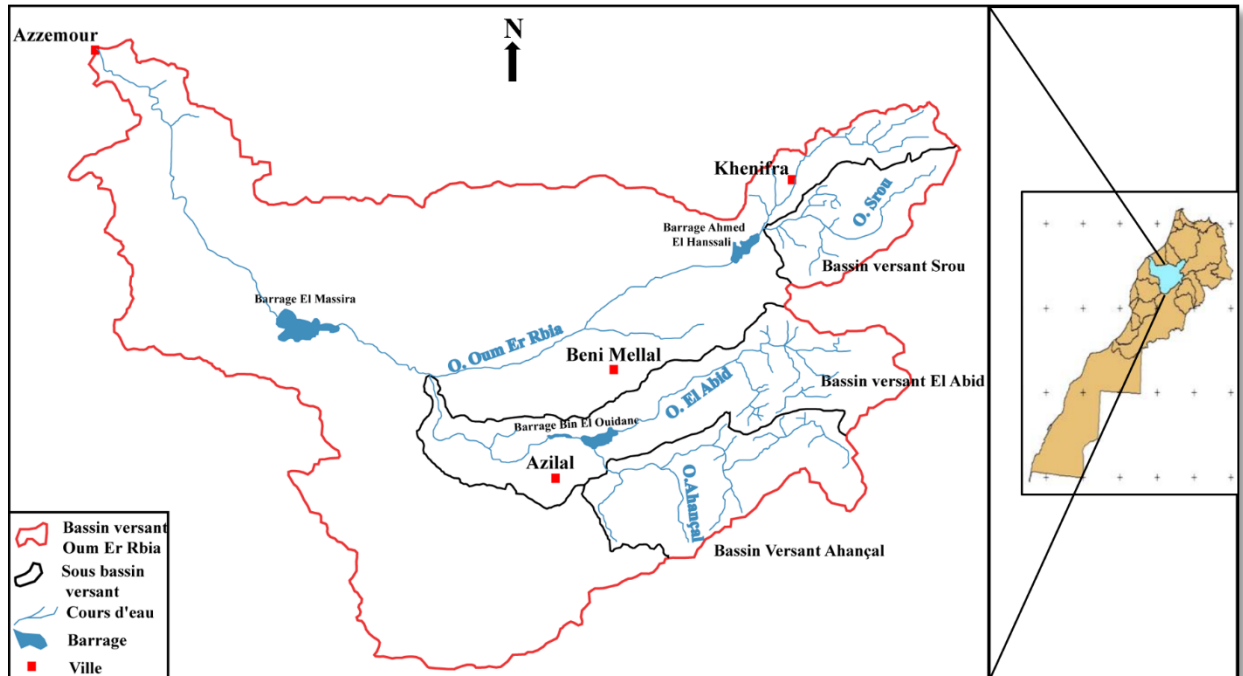


Figure 5: Localisation des bassins versants étudiés au sein du bassin versant Oum Er Rbia

## II. Présentation du bassin versant Oued El Abid

### 1. Localisation géographique

Le bassin versant Oued El Abid se situe au centre de la partie nord du Maroc. Il traverse les provinces de Midelt, Khénifra, Tinghir, Béni Mellal et Azilal. Il s'étend sur une superficie de 8041 km<sup>2</sup> et une longueur de 638 km (Figure 6). Ce bassin versant est caractérisé par une diversité de relief entre les chaînes de montagnes du Haut Atlas Central, le piedmont, et une partie de la plaine de Tadla.

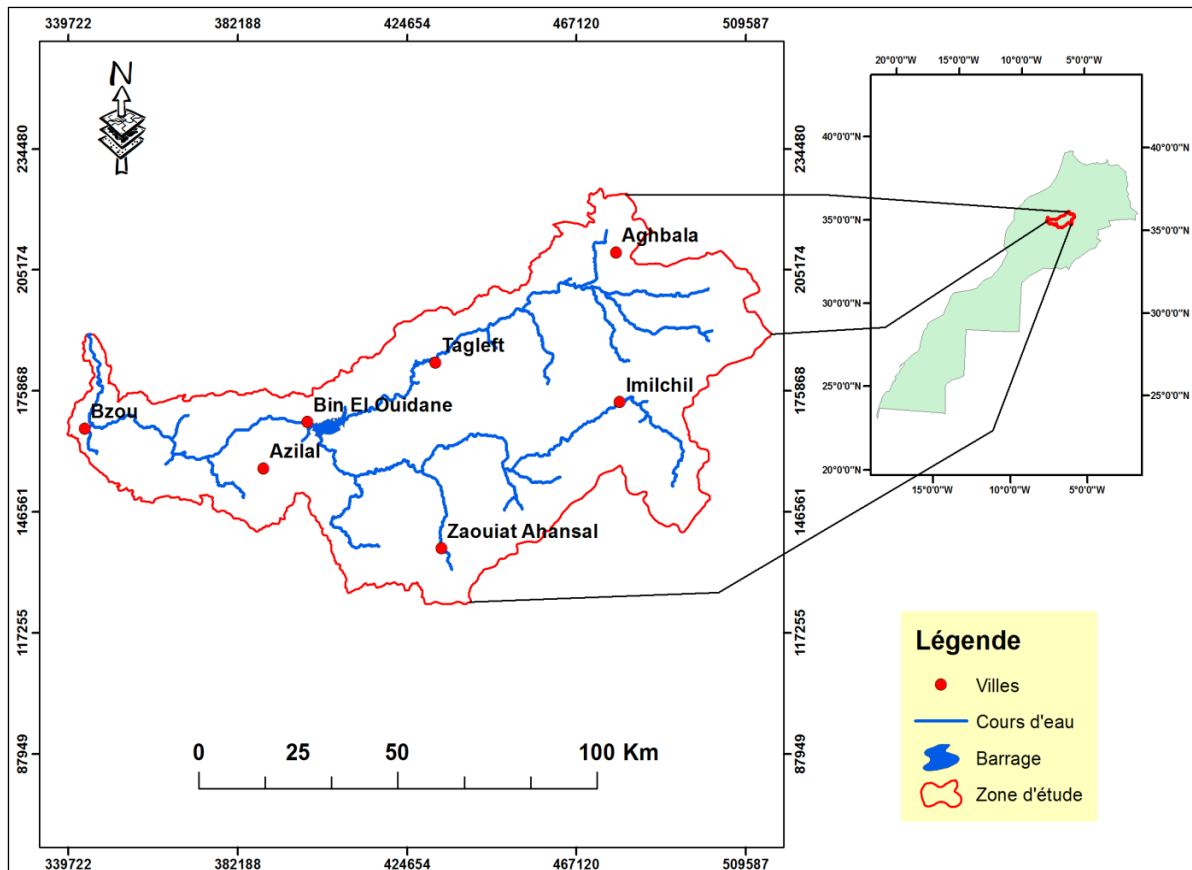


Figure 6: Localisation du bassin versant Oued El Abid

Le cours d'eau principal du bassin versant Oued El Abid est l'affluent le plus important du bassin d'Oum Er-Rbia. Il draine une grande partie des eaux du versant nord des montagnes de l'Atlas central, entre le bassin hydrographique saharien au Sud et la ligne de crête du Moyen Atlas jusqu'au Nord. Le bassin versant Oued El Abid peut être subdivisé en trois sous bassins: le sous bassin le plus important d'Assif Melloul, d'une superficie de 3117 km<sup>2</sup>, le sous bassin d'oued El Abid (Partie amont) dont le principal affluent est l'Oued El Abid sur une superficie de 2958 km<sup>2</sup> et le sous bassin drainé par la partie inférieure du bassin (1966 km<sup>2</sup>) qui achemine les eaux du barrage Bin El Ouidane vers le point de l'exutoire au niveau de la région de Tarmast où il va rejoindre le fleuve OER (Karaoui et al., 2019).

L'oued El Abid naît dans le Jbel Masker (3277 m d'altitude) et s'écoule d'est en ouest. Le bassin à une forme allongée, s'étend au cœur du Haut Atlas calcaire. Jbel Azourki est le point culminant du bassin à 3690m. Le principal affluent de l'oued El-Abid est l'oued Ahançal, peu après la confluence de ces deux oueds le grand barrage d'accumulation de Bin El Ouidane a été édifié avec une retenue de 1,5 milliard de mètres cubes. Il est couplé au barrage de compensation d'Aït-Ouarda. Ces ouvrages dérivent les eaux de l'oued El Abid dans une galerie souterraine qui franchit au Nord un petit chaînon atlasique et débouche directement à Afouer dominant la plaine des Béni-Moussa du Tadla (Karaoui et al., 2019).

## **2. Caractéristiques climatiques**

### **a. Précipitation**

La répartition des précipitations dans l'année se modifie d'ouest en est. Dans l'Est, la saison pluvieuse s'étend d'octobre à mai avec plusieurs maximas en novembre, janvier et mars. Par contre, les mois de juillet et août sont les plus secs. En effet, la pluviométrie annuelle d'une station au niveau de la partie amont (zone montagneuse) peut varier entre 1003 mm/an jusqu'à 243 mm/an. Par ailleurs dans le côté ouest, il pleut de septembre à février avec un seul léger maximum en janvier. Juillet et août sont encore les mois les plus secs au niveau de la partie avale du bassin versant et la pluviométrie annuelle de cette partie ouest varie entre 424 mm/an jusqu'à 153 mm/an (références : stations de Tillouguite, Tizi N'Isly, Zaouiet Ahansal, période 1990-2016) (Karaoui et al., 2019).

### **b. Température**

Les températures sont sujettes à de très importantes variations saisonnières au niveau du bassin versant Oued El Abid il n'est pas rare d'observer en hiver des températures très basses qui peuvent arriver jusqu'au  $-9^{\circ}\text{C}$  alors que les maximas d'été se situent toujours aux alentours des  $43^{\circ}\text{C}$ . Par ailleurs la moyenne générale des températures enregistrées est de l'ordre de  $18^{\circ}\text{C}$  (Cherifi and Loudiki, 1999).

Sur le flanc nord, les températures moyennes annuelles se situent entre 15 et  $18^{\circ}\text{C}$  jusqu'à 1500 m d'altitude (références : stations de Tillouguite et Azilal), puis décroissent rapidement en prenant de l'altitude ( $12,7^{\circ}\text{C}$  à Ait-Mhamed, altitude 1680 m). Les maximas mensuels se situent toujours en Juillet-Août, et les minimas en janvier avec un écart thermique d'une vingtaine de degrés entre ces deux périodes. Les valeurs extrêmes observées à la station de Tillouguite sont  $+43,8^{\circ}\text{C}$  et  $-9^{\circ}\text{C}$  (altitude 1100 m).

### c. Vent

Selon les mesures effectuées par l'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Er-Rbia (ABHOER) entre la période 1990-2017 au niveau de la station de Tillouguite, les vents dominants au niveau du bassin de l'Oued El Abid sont ceux de provenance de l'Ouest vers l'Est, avec une vitesse maximale de l'ordre de 3.28 m/s durant le mois d'avril (2001), et une minimale de 0.15 m/s pendant le mois de décembre (2016).

### d. Humidité et Évaporation

L'humidité de la zone d'étude est contrastée en allant de l'amont qui n'est formé que par les montagnes du Haut Atlas calcaire vers l'exutoire qui se trouve d'une manière ou d'une autre au niveau de l'extrémité ouest de la plaine de Tadla. Ce contraste se manifeste en hiver par des couches de neige au niveau de la partie supérieure du bassin de l'Oued El Abid et qui peut être recouverte de neige d'une épaisseur pouvant atteindre plusieurs mètres pendant 2 à 4 mois ce qui reflète une humidité moyenne de cette région (Schulz et De Jong, 2004).

Concernant l'évaporation, l'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Er-Rbia s'est engagée à suivre d'une façon continue ce paramètre à l'aide de l'évaporomètre Piche au niveau de la station de Tillouguite (en ml) entre la période de 1990-2016. Les mesures indiquent que l'évaporation est importante entre les mois de Mai-Septembre est peut atteindre une valeur maximale de 350 ml/jour. Tandis que la période la moins exposée à l'évaporation est celle de décembre- février avec une valeur minimale de 71ml/jour (Figure 7) (Karaoui et al., 2019).

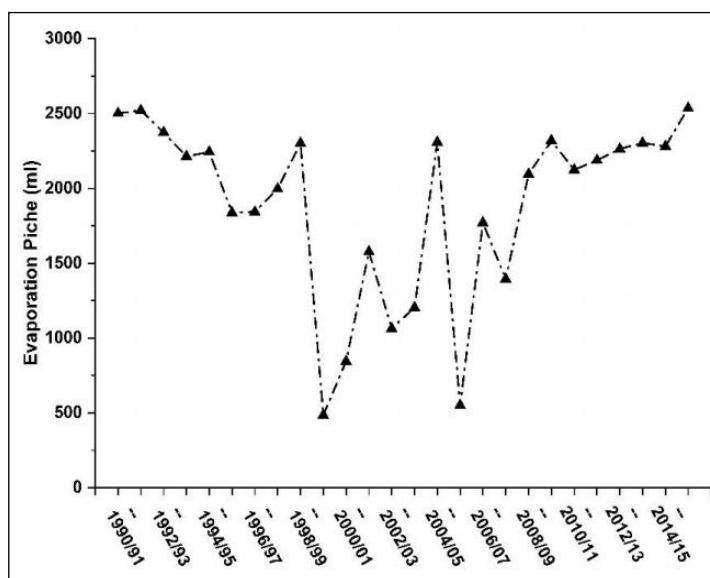


Figure 7: Évaporation annuelle au niveau de la station de Tillouguite (en ml) entre la période de 1990-2016

### 3. Caractéristiques physiographiques

#### a. Géologie

Le domaine Atlasique est subdivisé en deux parties, le Moyen Atlas et le Haut Atlas, ce dernier s'étend du Maroc jusqu'à la Tunisie. Le Haut Atlas s'étend sur une distance de 700 km de longueur et une centaine de kilomètres de largeur selon un axe ENE-WSW (Hoepffner et al., 2006). Il est subdivisé en trois parties, le Haut Atlas oriental, le Haut Atlas occidental, et le Haut Atlas central où se situe notre zone d'étude.

Le Haut Atlas central est formé essentiellement de terrains carbonatés appartenant au Jurassique. Le développement et l'extension des formations calcaires du Jurassique donnent à cette partie de l'Atlas un caractère particulier, elles constituent la ligne de crête de cette partie de la chaîne où l'altitude demeure très élevée et où les principaux sommets dépassent 3500m tels que l'Irhil-M'Goun (4071m), les Jbels Tignousti (3825m), Tiferdine (3770m), Ayachi (3757m), Azourki (3690m) et Anghomer (3607m). Tous ces massifs sont constitués de plis jurassiens assez réguliers, fréquemment rompus par des failles de direction N70 à R-W (Ibouh et al., 2001). Les anticlinaux allongés, aigus, dissymétriques succèdent aux synclinaux très larges à allure de cuvettes. Les grandes vallées présentent, sur les deux, versants nord et sud, une succession de vais longitudinaux et de cluses transversales. La circulation méridienne est rendue difficile par l'obligation de franchir successivement plusieurs crêtes et vallées (Figure 8).

Le bassin versant Oued El Abid connaît une répartition lithologique des âges qui varient du Mésozoïque jusqu'au Quaternaire :

- **Le Trias** est représenté par des affleurements d'une série Silto-gréseuse de couleur rouge qui se trouvent uniquement dans les bassins atlasiques, comprenant des coulés de dolérites tholeritiques, des marnes et argiles à niveaux salifères joue un rôle important comme substratum imperméable de la série jurassique et est à l'origine de la plupart des eaux salées de la région. Il affleure largement à l'ouest en limite du Haut Atlas calcaire, plus rarement dans le massif à l'occasion de failles, de diapirs ou de quelques boutonnières.
- **Le Jurassique** constitue la quasi-totalité de la chaîne centrale du Haut Atlas central. Il commence par une série de carbonates massifs dolomitiques du Lias inférieur calcaire dolomitique perméable en grande partie, en présentant la plus grande continuité, ce qui donne à la chaîne l'originalité de ses formes structurales en arêtes redressées de calcaires dolomitiques massifs. Ensuite la série marneuse imperméable du Toarcien-Aalénien sur laquelle s'établissent les vallées, puis une nouvelle série de calcaires, calcaires marneux

et marnes comportant généralement deux niveaux calcaires principaux : Aalénien supérieur et le Dogger. Le Jurassique de la zone d'étude se termine par une série surtout gréseuse, continentale, de faciès rouge (Jurassique supérieur), passant au Crétacé inférieur de faciès identique.

- **Le Crétacé** présente une extension réduite et offre une série classique à trois termes : grès et marnes rouges (Crétacé inférieur) -marnes bariolées (Cénomaniens)-calcaires (Turonien) et s'achève par des formations continentales rouges du Crétacé supérieur.
- Tertiaire et Quaternaire sont représentés par des formations continentales de remblayage.

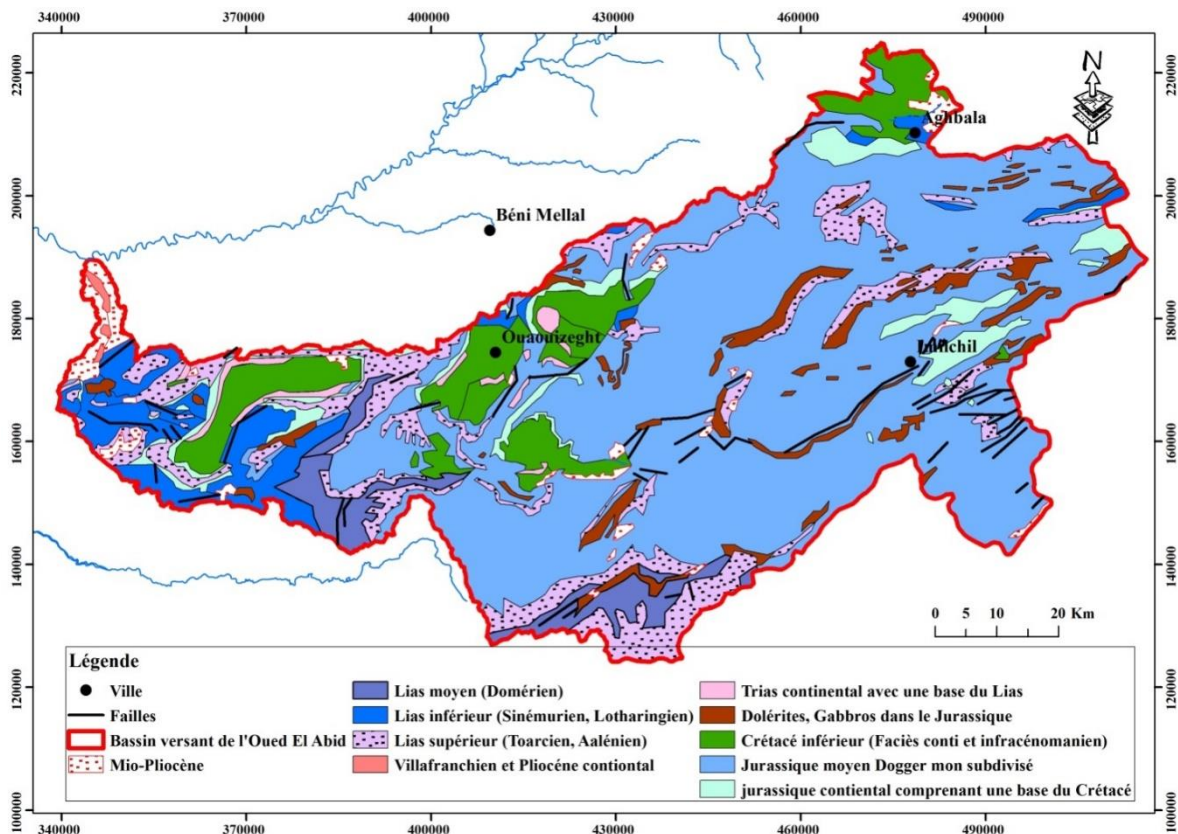


Figure 8: Carte géologique du bassin versant d'Oued El Abid (Source: carte de Rabat et Ouarzazate 1:500 000)

### b. Structure

La zone d'étude se situe dans une vaste structure synclinale à fond plate occupée par des couches du jurassique moyen et des structures anticlinales étroites, dont le cœur est occupé soit par des terrains sédimentaires triasiques ou liasiques, soit par des intrusions magmatiques.

Les structures synclinales ont une forme en S, avec un axe cartographique orienté N 50-60 E. L'épaisseur des séries, maximum au centre de chaque structure synclinale, se réduit rapidement en direction des structures anticlinales adjacentes, en même temps qu'apparaissent des variations latérales de faciès et des discordances progressives. Les rides E-W sont des

anticlinaux étroits, souvent à cœur triasique. Ces structures sont souvent faillées et le pendage de la faille, raide en profondeur, s'infléchit vers la surface, permettant l'amorce du chevauchement d'un flanc de l'anticlinal sur l'autre, plus raide, voire inverse.

L'épaisseur de la série sédimentaire est la plus faible à l'aplomb des rides anticlinales. Les rides NE-SW et NW-SE sont situées soit aux extrémités des rides majeures E-W, soit entre deux de celles-ci disposées en échelon.

Une schistosité et un métamorphisme général affectent souvent les roches dans les rides anticlinales de l'axe du Haut Atlas central. La schistosité est ici un clivage de dissolution. Presque partout, elle est orientée N70 à E-W, parallèle à l'axe des rides anticlinales E-W. Elle est particulièrement bien marquée à proximité et autour des intrusions magmatiques.

### **c. Topographie**

#### ▪ *Reliefs*

Le bassin versant de l'oued El Abid a une forme allongée vers l'Ouest (KG= 2.02). Il naît dans les chaînes du Haut Atlas calcaire à partir de Jbel Masker (3277m). Le relief du bassin de l'oued El Abid est délimité à l'Est et au Sud par une ligne de hautes crêtes supérieures à 3000m, son point culminant étant le Jbel Azourki avec une altitude de 3691m.

Ce bassin est subdivisé en deux parties à relief distinctif, une partie montagneuse et une partie de la plaine de Tadla au niveau de l'extrémité ouest. La première partie de la montagne se caractérise par une variation des altitudes entre 1800-3691 m avec des maxima observés au niveau du côté sud-est aux alentours de Zaouiet Ahnçal, Imilchil. Cependant, la partie avale (au début de la digue du barrage Bin El Ouidane jusqu'au point de confluence avec Oum Er-Rbia) se caractérise par un relief modéré et varient entre 1800-327m (Figure 9).



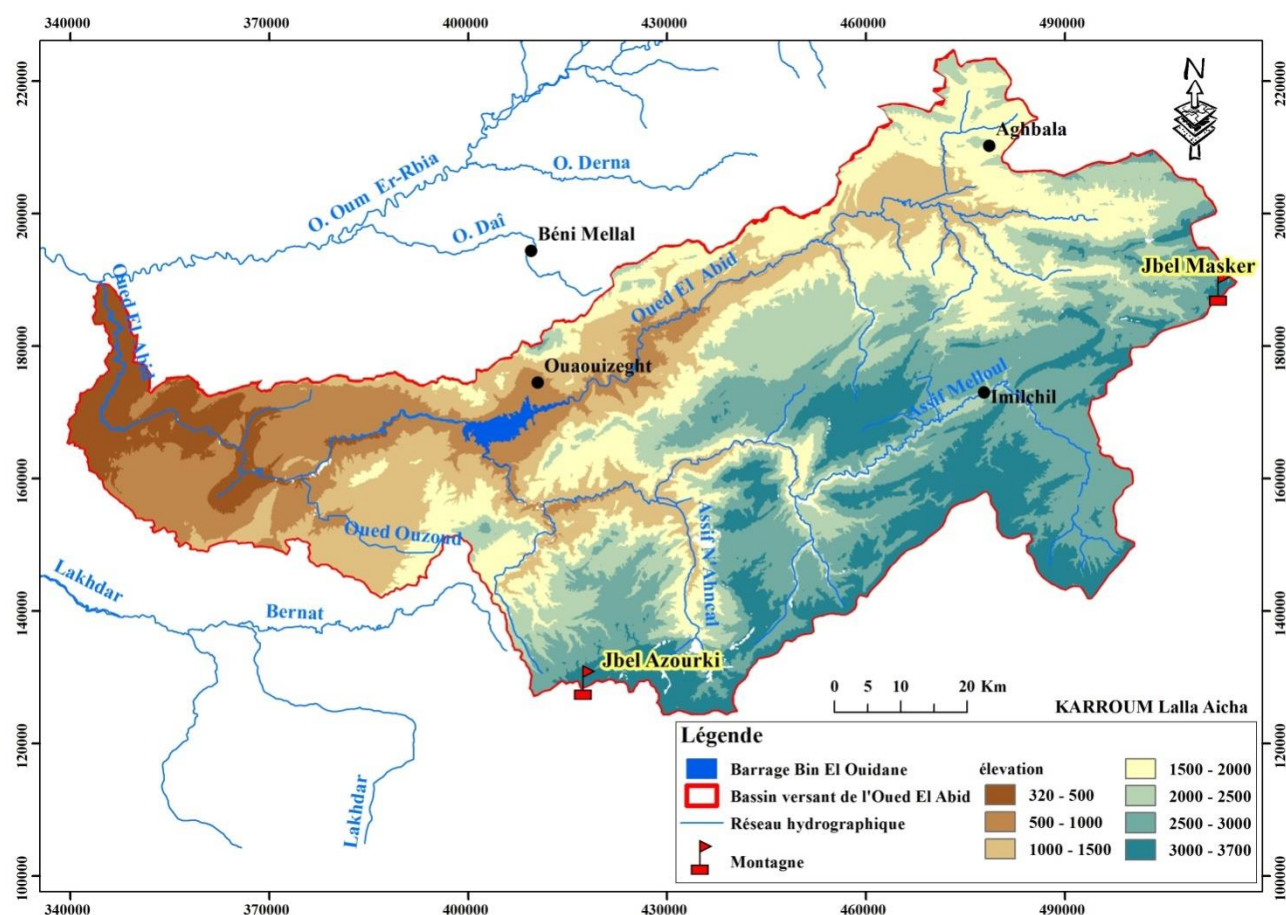


Figure 9: Reliefs du bassin versant Oued El Abid

▪ *Pentes*

La pente des cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin et donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, la pente peut se traduire par l'infiltration de l'eau (pour des pentes faibles) ou au contraire par un ruissellement de nature torrentielle (pour des pentes fortes) suivant la lithologie des roches rencontrées (Agostinho et al., 2004).

La répartition des pentes au niveau du bassin versant de l'Oued El Abid est subdivisée en deux zones distinctes où la pente est manifestée par des degrés ou pourcentages différents. La pente au niveau de la zone montagneuse varie entre 20° et 70°, ce qui exprime que cette zone est très vulnérable aux écoulements torrentiels qui peuvent engendrer dans la plupart des cas des inondations fréquentes et brutales. Cependant, la zone avale et le côté nord du bassin versant, les pentes sont faibles d'une façon générale et varient entre 0 et 15° ce qui se traduit par un écoulement fluvial et des temps de concentrations très longues au niveau des cours d'eau (Karaoui et al., 2019).

#### **d. Réseaux hydrographiques**

Le bassin versant de l'Oued El Abid est caractérisé par une orographie plus au moins accidentée dans la grande partie du bassin et des conditions climatiques marquées par des précipitations importantes. Ces deux paramètres rendent le bassin versant très favorable pour le développement d'un réseau hydrographique très ramifié (Figure 10).

Les principaux cours d'eau qui constituent le bassin versant de l'Oued El Abid sont formés par l'Assif N'Ahançal et l'Assif Melloul dans la partie sud-est du bassin et dans la partie nord-est par l'Oued El Abid et l'Assif n'Ougheddou. Ce réseau formé par ces quatre principaux cours d'eau se dirige vers le barrage de Bin El Ouidane où il continuera son chemin sous le nom de l'Oued El Abid jusqu'à la zone de l'embouchure avec l'Oued Oum Er-Rbia au niveau de la région de Tarmast.

L'Assif N'Ahançal et l'Assif Melloul naissent dans les chaînes de montagnes les plus élevées de la zone d'étude, respectivement proche de Jbel Azourki d'une altitude de 3691m et des chaînes qui entourent la ville d'Imilchil dans des altitudes de l'ordre de 3680m. Concernant l'Oued El Abid et l'Assif n'Ougheddou, leurs réseaux hydrographiques commencent aux alentours de Jbel Masker (3277m) puis ils continuent leurs chemins jusqu'au point de Taadlount où ils se rencontrent pour continuer leurs chemins en un seul cours d'eau nommé Oued El Abid. Ces différents cours d'eau se réunissent dans le barrage de Bin El Ouidane qui constitue un point culminant du bassin versant, puis ils continuent leurs chemins vers l'Oued Oum Er-Rbia.

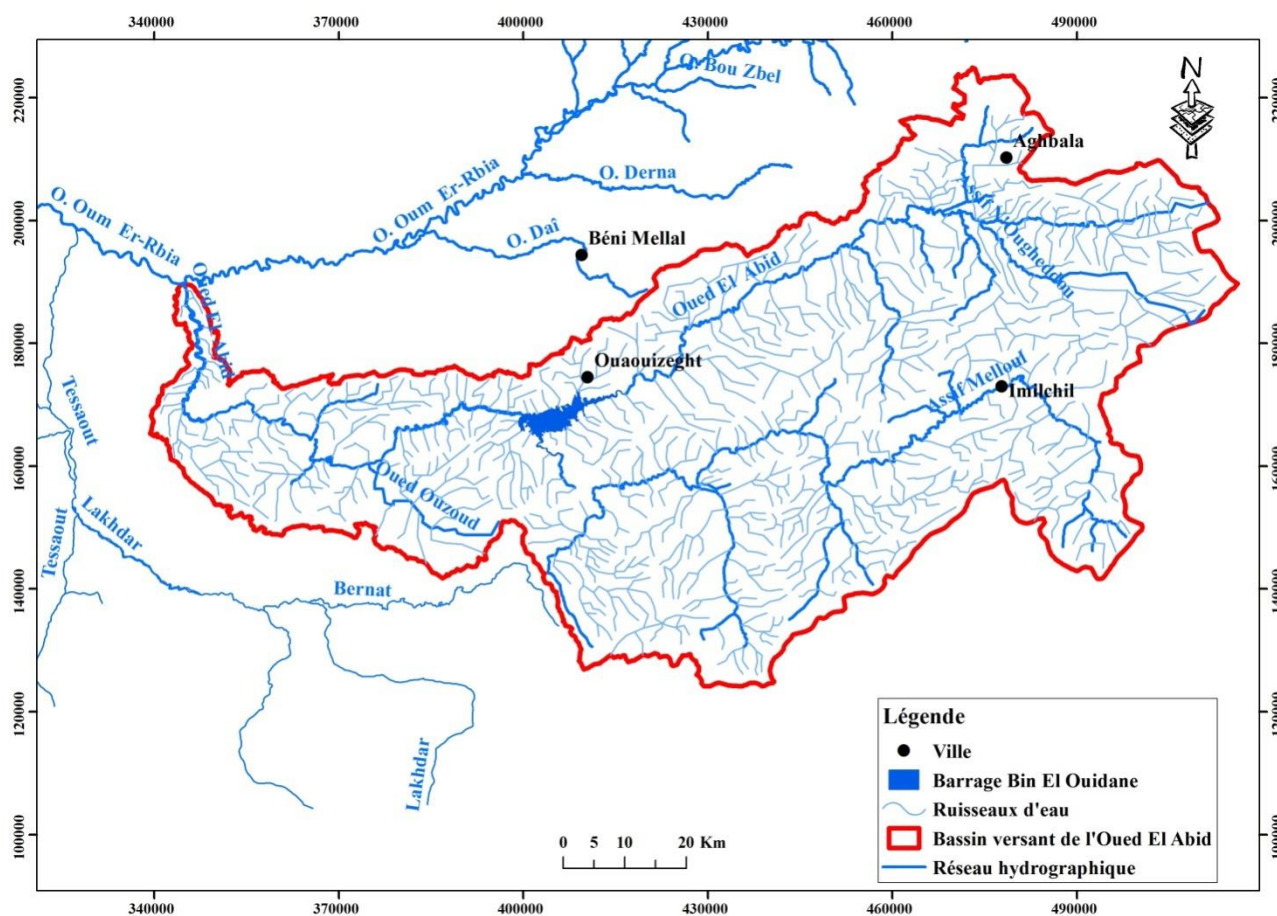


Figure 10: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued El Abid

### e. Occupation du sol et couvert végétal

Le bassin versant Oued El Abid se caractérise par un couvert végétal notable en termes de densité qui est très importante dans les versants situés au nord (aux environs des villes d'Aghbala, Ouaouizeght et Béni Mellal). Cependant, le côté sud-est aux alentours de la ville d'Imilchil est dépourvu du couvert végétal et n'est formé que par des terrains nus ou bien occupés par la neige. La partie aval du bassin connaît un couvert végétal moyennement dense (Figure 11).

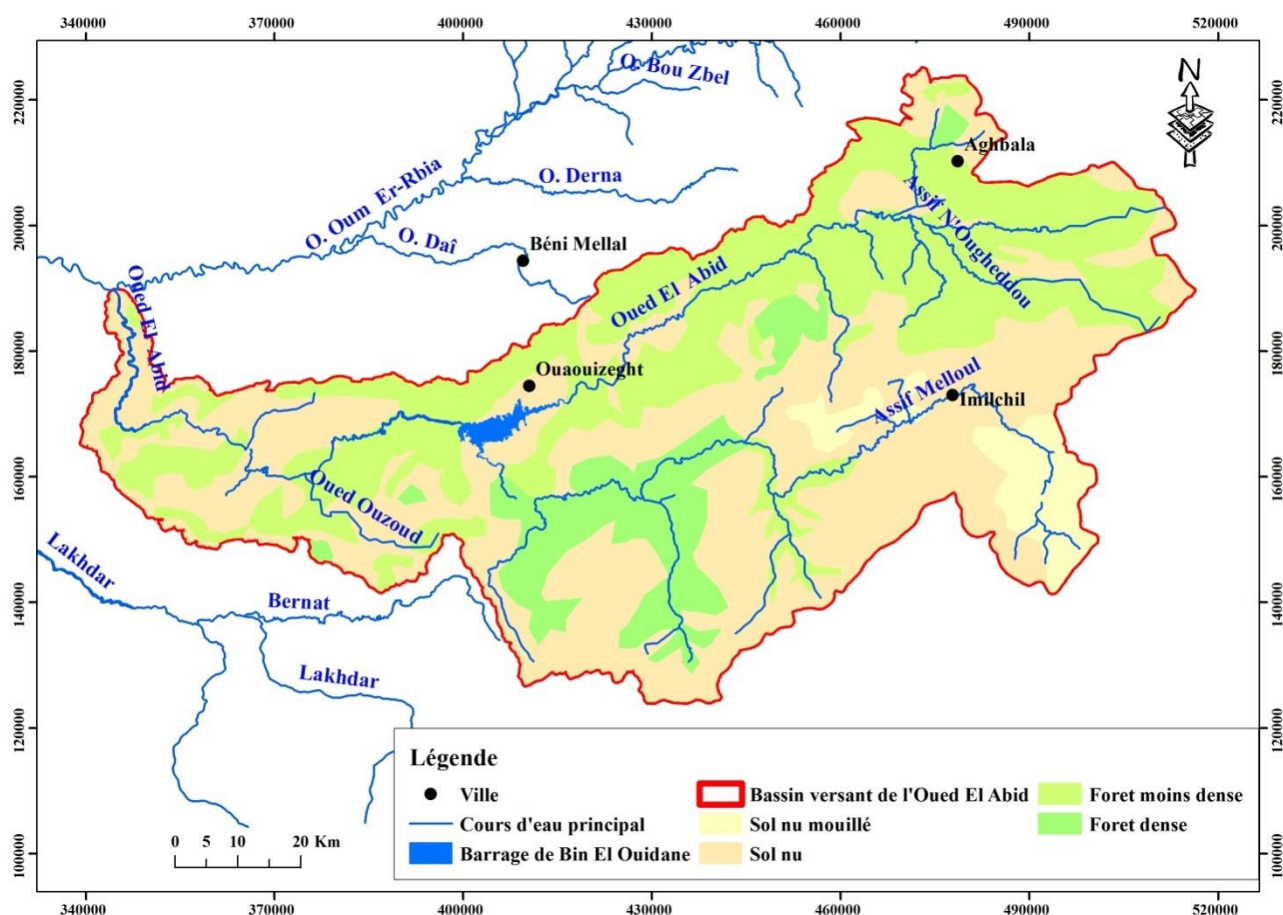


Figure 11: Occupation du sol au niveau du bassin versant

### III. Pollution dans le bassin versant Oued El Abid : État des lieux

La pollution dans le bassin versant Oued El Abid n'est pas un phénomène récent en raison de son appartenance à l'un des bassins les plus pollués (Oum Er-Rbia) et qui connaissent un taux d'industrialisation important et à sa localisation adjacente avec l'un des périmètres irrigués le plus productif au Maroc.

En analysant les caractéristiques de la zone d'études (activités agricoles, emplacement des rejets et les installations des traitements des déchets liquides et solides), on a constaté que la pollution des ressources en eau dans la zone d'étude est grandement liée aux activités de la population qui loge les berges de l'Oued El Abid qui connaît un taux d'urbanisation important dans les villes d'Azilal, Ouaouizeght et Bzou.

Cette pollution s'aggrave à cause de l'absence des stations d'épuration des eaux usées et les décharges publiques contrôlées dans la zone d'étude. Par la suite, il en résulte des déchets bruts qui vont s'acheminer vers les cours d'eau proches et deviennent ses récepteurs principaux (Caïdat Bzou, 2009).

Selon les derniers recensements de la population au Maroc, le nombre de la population du bassin versant Oued El Abid est passé de 106459 habitants pendant l'année 1994 jusqu'aux 141227 habitants comme une projection pour l'année 2024, c'est à dire une augmentation de 50%. Automatiquement, cette augmentation sera suivie par plusieurs répercussions surtout le taux des rejets de pollution liquides et solides des habitants qui se logent en grand nombre dans les rives de l'Oued El Abid et de ses affluents.

### **1. Charge polluante de la zone d'étude**

La charge polluante équivalente à la population actuelle et de projection future de 2024 du bassin versant se manifeste uniquement par deux types de pollutions (liquide et solide).

On se basant sur les normes et les équivalents des habitants moyens, des estimations des quantités de ces deux types de pollution du bassin a été effectuée, pour avoir une idée générale sur la quantité produite au niveau du bassin et qui n'est pas traitée à cause d'un manque des stations de traitement des eaux usées et la présence des décharges sauvages sur la plupart des centres et communes du bassin.

#### **a. Pollution liquide (Eaux usées)**

La charge polluante liquide des différents centres du bassin versant Oued El Abid a été estimée en utilisant l'équivalent moyen national de l'habitant en termes de rejets liquides estimé à 80 l/hab/j des eaux usées.

En se basant sur ces résultats d'estimation, la ville d'Azilal occupe la première place dans les villes productrices des eaux usées en grande quantité, suivies par Bzou, Ouaouizeght, Tagleft et Aghbala.

#### **b. Pollution solide**

L'évaluant moyen de la charge polluante solide au Maroc est estimée à 0,75kg/hab/jour de déchets solides. Cette charge polluante est très importante au niveau de la ville d'Azilal et qui peut arriver jusqu'à une valeur de 32,2 t par jour en 2024.



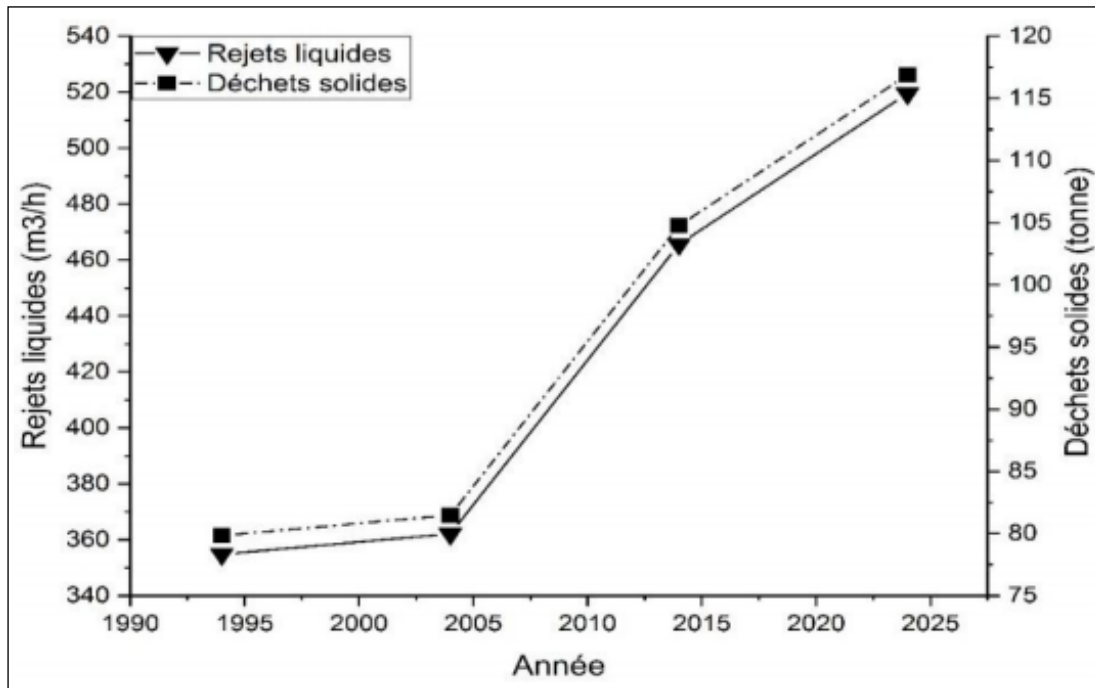


Figure 12: Évolution de la charge polluante globale au sein de la zone d'étude entre 1994 -2024

L'évolution de la quantité de la charge polluante liquide et solide au niveau de la zone d'étude commence à se ressentir à partir de l'année 2004 où la production des différentes villes devient très importante (Figure 12).

## 2. Activités économiques (agriculture, tourisme et artisanat)

L'agriculture au niveau de la zone d'étude se caractérise par une diversité de ses filières agricoles, qui se distinguent entre filières principales et de niche. Les filières principales comprennent les céréales, l'olivier, le maraîchage au niveau de la production végétale, laitière et de viande rouge et blanche. Les filières de niche sont constituées de certaines productions de terroir comme le grenadier, le miel, le caroubier, le cactus et les plantes médicinales et aromatiques (Centre Régional d'Investissement (CRI), 2016).

L'élevage occupe aussi une place privilégiée dans les activités de la population. Le cheptel constitue traditionnellement une source de revenu d'appoint pour les petites exploitations, en même temps que le capital de survie en période difficile.

La zone se caractérise par une diversité du paysage, des conditions climatiques et une richesse du patrimoine avec un avantage d'être étendue sur le Haut Atlas où le tourisme de montagne avec la richesse du terroir, les randonnées au niveau des sites les plus reculés du royaume, se prolifèrent. Toutefois, la proximité avec la première région touristique du Maroc à savoir Marrakech–Tensift, affecte le nombre de nuitées effectivement passées. Quant à l'artisanat, il est à souligner l'importance de l'artisanat au niveau des centres Bzou (djellaba

Bzouia) et Demnate (poterie, tissage et bijouterie), en plus d'autres centres connus par leurs activités, ainsi que le travail du bois et l'armurerie.

## IV. Présentation du bassin versant de l'Oued Ahançal

### 1. Localisation géographique

Le bassin versant de l'Oued Ahançal se situe dans la partie sud du bassin versant de l'Oued El Abid (Figure 13). C'est une zone montagneuse caractérisée par des altitudes très élevées, et délimitée au sud par une ligne de hautes crêtes supérieures à 3000m. Ce bassin est drainé par l'Oued Ahançal, le tributaire le plus important de l'Oued El Abid. Il prend naissance aux environs de Jbel Azourki à une altitude de 3691m. Il constitue avec Oued Melloul ou Assif Melloul le sous-bassin d'Assif Melloul, d'une superficie de 3117 km<sup>2</sup>.

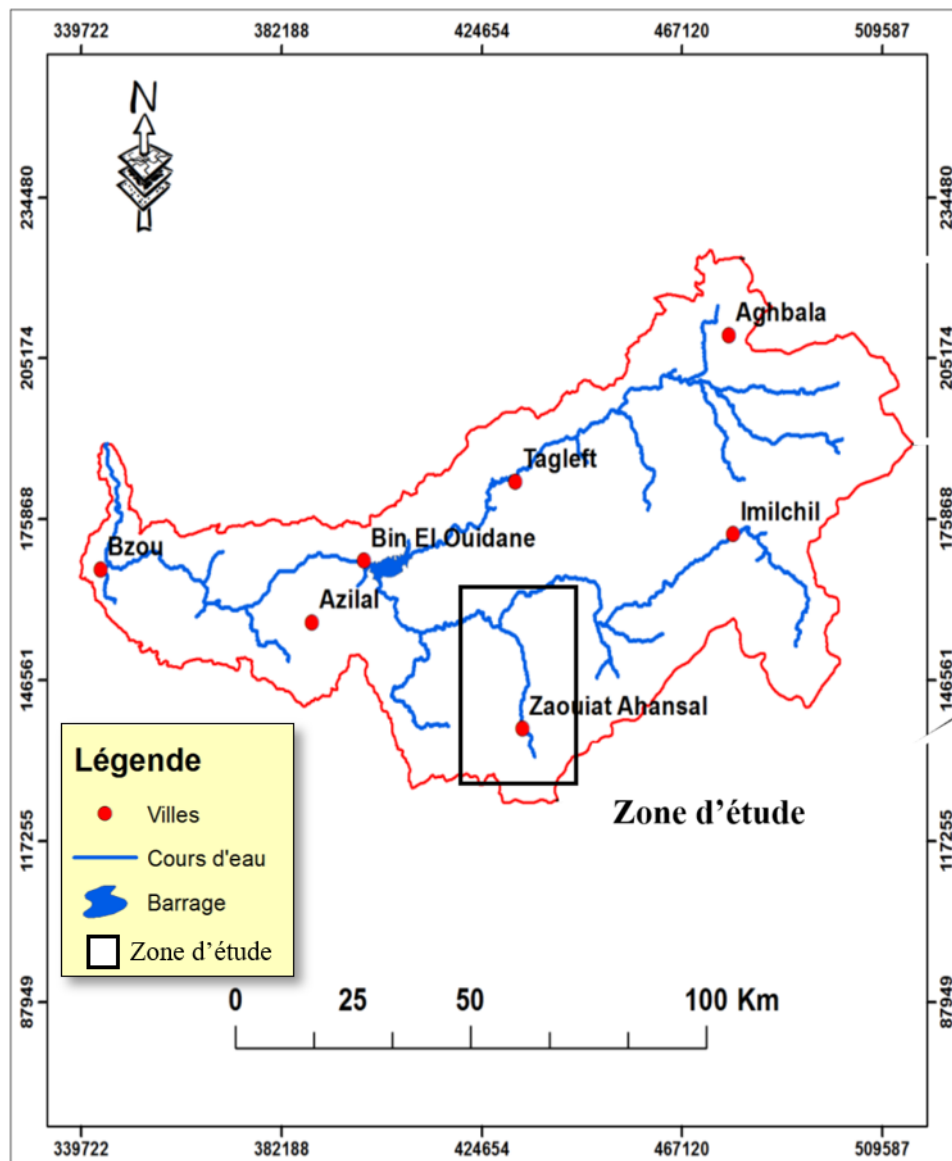


Figure 13: Localisation du bassin versant Oued Ahançal

## **2. Caractéristiques climatiques**

### **a. Précipitations**

La saison pluvieuse s'étend d'octobre à mai avec plusieurs maximas en novembre, janvier et mars. Par contre, les mois de juillet et août sont les plus secs. En effet, la pluviométrie annuelle d'une station au niveau de la partie amont (zone montagneuse) peut varier entre 1003mm/an jusqu'à 243 mm/an (références : stations de Tillouguite et de Zaouiet Ahançal, période 1990-2016) (Karaoui et al., 2019).

Dans le bassin versant de l'Oued Ahançal, la neige représente en hiver une part notable des précipitations en montagne (20% à 30% des précipitations totales) (Taïbi, et al 2015). Cette saisonnalité influence fortement le régime des cours d'eau, notamment au printemps et en été avec la fonte des neiges qui vient soutenir les étiages.

### **b. Température**

Les températures moyennes annuelles se situent entre 15° et 18°C jusqu'à 1500 m d'altitude (références : stations de Tillouguite et Azilal), puis décroissent ensuite rapidement en prenant de l'altitude. Les maximas mensuels se situent toujours en juillet-août, et les minimas en janvier avec un écart thermique d'une vingtaine de degrés entre ces deux périodes. Les valeurs extrêmes observées à la station de Tillouguite situé à l'aval du bassin sont + 43,8°C et - 9°C (altitude 1100 m).

### **c. Vent**

Selon les mesures effectuées par l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er-Rbia (ABHOER) entre la période 1990-2017 au niveau de la station de Tillouguite, les vents dominants sont ceux de provenance de l'Ouest vers l'Est, avec une vitesse maximale de l'ordre de 3.28 m/s durant le mois d'avril (2001), et une minimale de 0.15 m/s pendant le mois de décembre (2016).

## **3. Caractéristiques physio-graphiques**

### **a. Géologie**

Le jurassique constitue la quasi-totalité des terrains de la zone d'étude. Il comprend le Lias inférieur, moyen et supérieur et le Dogger. La répartition lithologique est formée essentiellement de terrains carbonatés avec des passés gréseux et doléritiques d'âge jurassique dans la partie sud du bassin (l'amont du bassin) puis des terrains marneux, des calcaires et des conglomérats. La partie aval du bassin connaît la présence des formations rouges d'âge Dogger (Taïbi, et al 2015).



## b. Reliefs, pente et couvert végétal

Le bassin versant de l'Oued Ahançal se caractérise par des altitudes très élevées variant entre 1800 et 3691 m avec des maxima observés au niveau du côté sud-est aux alentours de Zaouiet Ahançal, Jbel Azourki est le point culminant (3691m d'altitude). La pente au niveau de la zone d'étude est très accidentée (Boukdir et al., 2017). Elle varie entre 20° et 70° ce qui influence l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant et peut se traduire par un ruissellement de nature torrentielle.

Dans la partie sud de la zone d'étude, le bassin est dépourvu du couvert végétal. Il est formé de terrains nus ou bien des terrains occupés par la neige (sols mouillés en eau). La partie aval du bassin connaît un couvert végétal moyennement dense.

## V. Présentation du bassin versant Oued Srou

### 1. Localisation géographique

Le bassin-versant de l'Oued Srou est localisé au sud-ouest du Moyen Atlas central, au cœur de la province de Khénifra (Figure 14), il se situe en longitudes 5°05' à 5°50' Ouest et en latitudes 32°35' et 33° nord. Le bassin est délimité à l'Ouest par le massif central hercynien, au Nord par le causse d'Ajdir (calcaire et dolomie du Lias) et au Sud-est par la plaine de la haute Moulouya (El Jihad, 2010).

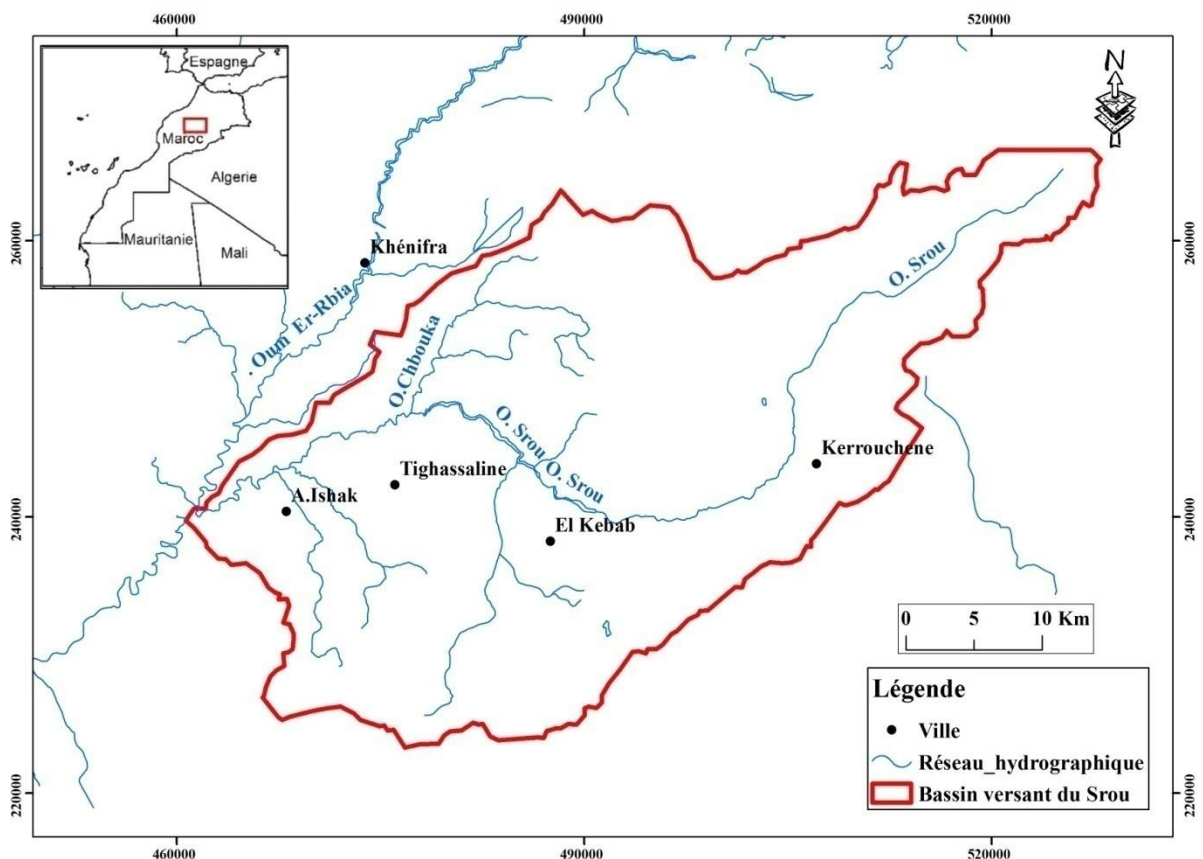


Figure 14: Localisation du bassin versant Oued Srou

L'Oued Srou est le principal affluent du haut Oum Er Rbia. Il prend naissance aux environs de Senoual, à une altitude de 2200 m environ et s'écoule du nord-est vers le sud-ouest. Son bassin-versant de forme allongée occupe une superficie de 1443 km<sup>2</sup>. Chbouka, son principal affluent, se trouve en rive droite (El Jihad, 1999). La percée spectaculaire du Srou marque la topographie du Causse moyen-atlasique. L'amincissement du Lias (calcaires) à cet endroit a permis au Srou et à ses affluents d'entailler le causse et d'atteindre le soubassement triasique (argiles et marnes) dont l'épaisseur peut avoisiner 300 mètres (Martin, 1981).

## **2. Caractéristiques climatiques**

Le climat de la région est très variable suivant les secteurs : semi-aride avec un hiver tempéré dans le bas Srou, il devient humide avec un hiver froid dans la partie supérieure du bassin-versant. Partout, il est caractérisé par des températures élevées et par des précipitations irrégulières dans le temps et dans l'espace (Elbouqdaoui et al., 2005).

Les données de douze stations climatologiques (sept localisées au niveau du bassin versant de l'Oued Srou, et cinq dans ses environs), montrent que la région a connu une période à tendance de sécheresse au cours des vingt dernières années. Les précipitations interannuelles sont de l'ordre de 500 mm, à l'exception de l'année agricole 1995-1996 qui a marqué un changement climatique brutal à l'échelle nationale, avec des précipitations dépassant les 700mm, et qui s'élèvent à 1559 mm à Aghbalou n Ikhouane.

En revanche, les faibles précipitations étaient enregistrées pour l'année 1994-1995 avec un total annuel de l'ordre de 300 mm (Elbouqdaoui et al., 2005).

## **3. Caractéristiques géologiques**

Les formations géologiques de la région, qui vont du Paléozoïque au Quaternaire, se composent de roches de faciès et de résistance variables : les calcaires crétacés subtabulaires, les calcaires dolomitiques liasiques, les basaltes doléritiques et les argiles rouges triasiques, ainsi que les schistes, grès et quartzites paléozoïques. Le Trias, se manifeste par des affleurements tendres très vulnérables à l'érosion, surtout sur les versants pentus. Les formations argileuses, riches en sel, sont à l'origine de la salure de nombreux Oueds et sources (El Jihad, 2005) (Figure 15).

L'altération de ces différentes formations et leur évolution pédogénétique ont donné plusieurs types de sols : sols peu évolués d'apport alluvial et/ou colluvial, qui sont très fréquents ; vertisols, sols calcimagnésiques et sols isohumiques assez profonds dans les vallées et les zones plates relativement stables ; et sols fersiallitiques sous forêts ou sur les terrasses anciennes. La dégradation des sols sous l'effet de l'érosion conduit à l'apparition de sols peu évolués d'érosion et de sols minéraux bruts.

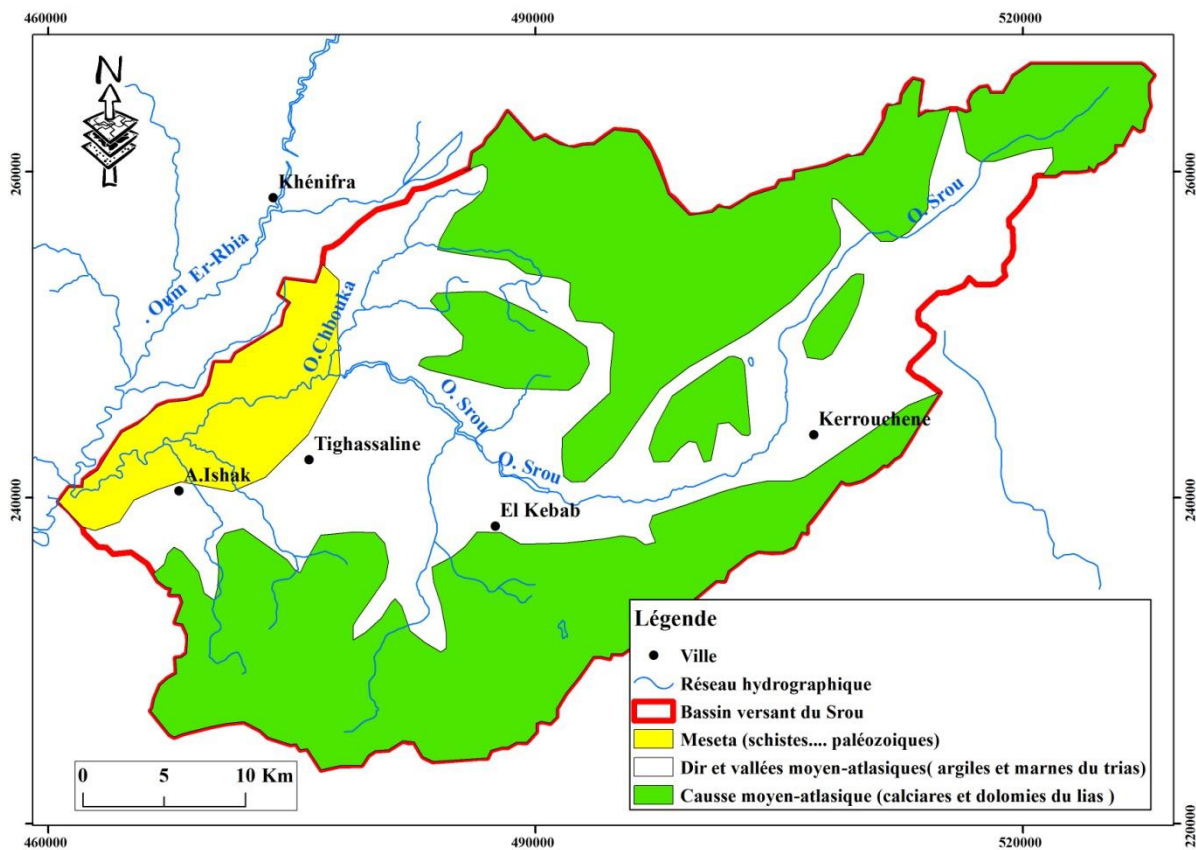


Figure 15: Esquisse géologique du bassin versant Oued Srou

#### 4. Caractéristiques géométriques et topographiques

Le bassin versant Oued Srou présente un caractère montagneux avec des altitudes qui varient entre 662 m et 2400 m. Il montre une diversité de reliefs, avec des formes structurales, des dépressions fermées, des ravins et des formes d'accumulation représentées par les terrasses alluviales.

De point de vue hypsométrique, le relief est considéré comme un facteur majeur reflétant l'aptitude d'un bassin versant au ruissellement. Dans le bassin versant de Srou les deux tranches altitudinales suivantes 1200-1400 m, 1400-1800 m, occupent plus de 40% de la surface du bassin versant. Ce qui montre le caractère montagneux du bassin. Les altitudes les plus basses s'étendent sur la partie avale du bassin versant (Yjjou, 2009 ; Yjjou et al., 2012a ; Yjjou et al., 2012b).

De point de vue pente, sept classes ont été identifiées. La classe 5-15%, éparpillée sur tout le territoire, représente 43% de la surface du bassin versant. La classe 15-25 est localisée surtout dans l'amont et au centre du bassin versant sur une superficie de 34905 ha soit 23% de la surface du bassin versant. Les pentes dépassant 25% sont localisées dans l'amont sur une superficie de 28171 ha soit 18,5% du bassin versant. Ces résultats montrent le caractère accidenté du bassin versant du bassin (Yjjou, 2009 ; Yjjou et al., 2012a ; Yjjou, et al., 2012b). (Figure 16).

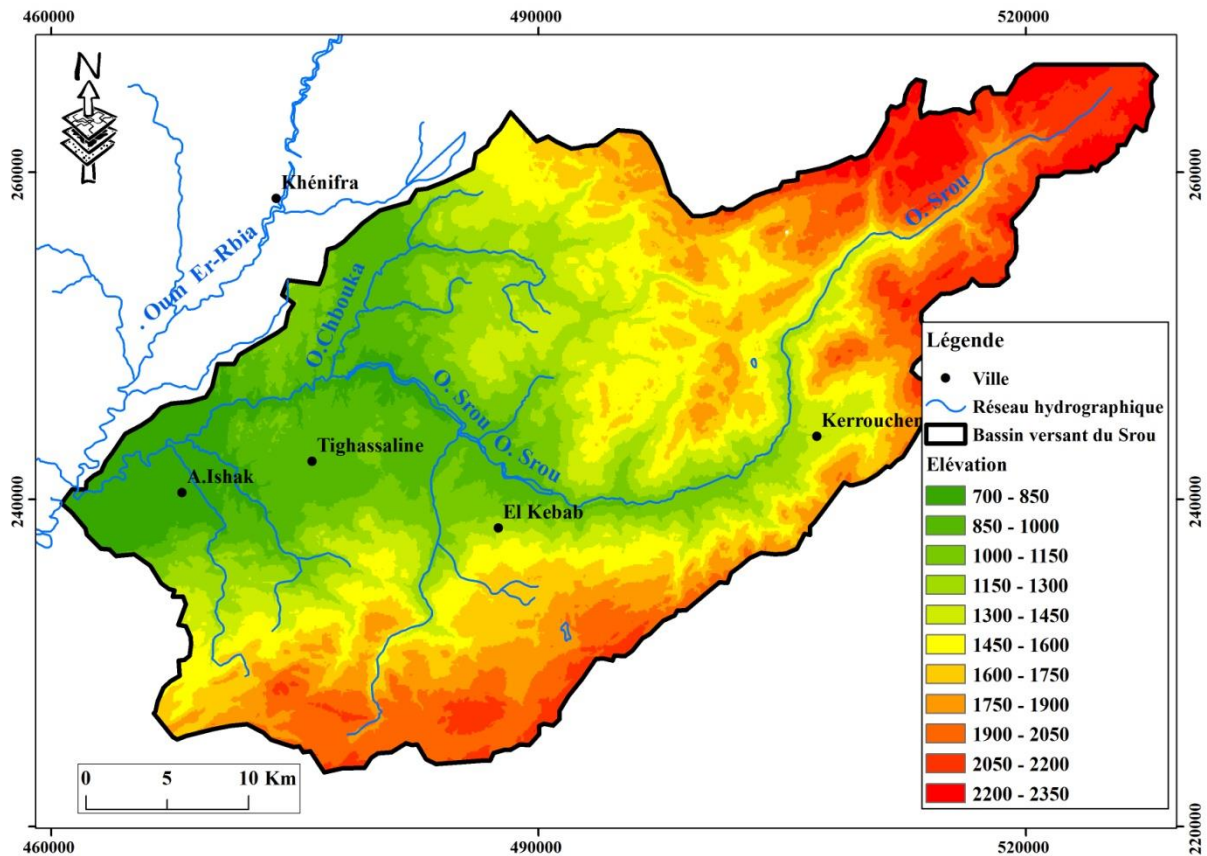


Figure 16: Reliefs du bassin versant

## 5. Occupation du sol et couvert végétal

Les sols du bassin versant de l'Oum Er-Rbia subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Le bassin versant est soumis à une forte érosion avec des pertes variant de 50 à 400 t/ha/an, touchent 54% du territoire. Les faibles pertes en dessous du seuil de tolérance ( $< 7$  t/ha/an) ne concernent que 9% de la superficie du bassin versant (Yjjou et al., 2014).

La couverture végétale est variée, on distingue des terrains de culture et des forêts à base de chênes verts et de cèdres, lesquelles se localisent essentiellement dans la partie orientale du bassin-versant. La région présente également des vergers ainsi que des prairies aux environs des lacs.

## VI. Pollution dans le bassin versant Oued Srou : Etat des lieux

Dans le bassin du Srou, la pollution d'origine industrielle et, plus encore, agricole est quasiment nulle. En revanche, la situation est préoccupante pour la pollution urbaine. La pollution des ressources en eau dans la zone d'étude est grandement liée aux activités de la population qui loge les berges de l'Oued Srou qui connaît un taux d'urbanisation moyen dans les villes de Tighassaline, Kerrouchen, Aït Ishak, et El Kebab (El Jihad, 2005).

Le quart de ces rejets est déversé, soit dans les ravins avoisinant les habitations, soit dans les puits perdus, surtout dans les quartiers marginaux. Le reste emprunte les réseaux d'assainissement liquide qui se terminent dans des talwegs à sec ou dans des talwegs à étiage estival sévère où il peut s'écouler pour atteindre le Srou. Aucune ville n'est dotée d'une station d'épuration (El Jihad, 2005).

Quant à la pollution solide la charge produite devient de plus en plus importante à cause d'un manque des stations de traitement et la présence des décharges sauvages sur la plupart des centres et communes du bassin.

### **1. Activités économiques (agriculture, tourisme et artisanat)**

S'appuyant sur l'exploitation de plusieurs terroirs (forêts, parcours, terres de culture), l'activité agricole trouve dans le bassin du Srou des conditions climatiques et topographiques peu favorables (pluies irrégulières et torrentielles, grêle, excès thermiques, relief accidenté, sols pauvres, etc.). Les travaux à l'araire dominant partout. La mécanisation ne concerne que certaines grandes exploitations céréalières accessibles. L'assolement biennal céréales/jachère est le trait dominant d'une agriculture extensive où l'élevage occupe une place importante. Les cultures irriguées n'occupent que 4 % de la SAU. Elles sont concentrées dans la vallée inférieure et moyenne du Srou autour des principales sources et dérivations de cours d'eau, où les densités peuvent atteindre 150 hab/km<sup>2</sup>. Ailleurs, l'enfouissement des eaux et le froid sont défavorables à un peuplement dense (densité inférieure à 15 hab/km<sup>2</sup>). L'économie est basée sur l'élevage (surtout ovin) et une céréaliculture aléatoire dans les dépressions du Causse (jusqu'à 1900 m d'altitude).

## **VII. Matériels et méthodes**

### **1. Méthodologie d'échantillonnage**

La méthodologie de travail consiste à caractériser le milieu étudié par le biais de trois composantes : l'eau, le sédiment et la nature des affleurements traversés par ces cours d'eau et ce par la détermination de plusieurs paramètres physicochimiques et éléments traces métalliques.

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. Il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. À cet effet, un échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physicochimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.). En outre, s'il est bien évident qu'un prélèvement correct est indispensable à l'obtention des résultats analytiques significatifs, il est tout aussi important de connaître le devenir de l'échantillon entre le prélèvement et l'arrivée au laboratoire.

Au moment du prélèvement, pour l'analyse chimique, les flacons seront de nouveau rincés 3 fois avec de l'eau à analyser puis remplis jusqu'au bord en essayant de placer le bouchon de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport.

Dans le cas d'une rivière, d'une nappe ouverte, d'un réservoir, d'une citerne, la bouteille sera plongée à une certaine distance du fond (50 cm) et de la surface, assez loin des rives ou des bords ainsi que des obstacles naturels ou artificiels.

Le volume nécessaire pour une analyse complète d'eau peut varier de 1 à 1,5 l, non compris les prélèvements spéciaux. Sauf pour certaines déterminations particulières à pratiquer sur place (pH, température, dureté totale et conductivité électrique).

Le transport à une température de 4°C et à l'obscurité dans des emballages isothermes permet d'assurer une conservation satisfaisante.

## **2. Normes de qualité des eaux de surface adoptées.**

La qualité de l'eau est un critère général utilisé pour décrire les propriétés physiques, chimiques, naturelles et / ou biologiques de l'eau. Nous la définissons souvent en termes d'utilisation humaine pour la consommation, les loisirs, l'esthétique,... etc. En termes plus généraux, la qualité de l'eau affecte toutes les composantes de l'écosystème aquatique. La qualité de l'eau appropriée et souhaitable pour l'utilisation par un organisme peut être totalement inappropriée pour un autre. Ainsi, la qualité de l'eau est un constat qui ne peut pas être défini facilement, ni définir des normes répondant à toutes les utilisations et à tous les besoins des utilisateurs. Par exemple, les normes des paramètres physiques, chimiques et biologiques de l'eau qui conviennent à la consommation humaine sont très différentes de ceux qui conviennent à un agriculteur irriguant une culture (Rodier, 1984).

Compte tenu des objectifs de ce travail, orienté spécialement vers l'analyse physicochimique des eaux de surface, des sédiments et la caractérisation des roches traversées par ces cours d'eau, les méthodes d'analyse retenues dans ce travail sont : les méthodes d'analyses chimiques préconisées par les normes Marocaine (2002) et de l'OMS (2011) en suivant la méthodologie de Rodier et al., 2009 (Tableau 2 et 3).

**Tableau 2: Normes marocaine (2002) et de l'OMS (2011) de qualité des eaux de surface.**

| Paramètres                    | Norme marocaine (2002) | Norme de l'OMS (2011) |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Température                   | 20                     |                       |
| pH                            | 6,5–8,5                | 6,5–8,5               |
| CE                            | 2700                   |                       |
| Turbidité                     | 5                      | 5                     |
| TH                            | 300                    | 500                   |
| OD                            | 5–8                    |                       |
| Na <sup>+</sup>               | -                      |                       |
| K <sup>+</sup>                | -                      |                       |
| Ca <sup>2+</sup>              | 100                    | 75                    |
| Cl <sup>-</sup>               | -                      | 200                   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | -                      | 250                   |
| Mg <sup>2+</sup>              | -                      | 50                    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 50                     | 11                    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0,5                    | 0,9                   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0,5                    | 0,2                   |

**Tableau 3: Teneurs maximales en ETM recommandées par l'OMS (2011) pour les eaux de surface.**

| Élément | Normes de l'OMS (mg/l) |
|---------|------------------------|
| Fe      | 0.3                    |
| Cu      | 2                      |
| Zn      | 0.5                    |
| Mn      | 0.1                    |
| Pb      | 0.01                   |
| Ni      | 0.07                   |
| Cr      | -                      |
| Cd      | 0.003                  |

### VIII. Techniques analytiques utilisées

Les analyses des échantillons ont été réalisées au sein du laboratoire Géorressources et Environnement, le centre d'analyse de la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal et le laboratoire de l'office national de l'électricité et de l'eau potable (ONEE) de Beni-Mellal.

Cette partie du mémoire offre une présentation générale de l'ensemble des analyses et techniques utilisées.

### **Analyse de l'eau**

Quelle que soit la méthode utilisée, le laboratoire d'analyses d'eau donne des résultats bruts.

Ainsi, les résultats de l'analyse comportent toujours, en dépit des précautions prises par l'opérateur, une certaine marge d'incertitude. Il convient donc de pouvoir détecter et les corriger, les erreurs grossières qui peuvent se produire : aussi bien au cours des manipulations, que lors des différents calculs.

S'il n'existe pas de recette absolue pour la vérification des résultats, la méthode la plus satisfaisante reste celle de la balance ionique. Le calcul de la balance ionique permet généralement de vérifier la fiabilité des résultats obtenus pendant la caractérisation de chaque échantillon. Ceci s'effectue en comparant la somme des anions et des cations analysés. D'une manière générale, la différence entre les cations et les anions par rapport à la somme totale nous permet de classer la fiabilité des analyses chimiques qu'on a réalisées en trois catégories : excellentes lorsque cette différence correspond à moins de 5 % de la somme totale, acceptable entre  $5\% < BI < 10\%$ , et douteuse lorsqu'elle est  $BI > 10\%$ .

#### **1. Analyses physicochimiques**

Les méthodes d'analyse des paramètres physicochimiques de l'eau sont les mêmes modes opératoires utilisés par les différents instituts en contrôlant la qualité des eaux au Maroc pour décrire la situation des différents types d'eau (surface, barrage et souterraine). Ces méthodes d'analyses sont extraites de l'AFNOR auxquelles se sont ajoutées des modifications qui prennent en considération les caractéristiques du pays (Ministère de l'Eau et de l'Environnement, 2002). Ces différentes analyses utilisées ont été résumées dans le tableau 4 suivant :



**Tableau 4: Méthodes et matériels utilisés pour les analyses physicochimiques des eaux échantillonnées.**

| Paramètres                               | Méthode d'analyse   | Unités |
|--|---|--------|
| Température                              | Multiparamètre(Thermo Scientific Orion 4-Star Plus)       | °C     |
| Potentiel hydrogène (pH)                 | Multiparamètre (Thermo Scientific Orion 4-Star Plus)      |        |
| Dureté TH                                | Multiparamètre (Thermo Scientific Orion 4-Star Plus)      | mg/l   |
| Conductivité électrique                  | Multiparamètre (Thermo Scientific Orion 4-Star Plus)      | µS/cm  |
| Turbidité                                | Turbidimetre  | NTU    |
| Oxygène dissous                          | Titrimétrie   | mg/l   |
| Titre alcalimétrique complet (TAC et TA) | Méthode titrimétrique à l'EDTA                            | mg/l   |
| Calcium                                  | Méthode titrimétrique à l'EDTA                            | mg/l   |
| Magnésium                                | Méthode titrimétrique à l'EDTA                            | mg/l   |
| Sodium                                   | Photomètreàflamme BWB                                     | mg/l   |
| Potassium                                | Photomètre à flamme BWB                                   | mg/l   |
| Chlorures                                | Méthode titrimétrique                                     | mg/l   |
| Sulfate                                  | Spectrophotomètre en utilisant la méthode turbidimétrique | mg/l   |
| Nitrate                                  | Spectrophotométrie  | mg/l   |
| Nitrite                                  | Spectrophotométrie  | mg/l   |
| Ammonium                                 | Spectrophotométrie  | mg/l   |
| Éléments traces métalliques              | Spectrométrie d'émission atomique ICP-AES                 | mg/l   |

## 2. Photomètre à flamme

Le photomètre à flamme est un instrument de laboratoire que l'on retrouve dans l'industrie chimique, pétrochimique, les analyses de l'eau ou les analyses médicales. Il est utilisé particulièrement pour obtenir une mesure de la concentration en éléments alcalins dans une solution aqueuse.

La solution à analyser est aspirée puis vaporisée dans une flamme. L'appareil dont nous disposons permet de déterminer la concentration de cinq éléments chimiques : Na, K, Li, Ca, Ba, tout en sélectionnant pour chacun un degré de calibration pour :

Na-ppm: 100, 1000, 2000

K-ppm: 40, 500, 1000

Li-ppm: 100, 500, 1000

Ca-ppm: 100, 500, 1000

Ba-ppm: 100, 1500, 3000

### **3. Spectrométrie d'émission atomique à plasma couplé par induction (ICP-AES)**

Cette technique constitue une méthode polyvalente et sensible grâce aux hautes températures produites par les plasmas des gaz inertes. Tout élément est émissif par excitation lorsqu'il est porté à une température suffisamment élevée (8000 K) (Zaichick, 2014 ; Novaes et al., 2016). L'analyse spectrale des échantillons repose sur la mesure du rayonnement émis. L'échantillon à analyser est nébulisé dans un plasma d'argon entretenu par induction électromagnétique. La mesure de l'intensité du rayonnement émis à une longueur d'onde correspondant à l'élément à doser permet de déterminer la concentration en cet élément dans l'échantillon.

## **4. Techniques statistiques**

### **a. Analyse en Composantes Principales**

L'analyse en composantes principales (ACP) s'effectue sur les données chimiques pour une meilleure compréhension de l'hydrochimie des eaux souterraines. Elle est utile pour la réduction et l'interprétation de grands ensembles de données multidimensionnelles avec des structures linéaires sous-jacentes, et pour la découverte de relations insoupçonnées. Cette approche facilite l'analyse en regroupant les données en des ensembles plus petits et en permettant d'éliminer les problèmes de multi-colinéarité entre les variables.

Des techniques multivariées ont été appliquées dans l'hydrochimie des eaux souterraines par plusieurs auteurs et elles se sont avérées très efficaces pour comprendre un certain nombre de processus géochimiques (Dawdy et Feth, 1967; Hitchon et al., 1971; Lawrence et Upchurch, 1976 ; Ashley et Lloyd, 1978 ; Seyhan et al., 1985; Usunoff et Guzman, 1989; Razack et Dazy, 1990 ; Jayakumar et Siraz, 1997; Hussein, 2004 ; Jayaprakash et al., 2008 ; Abderamane et al., 2012 ; Yitbarek et al., 2012).

Les données sont traitées par le programme SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, version 21). Elles sont stockées dans un tableau de données ou matrices. Les lignes de cette matrice représentent les individus sur lesquelles sont mesurées des variables quantitatives disposées en colonnes.

Dans le cas de notre étude, l'individu correspond à un point de prélèvement sur le cours d'eau à un temps donné, et les variables sont les différents paramètres physicochimiques mesurés.

### **b. Classification hiérarchique : les dendrogrammes**

Les méthodes de classification hiérarchiques (CH) se fondent sur la formation des groupes cohérents à l'intérieur et hétéroclites à l'extérieur. L'algorithme formé est soit ascendant dérivant par agrégations successives d'individus, soit descendant résultant des dichotomies successives de l'ensemble des individus. Dans notre étude, les dendrogrammes seront utilisés dont le principe est la construction d'une suite de partitions P en n classes, n-1 classes, n-2 classes..., assemblées et proches les unes dans les autres. Beaucoup d'auteurs (Shrestha et al., 2007) se sont servis des dendrogrammes pour classer les eaux de surface selon le niveau de pollution.

## **Analyse de roche et de sédiments**

### **5. Spectroscopie de fluorescence X (XRF)**

La fluorescence X (XRF) est une méthode d'analyse bien établie, adaptée pour des analyses qualitatives et quantitatives. Parmi les différentes méthodes physiques d'analyse, elle occupe une place importante en raison de la diversité de ses applications et de la possibilité qu'elle offre d'analyser des échantillons de façon non-destructive. C'est une technique qui permet de détecter, les éléments présents à des concentrations de l'ordre de microgramme par gramme ( $\mu\text{g/g}$ ), soit à des teneurs de l'ordre de la partie par million (ppm), sans altération des échantillons. Cette méthode permet de mesurer des échantillons très variés : des roches, des métaux, des minéraux, des huiles, de l'eau, des ciments, des polymères, des verres, des solutions...

Cette méthode est basée sur un principe physique relativement simple. Un faisceau de rayonnement X est dirigé sur une substance minérale. Cette dernière est excitée et émet des rayonnements X secondaires ou fluorescents. Chaque élément présent dans l'échantillon émet des rayons X d'une certaine longueur d'onde, en fonction de son poids atomique. En analysant le spectre des rayons X, il est donc possible de connaître la composition chimique de la structure irradiée, en retenant la loi de Bragg.

### **6. Diffraction des rayons X (DRX)**

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse cristallographique non destructive qui permet d'accéder à la nature des réseaux cristallins des produits analysés. Elle permet d'identifier une phase minérale sous réserve qu'elle soit bien cristalline. L'analyse consiste à

déterminer la distance interfoliaire dans un système cristallin en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$ . Cette mesure permet de déterminer le type de réseau.

Cette technique ne peut être utilisée que pour une matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés). Elle permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique, pouvant avoir une forme de cristallisation différente, par exemple la distinction des différentes silices ( $\text{SiO}_2$  : quartz, cristobalite...), des différents aciers (acier ferritique, austénite...) ou des différentes alumines ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  : corindon/alumine  $\alpha, \gamma, \delta, \theta \dots$ ). Un faisceau incident de rayons X monochromatique interagit avec un matériau, l'onde diffractée résulte de l'interférence des ondes diffusées par chaque atome. Elle dépend donc de la structure cristallographique. La direction du faisceau diffracté est donnée par la loi de Bragg :  $n\lambda = 2d \sin \theta$  Ou  $\lambda$  : est la longueur d'onde du rayonnement diffracté,  $n$  : est l'ordre de la diffraction et  $d$  : est la distance inter-réticulaire du plan cristallographique correspondant par ailleurs, entre les atomes.

On prépare l'échantillon sous forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, on fait tourner l'échantillon en même temps, ou on fait éventuellement tourner le tube produisant les rayons X.

## **7. Spectrométrie d'émission atomique à plasma couplé par induction (ICP-AES)**

Cette technique a été utilisée aussi pour la détermination des éléments traces métalliques des affleurements traversés par les oueds Objet de cette étude (voir paragraphe VIII-3 de ce chapitre).

## **IX. Conclusion**

Ce chapitre est une synthèse des principales techniques modernes de traitement des données, mise en œuvre pour la connaissance, l'évaluation et la caractérisation spatiale de la qualité des eaux des sédiments et des roches des bassins versants de l'Oued El Abid, l'Oued Ahançal et l'Oued Srou

.....

**PARTIE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS**

.....

Chapitre V : Évaluation de la qualité des eaux du bassin versant Oued El Abid

Chapitre VI : Évaluation de la qualité des eaux du bassin versant Oued Ahançal

Chapitre VII : Évaluation de la qualité des eaux du bassin versant Oued Srou

Chapitre VIII : Hydrochimie des eaux de surface

Chapitre IX : Évaluation de la contamination métallique des sédiments

## CHAPITRE V : EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT OUED EI ABID

La bonne connaissance de la zone d'étude joue un rôle majeur dans la compréhension de l'évolution des éléments chimiques, la protection et la résolution des problèmes de pollution au niveau du bassin versant. Dans ce chapitre on aborde la qualité hydrochimique des eaux superficielles de la zone d'étude, par le suivi et l'analyse de quelques paramètres physicochimiques au niveau des différentes stations prospectées pour établir à la fin un bilan général de la qualité hydrochimique des eaux de surface du bassin versant Oued El Abid.

### I. Description des paramètres physicochimiques

#### 1. Acquisition des données

Dans le but d'évaluer la qualité des eaux du bassin versant d'Oued El Abid, un échantillonnage portant sur 27 échantillons a été effectué le long de tous les affluents et les principaux cours d'eau de la zone d'étude et ceci pour couvrir toute l'aire d'étude et avoir une base de données solide en terme spatial. Le positionnement des stations a été fait aux endroits les plus suspectés tels que les zones de déversement des différents affluents et avant et après les agglomérations voisines (Figure 17).

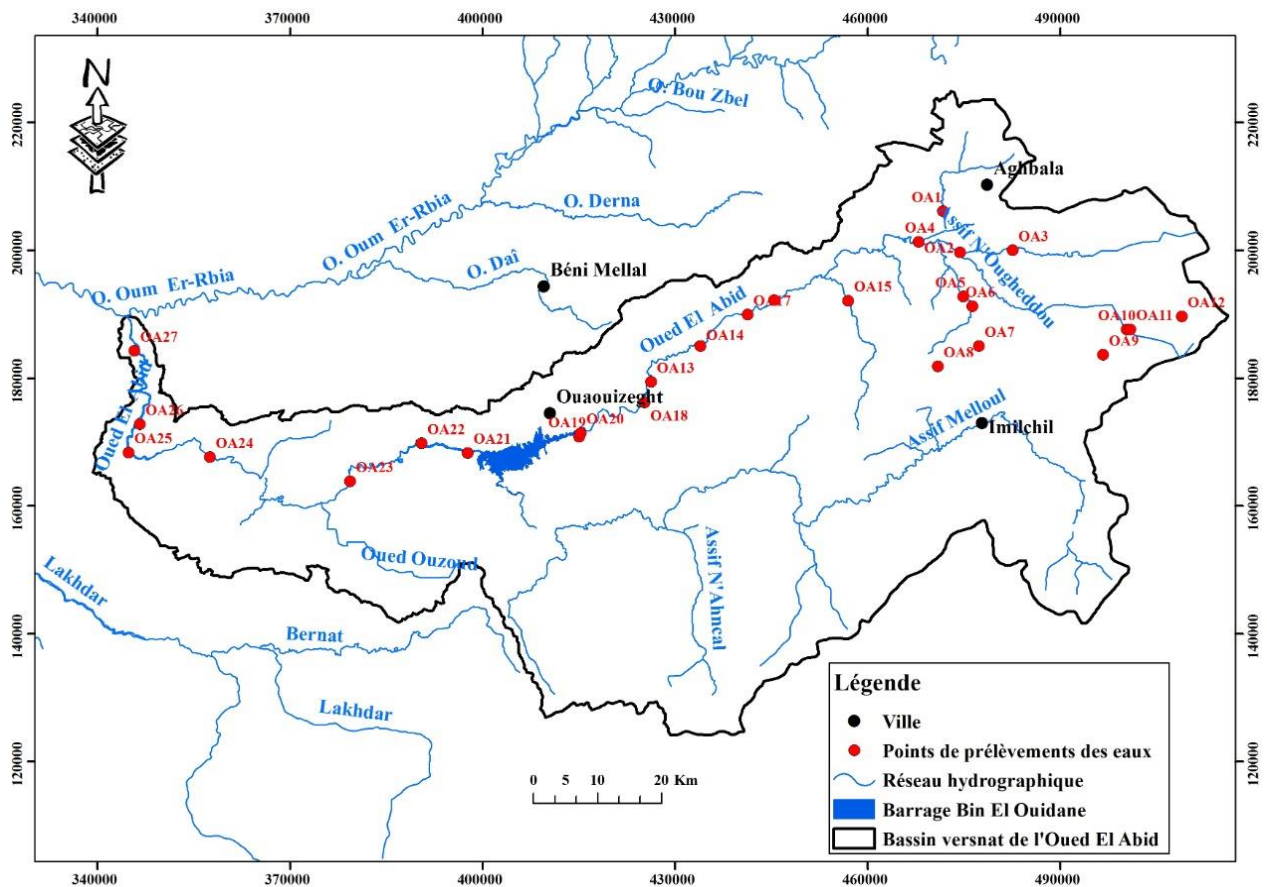


Figure 17: Points de prélèvements choisis pour suivre la qualité des eaux

## 2. Évolution spatiale des paramètres physicochimiques des eaux superficielles du bassin Oued El Abid

Seize paramètres ont fait l'objet de notre étude notamment : T, pH, OD, CE, la turbidité, TH,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4$ . Les résultats des analyses obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous (voir Tableau 1 Annexe 1) (karroum et al., 2019) :

Les températures enregistrées au niveau des eaux de surface du bassin El Abid sont comprises entre 11.9°C et 24.9°C (Figure 18). La valeur minimale est enregistrée au niveau d'un affluent en amont de Oued El Abid situé dans les hautes altitudes ce qui explique les basses valeurs de température, alors que les valeurs maximales sont enregistrées au niveau de la partie aval de Oued El Abid (conditions climatiques locales). Les écarts enregistrés ne sont dus en fait, dans des cas, qu'au décalage horaire journalier entre les mesures dans les différentes stations prospectées.

Le pH des eaux de la zone d'étude varie entre un minimum de 7.7 et un maximum de 8.2 enregistré dans plusieurs stations au niveau d'Oued El Abid (Figure 18). En littérature un pH naturel entre 6.5 et 8.5 caractérise des eaux où la vie se développe de manière optimale (Bendjama, 2014).

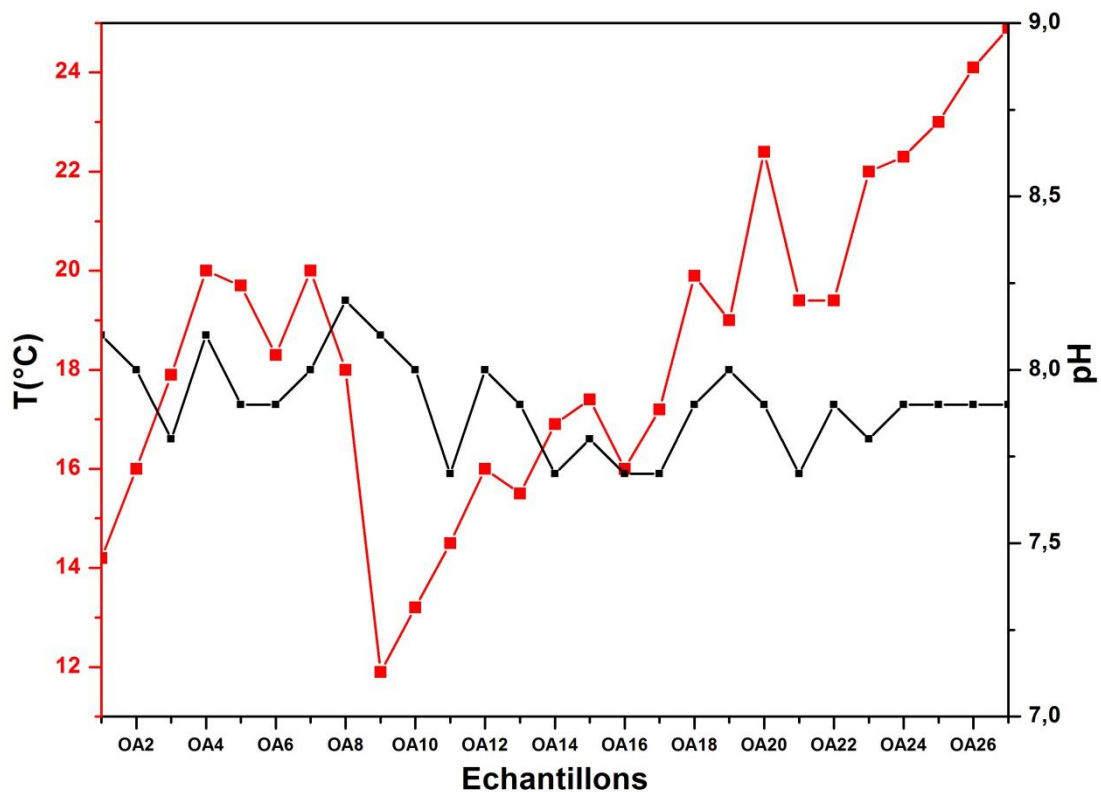


Figure 18: Représentation de l'évolution spatiale de T° et pH

La conductivité électrique mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés

électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Elle est proportionnelle à la quantité des sels dissous (Nisbet et Verneau, 1970). La CE oscille entre 260 et 770  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , et on remarque que ces valeurs ont tendance à s'élever dans la partie aval de l'Oued El Abid malgré qu'elles restent largement inférieures à la norme marocaine fixée à 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figure 19).

La TH varie entre 188 et 642 mg/l avec une moyenne de 357.3 mg/l (Figure 19). Les valeurs élevées de TH sont enregistrées dans 66% des échantillons spécialement dans la partie aval de l'Oued El Abid où les valeurs dépassent largement les normes marocaines fixées à 300 mg/l.

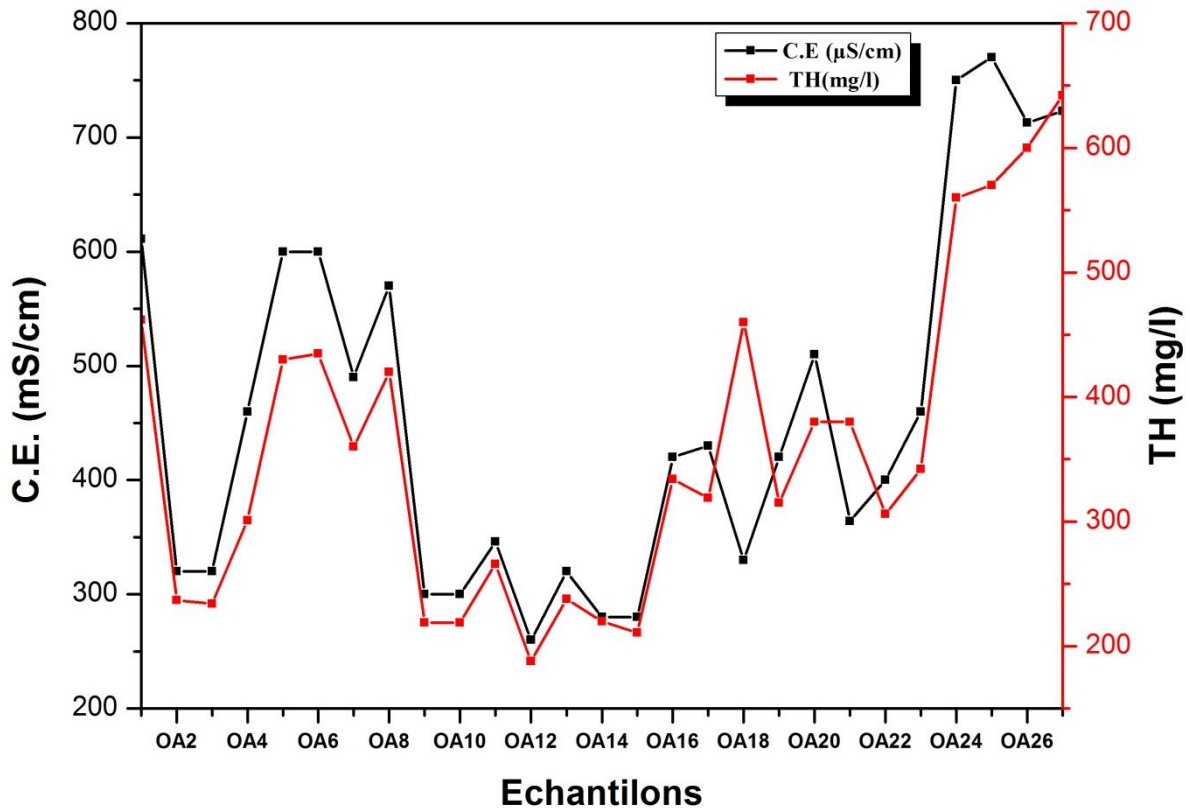


Figure 19: Représentation de l'évolution spatiale de la conductivité électrique et la dureté totale

La turbidité montre des valeurs qui oscillent entre 10.1NTU et 1000NTU (Figure 20). La différence enregistrée dans les valeurs de la turbidité est liée aux caractéristiques propres de chaque affluent du cours principal de l'Oued El Abid tel que la pente et la lithologie. 100% des échantillons montrent des valeurs qui dépassent largement la limite permise des normes marocaines et de l'OMS (5NTU). Dans notre cas d'étude, la turbidité est liée d'une part à la lithologie du bassin dont les marnes et les argiles sont très répandues et d'autre part elle dépend en générale des variations saisonnières « période de crue et période d'étiage ». Cette turbidité élevée est responsable du problème d'envasement dont souffre le barrage de Bin El Ouidane.

L'OD est un paramètre très sensible qui indique une pollution organique. Les échantillons montrent des valeurs qui oscillent entre 4.8 mg/l et 8.48 mg/l avec une moyenne de 6.86 mg/l



(Figure 20) qualifiant la qualité de ces échantillons comme bonne à excellente. Les valeurs minimales sont observées au niveau des stations situées dans la partie aval de l'Oued El Abid à cause des rejets d'eaux usées des agglomérations voisines (Ait Attab, Bzou...) qui sont acheminés directement vers la rivière du fait que les réseaux d'assainissement sont quasi-absents.

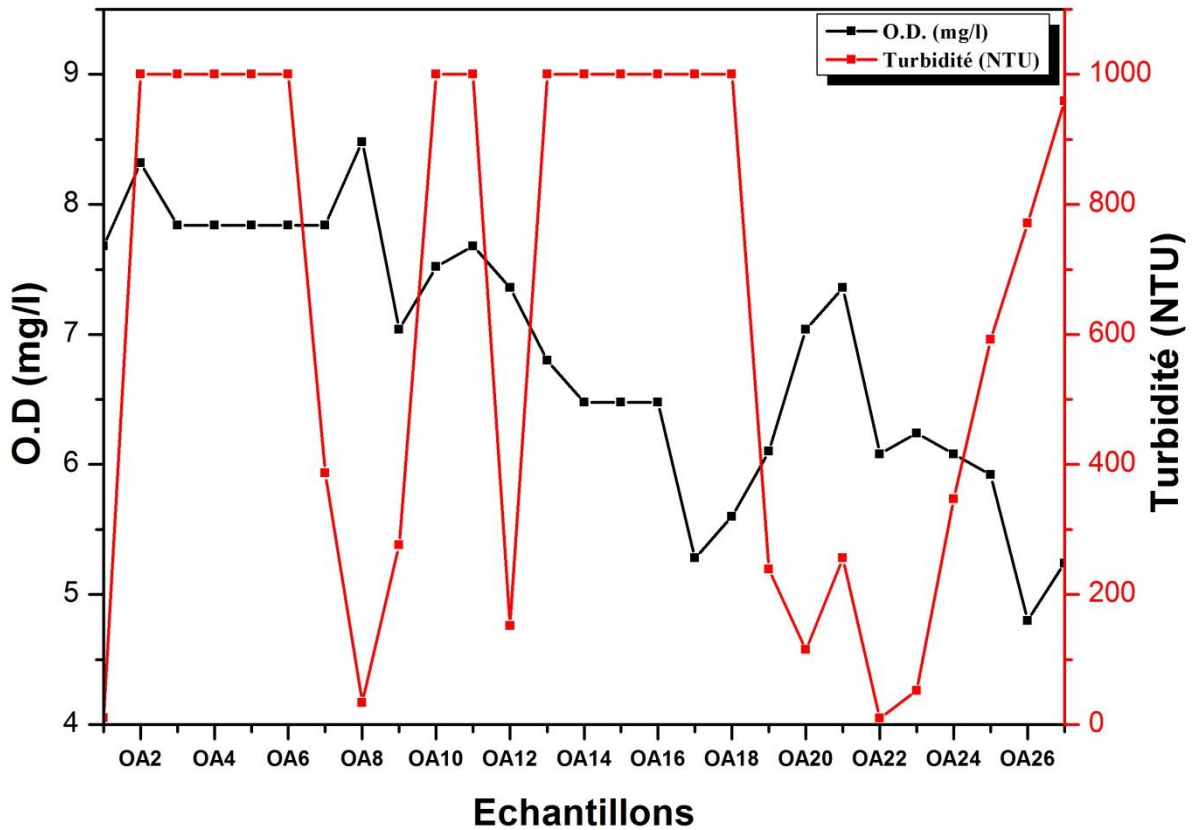


Figure 20: Représentation de l'évolution spatiale de la turbidité et OD

Les concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  sont respectivement de l'ordre de 40,3-153 mg/l et 34,41-120,65 mg/l avec des moyennes respectives de 81,23 mg/l et 63,26 mg/l (Figure 21). Les valeurs du calcium sont légèrement élevées et dépassent les normes marocaines et de l'OMS au niveau des stations OA5, OA8 et OA24 jusqu'à OA27. Quant à  $\text{Mg}^{2+}$  les valeurs augmentent dans la partie aval d'Oued El Abid depuis OA24 jusqu'à OA27. Cet enrichissement pourrait être probablement attribué au lessivage des minéraux des roches constituant le bassin versant (voir chapitre VIII de la troisième partie).

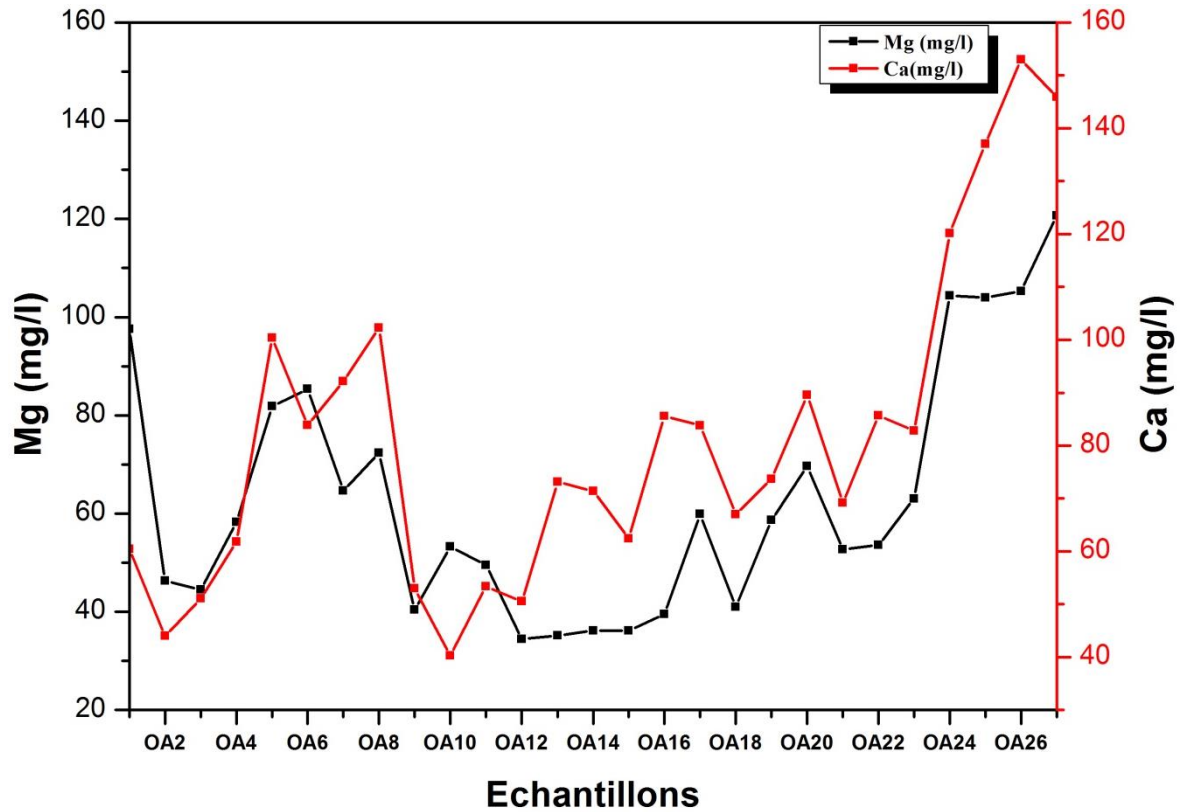
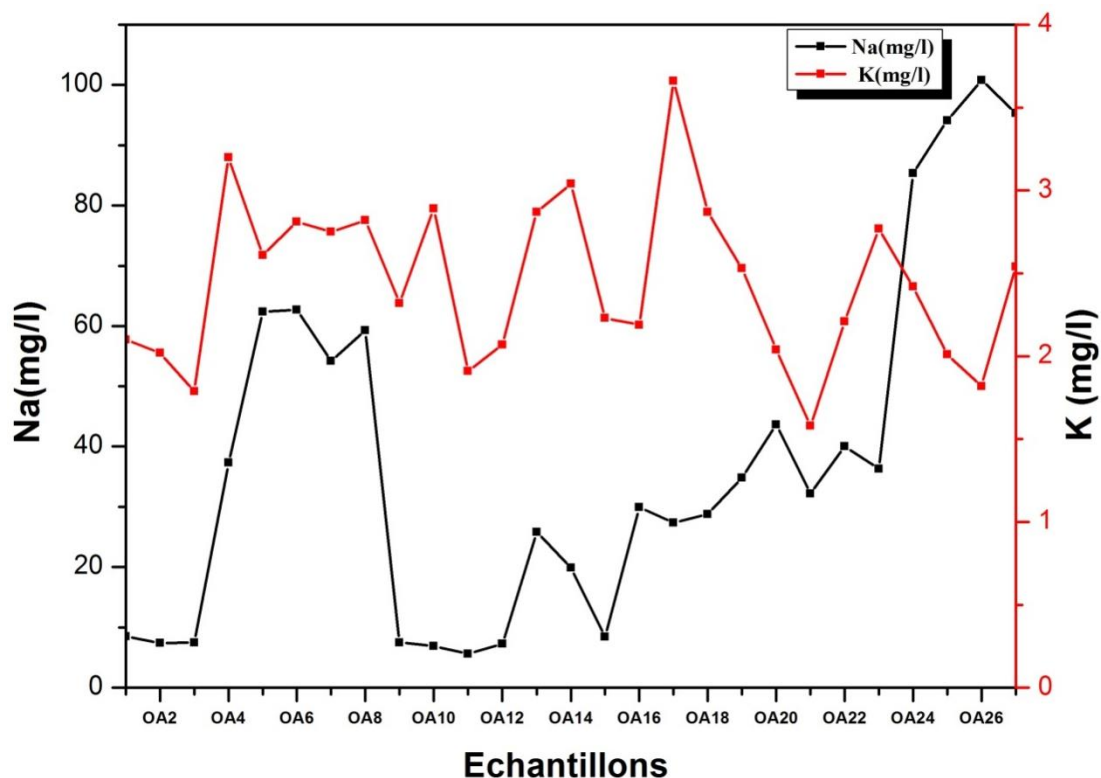


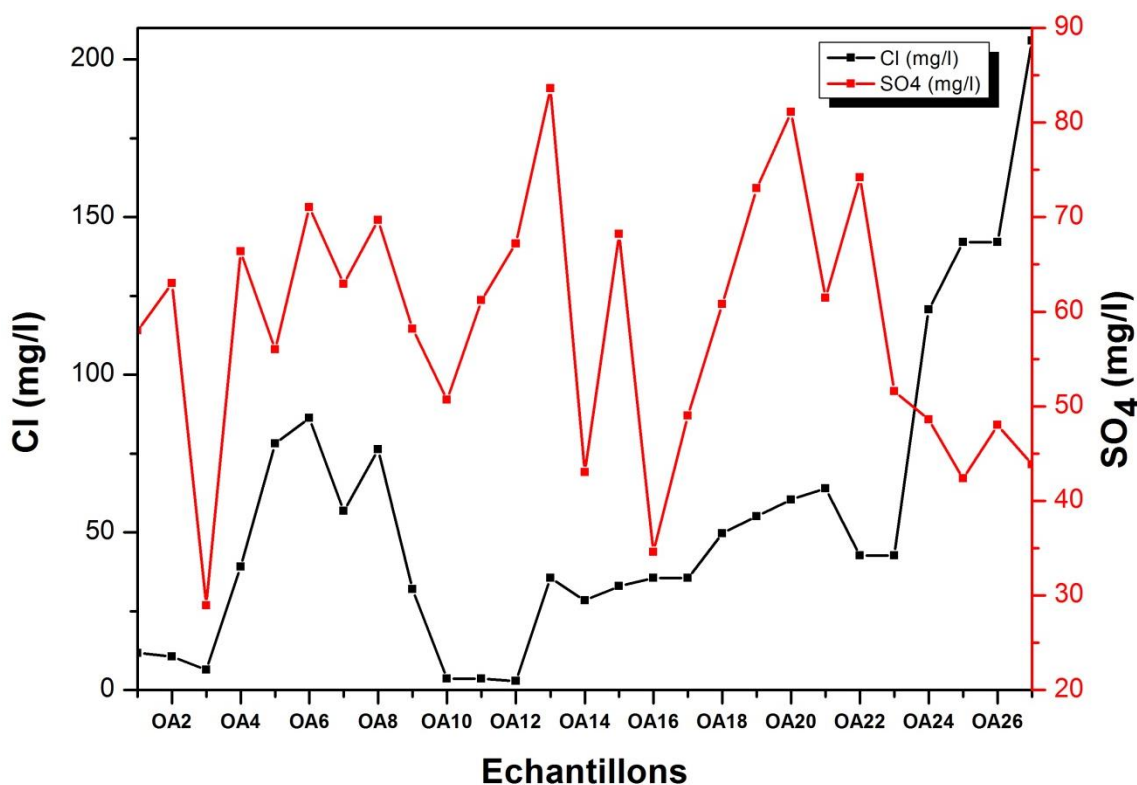
Figure 21: Représentation de l'évolution spatiale du Calcium et du Magnésium

Les concentrations de  $\text{Na}^+$  varient entre 5.6 mg/l à 100.8 mg/l avec une moyenne de 38.12 mg/l (Figure 22). Le sodium montre des valeurs basses, mais qui tend à s'élever en aval d'Oued El Abid depuis la station OA20 jusqu'à la station OA27. Les concentrations de  $\text{K}^+$  présentent des valeurs très basses qui s'échelonnent entre 1.58 mg/l à 3.66 mg/l avec une moyenne de 2.44 mg/l (Figure 22). Les valeurs de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  restent au-dessous de la limite marocaine recommandée. L'origine du  $\text{Na}^{2+}$  dans ces eaux est due au processus naturel tel que la dissolution des minéraux argileux (Spears et Reeves, 1975, Ogbukagu, 1986). Les cations sont dans l'ordre d'abondance suivant :  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ .



**Figure 22: Représentation de l'évolution spatiale du Sodium et du potassium**

Les concentrations en anions révèlent des variations remarquables le long du cours d'eau. Les concentrations de  $SO_4^{2-}$  varient entre 28,93 mg/l et 83,6 mg/l et celles de  $Cl^-$  s'échelonnent entre 2,84 mg/l à 205,9 mg/l avec une moyenne de 58,39 mg/l et 55.54 mg/l respectivement (Figure 23).



**Figure 23: Représentation de l'évolution spatiale des sulfates et des Chlorures**

Les contenus en  $\text{HCO}_3^-$  des eaux analysées varient entre 141,6 mg/l à 280,6 mg/l avec une moyenne de 229,81mg/l (Figure 24). Les teneurs en  $\text{NH}_4^+$  restent minimales et varient entre 0,01 mg/l à 0,282 mg/l (Figure 24). La valeur maximale est enregistrée au niveau du village de Ouauizght une source probable lié aux activités anthropiques des villageois.

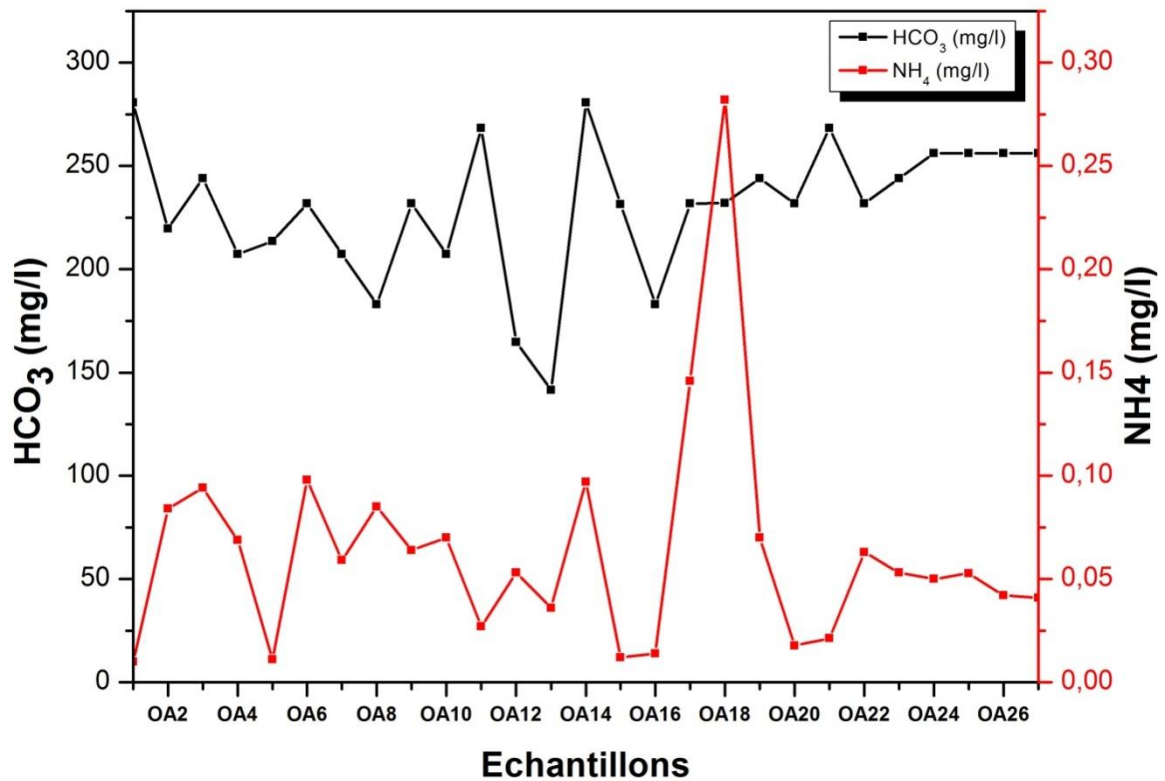
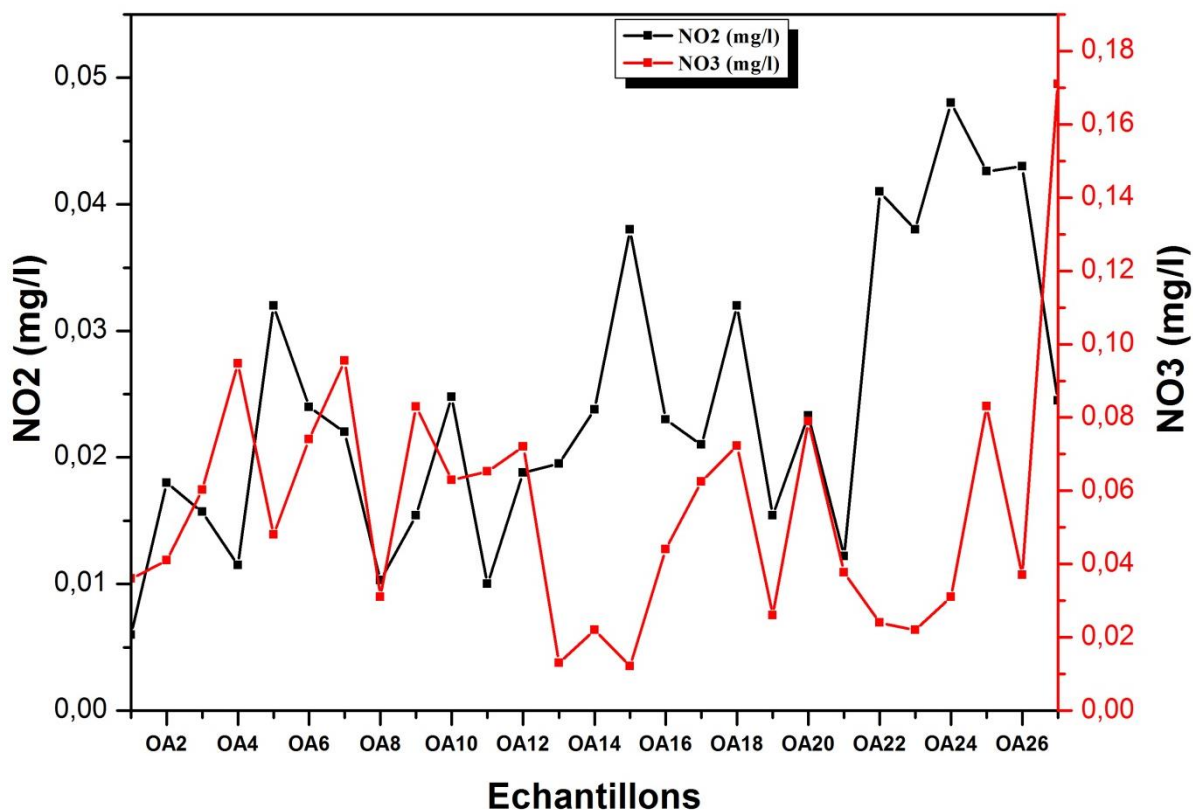


Figure 24:Évolution spatiale des  $\text{HCO}_3^-$  et de l'Ammonium

Les valeurs de  $\text{NO}_3^-$  oscillent entre 0,0121 à 0,171mg/l et restent au-dessous de la norme marocaine et les concentrations en  $\text{NO}_2^-$  varient entre 0.006 to 0.048 mg/l (Figure 25) et reste largement au-dessous des normes adoptées dans ce travail. Les anions révèlent l'ordre d'abondance suivant :  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^-$ .

Figure 25: Évolution spatiale des concentrations en NO<sub>2</sub> et NO<sub>3</sub>

### 3. Évolution spatiale des éléments traces métalliques des eaux superficielles du bassin versant Oued El Abid

Les concentrations des éléments traces métalliques (voir Tableau 2 Annexe 1) sont comprises entre 0,52-5,5 ; 14-20 ; 56-83 ; 2-598 ; 1-70 ; 12-20 ; 13-20 et 0-58  $\mu\text{g/l}$  pour Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn respectivement. Cr, Cu, Mn, Ni, Zn répond aux normes de l'organisation mondiale de la santé alors que Cd, Fe et Pb révèlent des valeurs qui dépassent légèrement les normes de l'organisation mondiale de la santé. L'origine supposée des éléments traces métalliques est probablement lié en premier lieu à la roche mère et en deuxième lieu aux activités anthropiques et l'agriculture, malgré qu'elle soit restreinte, qui libèrent des éléments de ce genre.

### 4. Niveau de contamination des eaux de l'Oued El Abid

L'appréciation de la pollution métallique dans l'environnement aquatique en se basant seulement sur la détermination de la teneur des métaux reste une approche peu pratique et peu significative surtout lorsqu'il s'agit des rejets complexes des compositions minéralogiques différentes d'une station à une autre. Cependant, les résultats bruts des teneurs métalliques constituent un instrument d'évaluation du degré ou d'indice de pollution métallique et des tendances spatio-temporelles qui lui sont associées. C'est ainsi que certains auteurs comme Belamie et al., 1982 ; Boust et al., 1981 ; Rosso et al., 1993 ; Bennasser et al., 2000 ; El Morhit,

2005 ont évalué la pollution à l'aide de cet indice de contamination (IC). IC est défini pour un métal donné comme étant le rapport de la teneur mesurée à une station donnée sur la teneur naturelle optimum fixée comme référence par l'OMS.

Nous avons reporté dans le tableau 5, les valeurs de l'indice de contamination calculées pour les métaux analysés dans les eaux échantillonnées au niveau des différentes stations.

Pour un indice de contamination IC proche de 1, on considère que le site n'est pas ou peu contaminé par les métaux. En général, c'est au-delà de 2 que les auteurs admettent que le site est soumis à un début de contamination.

L'évaluation des indices de contaminations des stations échantillonnées des eaux du bassin versant Oued El Abid nous a permis de constater que ces eaux sont indemnes de toute contamination par ces métaux. Du fait que les valeurs des indices relevées soient inférieures à 2 (Karroum et al., 2019).

**Tableau 5: Statistiques descriptives des indices de contamination par les métaux des eaux de l'Oued El Abid.**

|         | Ic (Cd) | Ic (Cr) | Ic (Cu) | Ic (Fe) | Ic (Mn) | Ic (Ni) | Ic (Pb) | Ic (Zn) |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Min     | 0,17    |         | 0,03    | 0,01    | 0,01    | 0,17    | 1,33    | 0       |
| Max     | 1,83    |         | 0,04    | 1,99    | 0,7     | 0,29    | 2       | 0,12    |
| Moyenne | 0,88    |         | 0,03    | 0,78    | 0,13    | 0,24    | 1,7     | 0,05    |

## 5. Identification du faciès chimique

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux de surface et l'effet du terrain, la représentation graphique des résultats des analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper. La réalisation de ce diagramme a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes (LHA-Avignon). Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions et d'un losange synthétisant le faciès global (Debieche, 2002 ; Gouaidia, 2008). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique de chaque échantillon d'eau. Le diagramme de Piper permet également d'avoir une idée sur la lithologie à partir des analyses chimiques, d'avoir une relation entre le chimisme de l'eau et la nature lithologique de l'encaissant et de suivre les propriétés physicochimiques d'un cours d'eau et son évolution spatiotemporelle.

Les différents prélèvements des 27 échantillons des eaux du bassin versant d'Oued El Abid ont été utilisés pour décrire la nature et les faciès chimiques.



La projection des résultats des analyses chimiques dans ce diagramme fait apparaître clairement une variation de la chimie des eaux de l'Oued El Abid indiquant un faciès bicarbonaté calcique et magnésien à chlorurée et sulfaté calcique et magnésien (Figure 26).

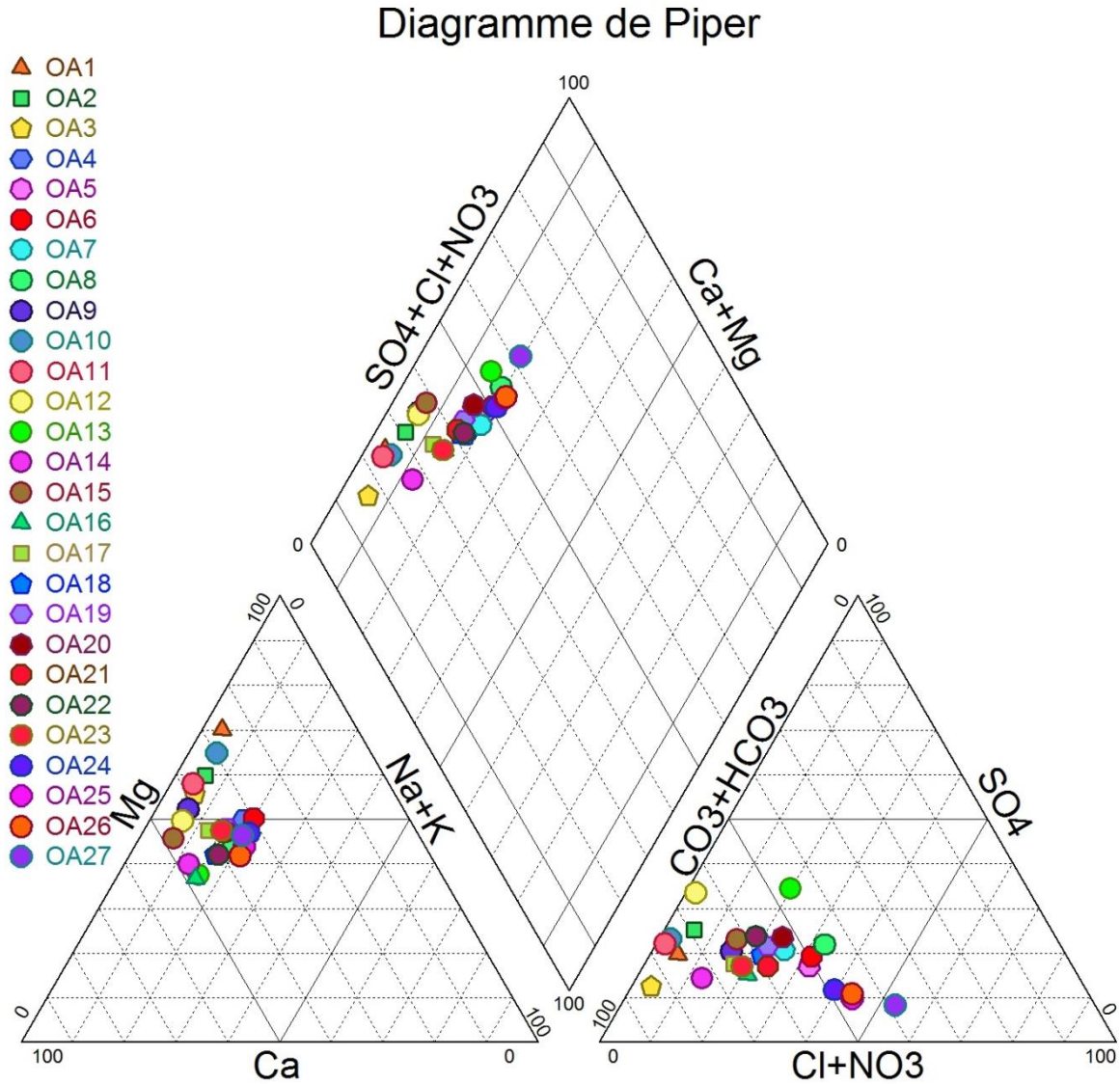


Figure 26: Diagramme de Piper des stations échantillonnées

## II. Étude des données par Analyse ACP

La composition chimique des eaux est fonction de plusieurs facteurs naturels (la nature géologique des formations à travers lesquelles l'eau a circulé et/ou a séjourné, les variations du climat) et anthropiques (les actions engendrées par l'être humain). Dans le but de déterminer les paramètres pouvant influencer le comportement chimique des eaux superficielles dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé la corrélation de Pearson, ACP et HA à l'aide du logiciel SPSS 21.

Différents tests de faisabilité ont été réalisés. Il s'agit des tests de Kaiser, Meyer et Olkin (indice KMO) et du test de Bartlett. La mesure de l'adéquation de l'échantillonnage de Kaiser-

Meyer-Olkin teste si les corrélations partielles entre les variables sont faibles ( $\ll 1$ ). Le test de Bartlett vérifie si la matrice des corrélations est une matrice unité ( $\gg 0$ ), ce qui indiquerait que le modèle factoriel est inapproprié. Pour la présente étude les valeurs de KMO et du test de Bartlett sont de 0,727 et 0, respectivement, indiquerait que le modèle factoriel est approprié.

### 1. Matrice de corrélations (coefficient de Pearson r)

La corrélation de Pearson est utilisée pour évaluer la relation entre les variables. Un coefficient de corrélation (r) de +1 indique que deux variables sont parfaitement corrélées positivement et ont la même source, alors que  $r = -1$  indique une négative corrélation et différente source. Cependant, il n'y a pas de corrélation si  $r = 0$  (Kumar et Dua, 2008, Nwankwoala et Warmate, 2014).

Le Tableau 6 présente les résultats de l'analyse de corrélation des données physicochimiques des eaux échantillonnées à l'Oued El Abid. Les valeurs en gras indiquent les corrélations les plus significatives.

**Tableau 6: Matrice de corrélation des différents paramètres physicochimiques.**

|                               | T            | pH    | EC          | TH          | Turbidité | OD           | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> |
|-------------------------------|--------------|-------|-------------|-------------|-----------|--------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| T                             | 1,000        |       |             |             |           |              |                 |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| pH                            | -,113        | 1,000 |             |             |           |              |                 |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| EC                            | <b>,681</b>  | ,185  | 1,000       |             |           |              |                 |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| TH                            | <b>,739</b>  | ,078  | <b>,917</b> | 1,000       |           |              |                 |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| Turbidité                     | -,113        | -,391 | -,167       | -,107       | 1,000     |              |                 |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| OD                            | <b>-,492</b> | ,382  | -,270       | -,431       | -,063     | 1,000        |                 |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| Na <sup>+</sup>               | <b>,829</b>  | ,071  | <b>,889</b> | <b>,876</b> | -,067     | -,426        | 1,000           |                |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| K <sup>+</sup>                | -,063        | ,112  | -,051       | -,096       | ,268      | -,100        | ,013            | 1,000          |                  |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| Ca <sup>2+</sup>              | <b>,802</b>  | -,043 | <b>,858</b> | <b>,861</b> | -,080     | <b>-,561</b> | <b>,957</b>     | -,032          | 1,000            |                  |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| Mg <sup>2+</sup>              | <b>,639</b>  | ,206  | <b>,962</b> | <b>,903</b> | -,158     | -,272        | <b>,824</b>     | -,079          | <b>,794</b>      | 1,000            |                               |                 |                               |                              |                              |                              |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ,269         | -,316 | ,292        | ,368        | -,081     | -,288        | ,158            | -,275          | ,194             | ,406             | 1,000                         |                 |                               |                              |                              |                              |
| Cl <sup>-</sup>               | <b>,795</b>  | ,030  | <b>,826</b> | <b>,878</b> | -,009     | <b>-,508</b> | <b>,940</b>     | -,042          | <b>,927</b>      | <b>,814</b>      | ,250                          | 1,000           |                               |                              |                              |                              |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | -,115        | ,385  | -,200       | -,232       | -,328     | ,269         | -,151           | ,093           | -,232            | -,214            | -,373                         | -,190           | 1,000                         |                              |                              |                              |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | <b>,570</b>  | -,245 | ,383        | ,405        | ,026      | <b>-,610</b> | <b>,545</b>     | -,028          | <b>,563</b>      | ,324             | ,138                          | ,477            | -,197                         | 1,000                        |                              |                              |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | ,270         | ,169  | ,282        | ,336        | ,185      | -,052        | ,297            | ,086           | ,242             | ,359             | ,052                          | ,423            | -,190                         | -,154                        | 1,000                        |                              |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | ,002         | ,022  | -,220       | ,000        | ,244      | -,211        | -,093           | ,466           | -,152            | -,221            | -,001                         | -,092           | -,060                         | ,043                         | ,119                         | 1,000                        |

À partir de la matrice de corrélation du tableau 8, se dégagent les observations suivantes :

- T° présente une corrélation positive avec CE ( $r = 0.681$ ), TH ( $r = 0.739$ ), Na<sup>+</sup> ( $r = 0.829$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $r = 0.802$ ), Mg<sup>2+</sup> ( $r = 0.639$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = 0.795$ ), et NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.576$ ) et une corrélation négative avec OD ( $r = -0.492$ ).



- CE montre une significative corrélation positive avec T° (r=0.681), TH (r=0.917), Na<sup>+</sup> (r= 0.889), Ca<sup>2+</sup> (r= 0.858), Mg<sup>2+</sup> (r= 0.962) et Cl<sup>-</sup> (r= 0.826).
- TH est bien corrélé positivement avec CE (r= 0.917), T° (r= 0.739), Na<sup>+</sup> (r= 0.876), Ca<sup>2+</sup> (r= 0.861), Mg<sup>2+</sup> (r= 0.903) et Cl<sup>-</sup> (r= 0.878) et montre une corrélation négative avec OD (r= - 0.431)
- Ca<sup>2+</sup> est bien corrélé positivement avec CE (r = 0.858), T° (r= 0.802), TH (r=0.861), Na<sup>+</sup> (r= 0.957), Mg<sup>2+</sup> (r= 0.794), Cl<sup>-</sup> (r= 0.927) et NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (r = 0.563) et négativement corrélé avec OD (r = -0.561).
- Mg<sup>2+</sup> montre une corrélation positive avec CE (r= 0.962), T° (r= 0.639), TH (r= 0.903), Na<sup>+</sup> (r= 0.824), Ca<sup>2+</sup> (r= 0.794), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (r =0.406) et Cl<sup>-</sup> (r= 0.814).
- OD présente une négative corrélation avec T° (r= -0.492), Ca<sup>2+</sup> (r=-0.561), Cl<sup>-</sup> (r= -0.508) et NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (r= -0.610).
- Na<sup>+</sup> montre une corrélation positive avec T° (r= 0.829), EC (r= 0.889), TH (r= 0.876), Ca<sup>2+</sup>(r = 0.957), Mg<sup>2+</sup> (r = 0.824), Cl<sup>-</sup> (r = 0.940) et NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (r= 0.545).
- K<sup>+</sup> présent une légère corrélation positive seulement pour NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (r= 0. 466).
- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> présentent une légère corrélation positive avec Mg<sup>2+</sup> (r =0.406) et une corrélation négative avec DO (r =-0.494).
- Pas de corrélation significative entre SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et les autres paramètres.
- Cl<sup>-</sup> est bien corrélé positivement avec T° (r= 0.795), EC (r= 0.826), TH (r = 0.878), Na<sup>+</sup> (r= 0.940), Ca<sup>2+</sup> (r = 0.927) et Mg<sup>2+</sup> (r = 0.8124) et présente une corrélation négative avec OD (r= -0.508).
- NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ne présente aucune corrélation avec aucune variable
- NH<sub>4</sub><sup>+</sup> présente une légère corrélation avec K<sup>+</sup> (r= 0.466).
- NO<sub>2</sub><sup>-</sup> montre une corrélation positive avec T° (r= 0.570), Ca<sup>2+</sup> (r= 0.563) et Na<sup>+</sup> (r = 0.545) et une corrélation négative avec DO (r= -0.610).

La bonne corrélation entre CE et Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et Cl<sup>-</sup> expliquerait que la salinité des eaux est très influencée par ces éléments. Alors que, la bonne corrélation de Cl<sup>-</sup>, élément conservateur, avec Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>, signifie que ces deux éléments se comportent de la même manière que Cl<sup>-</sup> sans réagir avec les autres éléments.

## **2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) : la similarité spatiale et le groupement des sites**

La recherche de groupes ou de classes homogènes peut également se faire par ce qu'on appelle la classification ascendante hiérarchique. Cette méthode permet de déterminer le niveau de similitude ou de divergence entre les individus (stations) et donne une répartition de ces

individus en groupes ou classes homogènes. La CAH représentée par le dendrogramme de la figure 27 et qui regroupe les 27 stations d'échantillonnage en trois classes ou clusters. Chaque classe regroupe les échantillons ayant les mêmes caractéristiques physicochimiques, la même origine naturelle des eaux et les mêmes polluants (Ibrahim et al., 2015).

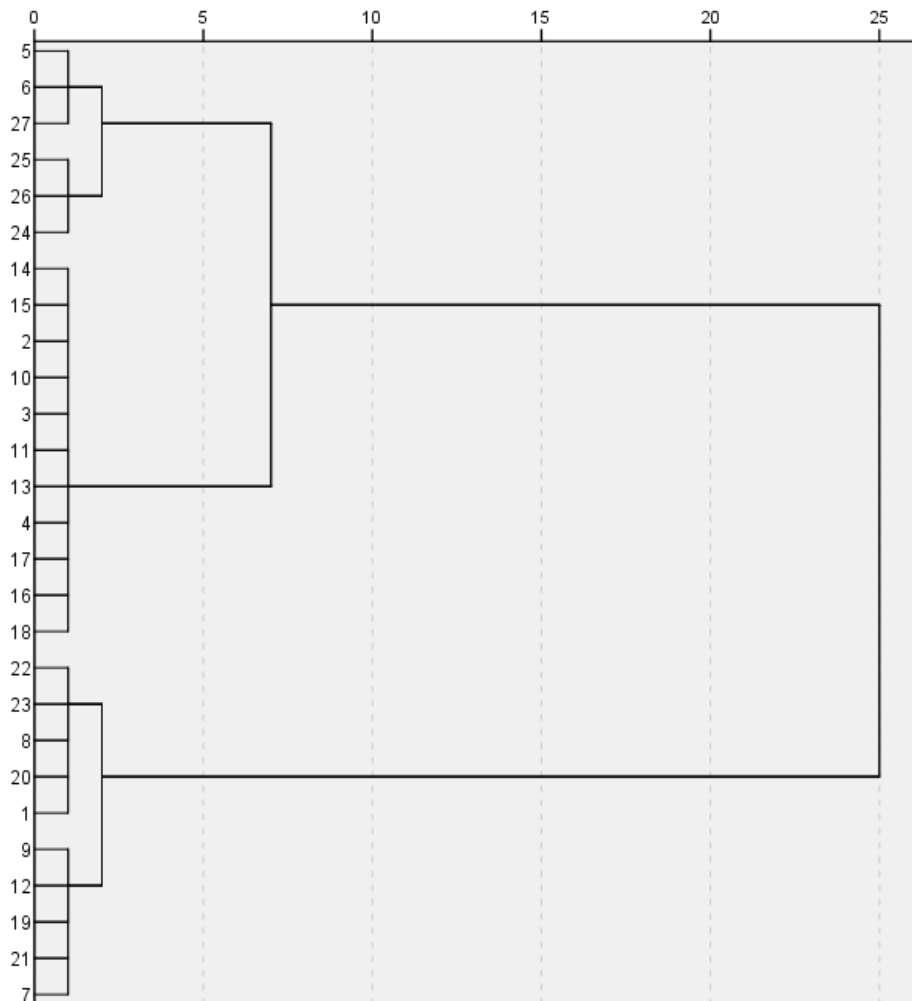


Figure 27: Dendrogramme du regroupement des stations échantillonnées de l'Oued El Abid

- **Cluster 1** inclus les stations suivantes OA1, OA7, OA8, OA9, OA12, OA19, OA20, OA21, OA22, et OA23. Il comprend toutes les stations situées dans la partie amont d'Oued El Abid (OA1, OA7, OA8, OA9, et OA12) et les stations situées aux alentours du barrage de Bin El Ouidane (OA19, OA20, OA21, OA22, et OA23). Dans ce cluster, le barrage de Bin El Ouidane joue le rôle dans la dilution des eaux avec une grande capacité d'autoépuration permettant de transformer ou d'éliminer les substances qui sont apportées aux cours d'eau (pollution), de manière définitive (autoépuration vraie) ou temporaire (autoépuration apparente). Mais ce processus d'autoépuration peut être limité lorsque les rejets des matières organiques sont trop concentrés, la capacité naturelle d'autoépuration des organismes vivants

est saturée et la pollution persiste. Par ailleurs, la présence de substances toxiques peut empêcher ce phénomène naturel (Zhang, 2014).

- **Cluster 2** est constitué des stations OA2, OA3, OA4, OA10, OA11, OA13, OA14, OA15, OA16, OA17, et OA18. Les deux clusters 1 et 2 présentent une bonne qualité des eaux, puisque cette partie est montagneuse avec une urbanisation faible et ne contient aucune activité agricole ou industrielle.

- **Cluster 3** comprend les échantillons OA5 et OA6 situés au niveau d'Oued N'ait Ouhssaine (affluent en amont d'Oued El Abid) et OA24, OA25, OA26, et OA27 localisés en aval d'Oued El Abid. Ce cluster enregistre des valeurs très élevées de tous les paramètres évalués malgré qu'elles restent, dans la plupart des cas, au-dessous des limites recommandées (norme marocaine et norme de l'OMS). Le cluster 3 regroupe les stations où la qualité des eaux se dégrade continuellement surtout en aval de Bzou jusqu'à sa confluence avec l'Oued Oum Er Rbia. Ces résultats ont été prouvés aussi par Karaoui et al., (2017). Cette dégradation est à lier à l'activité anthropique des agglomérations riveraines. En effet les rejets d'eaux usées des agglomérations voisines sont acheminés parfois directement vers Oued El Abid et/ou ses affluents sans oublier les autres polluants comme les margines des huileries évacuées anarchiquement dans la nature. On doit signaler aussi que les réseaux d'assainissement au niveau de ce tronçon sont quasi-absents et sont remplacés par les fosses septiques sauvages.

Karaoui et al., (2019) a mis en considération plusieurs scénarios pour chiffrer cette dégradation. La plus raisonnable est celle qui peut être causée par l'infiltration des eaux polluées des fosses septiques vers la rivière à travers les processus d'échange rivière-aquifère peu profonds.

Les résultats indiquent que la classification hiérarchique est un outil fort pour la classification des eaux de surface et elle peut fournir beaucoup d'informations pour établir un réseau d'échantillonnage et de surveillance convenable pour une gestion efficace (minimiser le coût et le temps) de la qualité des eaux (Chow et al., 2016).

### **3. Analyse factorielle**

Ce type d'analyse est utilisé pour comprendre la relation entre les variables (paramètres physicochimiques) et pour définir leurs caractéristiques. Le critère de Kaiser [Kaiser, 1960] a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs ou PCs significatifs : seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données. L'analyse a été poussée jusqu'à quatre facteurs. Ainsi le scree plot a identifié quatre facteurs à retenir (Figure 28). Ces facteurs représentent 76,856% de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie.

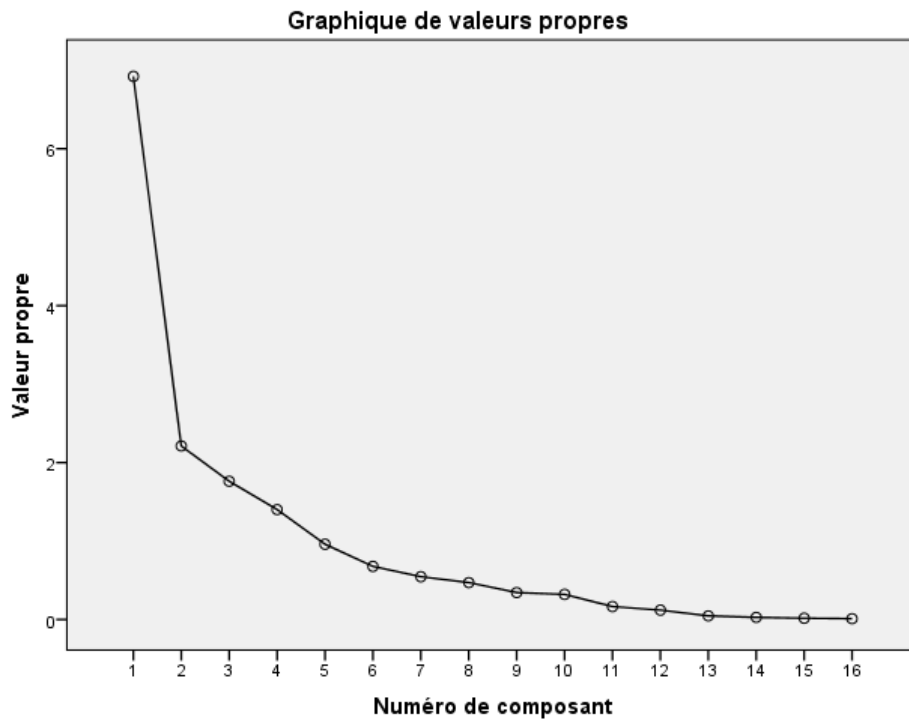


Figure 28: Scree plot déterminant le nombre de facteurs ou PCs à considérer

Dans notre cas d'études, quatre facteurs sont retenus et classés selon Liu et al., (2003) comme suit : élevé, modéré et faible quand les valeurs des variables sont supérieures respectivement à 0,75, entre 0,75 et 0,50 et entre 0.50 et 0.30 (Tableau 7).

Tableau 7: Liaison Variables-Facteurs.

|                               | F1           | F2           | F3           | F4           |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T°                            | <b>,849</b>  | -,058        | ,017         | -,178        |
| pH                            | -,019        | <b>,788</b>  | ,384         | -,007        |
| CE                            | <b>,913</b>  | ,264         | ,005         | ,094         |
| TH                            | <b>,938</b>  | ,098         | ,046         | ,097         |
| Turbidité                     | -,084        | <b>-,616</b> | ,340         | <b>,331</b>  |
| OD                            | <b>-,550</b> | <b>,557</b>  | -,005        | <b>,330</b>  |
| Na <sup>+</sup>               | <b>,951</b>  | ,101         | ,125         | -,101        |
| K <sup>+</sup>                | -,075        | -,185        | <b>,791</b>  | -,171        |
| Ca <sup>2+</sup>              | <b>,953</b>  | ,006         | ,020         | -,126        |
| Mg <sup>2+</sup>              | <b>,892</b>  | ,263         | -,018        | ,206         |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ,366         | -,274        | <b>-,466</b> | <b>,343</b>  |
| Cl <sup>-</sup>               | <b>,947</b>  | ,040         | ,109         | ,024         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | -,283        | <b>,556</b>  | ,171         | <b>-,499</b> |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | <b>,574</b>  | -,372        | -,113        | -,530        |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | ,340         | ,080         | ,439         | <b>,619</b>  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | -,097        | -,418        | <b>,625</b>  | -,071        |
| Valeurs propres               | 6,922        | 2,211        | 1,762        | 1,401        |
| % Variance                    | 43,264       | 13,821       | 11,012       | 8,758        |
| % Cumulative                  | 43,264       | 57,085       | 68,098       | 76,856       |

**Le facteur F1** représente 43,264% de la variance totale et montre des charges (loading) positives et élevées en T, CE, TH, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, et Cl<sup>-</sup>, négatives et modérées en OD, et positives et faible en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Ce facteur est naturel et lié à la minéralisation des eaux du bassin Oued El Abid (lessivage des minéraux et interaction eau-roche).

**Le facteur F2** compte 13,821% de la variance totale. Il montre des charges positives et élevées en pH, positives et modérées en turbidité, OD et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, et négatives et faible en NO<sub>2</sub><sup>-</sup>.

**Le facteur F3** décrit 11,012% de la variance totale et présente des charges positives et élevées en K<sup>+</sup> et positives et modérées en turbidité et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Les facteurs F2 et F3 représentent les eaux de ruissellement et le phénomène d'érosion dans le bassin où on note que l'Oued El Abid reçoit d'une manière continue un grand volume de charge en débris à cause du phénomène d'érosion qui s'accroît par la pente et les averses

(Barakat, 2016). Ces facteurs peuvent être dus aux conditions anaérobiques de l'Oued et le  $K^+$  peut être venu à partir des pratiques telles que l'élevage et l'agriculture (Conrad et al., 1999).

**Le facteur F4** présente 8,86% de la variance totale et montre des charges positives et modérées en  $NO_3^-$ , positives et turbidité, OD et  $HCO_3^-$ , et négatives et faibles en  $SO_4^{2-}$ . Ce facteur représente une pollution organique liée à une activité anthropique (les eaux usées, les déchets issus de l'élevage et les margines) (Patel and Vaghani, 2015).

Ce type d'analyse a identifié les sources de contamination des eaux de l'Oued El Abid. Cette contamination est due à la combinaison entre des processus naturel et anthropique (eaux usées, fumier et cheptel).

### **III. Aptitude des eaux à l'irrigation**

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures que dans l'extension des surfaces irriguées. Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui est appréciée par l'évaluation de CE et de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ ) entre l'eau et le sol irrigué.

Impérativement les eaux destinées à l'irrigation doivent répondre à certains critères de qualité pour minimiser les risques de salinisation des terrains cultivés dans la région d'étude. Afin d'estimer le degré de l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, plusieurs indices simplifiés permettent d'apprécier l'aptitude de l'eau à l'irrigation, en fonction du type de sol, sont : le SAR, le risque de salinité, Kelley index (KI) et le risque du magnésium (MH).

#### **1. Effet de la salinisation**

Les mesures de la conductivité électrique donnent une indication sur la salinité. En effet une salinité élevée peut causer des effets nocifs à la fois pour le sol et les plantes à irriguer. Il affecte les plantes chimiquement et physiquement, agit sur le processus osmotique et réduit la capacité des plantes à absorber l'eau et donc le dessèchement de la plante (Jalali, 2007). Pour le sol la salinité élevée cause des changements dans la structure du sol, sur sa perméabilité et sur son aération. Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de Mg, de Ca, de K, et de Na,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , et  $HCO_3^-$ .

Les eaux de l'Oued El Abid présentent des valeurs de CE variant entre 260 et 770 $\mu$ S/cm, indiquant que les eaux analysées sont de classe C2 dont l'utilisation dans l'irrigation présente un risque moyen (Tableau 8).

Tableau 8: Classification de la salinité des eaux (OMS, 2008)

| Classes | EC $\mu\text{S/cm}$ | Interprétation    |
|---------|---------------------|-------------------|
| C1      | < 250               | Risque faible     |
| C2      | 250–750             | Risque moyen      |
| C3      | 750–2250            | Risque élevé      |
| C4      | > 2250              | Risque très élevé |

## 2. Effet du $\text{Na}^+$

Le sodium est un élément clé qui détermine l'aptitude des eaux à l'irrigation, cependant des concentrations élevées causent un effet néfaste sur le sol et les plantes. Purushothaman et al., (2014) ont confirmé que les concentrations élevées du sodium dans les eaux souterraines dans la région de Bist-Doab (Punjab, India) affectaient les plantes, le rendement de la récolte et la perméabilité du sol. Le Sodium adsorption ratio (SAR) tient compte des effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium. Il est calculé selon l'équation suivante (Richard, 1954).

$$\text{SAR} = (\text{Na}^+) / \sqrt{(1/2 (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}))}$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l.

Dans la zone d'étude, les valeurs du SAR s'échelonnent entre 0,11 et 1,25 (Tableau 9).

Tableau 9: Valeurs des indices calculés SAR, KI, et MH

| Stations | Na (meq/l) | Ca (meq/l) | Mg (meq/l) | SAR  | KI   | MR%   |
|----------|------------|------------|------------|------|------|-------|
| OA1      | 0,17       | 1,21       | 1,95       | 0,14 | 0,05 | 61,76 |
| OA2      | 0,15       | 0,88       | 0,93       | 0,16 | 0,08 | 51,27 |
| OA3      | 0,15       | 1,02       | 0,89       | 0,15 | 0,08 | 46,58 |
| OA4      | 0,75       | 1,24       | 1,16       | 0,68 | 0,31 | 48,51 |
| OA5      | 1,25       | 2,01       | 1,64       | 0,92 | 0,34 | 44,91 |
| OA6      | 1,25       | 1,68       | 1,71       | 0,96 | 0,37 | 50,45 |
| OA7      | 1,08       | 1,84       | 1,29       | 0,87 | 0,35 | 41,22 |
| OA8      | 1,19       | 2,05       | 1,45       | 0,90 | 0,34 | 41,43 |
| OA9      | 0,15       | 1,06       | 0,81       | 0,16 | 0,08 | 43,26 |
| OA10     | 0,14       | 0,81       | 1,07       | 0,14 | 0,07 | 56,93 |
| OA11     | 0,11       | 1,07       | 0,99       | 0,11 | 0,05 | 48,14 |
| OA12     | 0,15       | 1,01       | 0,69       | 0,16 | 0,09 | 40,52 |
| OA13     | 0,52       | 1,46       | 0,70       | 0,50 | 0,24 | 32,50 |

|      |      |      |      |      |      |       |
|------|------|------|------|------|------|-------|
| OA14 | 0,40 | 1,43 | 0,72 | 0,38 | 0,19 | 33,61 |
| OA15 | 0,17 | 1,25 | 0,72 | 0,17 | 0,09 | 36,66 |
| OA16 | 0,60 | 1,71 | 0,79 | 0,54 | 0,24 | 31,58 |
| OA17 | 0,55 | 1,68 | 1,20 | 0,46 | 0,19 | 41,68 |
| OA18 | 0,58 | 1,34 | 0,82 | 0,55 | 0,27 | 37,96 |
| OA19 | 0,70 | 1,47 | 1,17 | 0,61 | 0,26 | 44,34 |
| OA20 | 0,87 | 1,79 | 1,39 | 0,69 | 0,27 | 43,74 |
| OA21 | 0,64 | 1,38 | 1,05 | 0,58 | 0,26 | 43,23 |
| OA22 | 0,80 | 1,71 | 1,07 | 0,68 | 0,29 | 38,46 |
| OA23 | 0,73 | 1,66 | 1,26 | 0,60 | 0,25 | 43,23 |
| OA24 | 1,71 | 2,40 | 2,09 | 1,14 | 0,38 | 46,50 |
| OA25 | 1,88 | 2,74 | 2,08 | 1,21 | 0,39 | 43,15 |
| OA26 | 2,02 | 3,06 | 2,11 | 1,25 | 0,39 | 40,77 |
| OA27 | 1,91 | 2,92 | 2,41 | 1,17 | 0,36 | 45,26 |

Les valeurs du SAR permettent d'énoncer que ces eaux sont de bonne qualité pour l'irrigation (classe1, SAR<10) et ne présente aucun danger pour la plupart des cultures et sur la plupart type de sol (Tableau 10).

**Tableau 10: Classification des eaux par niveau d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R (Durand, 1982)**

| Classes | Valeur du SAR | Interprétation |
|---------|---------------|----------------|
| S1      | < 10          | Faible         |
| S2      | 10–18         | Moyen          |
| S3      | 18–26         |                |
| S4      | > 26          | Très élevé     |

### 3. Indice de Kelley

L'indice de Kelly est utilisé aussi pour voir l'aptitude des eaux à l'irrigation. Il est donné par l'équation suivante  $KI = [Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$ . Des échantillons d'eaux avec un rapport supérieur à 1 indiquent un excès du sodium et donc inapte à utiliser dans l'irrigation, alors que KI est <1 on se permet d'irriguer avec cette eau (Jalali, 2007 ; Paliwal, 1967). Dans la présente étude, les valeurs de l'indice de Kelley varient entre 0.05 et 0.39 ce qui montre que cette eau est utilisable pour l'irrigation (Tableau 9).



#### **4. L'effet de magnésium**

Le rapport du magnésium (MR) est un paramètre utilisé aussi dans l'évaluation des eaux pour l'irrigation. Les valeurs de MR doivent être inférieures à 50% pour l'utiliser dans l'irrigation (Szabolcs et Darab, 1964). MR est calculé par la formule suivante :  $MR = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$ . Les valeurs du MR varient entre 31.58% et 61.76%. Toutes les valeurs ne dépassent pas 50% sauf deux (OA1 et OA2 enregistrent 61.76% et 51.27% respectivement), mais la valeur atteinte reste acceptable pour OA2 alors qu'elle est inquiétante pour OA1 (Tableau 9).

#### **5. Classification des eaux par la méthode de RICHARDS**

Cette classification a été proposée par RICHARDS, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de Sodification.

En effet, cette classification ne peut prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides ou semi-arides auxquels elle est destinée. Elle donne une vision sur l'état actuel de ces caractéristiques, mais ne permet pas d'anticiper sur le devenir de cette eau.

Après avoir reporté toutes les stations sur le diagramme de RICHARDS ou diagramme de Riverside, selon la conductivité électrique et la valeur de SAR, Les classes suivantes des eaux de l'Oued El Abid sont mises en évidence (Figure 29) (Karroum et al., 2019).

**C2S1** : caractérisé par un SAR faible et une conductivité électrique moyenne et désignent des eaux de bonne qualité utilisables pour l'irrigation.

**C3S1** : caractérisé par un SAR faible et une CE moyennement élevée. Les stations de cette classe tombent à la limite entre la classe C2S1 et la classe C3S1, et sont les stations qui se situent en aval de l'Oued El Abid (OA25, OA26, OA27). Cette classe désigne une qualité modérée.

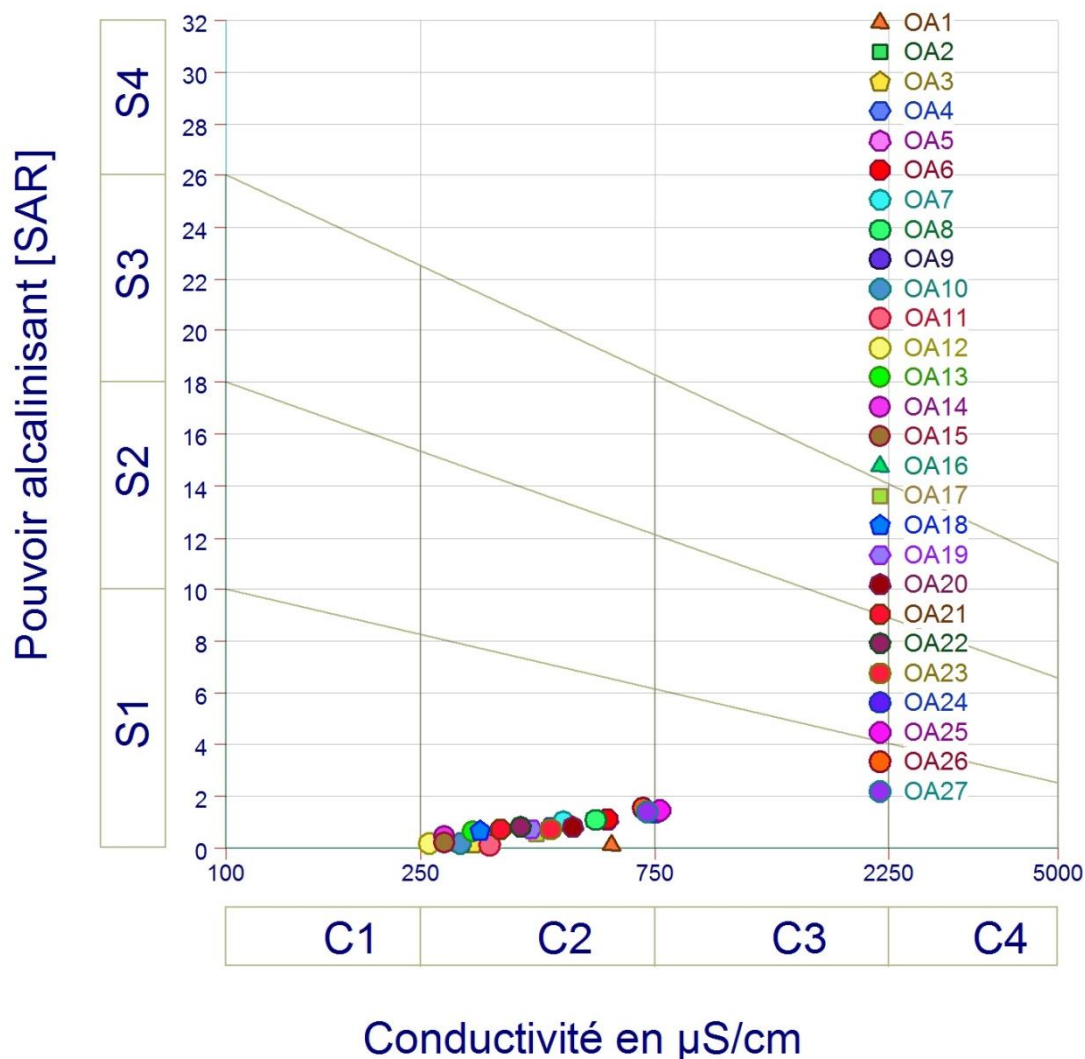


Figure 29: Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation

#### IV. Conclusion

Les résultats du contrôle spatial de la qualité de l'eau ont révélé que la tendance générale des teneurs des paramètres analysés montre une détérioration de la qualité en aval du barrage de Bin El Ouidane. La qualité de l'eau de l'Oued El Abid au niveau de la partie qui commence par la ville de Bzou jusqu'au point de confluence avec l'oued Oum Er Rbia connaît une détérioration significative par rapport à la partie amont. Cette dégradation a été identifiée par le fait que plusieurs paramètres à savoir la turbidité, TH, Ca, Mg, OD, Cd, Fe et Pb dépassent les normes recommandées (normes marocaines et normes de l'OMS). Cd, Fe, et Pb enregistrent des valeurs légèrement élevées, mais en calculant l'indice de contamination des stations échantillonnées on constate que ces eaux sont indemnes de toute contamination par ces métaux du fait que les valeurs des indices relevées sont inférieures à 2.

Différentes méthodes ont été utilisées pour bien mener cette étude. En effet, les analyses statistiques permettent d'identifier les facteurs responsables des variations de la qualité des

eaux. Ces variations sont dues, au premier lieu, au processus naturel qui résulte du contexte géologique, en relation avec la diversité lithologique de la zone d'étude et en deuxième lieu à l'action anthropique qui se manifestent par le rejet des eaux usées, les margines et les déchets de l'élevage riche en potassium. La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de classer les 27 stations en trois clusters dont chacun présente les mêmes caractéristiques physicochimiques ce qui permet d'établir un réseau d'échantillonnage et de surveillance convenable pour une gestion efficace (minimiser le coût et le temps) de la qualité des eaux.

L'aptitude des eaux de l'Oued El Abid a été envisagée par l'étude de plusieurs indices à savoir le SAR, la salinité, KI, et MH qui ont prouvé que l'eau est de bonne qualité et utilisable sans danger pour l'irrigation.

## CHAPITRE VI : EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT OUED AHANÇAL

### I. Description des paramètres physicochimiques

#### 1. Acquisition des données

Dans le but d'évaluer la qualité des eaux du bassin versant de l'Oued Ahançal, un échantillonnage portant sur six échantillons a été effectué le long de l'Oued Ahançal. Le positionnement des stations a été fait aux endroits les plus suspectés tels que les zones de déversement des différents affluents et avant et après les agglomérations voisines (Figure 30).

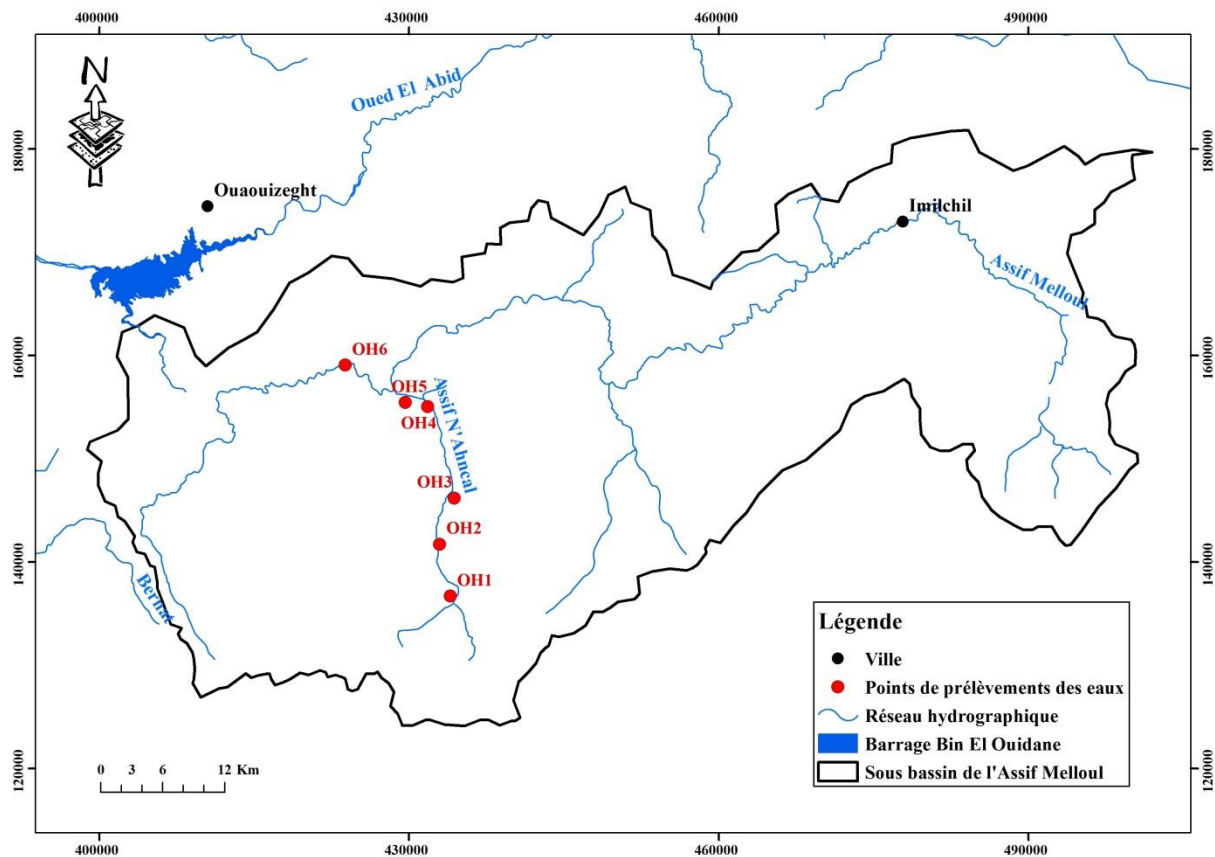


Figure 30: Points de prélèvements choisis pour suivre la qualité des eaux

#### 2. Évolution spatiale des paramètres physicochimiques des eaux superficielles du bassin de l'Oued Ahançal

Seize paramètres ont fait l'objet de notre étude notamment la  $T^{\circ}$ , le potentiel d'hydrogène, l'oxygène dissous, la conductivité électrique, la turbidité, TH, les carbonates le sodium, le potassium, le calcium, les chlorures, le magnésium, les sulfates, les nitrites, les nitrates et l'ammonium, les résultats des analyses obtenus sont représentés dans le tableau 1 de l'annexe 2.

La T° des eaux de l'Oued Ahançal oscille entre 11,5°C et 16,8°C (Figure 31), ces valeurs sont en parfaite concordance avec le climat et l'altitude élevée. Les variations spatiales ne montrent aucune différence significative. Il est à signaler que les fluctuations de ce paramètre abiotique sont en relation avec les conditions climatiques locales et plus particulièrement avec la température de l'air et les phénomènes d'évaporation d'eau qui en résultent quand cette dernière augmente (Bendjama, 2014).

Les valeurs du pH sont conformes aux normes de l'OMS. Elles sont comprises entre 7.5 et 8, ce sont donc des eaux légèrement alcalines (Figure 31).

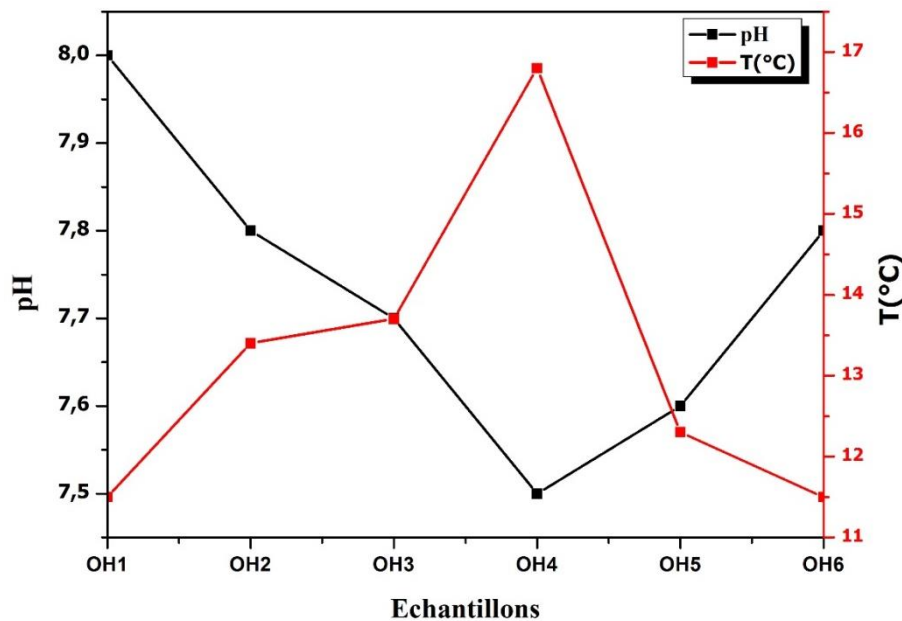


Figure 31: Représentation de l'évolution spatiale de T° et pH

La CE montre des valeurs qui oscillent entre 365  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 430  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figure 32). Ces valeurs sont inférieures aux normes marocaines limitées à 2700 mg/l, indiquant une minéralisation très faible.

Quant à la TH les valeurs enregistrées sont comprises entre 290 mg/l et 320 mg/l et reste largement inférieur à la norme de l'OMS fixée à 500 mg/l (Figure 32). D'après ces valeurs, on constate que les eaux de l'Oued Ahançal sont douces et de bonne qualité.

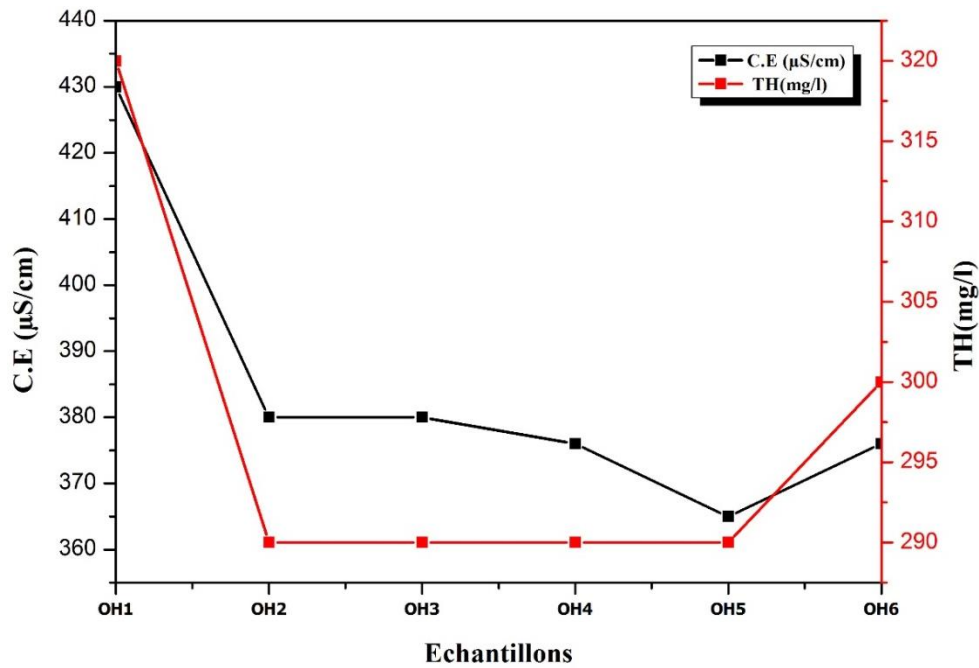


Figure 32: Représentation de l'évolution spatiale de CE et TH

La turbidité présente des valeurs très faible ne dépassant pas 7 NTU (Figure 33), Ceci met en évidence la diminution du phénomène d'érosion au niveau du bassin versant et la dureté des terrains su bassin versant.

Les valeurs OD enregistrées au niveau des eaux de l'Oued Ahançal varient entre 7,04  $\text{mg/l}$  et 8,88  $\text{mg/l}$  indiquant une bonne saturation en oxygène même si elles dépassent légèrement la valeur de la norme marocaine fixée à 8 $\text{mg/l}$  (Figure 33).

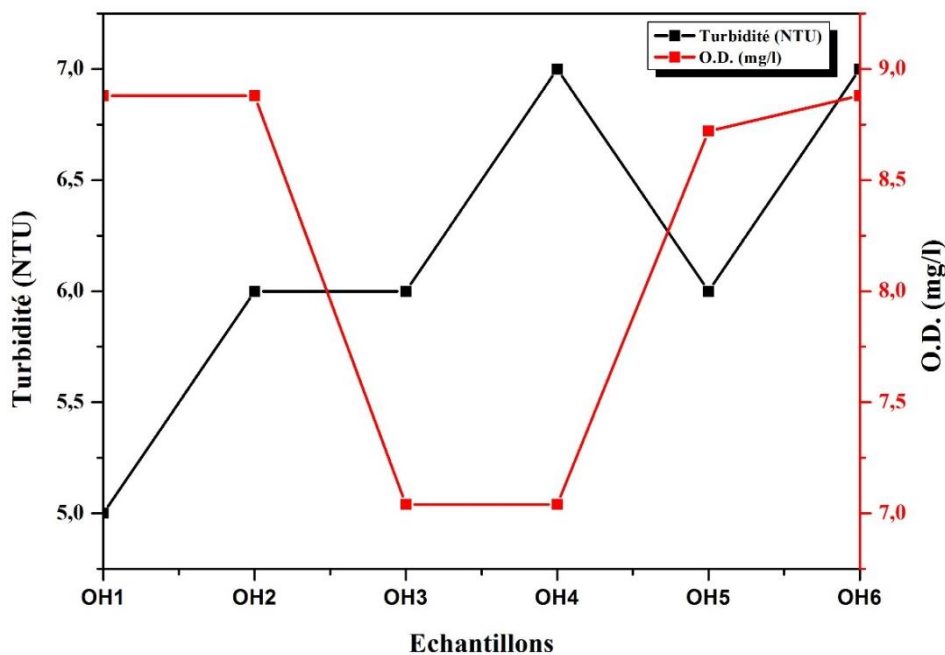


Figure 33: Représentation de l'évolution spatiale de la turbidité et OD

Les cations mis en jeu sont  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . Les eaux de l'Oued Ahançal enregistrent des valeurs dans les normes recommandées (au-dessous des normes marocaines et des normes de l'OMS) sauf pour le magnésium qui montre des valeurs qui dépassent légèrement la norme. Les cations sont dans l'ordre d'abondance suivant :  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  (Figure 34 et 35).

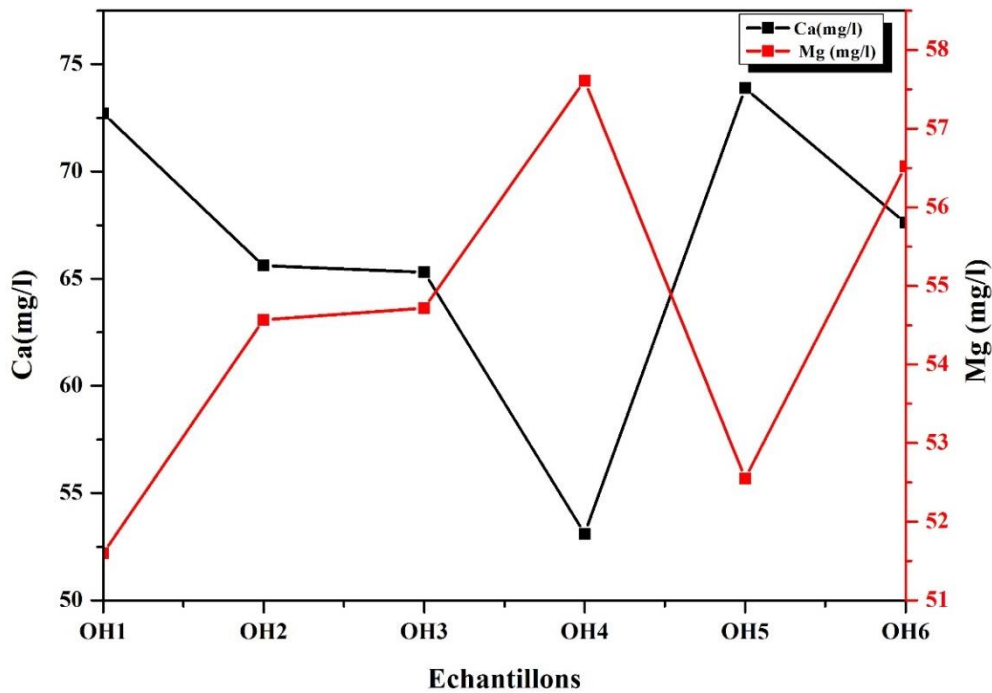


Figure 34: Représentation de l'évolution spatiale de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$

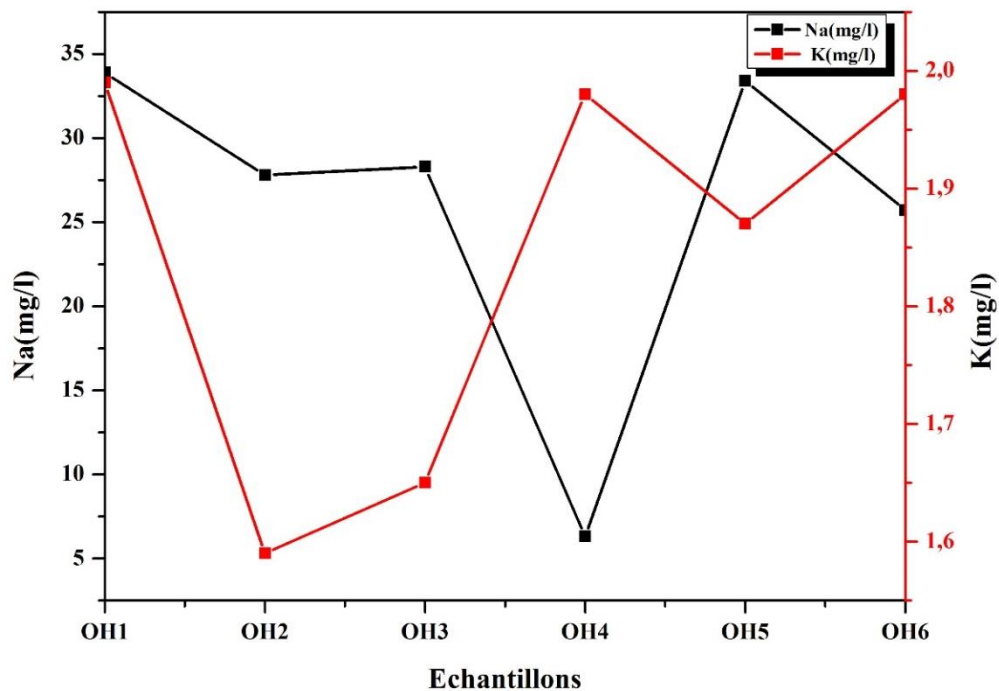


Figure 35: Représentation de l'évolution spatiale du Sodium et du potassium

La concentration des anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  suit la même tendance que celle des cations et présente des valeurs inférieures à la norme préconisée par l’OMS. Les anions révèlent l’ordre d’abondance suivant :  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$  (Figure 36).

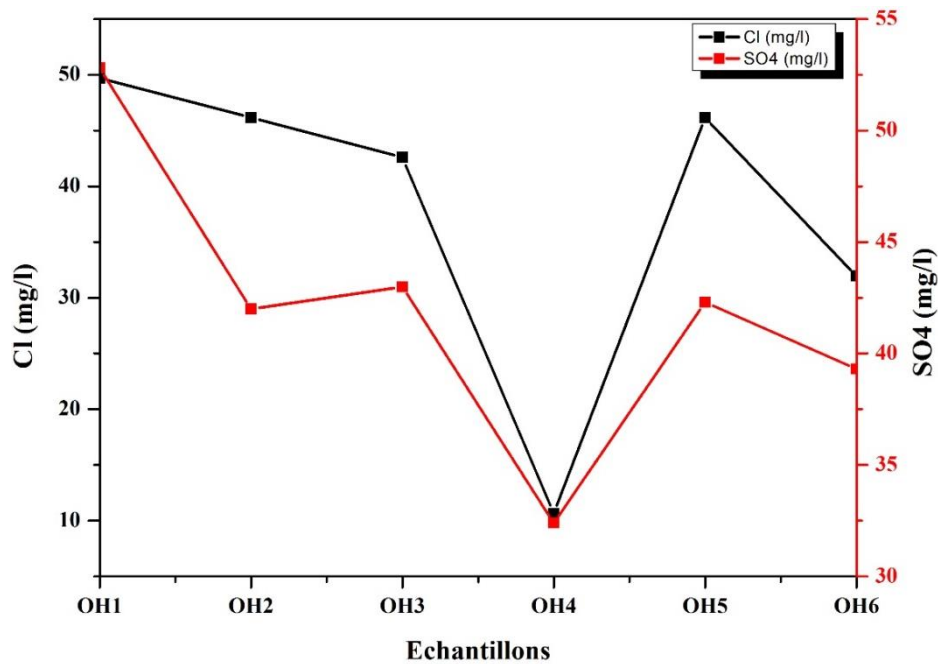


Figure 36: Représentation de l'évolution spatiale de  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$

Les composés azotés (les nitrates, les nitrites et les ammoniums) montrent des valeurs très faibles répondant aux normes admises dans cette étude (Figures 37 et 38).

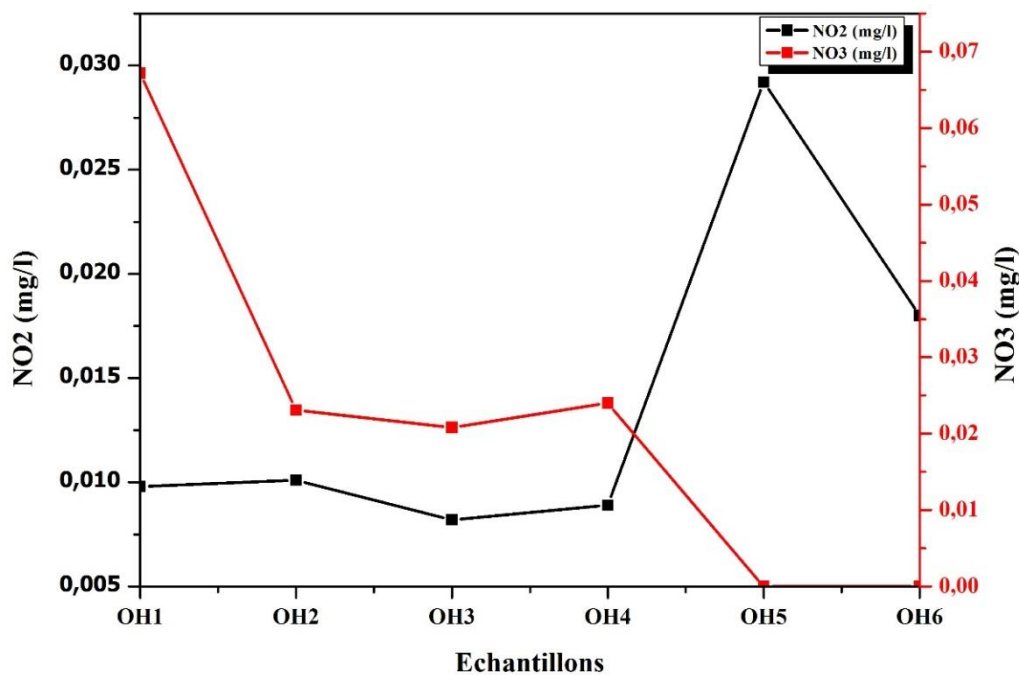


Figure 37: Représentation de l'évolution spatiale des  $\text{NO}_3$  et  $\text{NO}_2$



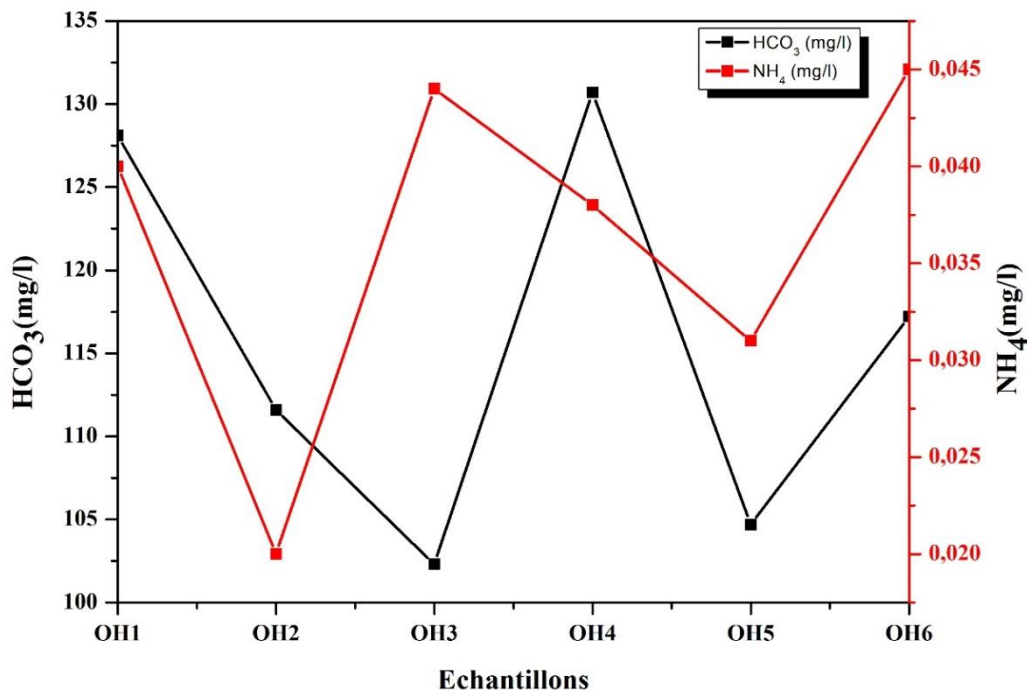


Figure 38: Représentation de l'évolution spatiale des HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

### 3. Évolution spatiale des éléments traces métalliques des eaux superficielles du bassin versant Oued Ahançal

Les concentrations des éléments traces métalliques (Tableau 11) sont comprises entre 1- 2,2 ; 16- 19 ; 68- 76 ; 2- 232 ; 1- 8 ; 12- 16 ; 1- 8 et 6- 16 µg/l pour Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn respectivement. Tous ces éléments traces métalliques se présentent par des faibles teneurs dans les eaux du bassin versant Oued Ahançal et répondent aux normes de l'OMS.

Tableau 11: Concentration des éléments traces métalliques

| Échantillon | Cd   | Cr | Cu   | Fe  | Mn  | Ni | Pb  | Zn  |
|-------------|------|----|------|-----|-----|----|-----|-----|
|             | µg/l |    |      |     |     |    |     |     |
| OH1         | 1    | 18 | 74   | 2   | 4   | 16 | 1,9 | 6   |
| OH2         | 1    | 18 | 72   | 49  | 1   | 13 | 1,9 | 15  |
| OH3         | 2,2  | 18 | 76   | 43  | 7   | 16 | 6   | 13  |
| OH4         | 1,5  | 19 | 75   | 202 | 7   | 16 | 1   | 14  |
| OH5         | 1,3  | 16 | 68   | 232 | 8   | 12 | 8   | 9   |
| OH6         | 1,8  | 18 | 74   | 170 | 5   | 16 | 1,4 | 6   |
| OMS (2011)  | 3    | -  | 2000 | 300 | 100 | 70 | 10  | 500 |

#### 4. Niveau de contamination des eaux du bassin versant Oued Ahançal

Comme on a déjà signalé dans les chapitres précédents (Chapitre V) le calcul de l'indice de contamination est très utile pour apprécier et évaluer la qualité des eaux superficielles de la zone d'étude. Le tableau suivant (Tableau 12) présente les valeurs de l'indice de contamination (Ic) calculé des six stations prospectées.

Pour un indice de contamination (Ic) proche de 1, on considère que le site n'est pas ou peu contaminé par les métaux. En général, c'est au-delà de 2 que les auteurs admettent que le site est soumis à un début de contamination.

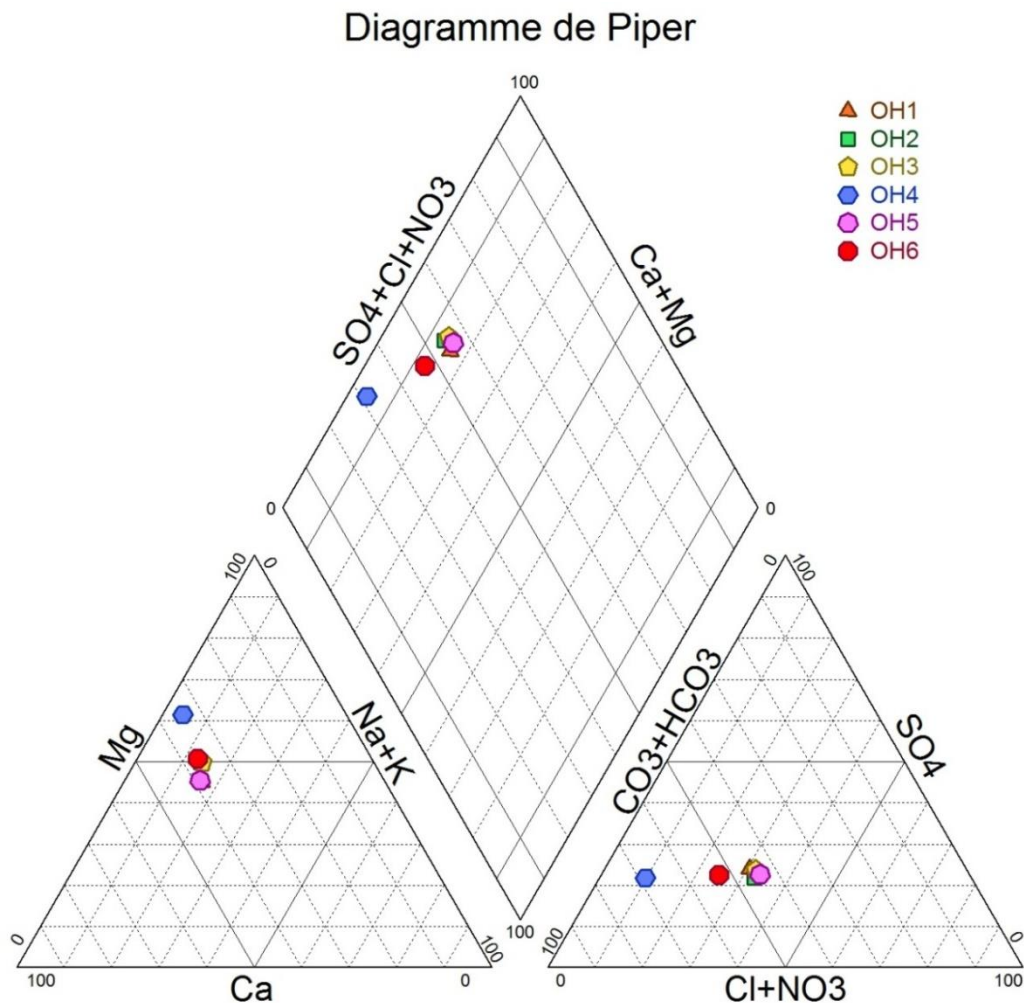
L'évaluation des indices de contaminations des stations échantillonnées des eaux du bassin versant Oued Ahançal nous a permis de constater que ces eaux sont indemnes de toute contamination par ces métaux. Du fait que les valeurs des indices relevées sont inférieures à 2. Les valeurs de l'indice de contamination montrent des valeurs très basses inférieures à 1 ce qui nous permet de conclure que les eaux de l'Oued Ahançal sont de très bonne qualité et indemnes de toute contamination par ces métaux objet de l'étude.

**Tableau 12: Valeurs des min, max, et moyenne de l'indice de contamination dans les eaux du bassin versant**

|       | Ic (Cd) | Ic (Cr) | Ic (Cu) | Ic (Fe) | Ic (Mn) | Ic (Ni) | Ic (Pb) | Ic (Zn) |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Min   | 0,33    |         | 0,03    | 0,01    | 0,01    | 0,17    | 0,1     | 0,01    |
| Max   | 0,73    |         | 0,04    | 0,77    | 0,08    | 0,23    | 0,8     | 0,03    |
| Moyen | 0,49    |         | 0,04    | 0,39    | 0,05    | 0,21    | 0,34    | 0,02    |

#### 5. Identification du faciès chimique

Dans le présent travail, les différents prélèvements des six échantillons des eaux de l'Oued Ahançal ont été utilisés pour décrire la nature et les faciès chimiques. Selon le diagramme de piper (Figure 39), les eaux de l'Oued Ahançal sont de type chloruré et sulfaté calcique et magnésien et bicarbonaté calcique et magnésien.



**Figure 39: Diagramme de Piper des stations échantillonnées**

## II. Analyse statistique par ACP

L'ACP a été appliqué aux données hydrochimiques des eaux de surface de l'Oued Ahançal sur un tableau de seize variables. Les tests réalisés de Kaiser, Meyer et Olkin (indice KMO) et du test de Bartlett montrent que le modèle factoriel est approprié (KMO= 0.662 et le test de Bartlett =0).

### 1. Matrice de corrélation de Pearson (r)

Le Tableau 13 reporte la matrice de corrélation appliquée aux six échantillons des eaux superficielles de l'Oued Ahançal. Les valeurs en gras présentent les coefficients de corrélation des variables fortement corrélées entre eux soit positivement ou négativement et où les corrélations sont les plus significatives.

À partir de la matrice de corrélation réalisée, on peut dégager les observations suivantes :

- T° est bien corrélée négativement avec le pH ( $r = -0.740$ ), OD ( $r = -0.798$ ), Na<sup>+</sup> ( $r = -0.882$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $r = -0.920$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = -0.763$ ), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = -0.733$ ) et moins corrélée négativement avec TH ( $r = -0.564$ ) et Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.642$ ).
- CE est bien corrélée positivement avec T°, TH ( $r = 0.921$ ), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.942$ ), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.774$ ), HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.529$ ), et présente une corrélation négative avec la turbidité ( $r = -0.723$ ).
- TH est assez bien corrélées positivement avec, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.537$ ), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.774$ ), NO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.750$ ) et négativement avec Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.512$ ) et la turbidité ( $r = -0.585$ ).
- La Turbidité est bien corrélée positivement avec Mg<sup>2+</sup> ( $r = 0.925$ ) et négativement avec Na<sup>+</sup> ( $r = -0.728$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $r = -0.657$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = -0.815$ ), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = -0.930$ ), EC ( $r = -0.723$ ), TH ( $r = -0.589$ ) et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = -0.711$ ).
- OD est corrélé positivement avec Na<sup>+</sup> ( $r = 0.645$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $r = 0.227$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = 0.586$ ) et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.510$ ) et négativement avec T ( $r = -0.798$ ) et Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.513$ ).
- Na<sup>2+</sup> présente une très bonne corrélation positive avec Ca<sup>2+</sup> ( $r = 0.964$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = 0.966$ ), OD ( $r = 0.645$ ) et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = -0.837$ ) et corrélée négativement avec Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.853$ ), T ( $r = -0.882$ ), Turbidité ( $r = -0.728$ ) et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = -0.530$ ).
- K<sup>+</sup> est corrélé positivement avec HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.699$ ) et NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ( $r = 0.527$ ).
- Ca<sup>2+</sup> est bien corrélé négativement avec Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.852$ ), T ( $r = -0.920$ ) et la turbidité ( $r = -0.657$ ) et corrélé positivement avec Na<sup>+</sup> ( $r = 0.964$ ) et OD ( $r = 0.727$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = 0.881$ ) et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.791$ ).
- Mg<sup>2+</sup> est très bien corrélé positivement avec la turbidité ( $r = 0.925$ ), T ( $r = 0.642$ ), négativement avec CE ( $r = -0.531$ ), TH ( $r = -0.512$ ), Na<sup>+</sup> ( $r = -0.853$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $r = -0.852$ ), OD ( $r = -0.513$ ), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = -0.892$ ) et Cl<sup>-</sup> ( $r = -0.870$ ).
- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> montrent une corrélation positive avec NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.559$ ), K<sup>+</sup> ( $r = 0.699$ ), TH ( $r = 0.537$ ) et CE ( $r = 0.529$ ) et corrélé négativement avec Na<sup>+</sup> ( $r = -0.530$ ).
- Cl<sup>-</sup> montre une bonne corrélation positive avec Na<sup>+</sup> ( $r = 0.966$ ), OD ( $r = 0.586$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $r = 0.881$ ) et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r = 0.853$ ) et corrélée négativement avec T ( $r = -0.763$ ), Turbidité ( $r = -0.815$ ) et Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.870$ ).
- SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> présentent une corrélation positive avec CE ( $r = 0.774$ ) TH ( $r = 0.748$ ), OD ( $r = 0.510$ ), Na<sup>+</sup> ( $r = 0.837$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r = 0.853$ ) et négative avec la turbidité ( $r = -0.930$ ), T ( $r = -0.733$ ), Mg<sup>2+</sup> ( $r = -0.892$ ) et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.643$ ).
- NO<sub>2</sub><sup>-</sup> est corrélée négativement avec NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = -0.613$ ).

- $\text{NO}_3^-$  présente une corrélation positive avec EC ( $r=0.942$ ), TH ( $r=0.750$ ),  $\text{HCO}_3^-$  ( $r=0.559$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r=0.643$ ) et une corrélation négative avec la turbidité ( $r=-0.711$ ) et  $\text{NO}_2^-$  ( $r=-0.613$ ).
- $\text{NH}_4^+$  présente une corrélation positive avec  $\text{K}^+$  ( $r=0.527$ ).

**Tableau 13: Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques analysés**

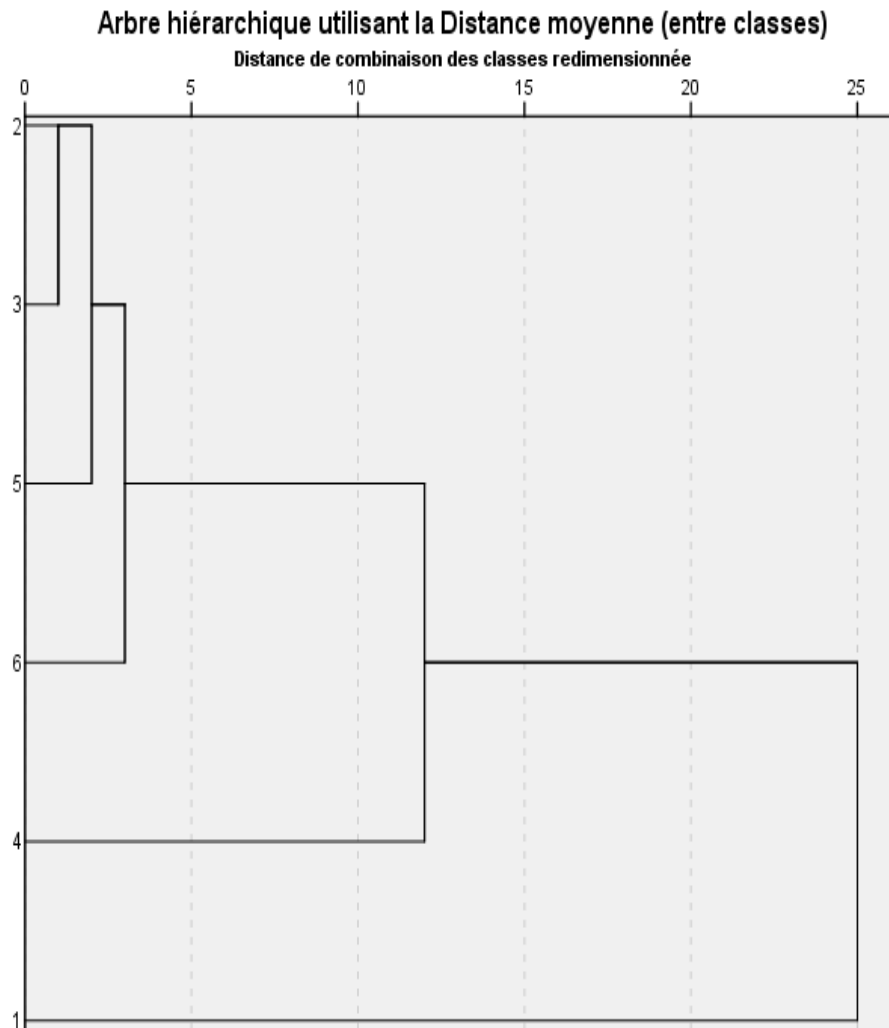
|                               | T            | pH           | E.C          | TH           | Turbidité    | DO           | Na+          | K+          | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> | NO <sub>2</sub> | NO <sub>3</sub> | NH <sub>4</sub> |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| T °C                          | 1,000        |              |              |              |              |              |              |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| pH                            | <b>-,740</b> | 1,000        |              |              |              |              |              |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| CE                            | -,346        | <b>,796</b>  | 1,000        |              |              |              |              |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| TH                            | <b>-,564</b> | <b>,817</b>  | <b>,921</b>  | 1,000        |              |              |              |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Turbidité                     | ,480         | <b>-,657</b> | <b>-,723</b> | <b>-,585</b> | 1,000        |              |              |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| DO                            | <b>-,798</b> | <b>,628</b>  | ,253         | ,454         | -,342        | 1,000        |              |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Na <sup>+</sup>               | <b>-,882</b> | <b>,646</b>  | ,314         | ,387         | <b>-,728</b> | <b>,645</b>  | 1,000        |             |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| K <sup>+</sup>                | -,090        | ,015         | ,283         | ,530         | ,187         | ,120         | -,250        | 1,000       |                  |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Ca <sup>2+</sup>              | <b>-,920</b> | <b>,592</b>  | ,296         | ,450         | <b>-,657</b> | <b>,727</b>  | <b>,964</b>  | -,017       | 1,000            |                  |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Mg <sup>2+</sup>              | <b>,642</b>  | <b>-,555</b> | <b>-,531</b> | <b>-,512</b> | <b>,925</b>  | <b>-,513</b> | <b>-,853</b> | ,080        | <b>-,852</b>     | 1,000            |                               |                 |                 |                 |                 |                 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ,278         | ,149         | <b>,529</b>  | <b>,537</b>  | ,091         | -,017        | <b>-,530</b> | <b>,699</b> | -,419            | ,237             | 1,000                         |                 |                 |                 |                 |                 |
| Cl <sup>-</sup>               | <b>-,763</b> | <b>,654</b>  | ,356         | ,333         | <b>-,815</b> | <b>,586</b>  | <b>,966</b>  | -,424       | <b>,881</b>      | <b>-,870</b>     | -,530                         | 1,000           |                 |                 |                 |                 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | <b>-,733</b> | <b>,843</b>  | <b>,774</b>  | <b>,748</b>  | <b>-,930</b> | <b>,510</b>  | <b>,837</b>  | -,048       | <b>,791</b>      | <b>-,892</b>     | -,079                         | <b>,853</b>     | 1,000           |                 |                 |                 |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | -,431        | -,243        | -,459        | -,175        | ,099         | ,462         | ,380         | ,236        | ,553             | -,286            | -,403                         | ,218            | -,031           | 1,000           |                 |                 |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | -,052        | <b>,612</b>  | <b>,942</b>  | <b>,750</b>  | <b>-,711</b> | ,035         | ,128         | ,148        | ,075             | -,453            | <b>,559</b>                   | ,240            | <b>,643</b>     | <b>-,613</b>    | 1,000           |                 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | -,102        | ,065         | ,205         | ,344         | ,188         | -,371        | -,120        | <b>,527</b> | -,069            | ,214             | ,191                          | -,284           | ,020            | -,131           | ,059            | 1,000           |

La bonne corrélation entre la CE et les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^{2-}$ ) et la dureté totale explique que la minéralisation (salinité) des eaux du bassin versant Oued Ahançal est très influencée par ces éléments.

## 2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) : la similarité spatiale et le groupement des sites

Le dendrogramme illustrant la classification ascendante hiérarchique (CAH) regroupe les six stations en deux classes ou clusters (Figure 40).

Il faut noter que les échantillons d'eau dans chaque groupe ont les mêmes caractéristiques physicochimiques, même origine naturelle des eaux et même type de polluants (Ibrahim et al, 2015).



**Figure 40: Dendrogramme du regroupement des stations échantillonnées de l'Oued Ahançal**

**Cluster 1** inclus les stations suivantes OH2, OH3, OH4, OH5, OH6 échantillonné le long de l'Oued Ahançal

**Cluster 2** comprend seulement la station OH1 située à l'amont de l'Oued Ahançal

La différence entre ces deux clusters réside dans le fait que la station OH1 enregistre des valeurs des paramètres analysés légèrement supérieures à celles des autres stations mêmes s'elles restent dans les limites préconisées par les normes marocaines et de l'OMS.

### **3. Analyse factorielle**

Dans notre étude, le graphique des valeurs propres permet de distinguer quatre facteurs (Figure 41) représentant 95,1% de la variance totale, ce qui est assez bon pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie.

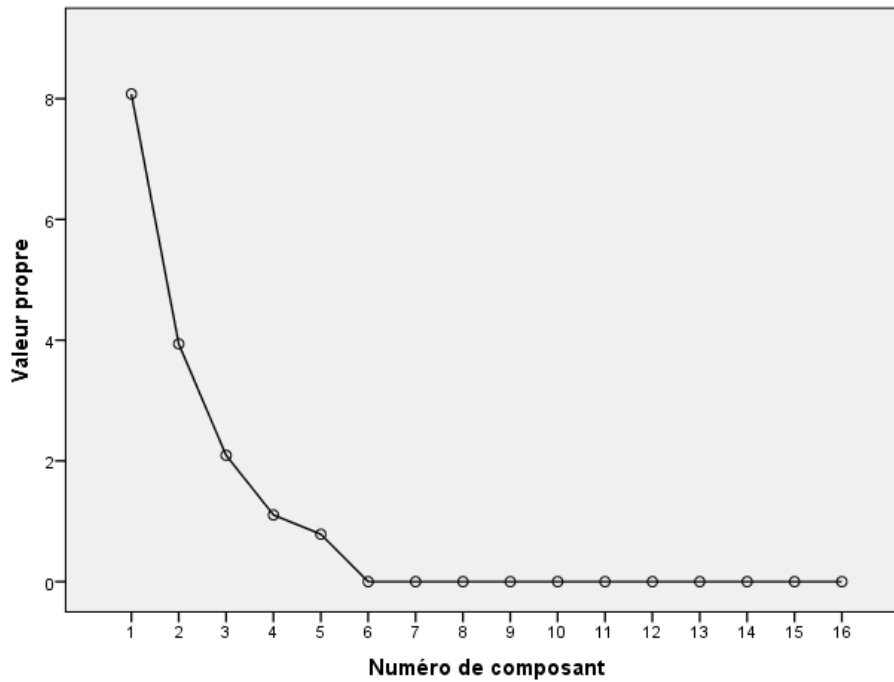


Figure 41: Graphique des valeurs propres

Les facteurs ont été distingués selon leurs charges (loading) en variables : bon, modéré et faible quand les valeurs de la charge sont supérieures à 0.75, entre 0.75-0.50 et entre 0.50-0.30 respectivement (Liu et al., 2003) (Tableau 14).

Tableau 14: Liaison Variables-Facteurs.

|                               | F1           | F2           | F3           | F4          |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T°                            | <b>-,835</b> | ,259         | <b>-,393</b> | ,103        |
| pH                            | <b>,851</b>  | ,299         | -,016        | ,018        |
| CE                            | <b>,689</b>  | ,718         | -,099        | ,001        |
| TH                            | <b>,723</b>  | <b>,629</b>  | ,283         | -,006       |
| Turbidité                     | <b>-,875</b> | -,111        | <b>,369</b>  | ,009        |
| DO                            | <b>,679</b>  | -,242        | <b>,376</b>  | <b>,513</b> |
| Na <sup>2+</sup>              | <b>,896</b>  | <b>-,419</b> | ,006         | -,145       |
| K <sup>+</sup>                | -,023        | <b>,524</b>  | <b>,811</b>  | ,054        |
| Ca <sup>2+</sup>              | <b>,879</b>  | <b>-,398</b> | ,242         | -,070       |
| Mg <sup>2+</sup>              | <b>-,901</b> | ,147         | ,104         | -,029       |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | -,119        | <b>,883</b>  | ,251         | <b>,376</b> |
| Cl                            | <b>,889</b>  | <b>-,388</b> | -,236        | -,057       |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | <b>,976</b>  | ,124         | -,121        | -,119       |

|                        |             |              |              |              |
|------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>NO<sub>2</sub></b>  | ,130        | <b>-,684</b> | <b>,626</b>  | ,126         |
| <b>NO<sub>3</sub></b>  | <b>,520</b> | <b>,762</b>  | <b>-,347</b> | ,076         |
| <b>NH<sub>4</sub></b>  | -,071       | <b>,417</b>  | <b>,446</b>  | <b>-,787</b> |
| <b>Valeurs propres</b> | 8,079       | 3,939        | 2,093        | 1,104        |
| <b>% variance</b>      | 50,493      | 24,616       | 13,081       | 6,902        |
| <b>% Cumulative</b>    | 50,493      | 75,109       | 88,190       | 95,092       |

Le facteur (F1) représente 50,493% de la variance totale et montre des charges (loading) positives et très élevées en pH, Na, Ca, Cl, SO<sub>4</sub>, positive et modéré en TH, EC, OD et NO<sub>3</sub> et négative et très élevé en T, Turbidité et Mg.

Le facteur (F2) représente 24,616% de la variance totale et montre des charges positives et très élevées en NO<sub>3</sub> et HCO<sub>3</sub>, positives et modérées en TH, K et positives et faibles en NH<sub>4</sub>, négatives et modérées en NO<sub>2</sub> et négatives et faibles en Na, Ca et Cl.

Le facteur (F3) représente 13,081% de la variance totale et montre des charges positives et élevées en K, positives et modérées en NO<sub>2</sub>, positives et faibles en Turbidité, OD et NH<sub>4</sub> et négatives et faibles en T° et NO<sub>3</sub>.

Le facteur (F4) représente 6,902% de la variance totale et montre des charges positives et modérées en OD, positives et faibles en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et négatives et élevées en NH<sub>4</sub>.

### III. Aptitude des eaux à l'irrigation

Une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire. Plusieurs paramètres de qualité doivent être pris en considération à savoir Sodium adsorption ratio (SAR), la salinité, le risque de salinité, Kelley index (KI) et le risque du magnésium (MH).

#### 1. Effet de la salinisation

La CE donne une idée sur la salinité des eaux. Dans notre zone d'étude, la CE varie entre 365 et 430  $\mu$ S/cm. Les stations de l'Oued Ahançal montrent des valeurs homogènes et faibles. Ces valeurs présentent la classe C2 dont l'eau est utilisable avec un risque moyen pour l'irrigation (Tableau 8 du chapitre V).

#### 2. Effet de Na<sup>+</sup>

Dans la zone d'étude, les valeurs du SAR varient entre 0,12 et 0,61 (Tableau 18). Ces valeurs représentent la classe S1 (SAR<10) (Tableau 10 du chapitre V) et montrent que ces eaux peuvent généralement être utilisées sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Un résultat similaire a été trouvé par Yidana et al. (2011) où ils ont suggéré que les



faibles valeurs du SAR au niveau de Southwestern and Coastal River Systems in Ghana sont attribué à l'abondance des alcalino-terreux (concentration très élevée) par rapport aux alcalins.

**Tableau 15: Valeurs des indices calculés SAR, KI, et MH**

| Stations | Na (meq/l) | Ca (meq/l) | Mg (meq/l) | SAR  | KI   | MR%   |
|----------|------------|------------|------------|------|------|-------|
| OH1      | 0,68       | 1,45       | 1,03       | 0,61 | 0,27 | 41,51 |
| OH2      | 0,56       | 1,31       | 1,09       | 0,51 | 0,23 | 45,41 |
| OH3      | 0,57       | 1,31       | 1,09       | 0,52 | 0,24 | 45,59 |
| OH4      | 0,13       | 1,06       | 1,15       | 0,12 | 0,06 | 52,03 |
| OH5      | 0,67       | 1,48       | 1,05       | 0,59 | 0,26 | 41,56 |
| OH6      | 0,51       | 1,35       | 1,13       | 0,46 | 0,21 | 45,54 |

### 3. Indice de Kelley

L'indice de Kelly est utilisé aussi pour voir l'aptitude des eaux à l'irrigation. Il est donné par l'équation suivante  $KI = [Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$ . Des échantillons d'eaux avec un rapport supérieur à 1 indiquent un excès du sodium et donc inapte à utiliser dans l'irrigation, alors que  $KI < 1$  on se permet d'irriguer avec cette eau (Jalali, 2007; Paliwal, 1967). Dans les eaux du bassin versant de l'Oued Ahançal, les valeurs de l'indice de Kelley varient entre 0.06 et 0.27 ce qui montre que cette eau est utilisable pour l'irrigation (Tableau 15).

### 4. Effet de $Mg^{2+}$

Le rapport du magnésium (MR) est un paramètre utilisé aussi dans l'évaluation des eaux pour l'irrigation. Les valeurs de MR doivent être inférieures à 50% pour l'utiliser dans l'irrigation (Szabolcs et Darab, 1964). MR est calculé par la formule suivante :  $M.R = [Mg^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$ . Les valeurs du MR varient entre 41,51% et 52,03% ce qui suggère que ces eaux sont utilisables pour l'irrigation (Tableau 15). La station OH4 est la seule station qui enregistre une valeur légèrement élevée (52,03%), mais elle n'est pas inquiétante.

### 5. Classification des eaux par la méthode de RICHARDS

La classification de Richards (1954) est fondée sur la CE et le SAR. La représentation des différents échantillons du bassin versant Oued Ahançal dans le diagramme de RICHARDS permet de mettre en évidence la classe suivante (Figure 42) :

C2S1 : caractérisé par un SAR faible et une CE faible et désigne des eaux de bonne qualité utilisables pour l'irrigation.

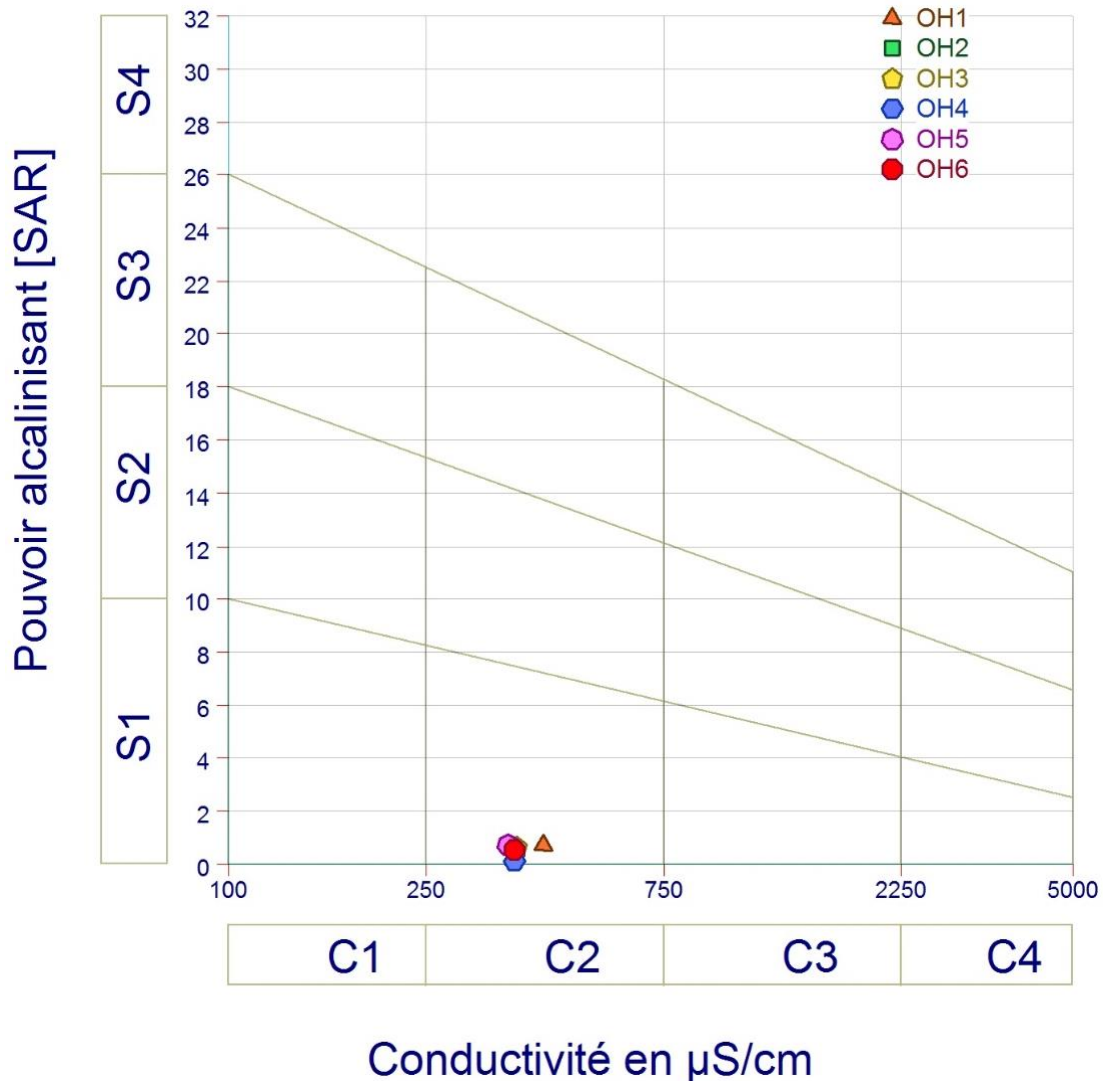


Figure 42: Diagramme de Richards de classification des eaux pour l'irrigation

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre l'étude a porté sur l'évaluation spatiale de la qualité des eaux du bassin versant Oued Ahançal à travers 16 paramètres à savoir  $T^\circ$ , pH, OD, CE, la turbidité, TH,  $\text{HCO}_3^-$ , Na, K, Ca, Cl, Mg,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ . Les résultats ont révélé que ces paramètres répondent aux normes adoptées dans ce travail et qui sont les normes marocaines et de l'OMS. Aussi, l'étude des ETM a prouvé que ces eaux sont indemnes de toute pollution métallique, et qu'elles sont de qualité bonne à excellente.

L'aptitude des eaux de l'Oued Ahançal à l'irrigation a été mis en évidence par l'étude de plusieurs indices à savoir le SAR, la salinité, KI, et MH qui ont prouvé que l'eau est de bonne qualité et utilisable sans danger pour l'irrigation.

## CHAPITRE VII : EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT OUED SROU

### I. Description des paramètres physico-chimiques

#### 1. Acquisition des données

Dans le but d'évaluer la qualité des eaux du bassin versant Oued Srou, un échantillonnage portant sur 12 échantillons a été effectué le long de l'Oued Srou et tous ces affluents et ceci pour couvrir toute l'aire d'étude et avoir une base de données solide en terme spatial (Figure 43). Le positionnement des stations a été fait aux endroits les plus suspectés tels que les zones de déversement des différents affluents et avant et après les agglomérations voisines. On a souhaité couvrir la partie amont d'Oued Chbouka, mais malheureusement aucun point de prélèvement n'a été choisi dans cette région à cause d'un accès difficile et d'absence quasi-totale des centres et douars dans cette partie.

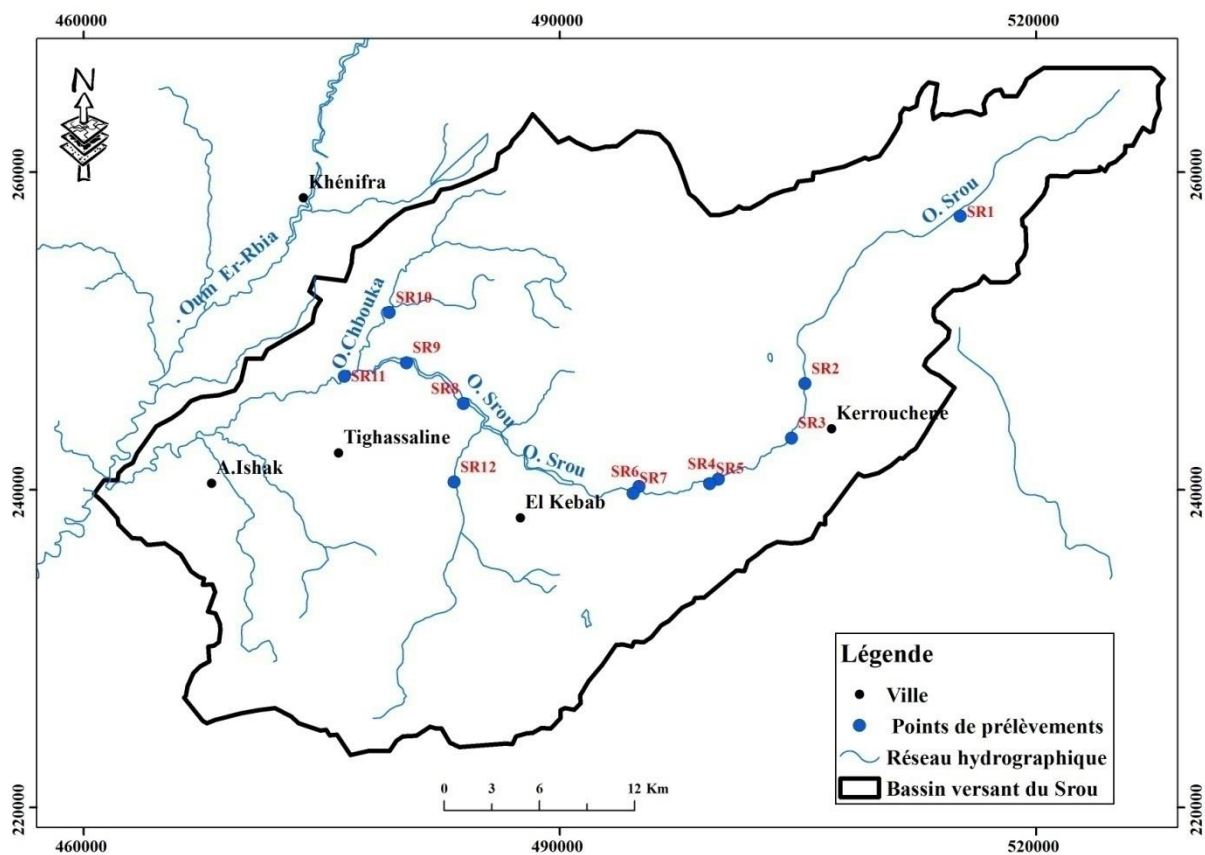


Figure 43: Points de prélèvements choisis pour suivre la qualité des eaux

## 2. Evolution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux superficielles du bassin Oued Srou

Seize paramètres ont fait l'objet de notre étude notamment la température, le potentiel d'hydrogène, l'oxygène dissous, la conductivité électrique, la turbidité, le TH, les carbonates le sodium, le potassium, le calcium, les chlorures, le magnésium, les sulfates, les nitrites, les nitrates et l'ammonium, les résultats des analyses obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous (voir Tableau 1 Annexe 3) (Karroum et al., 2019).

Les températures enregistrées au niveau des eaux de surface du bassin Srou sont comprises entre 11.8°C et 18.6°C et répond aux normes exigées par l'organisation mondiale de la santé (Figure 44). Le pH des eaux de la zone d'étude varie entre un minimum de 8.1 et un maximum de 8.6. En littérature un pH naturel entre 6.5 et 8.5 caractérise des eaux où la vie se développe de manière optimale (Bendjama, 2014) (Figure 44).

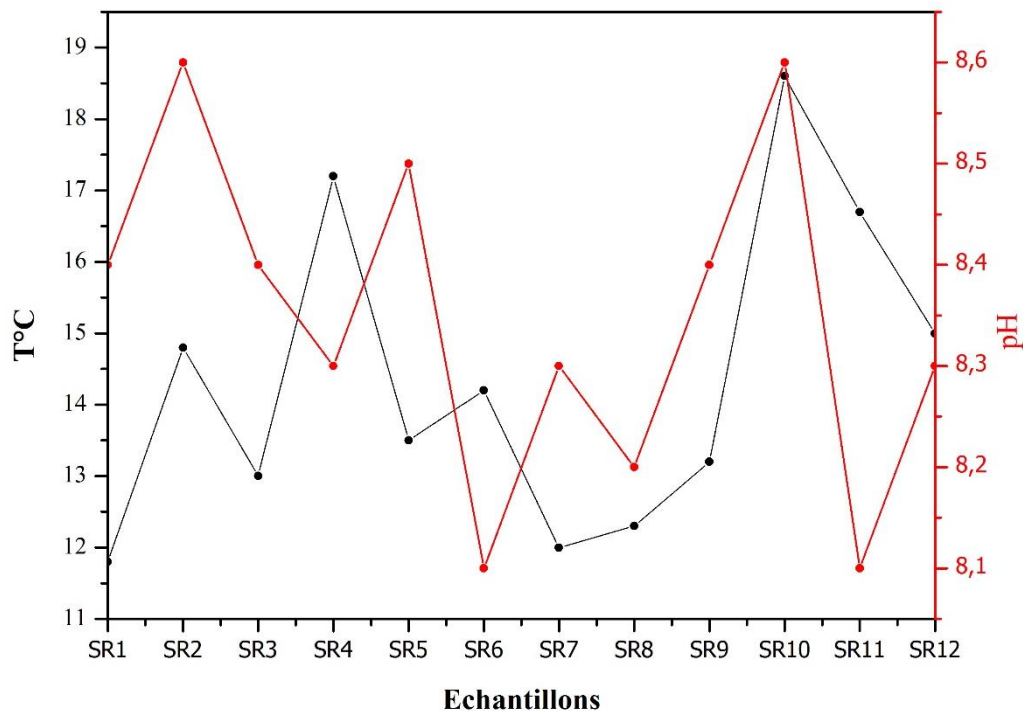


Figure 44: Représentation de l'évolution spatiale de la température et le pH

Pour la CE les résultats obtenus dans notre étude montrent des valeurs oscillantes entre 720 et 2890  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avec un moyen de 1660.6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La valeur minimale est enregistrée au niveau de SR6 alors que la valeur maximale est enregistrée au niveau de SR9 et dépasse largement les normes marocaines et ceux de l'organisation mondiale de la santé. L'échantillon SR9 se caractérise par un goût très salé en relation avec la dissolution des minéraux à partir des affleurements traversés par le cours d'eau. Cette salinité élevée est attribuée principalement aux chlorures, sodium, calcium, magnésium, et sulfates (Figure 45).

La dureté totale est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Elle est surtout due aux ions calcium et magnésium. Les résultats de la dureté totale obtenus montrent des valeurs de TH variant entre 530 et 2000 mg/L et excèdent les normes marocaines et celles de l'OMS fixées à 300 et 500 mg /L respectivement. Les échantillons présentent des valeurs élevées de TH. La valeur minimale est enregistrée au niveau de SR4, SR6 et SR10 (affluent de Srou) alors que la valeur maximale est enregistrée à SR12 dans un affluent de l'Oued Srou qui s'écoule depuis les environs de la ville d'El Kbab. Cela veut dire que les eaux du bassin versant Srou se caractérisent par des eaux très dures c'est à dire très riche en sels dissous surtout en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (Figure 45).

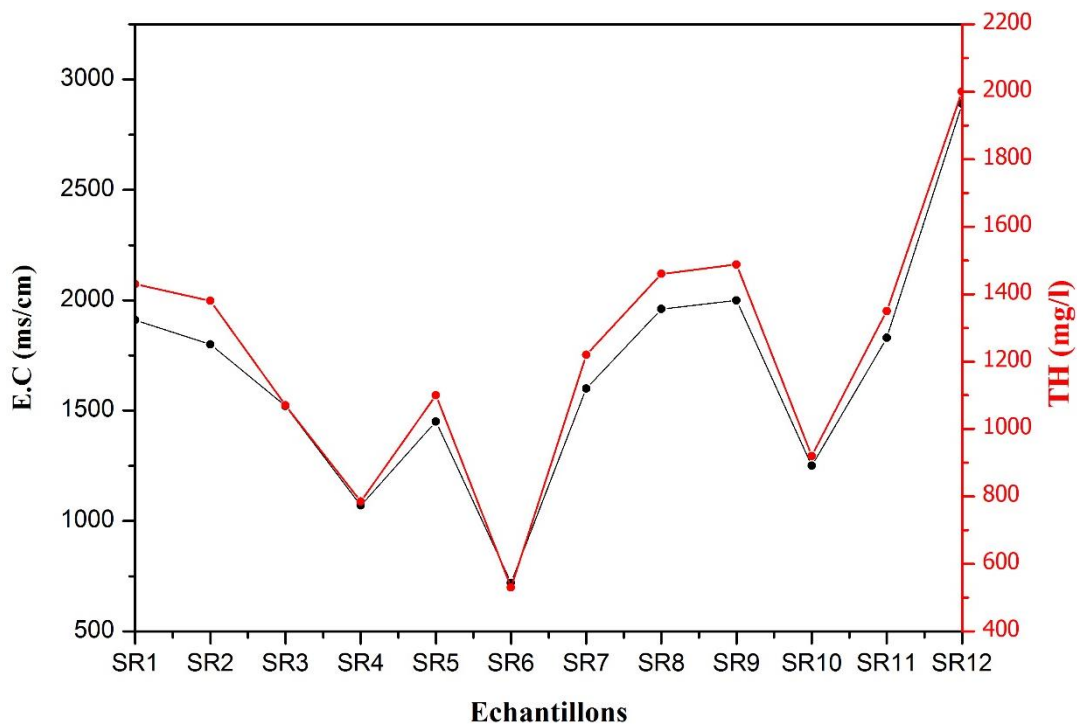


Figure 45: Représentation de l'évolution spatiale de la température et le pH

L'oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie aquatique. Il joue un rôle prépondérant dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse. C'est un paramètre utilisé essentiellement pour contrôler la qualité des eaux de surface. Les relevés spatiaux de ce paramètre fluctuent dans des normes normales entre un minimum de 8 mg/L à SR4 et un maximum de 8.96 mg/L au niveau de SR7 et SR9 indiquant une bonne saturation en oxygène de ces eaux (Figure 46).

La turbidité se manifeste par toutes les particules organiques ou minérales véhiculées par les eaux. Elles peuvent être composées de particules de sable, de terre et de sédiment arrachées par l'érosion, de divers débris apportés par les eaux pluviales. Selon les résultats obtenus on constate que les valeurs de la turbidité sont en dessus des normes recommandées par le Maroc et l'OMS à l'exception de SR10. Elle s'échelonne entre 3.78 et 170 NTU (Figure 46). L'origine de cette

turbidité est liée à la lithologie des terrains principalement les argiles qui sont très répandues dans le bassin. L'activité humaine contribue aussi à la turbidité des eaux par la présence de plusieurs carrières de sables et de gravats localisées au niveau des rives des oueds surtout en aval du bassin.

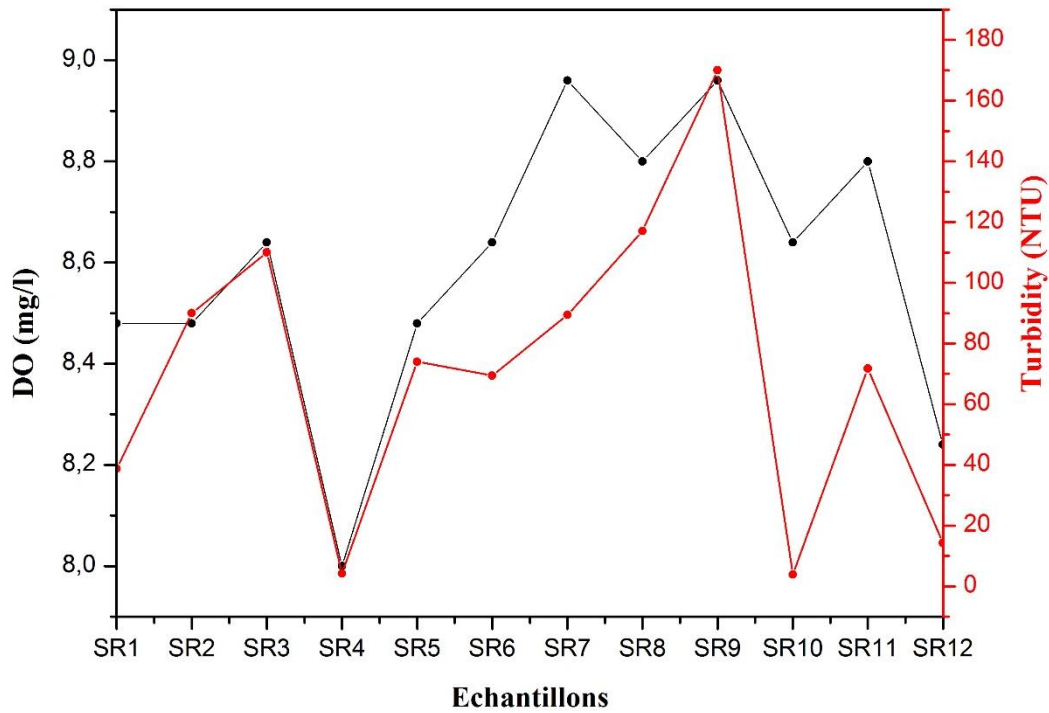


Figure 46: Représentation de l'évolution spatiale de la Turbidité et l'Oxygène dissous

La concentration en calcium et magnésium varient entre 216.8 et 381.2 mg/L et 66 et 393.6 mg/L avec une moyenne de 282.46 et 229.89 mg/L respectivement. Tous les échantillons présentent des concentrations très élevées en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  et dépassent les normes préconisées par le Maroc et l'OMS (Figure 47). L'apport continu en ces éléments est en liaison avec l'environnement géologique des affleurements (dolomites et carbonates) traversé par les cours d'eaux du bassin du fait qu'ils sont très solubles dans l'eau.

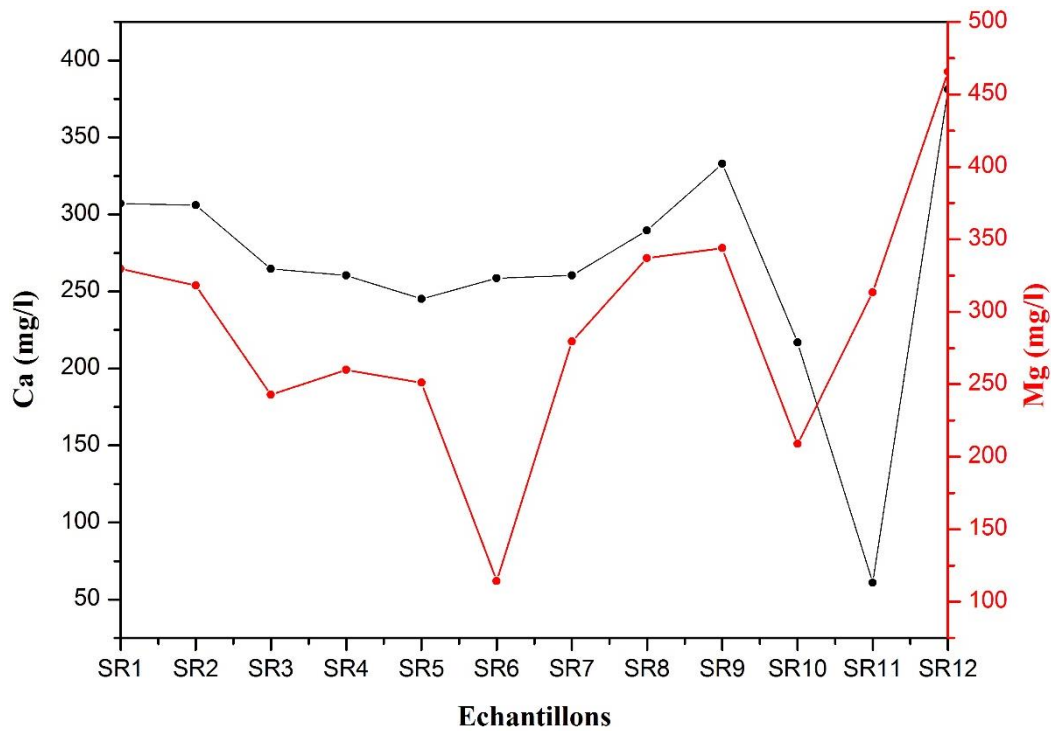


Figure 47: Représentation de l'évolution spatiale du Calcium et le Magnésium

Pour les carbonates et les bicarbonates les concentrations s'échelonnent entre 0 et 48 mg/L et 293.75 et 329.4 mg/L respectivement (Figure 48).

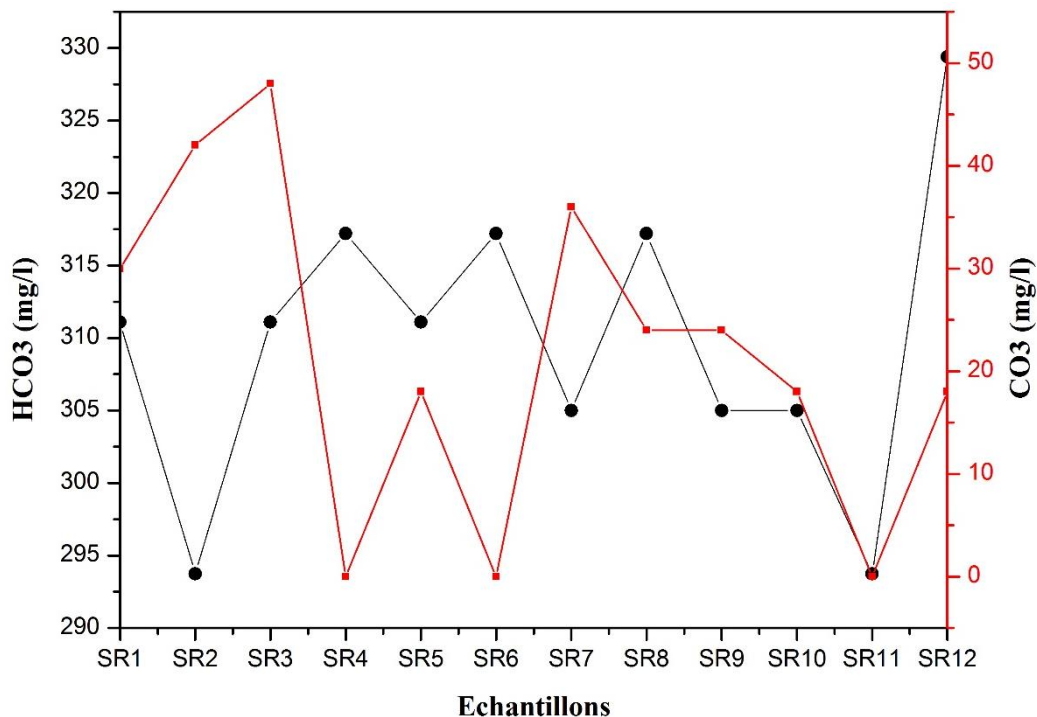


Figure 48: Représentation de l'évolution spatiale des Carbonates et les Bicarbonates

Les concentrations de sodium varient entre 212.3 mg/l à 483.3 mg/l avec une moyenne de 309,5 mg/l (Figure 49). La valeur minimale est observée au niveau de la station SR9. Elle est



en parfaite accord avec la conductivité électrique et la dureté totale. En même temps on observe des valeurs minimales de potassium qui varie entre 1,42 et 4,7 mg/l (Figure 49). L'origine des apports en sodium dans notre zone d'étude est naturelle. Na provient du lessivage de sols, dissolution du feldspath (Albite) et les minéraux argileux (Spears et Reeves, 1975, Ogbukagu, 1986) et les précipitations (Egbunike, 2007).

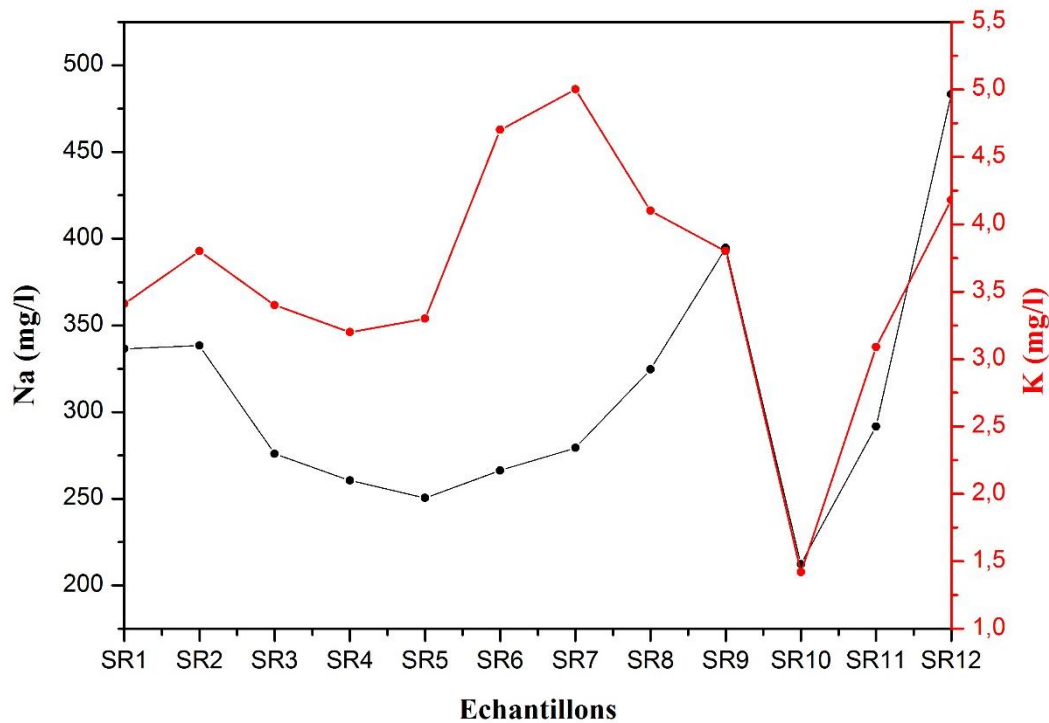
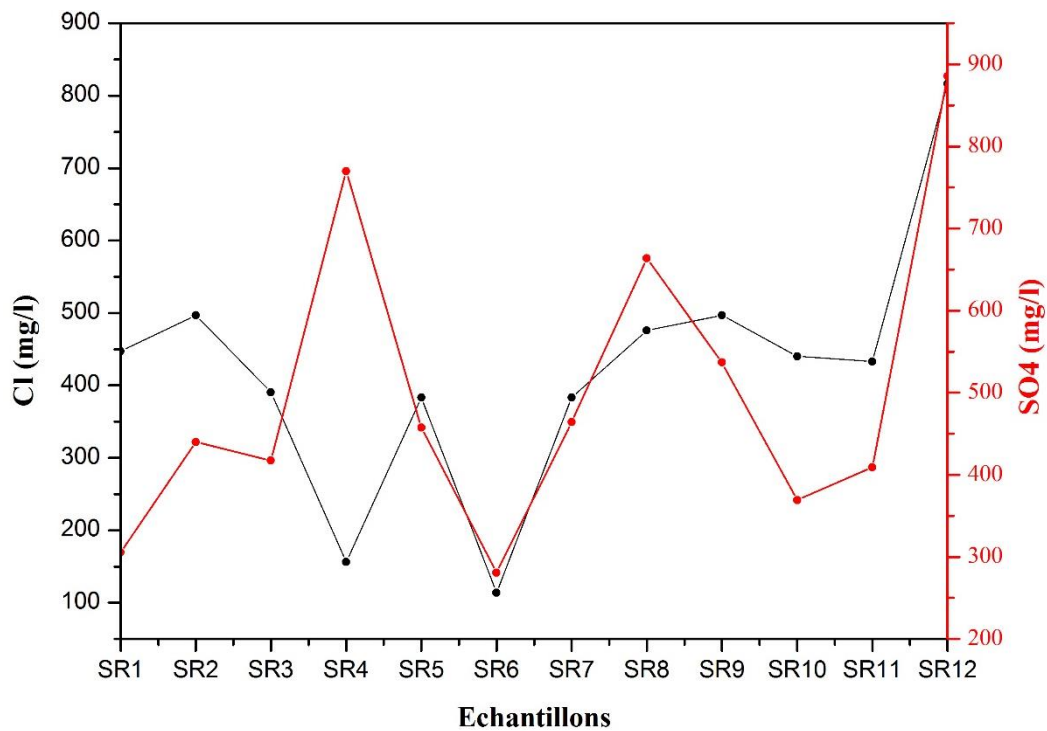


Figure 49: Représentation de l'évolution spatiale du Sodium et le Potassium

Généralement les concentrations des chlorures sont très élevées dans toutes les stations à l'exception de SR4 et SR6 où les valeurs sont faibles (200 mg/L). La valeur maximale de 816.5 mg/L est enregistrée à SR12 et dépasse largement la limite recommandée par l'OMS (Figure 50). Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Dans notre zone d'étude les chlorures sont en étroite relation avec la géologie des terrains dans le bassin versant de l'Oued Srou ou affleurent beaucoup de formations salifères triasiques et de dépôts évaporitiques.

La concentration des sulfates présente des valeurs très élevées excédant les normes de l'OMS (250 mg/L) au niveau de toutes les stations d'échantillonnage (Figure 50). L'origine des sulfates est causée par le phénomène d'érosion qui est responsable de la dissolution du gypse et des sulfures.





**Figure 50: Représentation de l'évolution spatiale du Chlorures et les Sulfates**

Pour les éléments azotés et d'après les résultats obtenus, on constate que les teneurs des nitrates et des nitrites varient entre 0.066 à 0.232 mg/L et 0.0122 à 0.241 mg/L respectivement. Au niveau de SR12 la valeur enregistrée est relativement élevée si on la compare avec les valeurs enregistrées dans les autres stations même si elles restent au-dessous des normes recommandées (Figure 51). Pour l'ammonium la limite de 0.2 mg/L a été prescrite par l'OMS et l'ensemble des stations montrent des valeurs inférieures à la norme à l'exception de SR11 où la valeur est 0.62 mg/L au niveau du point de confluence entre l'Oued Srou et l'Oued Chbouka. Cette élévation est attribuée aux rejets des eaux usées locale.

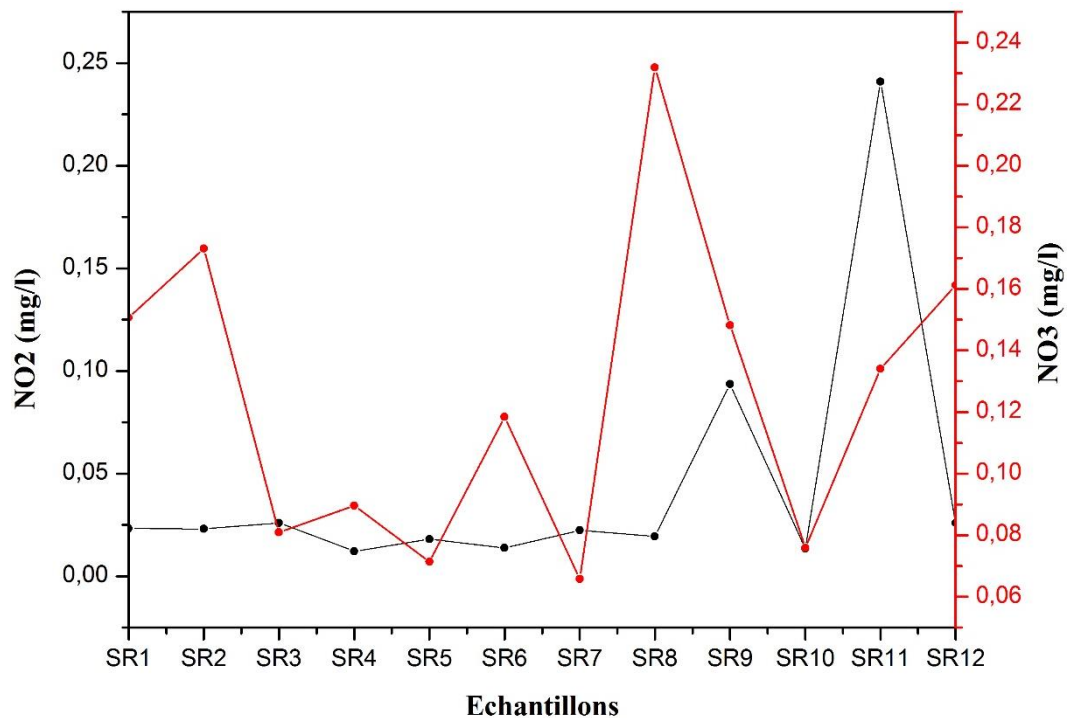


Figure 51: Représentation de l'évolution spatiale des nitrates et des nitrites

### 3. Evolution spatiale des éléments traces métalliques des eaux superficielles du bassin versant Oued Srou

Afin de déterminer le degré de pollution métallique relatif aux eaux du bassin Oued Srou, nous avons reporté dans le tableau 2 de l'annexe 3, les concentrations des éléments traces métalliques analysés au niveau des douze stations prospectées. Les résultats obtenus ont permis une estimation des concentrations brutes en éléments métalliques et de donner une idée sur leur répartition dans les différents sites étudiés (Karroum et al., 2019).

Les concentrations des éléments traces métalliques varient entre 6-18 ; 12-18 ; 6-14 ; 3-732 ; 1-31 ; 3-23 ; 9-24 et 2-29  $\mu\text{g/L}$  pour Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn respectivement. Cu, Mn, Ni et Zn répond aux normes de l'OMS, alors que Cd, Fe et Pb montrent des concentrations élevées dépassant les normes de l'OMS surtout au niveau des stations SR7 et SR8 pour le Fer qualifiant ainsi les eaux du bassin Oued Srou en tant que potentiellement polluée en ces trois métaux. L'origine de cette pollution peut être liée en premier lieu à la géologie des terrains traversés par les Oueds et en deuxième lieu aux eaux usés des agglomérations tel qu'El Kbab, Kerrouchen.... puisque toute activité industrielle est quasiment absente.

### 4. Niveau de contamination des eaux du bassin versant Oued Srou

Comme on a déjà signalé dans le chapitre précédant le calcul de l'indice de contamination est très utile pour apprécier et évaluer la qualité des eaux superficielle de la zone d'étude. Le

tableau suivant (Tableau 16) présente les valeurs de l'indice de contamination (Ic) calculé des douze stations prospectées.

L'évaluation des indices de contaminations des stations échantillonnées des eaux du bassin versant Oued Srou nous a permis de constater que ces eaux sont potentiellement contaminées par le Cd, Fe, et partiellement le Pb et indemnes de toute contamination par les autres métaux (Karroum et al., 2019).

**Tableau 16: Valeurs des min, max, et moyenne de l'indice de contamination dans les eaux du bassin versant**

|       | Ic (Cd) | Ic (Cr) | Ic (Cu) | Ic (Fe) | Ic (Mn) | IC (Ni) | Ic (Pb) | Ic (Zn) |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Min   | 2       | -       | 0,003   | 0,01    | 0,01    | 0,043   | 0,9     | 0,004   |
| Max   | 6       | -       | 0,052   | 7,047   | 0,31    | 0,329   | 2,4     | 0,058   |
| Moyen | 5,33    | -       | 0,022   | 2,053   | 0,094   | 0,25    | 1,4     | 0,022   |

## 5. Identification du faciès chimiques

Dans notre cas d'étude, les différents prélèvements des douze échantillons des eaux du bassin versant Oued Srou ont été utilisés pour décrire la nature et les faciès chimiques. Selon le diagramme de piper (Figure 52), les eaux d'Oued Srou sont de type Chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

Il ressort des résultats ainsi obtenus que les eaux étudiées soient particulièrement riches en chlorures et en sulfates. Les concentrations des cations révèlent que les teneurs en Ca, Mg et Na sont importantes.

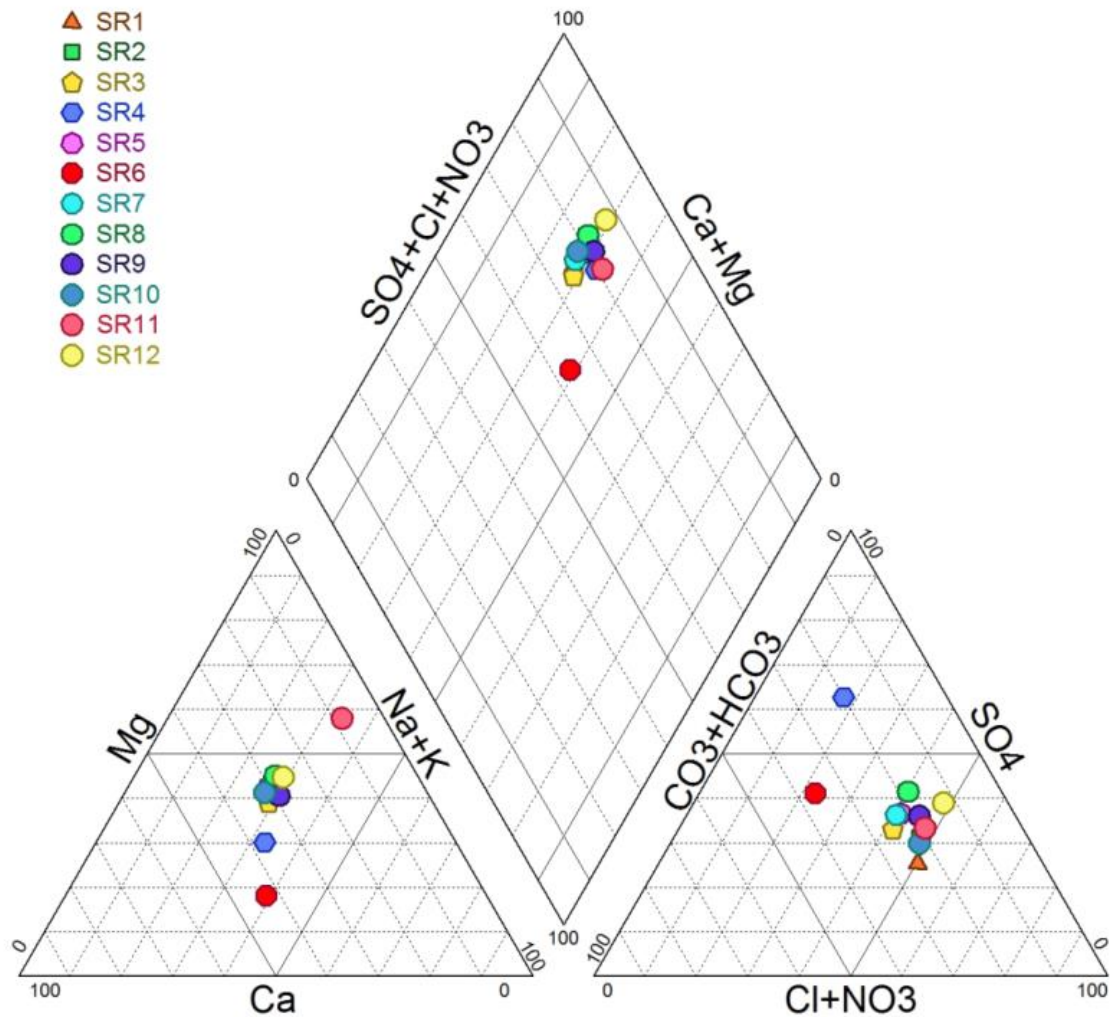


Figure 52 : Diagramme de Piper des stations échantillonnées

## II. Etude des données par Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'ACP a été appliqué aux données hydrochimiques des eaux de surface de l'Oued Srou sur un tableau de 16 variables. Les tests réalisés montrent que le modèle factoriel est approprié (KMO= 0.500 et le test de Bartlett =0)

### 1. Matrice de corrélations (coefficient de Pearson r)

Le tableau (17) présente la matrice de corrélations appliquée aux 12 échantillons des eaux superficielles de l'Oued Srou. Les valeurs en gras présentent les coefficients de corrélation des variables fortement corrélées entre eux soit positivement ou négativement et où les corrélations sont les plus significatives.

À partir de la matrice de corrélation réalisée, on peut dégager les observations suivantes :

- La température présente une corrélation négative avec la turbidité EC ( $r = -0.606$ ), K ( $r = -0.677$ ) et  $\text{CO}_3^{2-}$  ( $r = -0.552$ )
- Le pH montre une corrélation négative avec K ( $r = -0.505$ ) et positive avec  $\text{CO}_3^{2-}$  ( $r = 0.556$ ).
- La turbidité est bien corrélée positivement avec OD ( $r = 0.724$ ) alors que ce dernier ne représente aucune corrélation avec les autres paramètres
- La conductivité électrique est très bien corrélée avec la dureté totale ( $r = 0.994$ ),  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0.944$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.836$ ),  $\text{Na}^+$  ( $r = 0.871$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.988$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = 0.528$ ) et  $\text{NO}_3^-$  ( $r = 0.547$ )
- La dureté totale est très corrélée positivement avec la conductivité électrique,  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0.933$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.819$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.997$ ) et  $\text{Na}^+$  ( $r = 0.851$ )
- Les carbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) sont corrélés positivement avec  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = -0.570$ ) et négativement avec  $\text{NH}_4^+$  ( $r = -0.516$ ) par contre les  $\text{CO}_3^{2-}$  présente une corrélation négative avec T ( $r = -0.552$ ) et positive avec pH ( $r = 0.556$ ).
- Le calcium est très bien corrélé positivement avec EC, TH,  $\text{Na}^+$  ( $r = 0.993$ ), Mg ( $r = 0.776$ ), Cl ( $r = 0.707$ ),  $\text{NO}_3^-$  ( $r = 0.626$ ) et  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = 0.537$ ).
- Le Magnésium montre une bonne corrélation positive avec EC, TH,  $\text{Na}^+$  ( $r = 0.811$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.776$ ) et  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0.938$ ).
- Le sodium montre une corrélation positive avec EC, TH,  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.993$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.811$ ) et  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0.759$ ).
- Le potassium K présente une corrélation négative avec la température et le pH.
- Les chlorures sont très bien corrélés positivement avec EC, TH,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.707$ ) et  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.938$ ).
- Les sulfates montrent une corrélation positive avec  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.537$ ),  $\text{HCO}_3^-$  ( $r = 0.570$ ) et EC ( $r = 0.582$ ).
- Les nitrates  $\text{NO}_3^-$  est corrélé positivement avec EC et  $\text{Ca}^{2+}$ .
- Les nitrites  $\text{NO}_2^-$  est bien corrélé positivement avec  $\text{NH}_4^+$  ( $r = 0.959$ ).
- Les ammoniums  $\text{NH}_4^+$  est positivement corrélé avec  $\text{NO}_2^-$  et négativement corrélé avec  $\text{HCO}_3^-$  ( $r = -0.516$ ).

La bonne corrélation entre la conductivité électrique et le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) explique que ces éléments sont responsables de la salinité élevée que connaît les eaux du bassin versant Oued Srou. L'origine

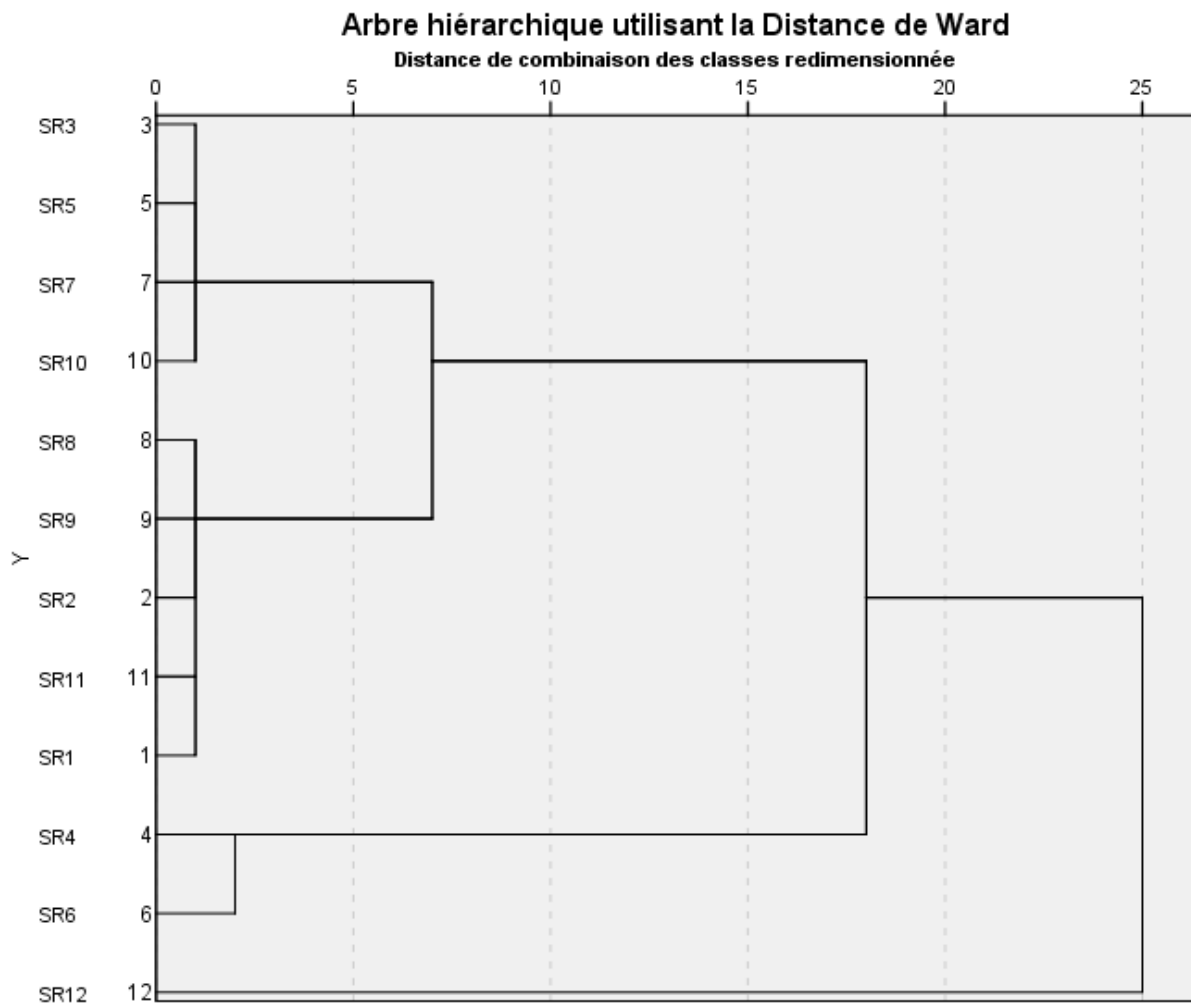
de ces éléments est quasiment liée à la lithologie du bassin versant (lessivage de ces éléments via les processus d'interaction eau-roche).

**Tableau 17: Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques.**

|                               | T            | pH           | EC          | Turbidité   | TH          | DO    | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> |
|-------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T                             | 1,000        |              |             |             |             |       |                 |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| pH                            | ,123         | 1,000        |             |             |             |       |                 |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| EC                            | -,240        | ,042         | 1,000       |             |             |       |                 |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| Turbidité                     | <b>-,606</b> | -,084        | ,112        | 1,000       |             |       |                 |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| TH                            | -,278        | ,071         | <b>,994</b> | ,161        | 1,000       |       |                 |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| DO                            | -,395        | -,161        | ,015        | <b>,724</b> | ,064        | 1,000 |                 |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| Cl <sup>-</sup>               | -,098        | ,255         | <b>,944</b> | ,032        | <b>,933</b> | ,042  | 1,000           |                               |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | ,137         | -,130        | <b>,528</b> | -,182       | ,486        | -,467 | ,427            | 1,000                         |                              |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ,234         | -,418        | ,206        | ,229        | ,220        | ,369  | ,118            | -,123                         | 1,000                        |                              |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | -,253        | -,232        | <b>,547</b> | ,285        | ,570        | ,076  | ,432            | ,291                          | ,120                         | 1,000                        |                              |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | ,317         | -,434        | ,140        | ,026        | ,149        | ,236  | ,065            | -,154                         | <b>,959</b>                  | ,074                         | 1,000                        |                 |                |                  |                  |                               |                               |
| Na <sup>+</sup>               | -,281        | -,102        | <b>,871</b> | ,168        | <b>,851</b> | -,090 | <b>,759</b>     | ,557                          | ,088                         | ,613                         | -,032                        | 1,000           |                |                  |                  |                               |                               |
| K <sup>+</sup>                | <b>-,677</b> | <b>-,505</b> | ,169        | ,415        | ,178        | ,208  | -,019           | ,162                          | -,131                        | ,265                         | -,190                        | ,410            | 1,000          |                  |                  |                               |                               |
| Ca <sup>2+</sup>              | -,311        | -,088        | <b>,836</b> | ,169        | <b>,819</b> | -,141 | <b>,707</b>     | <b>,537</b>                   | ,052                         | <b>,626</b>                  | -,065                        | <b>,993</b>     | ,426           | 1,000            |                  |                               |                               |
| Mg <sup>2+</sup>              | -,267        | ,089         | <b>,988</b> | ,155        | <b>,997</b> | ,088  | <b>,938</b>     | ,468                          | ,235                         | ,549                         | ,172                         | <b>,811</b>     | ,142           | <b>,776</b>      | 1,000            |                               |                               |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | -,152        | -,276        | ,172        | -,326       | ,097        | -,472 | ,111            | <b>,570</b>                   | -,530                        | ,104                         | <b>-,516</b>                 | ,340            | ,266           | ,337             | ,064             | 1,000                         |                               |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | <b>-,552</b> | <b>,556</b>  | ,301        | ,415        | ,332        | ,270  | ,369            | -,152                         | -,342                        | ,049                         | -,390                        | ,158            | ,135           | ,178             | ,343             | -,209                         | 1,000                         |

## 2. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) : la similarité spatiale et le groupement des sites

Le dendrogramme présentant la classification ascendante hiérarchique (CAH) groupe les 12 stations d'échantillonnage en trois classes ou clusters (Figure 53).



**Figure 53: Dendrogramme du regroupement des stations échantillonnées du bassin versant Oued Srou**

**Cluster 1** se compose des stations suivantes SR1, SR2, SR3, SR5, SR7, SR8, SR9 et SR11 localisées au niveau d'Oued Srou et SR10 pris au niveau de l'Oued Chbouka. Les stations de ce cluster présentent des caractéristiques similaires et correspondent à des eaux de qualité modérée.

**Cluster 2** est constitué des stations SR4 et SR6 échantillonné dans des petits cours d'eau tributaires d'Oued Srou situé dans sa rive droite. Ce cluster enregistre des valeurs très basses dans tous les paramètres contrôlés et correspond à des eaux de bonne qualité.

**Cluster 3** comprend seulement la station SR12. Cette station présente les valeurs les plus élevées de tous les paramètres contrôlés et renseigne sur des eaux potentiellement polluées.

Dans notre cas d'étude les variations remarquées dans la qualité des eaux du bassin versant Oued Srou sont principalement liées à des processus naturels tel que la dissolution des sels minéraux des formations triasique salifères et évaporitiques très répandu dans le bassin versant d'Oued Srou.

### 3. Analyse factorielle

Dans le bassin versant Oued Srou le scree plot a identifié quatre facteurs à retenir (Figure 54). Ces facteurs représentent 86,287% de la variance totale, ce qui est assez bon pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie.

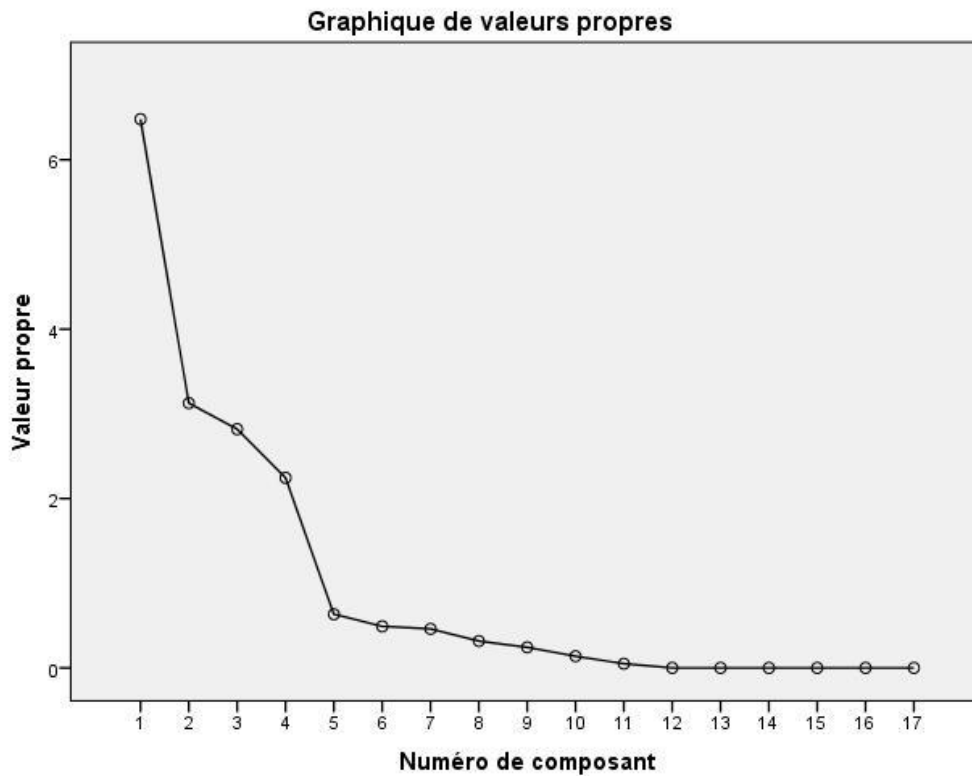


Figure 54: Graphique des valeurs propres

Les facteurs ont été distingués selon leurs charges (loading) en variables : bon, modéré et faible quand les valeurs de la charge sont supérieures à 0.75, entre 0.75-0.50 et entre 0.50-0.30 respectivement (Liu et al., 2003) (Tableau 18).



**Tableau 18: Liaison Variables-Facteurs**

|                               | F1          | F2           | F3           | F4           |
|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| T                             | -,378       | -,202        | <b>,772</b>  | ,274         |
| pH                            | -,033       | -,248        | -,269        | <b>,894</b>  |
| EC                            | <b>,965</b> | ,026         | ,152         | ,162         |
| Turbidité                     | ,241        | <b>,642</b>  | <b>-,544</b> | -,142        |
| TH                            | <b>,962</b> | ,083         | ,116         | ,187         |
| DO                            | ,034        | <b>,809</b>  | <b>-,358</b> | -,021        |
| Cl                            | <b>,870</b> | -,018        | ,140         | <b>,391</b>  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>  | <b>,552</b> | <b>-,523</b> | ,296         | -,197        |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ,108        | <b>,762</b>  | <b>,607</b>  | -,080        |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | <b>,658</b> | ,123         | ,033         | -,225        |
| NH <sub>4</sub>               | ,011        | <b>,682</b>  | <b>,691</b>  | -,062        |
| Na                            | <b>,939</b> | -,103        | ,060         | -,133        |
| K                             | ,359        | ,079         | <b>-,469</b> | <b>-,686</b> |
| Ca                            | <b>,920</b> | -,128        | ,024         | -,146        |
| Mg                            | <b>,943</b> | ,108         | ,124         | ,224         |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ,249        | <b>-,750</b> | -,050        | <b>-,461</b> |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | ,323        | ,100         | <b>-,703</b> | <b>,514</b>  |
| Valeurs propres               | 6,480       | 3,126        | 2,819        | 2,244        |
| % Variance                    | 38,117      | 18,386       | 16,583       | 13,202       |
| % Cumulative                  | 38,117      | 56,502       | 73,085       | 86,287       |

**Le facteur (F1)** représente 38,117% de la variance totale et montre des charges (loading) positives et très élevées en EC, TH, Na, Ca, Mg, et Cl, positives et modérées en SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, négatives et faibles en T et positives et faibles en turbidité, K, et CO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Ce facteur présente une origine commune des sels minéraux dissout dans ces eaux et qui vient de la dissolution des calcaires, dolomites et les formations salifères et évaporitiques. Des observations similaires ont été prouvées par Han et al., (2013) au niveau du bassin versant de Xiangxi en chine.

**Le facteur (F2)** compte 18,386% de la variance totale. Il montre des charges positives et très élevées en DO et NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et négatives et élevées en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, positives et modérées en turbidité et NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et négatives et modérées en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Ce facteur inclus des variables organiques et des

nutriments et il se peut qu'il soit influencé par une source de pollution domestique et/ou issue de la pratique de l'élevage (fumier) (Simeonov et al., 2003).

**Le facteur (F3)** décrit 16,583% de la variance totale, et présente des charges positives et élevées en T et négatives et élevées en  $\text{CO}_3^{2-}$ , positives et modérées en  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$  et négatives et modérées en turbidité, K et DO et négatives et faibles en DO et K et positives et faibles en  $\text{NO}_3^-$ . F3 témoigne d'une source de pollution mixte comprenant une source naturelle et une contribution anthropique (barakat et al., 2016).

**Le facteur (F4)** présent 13,202% de la variance totale et présente des charges positives et élevées en pH, négatives et modérées en K et positives et modérées en  $\text{CO}_3^{2-}$  et négatives et faibles en  $\text{HCO}_3^-$  et positives et faibles en Cl. Ce facteur mis le point sur des processus naturel de dissolution des carbonates (Singh et al., 2004).

### **III. Aptitude des eaux à l'irrigation**

Une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire. Plusieurs paramètres de qualité doivent être pris en considération à savoir Sodium adsorption ratio (SAR), la salinité, le risque de salinité, Kelley index (KI) et le risque du magnésium (MH) (Karroum et al., 2019).

#### **1. Effet de la salinisation**

La CE donne une idée sur la salinité des eaux. Dans notre zone d'étude la CE varie entre 720 et  $2890\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces valeurs sont très élevées et représentent la classe C3 (Tableau 8 du chapitre V) où l'utilisation de l'eau révèle un risque élevé pour le sol et les plantes à irriguer.

#### **2. Effet de $\text{Na}^+$**

Dans la zone d'étude les valeurs du SAR varient entre 2,16 et 3.47 (Tableau 19). Ces valeurs représentent la classe S1 ( $\text{SAR}<10$ ) (Tableau 10 du chapitre V) et montrent que ces eaux peuvent généralement être utilisées sur tous types de sol avec une faible accumulation de sodium.

**Tableau 19: Valeurs des indices calculés SAR, KI, et MH**

| Samples | Na (meq/l) | Ca (meq/l) | Mg (meq/l) | SAR  | KI   | MR    |
|---------|------------|------------|------------|------|------|-------|
| SR1     | 6,73       | 6,14       | 5,46       | 2,79 | 0,58 | 47,06 |
| SR2     | 6,77       | 6,12       | 5,22       | 2,84 | 0,60 | 46,03 |
| SR3     | 5,52       | 5,29       | 3,92       | 2,57 | 0,60 | 42,55 |
| SR4     | 5,21       | 5,21       | 2,55       | 2,65 | 0,67 | 32,88 |
| SR5     | 5,01       | 4,90       | 4,16       | 2,35 | 0,55 | 45,90 |
| SR6     | 5,33       | 5,17       | 1,32       | 2,96 | 0,82 | 20,33 |
| SR7     | 5,59       | 5,21       | 4,67       | 2,51 | 0,57 | 47,28 |
| SR8     | 6,49       | 5,79       | 5,69       | 2,71 | 0,57 | 49,56 |
| SR9     | 7,89       | 6,66       | 5,62       | 3,19 | 0,64 | 45,77 |
| SR10    | 4,25       | 4,34       | 3,42       | 2,16 | 0,55 | 44,09 |
| SR11    | 5,83       | 5,34       | 5,27       | 2,53 | 0,55 | 49,69 |
| SR12    | 9,67       | 7,62       | 7,87       | 3,47 | 0,62 | 50,79 |
| mean    | 6,19       | 5,64       | 4,60       | 2,73 | 0,60 | 44,92 |

### 3. Indice de Kelley

Dans les eaux de l'Oued Srou les valeurs de l'indice de Kelley sont inférieures à 1. Elles varient entre 0.55 et 0.82 ce qui montre que cette eau est utilisable pour l'irrigation (Tableau 19).

### 4. Effet de magnésium (MR)

Selon la littérature les valeurs de MR doivent être inférieures à 50% pour l'utiliser dans l'irrigation (Szabolcs et Darab, 1964). Elles varient entre 20.33% et 50.79% ce qui suggère que ces eaux sont utilisables pour l'irrigation (Tableau 19).

### 5. Classification des eaux par la méthode de RICHARDS

La classification de Richards (1954) est fondée sur la CE et le SAR. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme montre que les eaux de l'Oued Srou appartiennent à trois classes (Figure 55)

C2S1 : comprend la station SR6 et se caractérise par un SAR faible et une conductivité électrique moyenne et désignent des eaux de bonne qualité utilisables pour l'irrigation.

C3S1 : se compose des stations SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR7, SR8, SR9, SR10 et SR11 et révèle un SAR faible et une conductivité électrique élevée. Cette classe désigne une qualité bonne à modérée.

C4S2 : inclus la station SR9 et se caractérise par un SAR moyen et une conductivité électrique très élevée ce qui permet d'énoncer que ces eaux sont inaptes à utiliser dans l'irrigation dans tous les types du sol.

Selon Tiwari et Singh les eaux de bonne qualité (C2S1) sont utilisables dans l'irrigation avec un danger très limité pour le sol et les cultures. Pour les eaux de qualité modérée (C3S1) sont tolérées pour les sols et les plantes qui supportent davantage la salinité. Enfin ils ont mis en évidence que les eaux de nature médiocres (C4-S2, C4S3, et C4S4) sont indésirables dans l'irrigation notamment dans les sols argileux de faible perméabilité.

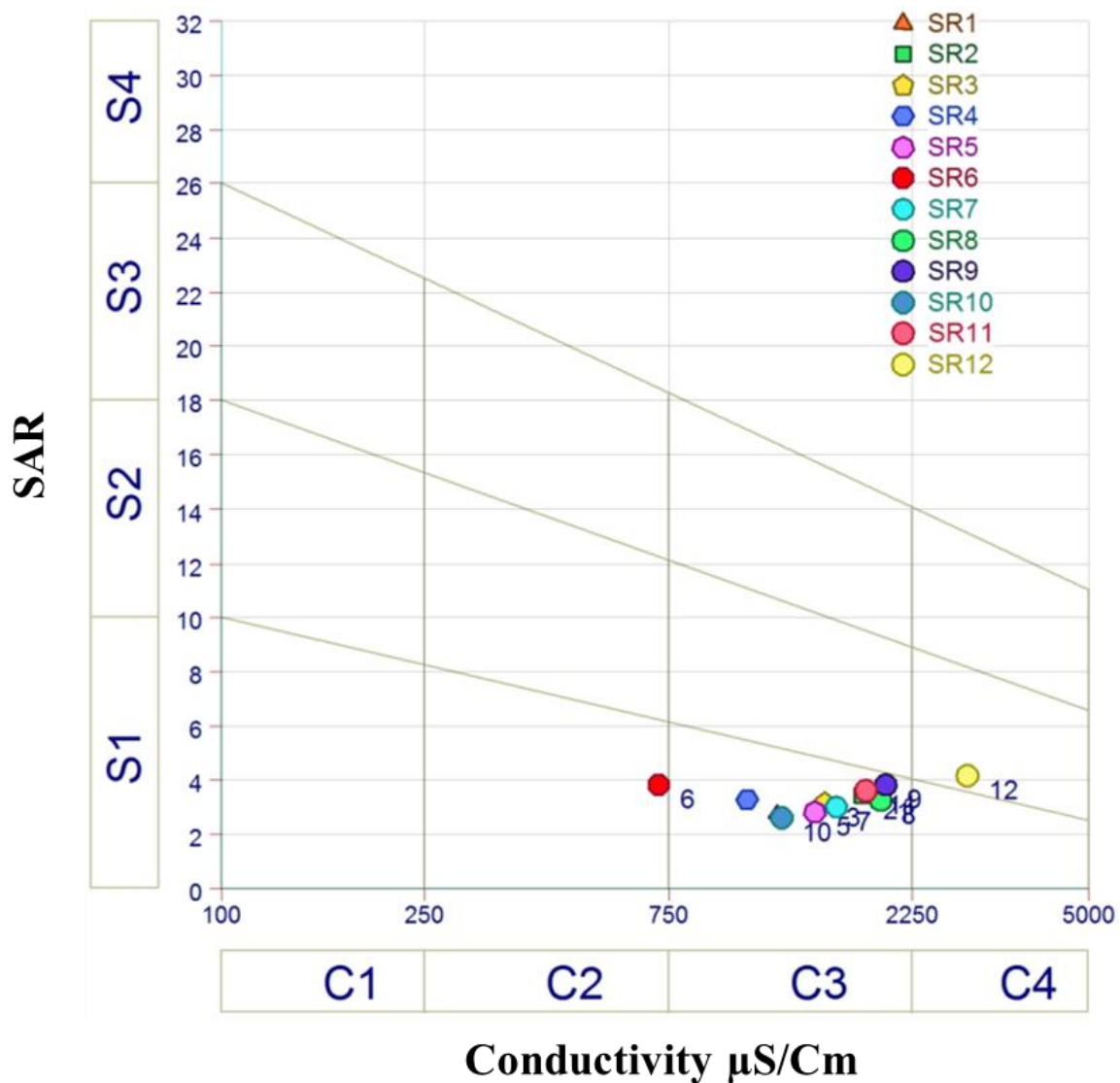


Figure 55: Diagramme de Richards de classification des eaux pour l'irrigation

## **IV. Conclusion**

Les conclusions relevées au terme de ce chapitre, permettent de dégager un premier constat sur la qualité des eaux superficielles des douze stations prospectées par l'analyse spatiale de plusieurs paramètres physicochimiques.

En effet selon les analyses physico-chimiques, les eaux du bassin versant Oued Srou révèlent une qualité potentiellement dégradée du fait que la majorité des éléments chimiques analysés à savoir la conductivité électrique, la dureté totale, les chlorures, le calcium, le sodium, le magnésium, les sulfates et quelque métaux lourd (Fe, Cd et Pb) dépassent les normes marocaines et celle fixées par l'organisation mondiale de la santé (OMS). Aucun signe lié à la pollution organique (nitrites, nitrates et ammonium) n'a été détecté mais en revanche une signature naturelle est la cause de cette détérioration. Les cations sont dans l'ordre d'abondance suivant :  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  tandis que les anions révèlent l'ordre d'abondance suivant :  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ .

Le recours aux analyses statistiques a prouvé que les différentes corrélations entre les éléments montrent que le chimisme de l'eau est le résultat d'une contamination naturelle liée à la géologie. L'analyse hiérarchique ascendante a permis d'affiner la distribution des éléments chimiques et leur distribution en trois groupes contrôlés par la conductivité électrique et les sels minéraux dissouts.

L'aptitude de ces eaux à l'irrigation a été envisagée par l'étude de plusieurs paramètres tels que le SAR, la salinité, KI et MH. Les résultats montrent des valeurs faibles de SAR, KI et MH et donc apte à utiliser dans l'irrigation mais conjointement à la salinité élevée ces eaux peuvent causer des effets négatifs et des dommages irréversibles au sol et aux plantes objet d'irrigation.

## CHAPITRE VIII : HYDROCHIMIE DES EAUX DE SURFACE

### I. Introduction

La composition chimique des eaux naturelles avant toute perturbation anthropique est contrôlée par le milieu naturel du bassin versant (atmosphère, biosphère, sols et roches). Dans le cas des rivières, celle-ci change grandement au cours de son écoulement de l'amont vers l'aval via des processus physiques, chimiques et biologiques naturels. Elle est de même modifiée par les eaux de pluie, de ruissellement, et celles des nappes.

L'objectif de ce chapitre est de cerner les processus d'acquisition de la minéralisation, déterminer l'origine de chaque élément chimique, son comportement par rapport aux autres, son évolution dans l'espace et les différents phénomènes hydrochimiques qui peuvent se développer.

#### 1. Hydrochimie : définition

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques des eaux. Elle est basée aussi sur les processus d'interactions eau-roche. Selon Gibbs (1970), les trois mécanismes influençant la composition des eaux douces sont, par ordre croissant de concentrations en matières dissoutes totales (TDS ou sels): les précipitations atmosphériques, la géologie ainsi que les processus d'évapo-cristallisation. Les ions dissous les plus notables résultant de ces mécanismes sont les ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) auxquels s'ajoutent  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

#### 2. Apports et origines des sels

Le sel fait référence à tout composé formé du cation d'une base, et de l'anion d'un acide, qui se dissocient facilement dans l'eau. En pratique, une eau est saline lorsque sa salinité exprimée en résidu sec dépasse 1g/l.

L'origine des sels varient entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les principales origines sont l'origine géologique, les échanges avec un aquifère voisin dans les systèmes hydrogéologiques, l'intrusion marine et les sels anthropiques.

Dans notre contexte d'étude on est intéressé à l'eau de surface c'est pour cette raison qu'on détaille seulement l'origine géologique des sels.

##### a. Origines géologiques

Classiquement, en géologie, on distingue les roches sédimentaires, les roches cristallines et métamorphiques. Par leurs caractères de porosité primaire et leurs modes de genèses, les roches sédimentaires constituent l'essentiel des terrains. Alors que la seconde catégorie (les roches

magmatiques) est issue de la fusion du manteau, ou reprise sous haute pression et haute température (Elgettafi, 2011).

### **b. Les roches carbonatées**

Ces roches sont formées au minimum de 50% de carbonates (Calcite  $\text{CaCO}_3$ , Dolomite ( $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$ , Aragonite  $\text{CaCO}_3$ ). Ces roches représentent 20% des roches sédimentaires, on distingue les calcaires et les dolomies. Elles sont souvent liées à une transgression marine ou à une activité biologique, ou bien elles peuvent être déposées dans un milieu lacustre. En effet, leurs caractères de perméabilité, de fissuration et de dissolution, leurs confèrent la propriété d'être de bons réservoirs d'eau (les aquifères karstiques) dans les eaux souterraines. En revanche, les roches reprises en cristallisation (tel que le marbre) ne le sont pas. Les roches carbonatées pures fournissent essentiellement de  $\text{HCO}_3^-$ , du Ca et du Mg. Le faciès des eaux associé à ces terrains est généralement bicarbonaté calcique et magnésien.

### **c. Les roches évaporitiques**

Les évaporites sont des sédiments résultant de l'évaporation de l'eau des anciennes mers et de la précipitation des sels qui y sont dissous. Elles correspondent souvent à des épisodes de régressions. Elles se déposent en milieu continental dans des lacs endoréiques ou dans un milieu marin peu profond des Sebkhah. Nous pouvons les trouver sous forme de lits continus ou en intercalation avec d'autres couches sédimentaires, en masse lenticulaires isolés ou associés à des formations géologiques ou bien en diapir de sel lié aux effets tectoniques. Par ordre de cristallisation, les minéraux principaux sont le gypse, l'anhydrite et la halite. Du point de vue sédimentologique, ce sont de bons marqueurs climatiques qui se développent dans les régions à climat aride. Par leur contact avec les eaux, les évaporites contribuent à la salinisation des eaux, suite à leur forte solubilité. Les roches évaporitiques sont la principale source de  $\text{SO}_4$  et Cl, de Ca, Mg et Na. Le faciès des eaux associées à ces environnements est généralement chloruré, sulfaté sodique.

### **d. Les roches magmatiques et métamorphiques**

Les eaux de surfaces traversant les roches cristallines sont principalement oxydées, faiblement minéralisées et peu tamponnées (Toulhoat, 1996)

## **3. Etat des lieux sur les éléments majeurs (sels).**

### **a. $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{Mg}^{2+}$**

Ces deux éléments proviennent essentiellement de la dissolution des calcaires, des dolomies et des marnes dolomitiques. La cinétique de la mise en solution de ces roches n'est pas rapide. Le temps de dissolution étant plus important que pour la calcite, les teneurs élevées en magnésium indiquent généralement des eaux à transit lent (Krimissa, 2005).

### **b. K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>**

Résultent d'une dissolution rapide et en grande quantité de NaCl et KCl. Toutefois, dans les eaux karstiques, leur présence est souvent très faible et leur origine relève d'évolutions différentes (Krimissa, 2005).

- Les précipitations : constituent le principal apport par lessivage des impuretés atmosphérique d'origine océanique. Trois facteurs entrent en jeu (Schoeller, 1962) :
  - L'éloignement du littoral : la concentration diminue quand on s'éloigne de la mer.
  - La dilution : les hauteurs de pluies les plus élevées montrent de plus faibles teneurs du fait de la grande dilution (effet de masse).
  - L'origine des précipitations : les vents des zones côtières généralement riche en Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>. Les pluies locales de type orageux présentent par contre de faibles teneurs.
- Apport dû à la présence de formation évaporitiques.
- Influence des minéraux silicatés, tel que les argiles.
- Facteurs de reconcentration : plusieurs facteurs d'ordre chimique, biologique, climatique, peuvent influencer sur la concentration des ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> (Krimissa, 2005).
  - Facteurs biologiques : le K<sup>+</sup> est sélectivement absorbé par les plantes, au détriment de Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>, une reconcentration éventuelle de l'ion K<sup>+</sup> n'est généralement pas décelable dans le sol par rapport aux ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>. De plus, la minéralisation de la matière organique du sol (humification) libère du potassium après la chute des feuilles.
  - Les échanges de cation : les minéraux argileux ou les substances organiques (humus) sont susceptibles d'échanger leur Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> contre Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> des eaux à leur contact. Le lessivage de ces substances peut provoquer une augmentation sensible de la concentration en Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> des eaux karstiques.
  - L'évaporation : ce mécanisme n'est actif que dans le sol (à proximité de la surface); il favorise la reconcentration.

### **c. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**

La variabilité des teneurs en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> observées dans les eaux naturelles présente un grand intérêt hydrologique. Elle est d'origine diverse :

- Eaux de pluie : les précipitations peuvent contenir des quantités non négligeables de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. La formation d'ions sulfates s'obtient par une double oxydation du soufre présente dans l'atmosphère suivie d'une hydratation. L'oxydation du soufre donne naissance aussi à une libération de H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> qui acidifie l'eau (Krimissa, 2005) ;
-



- Apport des sulfates par lessivage des roches évaporitiques (gypse, anhydrite...): la mise en solution du sulfate de calcium est relativement rapide ( $K_s : 2,83 \cdot 10^{-6}$  à 25°C). Seulement, la présence de l'ion  $Ca^{2+}$ , commun avec la calcite est susceptible de limiter la dissolution des deux minéraux. Généralement un tel apport est toujours à l'origine de teneurs très élevées (Bakalowicz, 1979). La lixiviation du gypse contenu dans les marnes enrichit les eaux en sulfates (Krimissa, 2005) ;
- Apport des sulfates par les minéraux sulfurés : l'oxydation du soufre de la pyrite contenue dans les roches est un ensemble de réactions complexes aboutissant à la formation d'hydroxydes de fer insolubles, de sulfates et d'ions  $H_3O^+$  : ce qui va accroître les possibilités de dissolution, donc les sulfures constituent un facteur particulièrement favorable à la mise en solution des carbonates (Krimissa, 2005) ;
- Influence biologique du sol : la matière organique végétale et animale dans le sol fournit, par minéralisation, des sulfates. Néanmoins, l'activité microbiologique du sol commande dans certains cas l'évolution des teneurs en sulfates des eaux souterraines (Bakalowicz, 1980). En effet, lorsque cette activité se développe, il y a consommation de l'oxygène, celui de l'ion sulfate notamment, et donc réduction des sulfates et immobilisation du soufre dans la matière vivante (Krimissa, 2005) ;
- Origine agricole : l'utilisation systématique des engrais chimiques pour fertiliser les terrains agricoles, et l'emploi des pesticides pour lutter contre les parasites des cultures, peuvent accroître les concentrations en  $SO_4^{2-}$  des eaux souterraines (Krimissa, 2005).

## II. Acquisition de la minéralisation

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer et connaître l'hydrochimie des eaux naturelles. A cette fin nous avons fait appel au diagramme binaires X-Y et l'indice de saturation. De là, nous présenterons les principaux mécanismes géochimiques impliqués dans l'acquisition de la minéralisation des eaux.

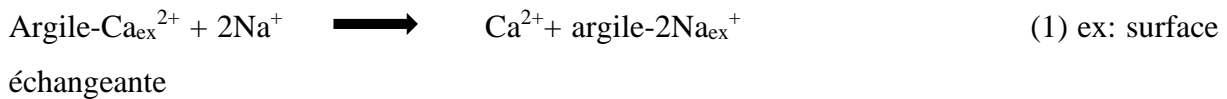
### 1. Diagrammes binaires

Les espèces dissoutes et leurs relations les unes avec les autres peuvent révéler l'origine de solutés et les processus qui ont généré la composition observée des eaux des trois oueds (Sujatha et al., 2003 ; Hussein, 2004 ; Yuce, 2007 ; Gupta et al., 2008 ; Moussa et al., 2008 ; Jalali, 2009 ; Kuldip et al., 2011 ; Nandimandalam, 2011 ; Diaw et al., 2012 ; Aboubaker et al., 2013). La température et le pH de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels, dans notre cas d'étude ces deux paramètres n'ont aucun effet négatif sur les processus de solubilités des éléments chimiques.

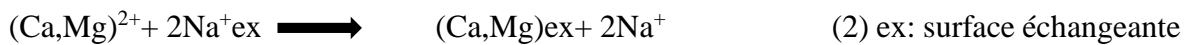
En région bruxelloise, on admet généralement qu'un pH naturel situé entre 6,5 et 8,5 caractérise des eaux où la vie se développe de manière optimale.

Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , relation a été souvent utilisée pour identifier le mécanisme d'acquisition de la salinité. Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  représente une évolution linéaire du sodium en fonction du chlorure (Figure 56) en allant de faibles concentrations vers les fortes concentrations. Cette tendance à l'alignement des points, indique que le sodium et le chlorure ont la même origine correspondant à la dissolution de l'halite. Cependant la plupart des points présentent un léger excès en Na par rapport à la ligne d'égale concentration ( $\text{NaCl}$  1:1, dissolution de la halite).

Le déficit en Na caractérisant certains points au niveau de l'Oued El Abid et l'Oued Srou est attribué aux mécanismes d'échange de bases inverse par lesquels les ions  $\text{Na}^+$  sont absorbés à la surface des minéraux argileux (argiles salifères du Trias) suivant la réaction 1 (Cardona et al., 2004).



On note que les eaux de l'Oued Srou montrent un fort enrichissement en sodium. Ceci peut être dû aux échanges avec le  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (réaction 2) ou bien à la présence d'une autre source de  $\text{Na}^+$ , comme la dissolution des minéraux argileux (Spears et Reeves, 1975, Ogbukagu, 1986).



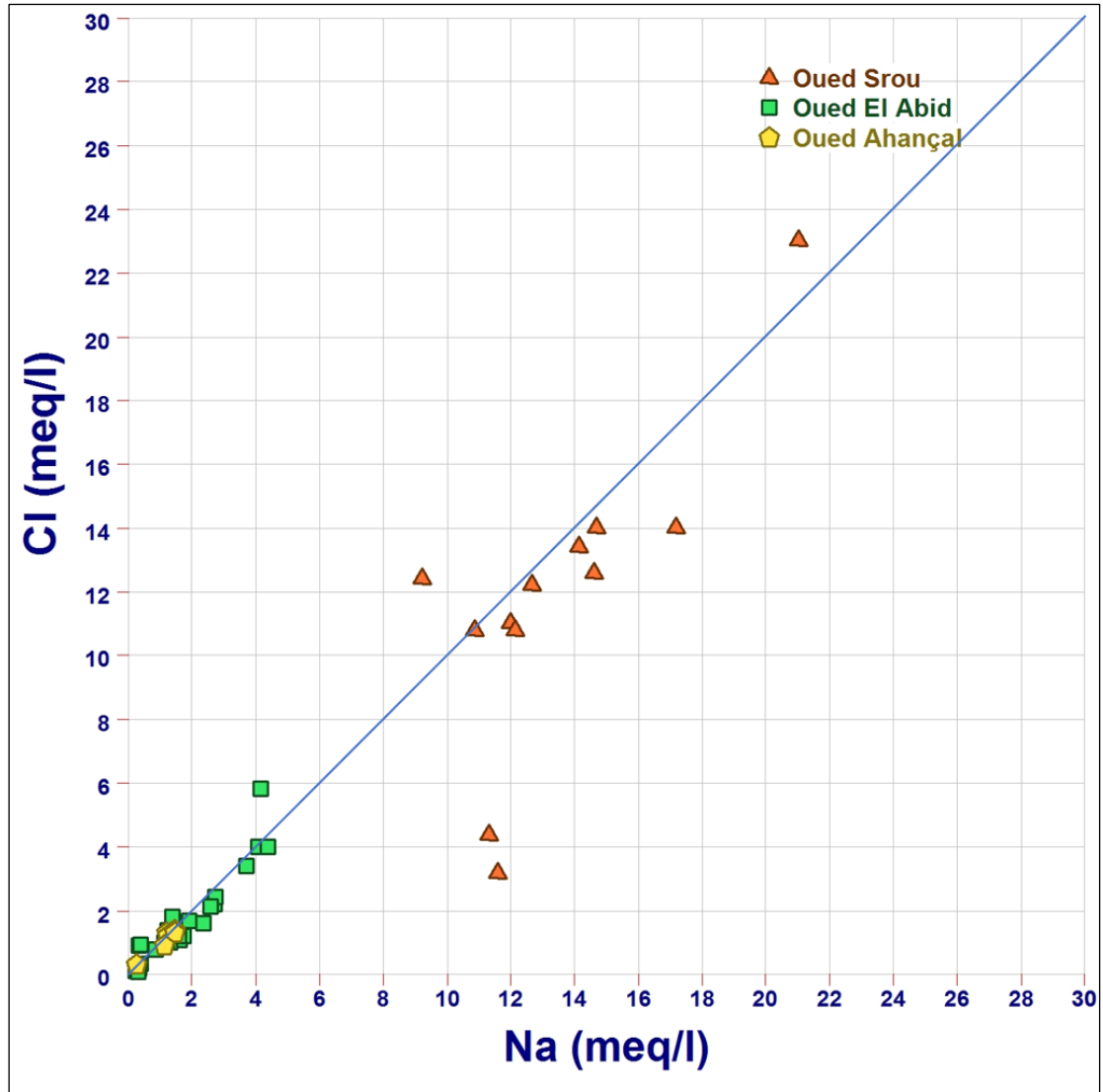


Figure 56: Relation entre les teneurs en Cl et les teneurs en Na<sup>+</sup> des eaux

Les bicarbonates peuvent avoir deux origines qui sont la dissolution de la calcite ou de la dolomite.

La dissolution de la calcite se fait selon la réaction (Domenico et Schwartz, 1998 ; Fetter, 2000; Elgettafi, 2011):

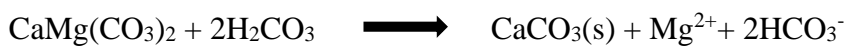


La dissolution de la dolomite se fait selon deux réactions (Edmunds et al, 1982) :

- Une dissolution congruente:



- Une dissolution incongruente:



Sur la figure 57 et figure 58, nous avons représenté les teneurs de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  respectivement par rapport aux teneurs des bicarbonates des eaux des trois oueds.

L'ion  $\text{HCO}_3^-$  est faiblement corrélé avec  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , indiquant que la dissolution des roches carbonatées (calcite, dolomite) n'est pas la seule source pour ces éléments. Les points d'eau à haute concentration en bicarbonates se répartissent en deux cas d'évolution :

- Une répartition entre la droite d'équilibre de la calcite et la droite d'équilibre de la dolomite (SR11, OA1, OA2, OA3, OA4, OA9, OA10, OA11, OA12, OA14, OA15, OA18, OA19, OA21). Le domaine situé entre les deux droites, est un domaine à la fois affecté par la dissolution/précipitation de la dolomite et de la calcite.
- Une deuxième répartition est pratiquement au-dessus de la droite de dissolution/précipitation de la calcite (SR1-SR10, SR12, OH1-OH6, OA5, OA6, OA7, OA8, OA13, OA16, OA17, OA20, OA22, OA23, OA24, OA25, OA 26, OA27), ce qui traduit l'existence d'autres mécanismes géochimiques aboutissant à l'augmentation des bicarbonates.

Les points d'eau de l'oued Srou (Figure 57) montrent aussi une augmentation de la teneur en calcium tandis que la teneur en bicarbonate reste stable. Cela traduit la dominance de la dissolution du gypse par rapport aux carbonates (Elgattafi, 2011)

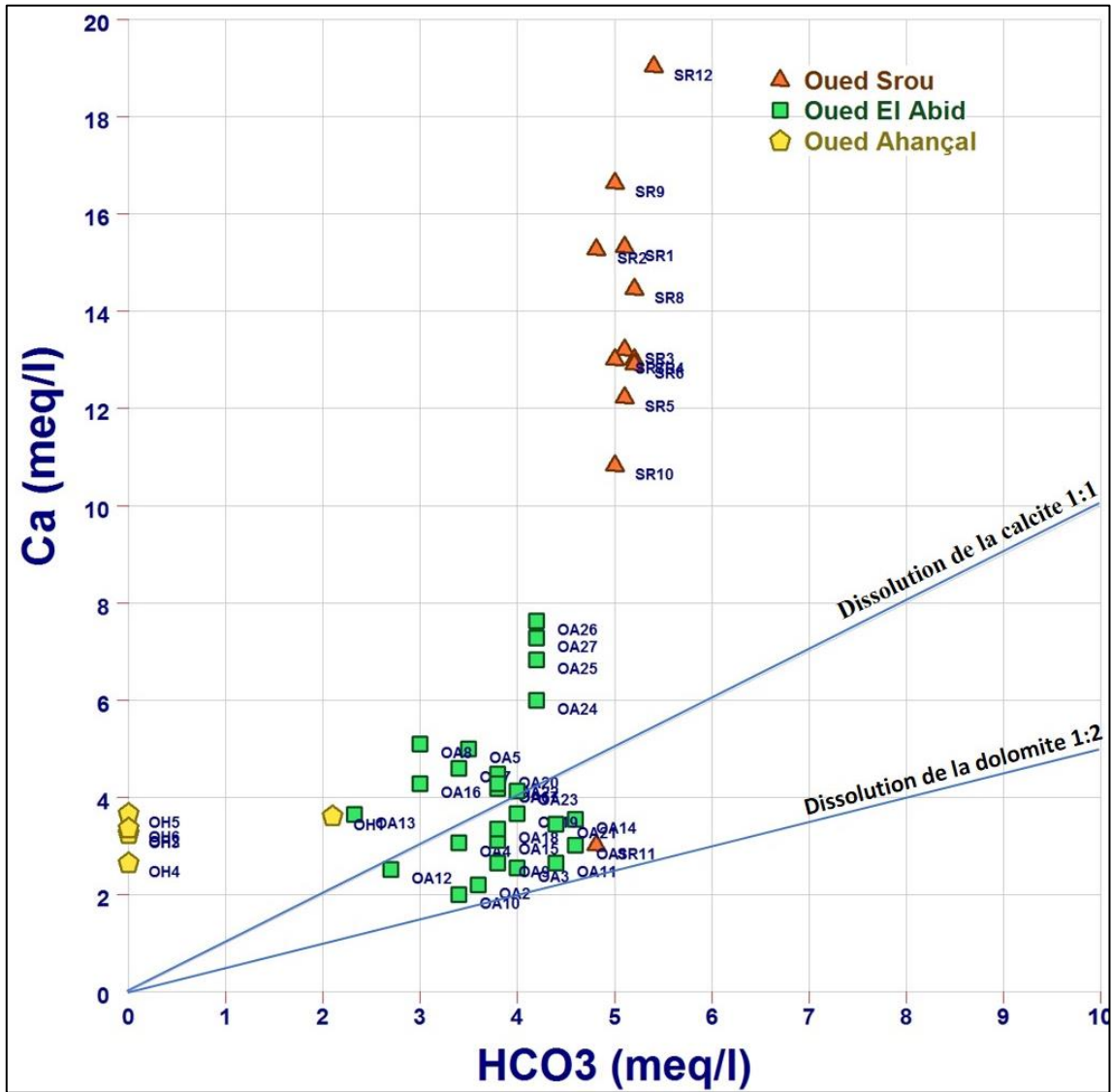


Figure 57: Relation entre les teneurs en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et les teneurs en Ca<sup>2+</sup> des eaux

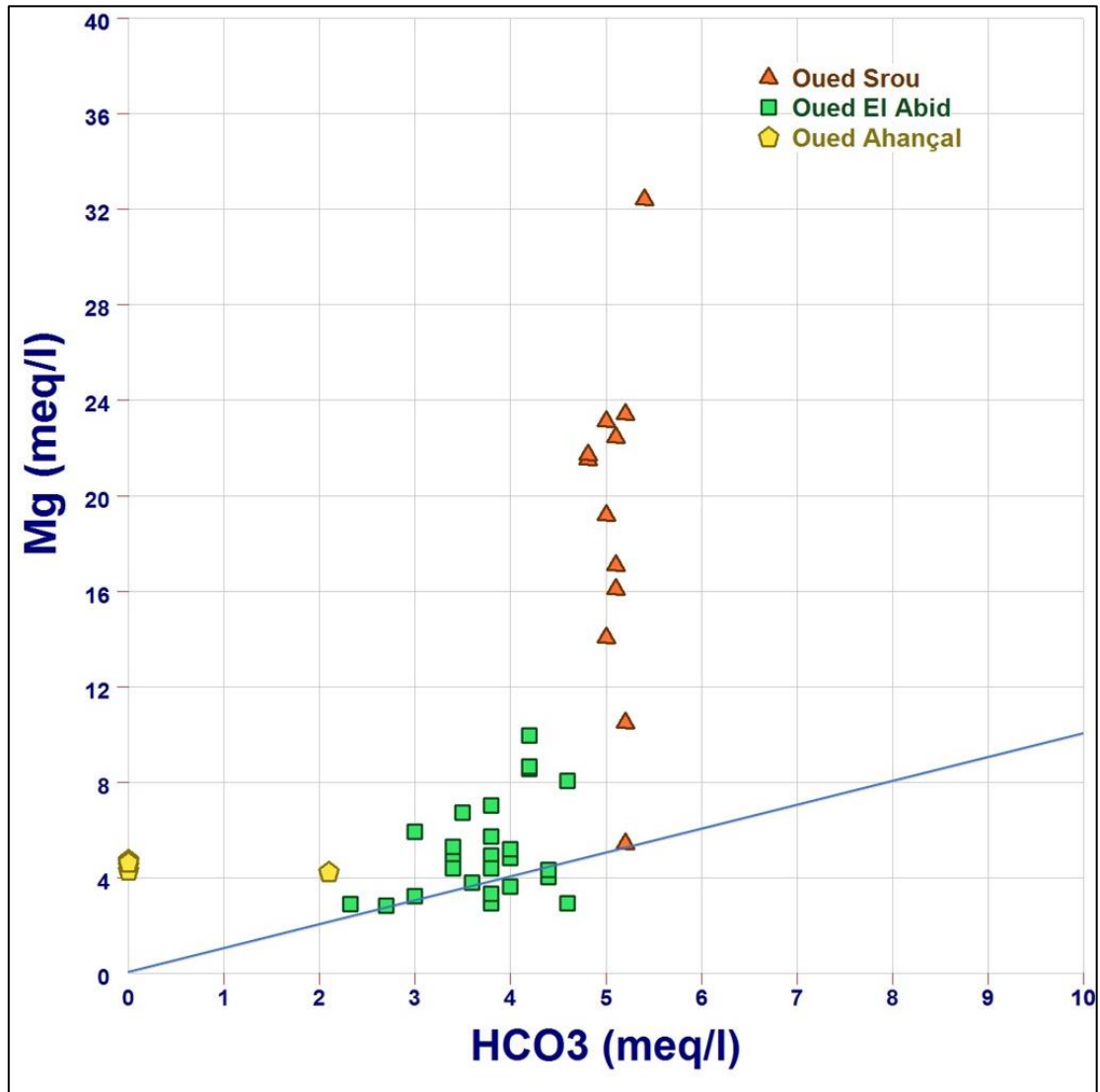


Figure 58: Relation entre les teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  et les teneurs en  $\text{Mg}^{2+}$  des eaux

La corrélation de  $\text{SO}_4^{2-}$  avec  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  ne montre pas un alignement parfait le long de la ligne d'égalité concentration  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  et  $\text{Mg}/\text{SO}_4$  comme celui de  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , mais plutôt, un enrichissement en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (Figures 59 et Figure 60). Cet enrichissement est expliqué par la dissolution des calcaires, et dérivé aussi en partie par la dissolution de gypse et d'un minéral sulfaté-Mg.

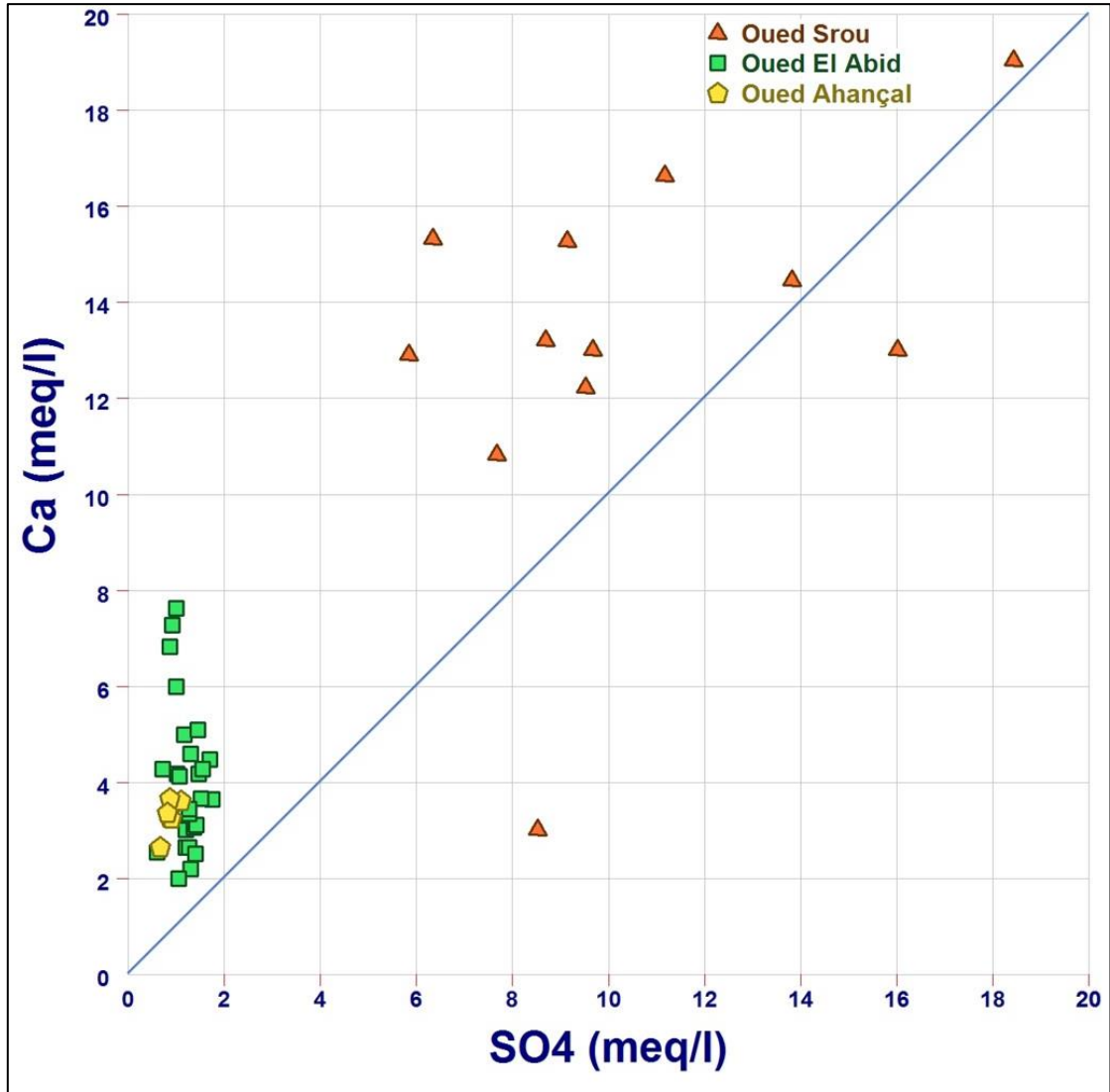


Figure 59: Relation entre les teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  et les teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  des eaux

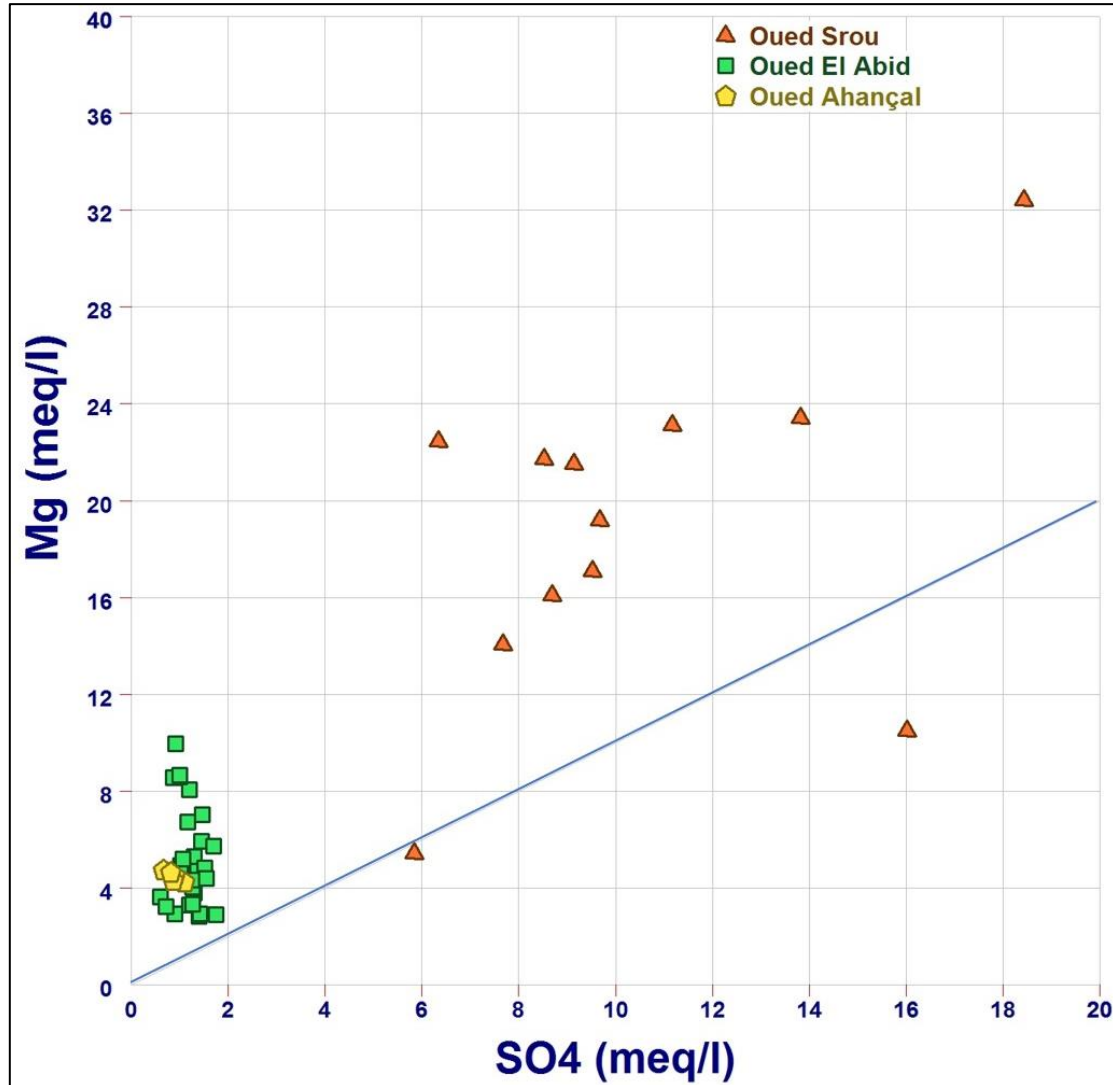


Figure 60: Relation entre les teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  et les teneurs en  $\text{Mg}^{2+}$  des eaux

Les rapports de  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{HCO}_3^{2-}$  (Figure 57),  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{SO}_4^{2-}$  (Figure 59) montrent d'une part, un excès important de  $\text{Ca}^{2+}$  cela indique que l'origine de  $\text{Ca}^{2+}$  n'est pas seulement la dissolution de la calcite et de gypse, et confirme ainsi l'hypothèse d'une contribution de  $\text{Ca}^{2+}$  par échange d'ions suivant la réaction basique (3), telle que :



D'autre part, le rapport  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{Mg}^{2+}$  (Figure 61) montre un excès de  $\text{Mg}^{2+}$ . L'importance de la concentration du magnésium peut s'expliquer par différents facteurs (Elgettafi, 2011) tels que :

- Des échanges  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  lors de la réaction de précipitation ou de recristallisation de la calcite à partir de la calcite magnésienne (Edmunds et al., 1987) ;
- La dissolution incongruente de la dolomite, une réaction équivalente à la précipitation de la calcite ;



- Une dominance du sel sulfate magnésien dans la région

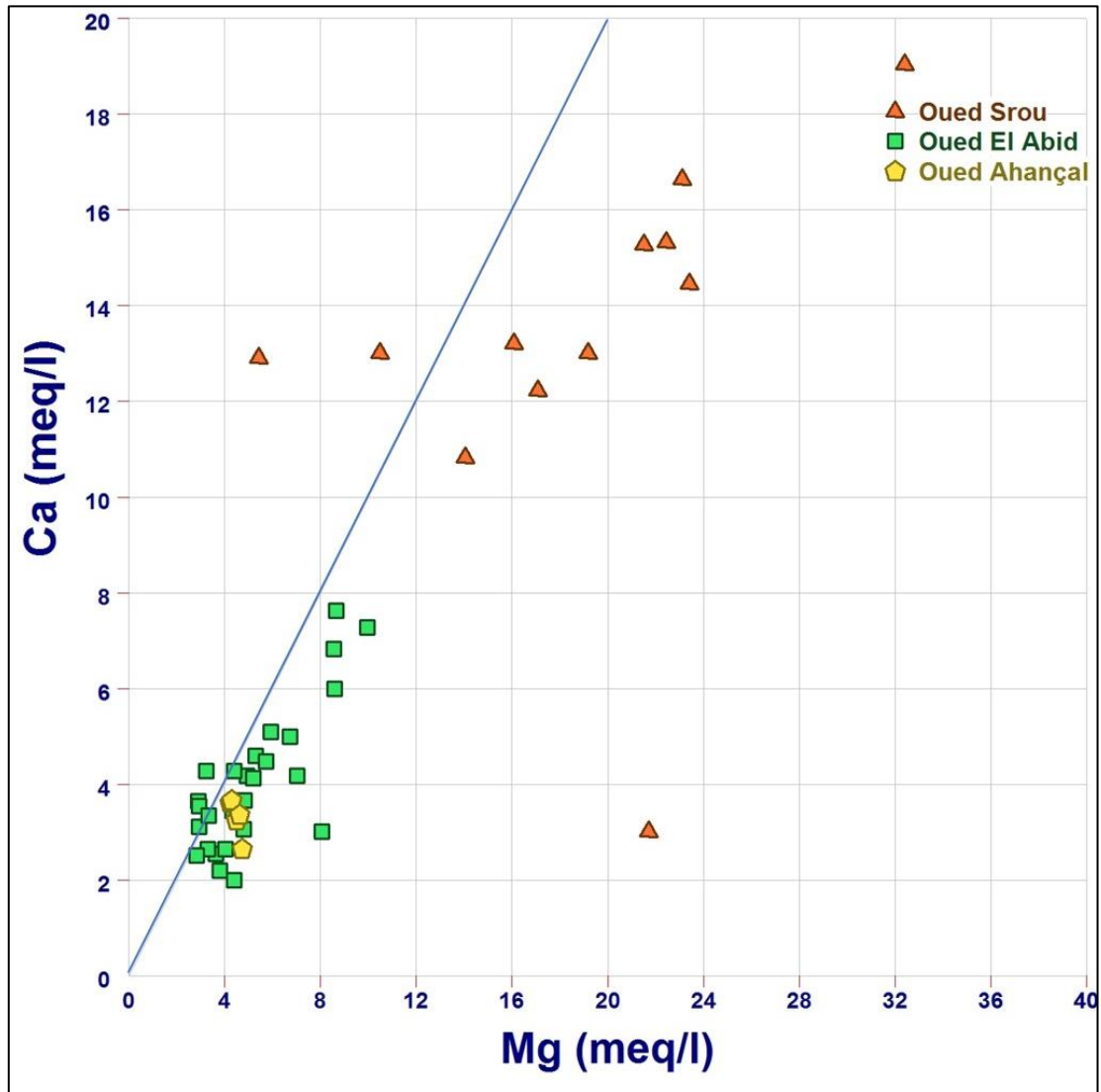


Figure 61: Relation entre les teneurs en  $Mg^{2+}$  et les teneurs en  $Ca^{2+}$  des eaux

## 2. Indices de saturation des minéraux

Les indices de saturation (IS) permettent de savoir ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de se précipiter. La dissolution de ces minéraux se fait de manière congruente ou incongruente. Il a également été évalué pour interpréter l'hydrochimie des eaux, en utilisant le PHREEQC V.2 (Parkhurst et Appelo, 1999), via la version gratuite du logiciel (Simler, 2009).

Les indices de saturation (IS) de minéraux sont calculés en utilisant les concentrations des principaux ions dans le système. L'indice de saturation d'un minéral est obtenu à partir de l'équation (4) (Appelo et Postma, 1993 ; Yidana et al., 2008).

$$IS = \log (PAI / K_T) \quad (4)$$

Où : PAI est produit de l'activité ionique de l'élément chimique dans la solution

$K_T$  est la constante d'équilibre de la réaction considérée à la température T (K)

Lorsque :

$IS < 0$ , l'eau est sous-saturée par rapport au minéral en question.

$IS = 0$ , signifie l'eau est en équilibre avec le minéral,

$IS > 0$  signifie une solution sursaturée par rapport à la matière minérale en question.

Les indices de saturation des minéraux sont très utiles pour l'évaluation de la chimie des eaux. La chimie de l'eau est contrôlée par l'équilibre des phases solides (Appelo et Postma, 1993). PHREEQC a été utilisé pour calculer les indices de saturation des minéraux de l'eau suivants : calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et halite ( $\text{NaCl}$ ) dans les trois oueds objet de l'étude.

#### **Indice de saturation de l'Oued El Abid :**

Les calculs ont montré que l'indice de saturation de la dolomite est compris entre 0,43 et 1,98 alors que les intervalles de la calcite varient 0,2 et 0,87. L'indice de saturation du gypse varie de -2,29 à -1,69 et l'IS de l'halite varie de -9,26 à -6,33. En supposant que l'équilibre se fait dans l'intervalle de -0,5 à +0,5, les résultats montrent que la calcite et la dolomite sont dans un état de sursaturation et que les eaux sont sous-saturées en ce qui concerne le gypse et la halite.

#### **A. Indice de saturation de l'Oued Ahançal :**

L'indice de saturation de la calcite varie de -1,14 à 1,56 et l'indice de saturation de la dolomite est de -2,26 à 3,28. Pour les minéraux évaporitiques le gypse présente un IS qui varie de -2,22 à -0,54 alors que l'halite est de -8,73 à -5,08.

Pour les eaux de l'Oued Ahançal, les minéraux carbonatés montrent des degrés de saturation supérieurs à celle des minéraux évaporitiques. Elles sont sursaturées en calcite et en dolomite et sous-saturé en gypse et halite.

#### **B. Indice de saturation de l'Oued Srou :**

Les calculs ont montré que l'indice de saturation de la dolomite est compris entre 1,88 et 3,28 alors que les intervalles de la calcite varient 0,5 et 1,56. L'indice de saturation du gypse varie de -1,46 à -0,54 et l'IS de l'halite varie de -6,13 à -5,08.

La présence d'une corrélation positive entre ces ions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et la dureté totale traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux de l'Oued Srou et témoigne de la présence d'une source commune de minéralisation qui ne peut être que la dissolution des évaporites telles que la halite et le gypse. Ceci est corroboré par les indices de saturation (Is) calculés qui montrent un état de sous-saturation pour tous les

échantillons vis-à-vis de la halite et du gypse. Le calcul des indices de saturation de la calcite et la dolomite montre que la majorité des eaux prélevées sont saturés vis-à-vis des minéraux carbonatés, la calcite, la dolomite.

Notre cas est similaire au cas mis en évidence par Ben Alaya et al., 2014 où les eaux d'un système aquifère sont caractérisées par une forte salinité alors que les indices de saturation calculés de la halite et du gypse montrent un état de sous saturation pour tous les échantillons.

### **III. Détermination des phases minérales par Diffractions des rayons X**

Concernant cette partie de ce chapitre, nous étudierons les affleurements traversés par les cours d'eau en question, pour faire une étude comparative des minéralisations eau/roches, qui nous permettra de trouver éventuellement les constituants responsables de la minéralisation des eaux des trois oueds. Pour atteindre cet objectif, un échantillonnage systématique a été réalisé. Il s'agit des échantillons de roche représentatifs de l'ensemble des roches des affleurements parcouru par les trois oueds.

Ces échantillons ont été étudiés par diffraction des rayons X (DRX). C'est une technique qui permet de déterminer les phases minérales. Les échantillons sont examinés sous forme de poudre très fine. Cette méthode a mis en évidence la présence simultanée de phases primaires et de phases secondaires. Les affleurements rencontrés sont : les calcaires, les argilites, les grés, les dolomites, les marnes et les basaltes. L'analyse des diffractogrammes obtenus a été réalisée à l'aide du logiciel X'Pert High Score (voir annexe) et a donné les résultats suivant (Figures 62, 63, 64, 65 et 66) :

#### **1. Les carbonates**

Les phases minérales présentes dans les carbonates sont composées des minéraux suivants : Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), quartz ( $\text{SiO}_2$ ) et oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

#### **2. Les Argiles**

Pour les argiles on trouve le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

#### **3. Les grés rouges**

La composition minéralogique est la suivante : quartz ( $\text{SiO}_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

#### **4. Les marnes**

Pour les marnes on trouve le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

## 5. Les basaltes

Les phases minérales présentes dans les carbonates sont composées des minéraux suivants : calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), quartz ( $\text{SiO}_2$ ), oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) et l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

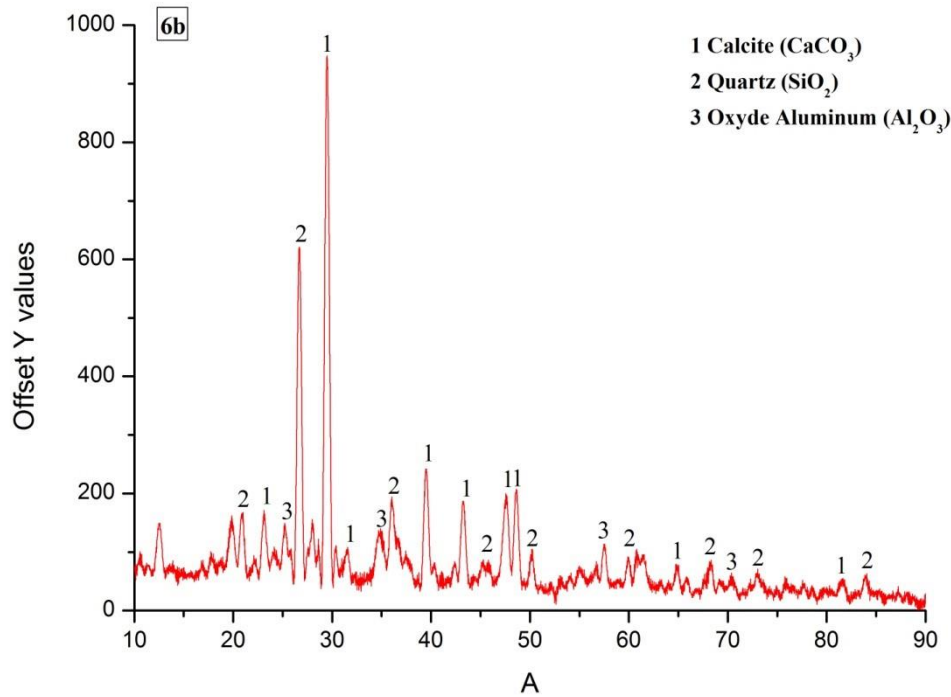


Figure 62: Spectres de diffraction de rayons X d'une roche carbonatée du bassin versant Oued Ahançal

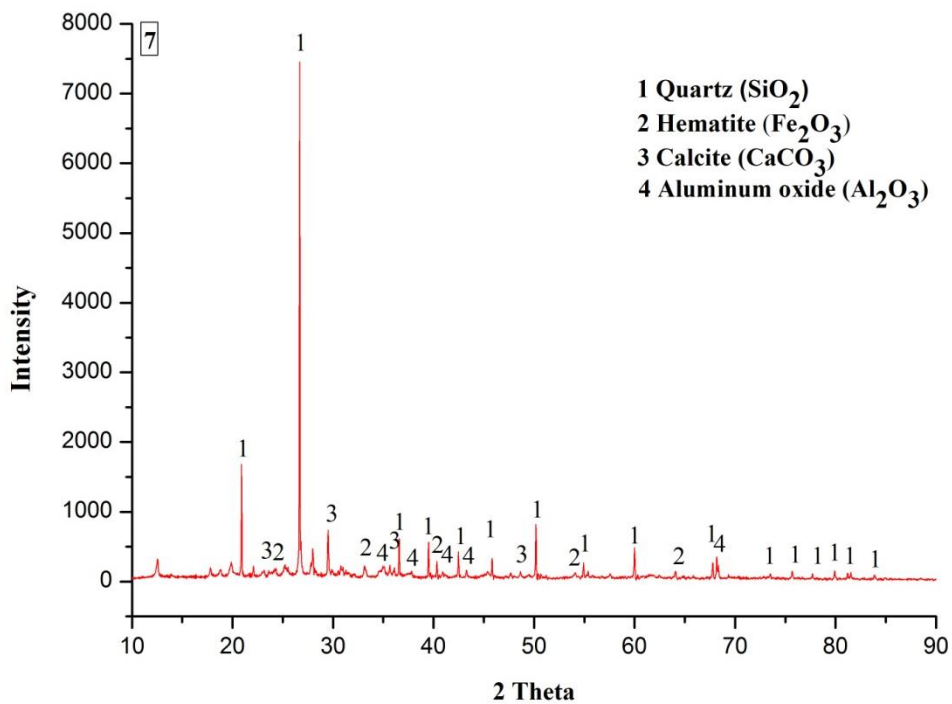


Figure 63: Spectres de diffraction de rayons X d'une argile du bassin versant Oued Srou

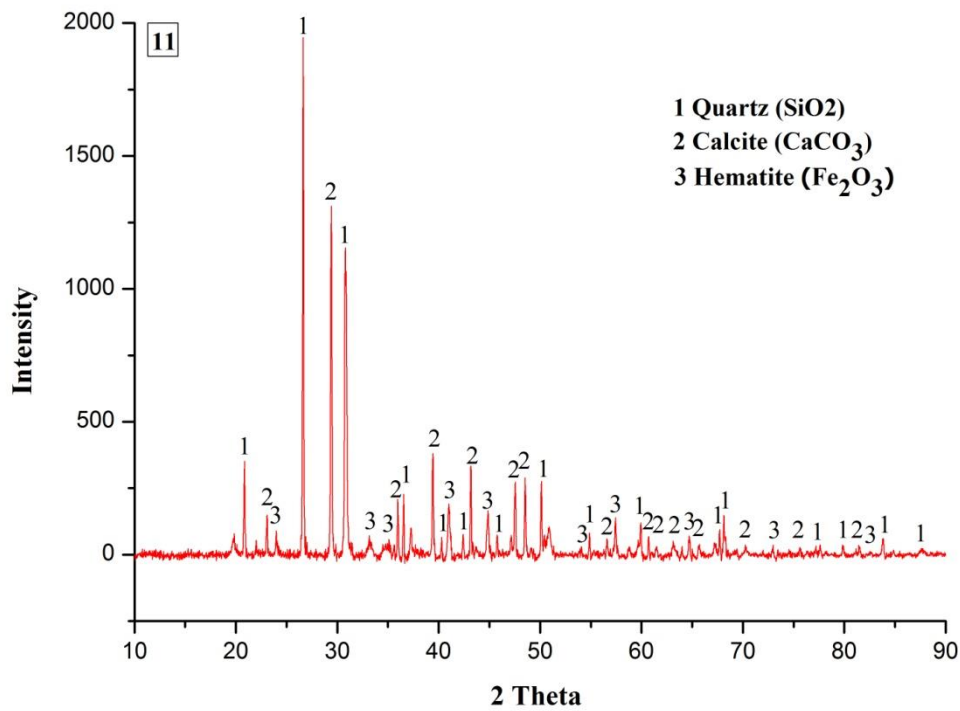


Figure 64: Spectres de diffraction de rayons X d'un grès rouge du bassin versant Oued El Abid

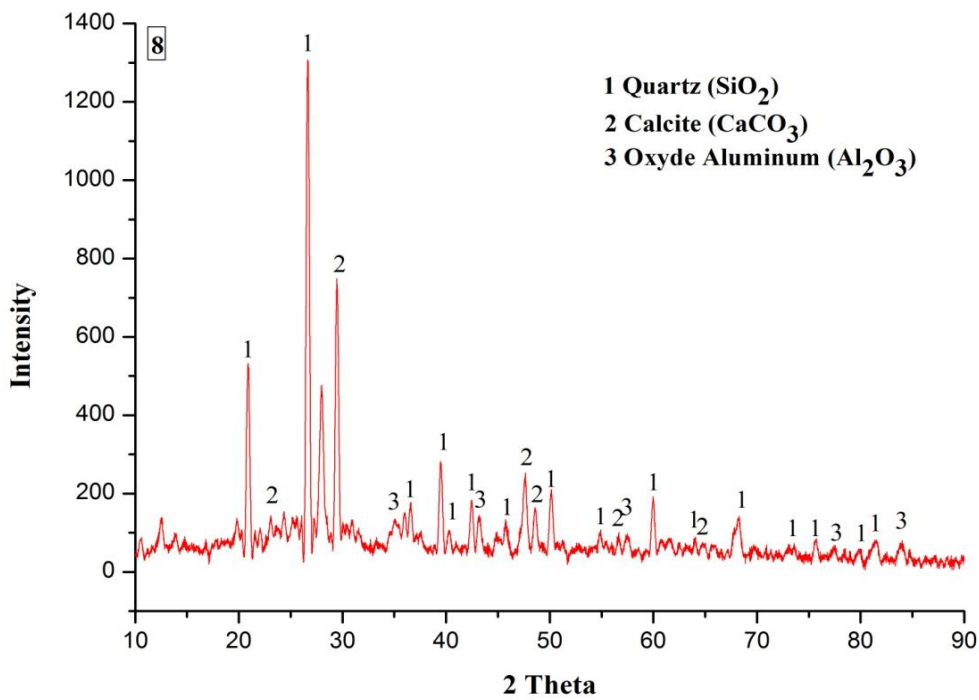
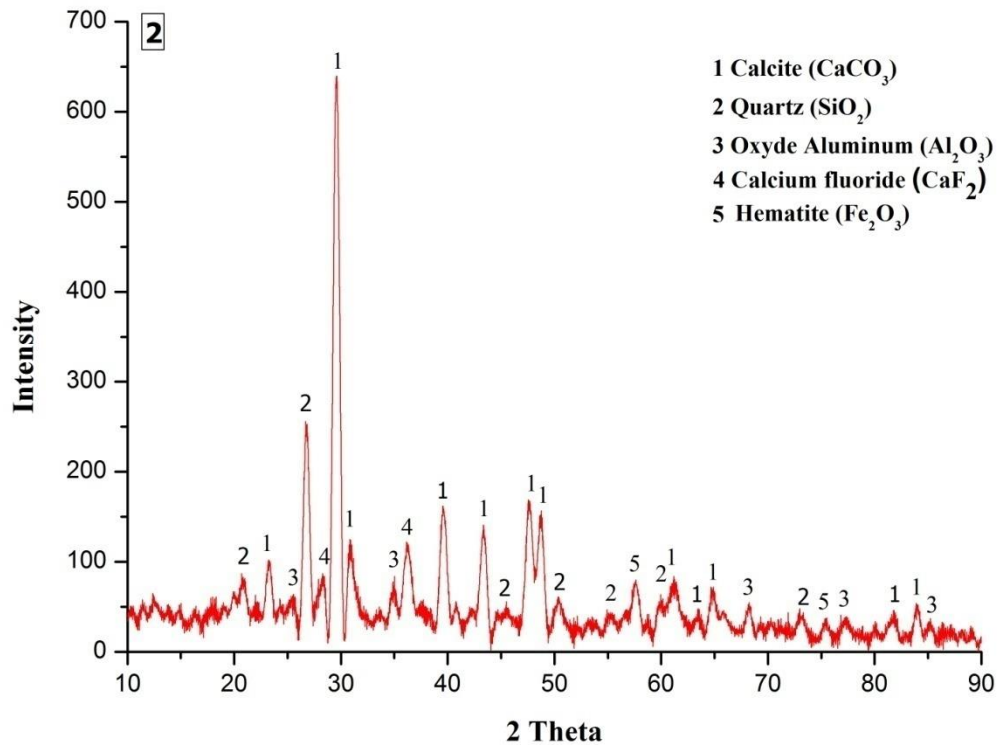


Figure 65: Spectres de diffraction de rayons X d'une roche de marnes du bassin versant Oued El Abid



**Figure 66: Spectres de diffraction de rayons X d'un basalte du bassin versant Oued Srou**

L'analyse par diffraction des rayons X montre que les spectres d'analyse caractérisent la nature des minéraux cristallisés. Nous constatons que tous les spectres obtenus présentent une série de pics de diffraction bien définis qui correspondent à des phases solides majoritairement bien cristallisées, et aussi des bruits de fond dont la forme indique la présence de phases mal cristallisées. Les phases minérales révélées se constituent principalement de la calcite et du quartz aux quel s'ajoute l'oxyde de fer, l'oxyde d'aluminium et la fluorite du calcium. Ces roches sont majoritairement acides car riches en silice.

#### **IV. Conclusion**

L'étude hydrochimique des eaux été effectuée en utilisant différentes méthodes (de Piper, diagramme binaire, indices de saturation). Cette étude a montré la présence des faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien et bicarbonaté calcique et magnésien. La minéralisation des eaux des trois oueds est due au processus des dissolutions des formations carbonatées et évaporitiques. L'échange d'ions affecte de manière significative la composition chimique des eaux des Oueds objet de l'étude.

Afin d'approuver l'origine de cette minéralisation on avait besoin d'une technique analytique qui est la technique de la diffraction des rayons X effectuée sur les poudres des

roches des affleurements parcourus par les eaux des trois Oueds. Cette analyse a mis en évidence l'existence des phases minérale qui contribuent à la minéralisation de ces eaux.

## **CHAPITRE IX : EVALUATION DE LA CONTAMINATION METALLIQUE DES SEDIMENTS**

### **I. Introduction**

Le sédiment est considéré comme un outil d'interprétation et de lecture efficace en termes de management environnemental. En effet, il constitue un compartiment intégrateur des contaminations (Castelle et al., 2007, Irabien et al., 2008) qui vient en complément des résultats obtenus par les eaux. De façon générale, le sédiment agit à la fois comme un compartiment de stockage et/ou de source de contamination métallique en fonction des conditions du milieu aquatique (Audry et al., 2010, Yang et al., 1998) à travers les deux phénomènes de piégeage et de mise en solution de particules contaminées par les éléments métalliques (voir chapitre III). L'étude de la qualité des sédiments des milieux aquatiques a fait l'objet de plusieurs travaux à l'échelle internationale (Loizeau et al., 2018 ; Romic et Romic, 2003) et locale (Belabed et al., 2011 ; Benbouih et al., 2005).

Ce chapitre est consacré à l'étude de la pollution métallique des sédiments. Tous les échantillons prélevés étaient en contact direct avec les échantillons liquides étudiés dans les chapitres précédents.

Le début de ce chapitre porte sur l'étude des variations spatiales des éléments traces métalliques (ETM) dans les sédiments des bassins versant El Abid, Srou et Ahançal. Dans un deuxième temps, des calculs d'indices et de facteurs d'enrichissement seront présentés pour déterminer le degré de contamination des sédiments étudiés. La dernière partie de ce chapitre sera dédiée à la comparaison des résultats obtenus dans ce travail et des études antérieures à l'échelle internationale et locale.

Les analyses par Fluorescence X (FX) s'est intéressé aux éléments traces métalliques (ETM) suivants : Al, Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cr et Ni. La quantification de ces éléments a été réalisée sur la fraction inférieure à 2 mm, préparée selon le protocole décrit dans le chapitre IV. Cette fraction a été recommandée en raison de son affinité et sa capacité à retenir les plus grandes concentrations en ETM (Lesven, 2008).

Par la suite, le degré de contamination métallique des sédiments sera évalué par rapport le fond géochimique naturel défini par la moyenne de la croûte continentale supérieure (UCC : Upper Continental Crust ; Wedepohl, 1995), en absence de réglementation sur les sédiments au Maroc (Hayzoun, 2014).



## **II. Variations spatiales des éléments traces métalliques dans les sédiments**

Le tableau 1 de l'annexe 4 présente les résultats des variations spatiales des éléments traces métalliques (Al, Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cr et Ni) dans les sédiments, en fonction des stations d'échantillonnage.

Les concentrations de Fer (Fe) obtenues s'échelonnent entre 5609,57 mg/kg et 16857,93mg/kg. Le fer montre des valeurs très basses qui ne dépassent pas la moyenne d'UCC fixée à 30900 mg/kg.

Les teneurs d'aluminium (Al) oscillent entre 10841,97mg/kg et 21457,17mg/kg. Ces valeurs sont très faibles et conformes à la moyenne recommandée d'UCC (77400 mg/kg). L'abondance de cet élément dans les sédiments est liée d'une part à la composition de la roche mère (aluminosilicates) (Hamzeh, 2012) et d'autre part aux rejets des activités anthropiques.

Le Mn montre une valeur maximale de 196,26 mg/kg. Cette valeur reste au-dessous de la moyenne d'UCC (530mg/kg).

Pour le plomb (Pb), les concentrations varient entre 4,3 mg/kg et 13,62 mg/kg. Les valeurs du Pb ne dépassent pas la moyenne d'UCC (17mg/kg). Cet élément se présente essentiellement sous la forme particulaire (Thouvenin et al., 2004), son origine est majoritairement anthropique, provenant des activités urbaines ainsi qu'industrielles (câbles, batteries d'automobiles...etc), il est aussi abondamment utilisé sous forme d'oxydes (pigment, cristallerie, PVC).

Le Zinc (Zn) enregistre des valeurs qui s'échelonnent entre 5,32 mg/kg et 19,86 mg/kg et répond à la moyenne d'UCC fixé à 52 mg/kg. Les sources de zinc (Zn) sont multiples, parmi celles-ci on peut citer les activités industrielles, les rejets domestiques et même les activités d'élevage (Sarva Mangala et al., 2010).

Le cuivre (Cu) enregistre des valeurs qui varie entre 0,12 mg/kg et 6,16 mg/kg et restent au-dessous de la moyenne de UCC fixé à 14,3mg/kg. Cet élément provient principalement des activités agricoles (notamment dû à l'utilisation de sulfate de cuivre), des rejets d'eaux usées urbaines ainsi que de l'érosion des sols (Chiffolleau et al., 2001 ; Bisson et al., 2005).

Le chrome (Cr) présente des valeurs qui varient entre 2,34 mg/kg et 16,03 mg/kg et reste inférieur à la moyenne de l'UCC (35mg/kg).

La présence du chrome dans les sédiments pourrait être d'origine naturelle, à travers l'altération des sols, ou d'origine anthropique via les rejets de l'industrie chimique et des tanneries artisanales domestiques (Hamzeh, 2012). De plus, le chrome est généralement présent

*Partie III : Chapitre IX : Evaluation de la contamination métallique des sédiments*  
 sous forme particulaire, cela explique ses faibles concentrations trouvées dans la phase dissoute (Belhadj, 2012).

Les valeurs des concentrations de nickel (Ni) sont très faibles le long des trois Oueds et inférieur à la moyenne de UCC (18,6mg/kg).

Les sédiments d'Oued Srou, Oud El Abid et Oued Ahançal présentent des concentrations métalliques faibles qui répondent à la moyenne adoptée d'UCC et par la suite ces sédiments sont donc indemnes de toute pollution métallique.

### **III. Evaluation de l'intensité de la contamination métallique.**

Afin d'évaluer l'état de contamination métallique des sédiments étudiés, des calculs de différents facteurs et indices définis dans la bibliographie ont été réalisés.

#### **1. Facteur d'Enrichissement (EF)**

D'après l'étude réalisée par Hernandez et al 2003, le facteur d'enrichissement (EF) est défini comme l'abondance relative d'un élément chimique dans un sol par rapport à celle retrouvée dans le substrat rocheux. Dans le présent travail, EF est déterminé par comparaison des concentrations élémentaires avec celles de la croûte continentale supérieure (UCC) (Wedepohl, 1995) (Tableau 20). Nous avons choisi l'aluminium comme élément de référence car il est considéré comme un marqueur de la fraction argileuse, fraction pour laquelle les métaux traces (Me) ont une forte affinité (Hamzeh, 2012). Aussi, l'aluminium provient principalement de processus naturels ; un enrichissement anthropique est peu probable pour cet élément (Voravit, 1997 ; Charlesworth et Service, 2000). Cet élément a été utilisé comme référence dans de nombreuses études similaires à la nôtre (Sarva Mangala et al., 2010 ; Huang et Lin, 2003 ; Strady et al., 2017).

**Tableau 20: Concentrations des éléments métalliques dans la croûte continentale supérieure.**

| Elements | Al           | Fe           | Mn         | Pb        | Zn        | Cu          | Cr        | Ni          |
|----------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| UCC      | <b>77400</b> | <b>30900</b> | <b>530</b> | <b>17</b> | <b>52</b> | <b>14.3</b> | <b>35</b> | <b>18.6</b> |

Les facteurs d'enrichissement ont été calculés selon la formule suivante :

$$EF = \frac{(Me / Al)_{\text{sédiment}}}{(Me / Al)_{\text{référence}}}$$

D'après Sutherland, (2000), les facteurs d'enrichissement sont classés en 5 niveaux de contamination (tableau 21) :

**Tableau 21: Echelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement facteur (FE), d'après Sutherland (2000)**

| Classe | Valeur         | Intensité de pollution                          |
|--------|----------------|---|
| 1      | $FE \leq 2$    | Enrichissement anthropique inexistant ou faible |
| 2      | $2 < FE < 5$   | Enrichissement modéré                           |
| 3      | $5 < FE < 20$  | Enrichissement significatif                     |
| 4      | $20 < FE < 40$ | Enrichissement très fort                        |
| 5      | $FE > 40$      | Enrichissement extrême                          |

Les résultats des facteurs d'enrichissement calculés (voir Tableau 2 Annexe 4) au niveau de chaque site de prélèvement montrent que pour le Fe, Mn, et Pb les valeurs varient entre 0,69 mg/kg et 3,08 mg/kg, 0,75 mg/kg et 2,15 mg/kg et 1,22 mg/kg et 5,23 mg/kg respectivement indiquant ainsi un enrichissement modéré en Fe, Mn, et Pb. Pour le Fer (Fe) et le Plomb (Pb) le facteur d'enrichissement sont compris entre 2 et 5 ( $2 < FE < 5$ ) au niveau de plusieurs stations d'Oued Srou et Oued El Abid. D'autre part, toutes ces stations présentent des valeurs du facteur d'enrichissement en Mn inférieures à 2 qui montreraient son origine naturelle (altération des sols).

En ce qui concerne le Zn, le Cu, le Cr et le Ni les concentrations s'échelonnent entre 0,48-1,96 mg/kg, 0,0596-1,95 mg/kg, 0,2796-1,9696 mg/kg et 0,10-1,92 mg/kg respectivement ce qui traduit par un enrichissement anthropique inexistant ou faible.

Oued Ahançal présente des valeurs inférieures à 2 pour tous les éléments traces métalliques et montre donc une bonne qualité par rapport à Oued Srou et Oued El Abid.

## 2. Facteur de contamination (CF)

Le facteur de contamination ou CF est l'un des facteurs permettant d'évaluer la contamination d'un métal analysé dans un sédiment. Il est exprimé par le ratio entre la teneur du métal dans le sédiment ( $C_s$ ) et la teneur du même métal dans le fond géochimique du bassin versant de la zone d'étude concernée ( $C_b$ ) (Pekey et al., 2004 ; Raj et Jayaprakash, 2008). Dans notre cas, les valeurs moyennes de la croûte continentale (Wedepohl, 1995) (Tableau 20) ont dû être utilisées comme référence en raison du manque de données de fond géochimique de référence dans la zone géographique étudiée.

Le CF est calculé selon la formule suivante :

$$CF = C_s / C_b$$

Ce facteur est associé à une échelle de pollution de quatre classes et présentée dans le tableau 22 :

**Tableau 22: Echelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs du facteur de contamination (FC), d'après Hakanson (1980)**

| Classe | Valeur       | Intensité de pollution  |
|--------|--------------|---|
| 1      | $FC < 1$     | pas de contamination issue des apports naturels ou anthropiques |
| 2      | $1 < FC < 3$ | le sédiment est modérément contaminé                            |
| 3      | $3 < FC < 6$ | la contamination est considérable                               |
| 4      | $FC > 6$     | très forte contamination  |

Pratiquement aucune contamination issue des apports naturels ou anthropiques ( $CF < 1$ ) n'a été relevée pour toutes les stations des trois Oueds Objet de l'étude (voir Tableau 3 Annexe 4).

### 3. Indice de géo-accumulation (Igeo)

Un autre facteur d'évaluation de la contamination métallique des sédiments peut être calculé, il s'agit de l'indice de géo-accumulation (Igeo). L'Igeo a été introduit par Muller (1969) dans le but de déterminer le degré de contamination métallique dans les sédiments. Il est calculé selon l'équation suivante :

$$I_{geo} = \text{Log}_2 (C_n / (1,5 * B_n))$$

Où :

$C_n$  est la concentration mesurée d'un métal (n) dans le sédiment ;

$B_n$  est la concentration du métal (n) dans le fond géochimique du bassin versant ;

1,5 est le facteur de correction de matrice du fond géochimique lié à la lithologie.

Dans notre cas, nous avons utilisé comme référence la composition élémentaire de la croûte continentale (Wedepohl, 1995) comme expliqué précédemment pour les calculs de FE et CF. D'après le travail mené par Muller (1969) les sédiments peuvent être classés en 6 groupes selon la valeur de l'indice de géo-accumulation (Igeo) (Tableau 23).

**Tableau 23: Echelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs de l'indice de géo-accumulation (Igeo) d'après Muller (1969)**

| Classe | Valeur            | Intensité de pollution         |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| 1      | $I_{geo} \leq 0$  | non-pollué                     |
| 2      | $0 < I_{geo} < 1$ | non-pollué à modérément pollué |
| 3      | $1 < I_{geo} < 2$ | modérément pollué              |
| 4      | $2 < I_{geo} < 3$ | modérément à fortement pollué  |
| 5      | $3 < I_{geo} < 4$ | fortement pollué               |
| 6      | $4 < I_{geo} < 5$ | fortement à extrêmement pollué |
| 7      | $I_{geo} > 5$     | extrêmement pollué             |

Les valeurs obtenues de l'indice de géo-accumulation sont inférieures à 0 ce qui indique que ces sédiments sont indemnes de toute pollution métallique (voir Tableau 4 Annexe 4)

#### **IV. Etudes comparatives**

Le tableau 24 présente une étude comparative entre les concentrations métalliques mesurées dans les sédiments de trois Oueds Objet de cette étude avec celles mesurées dans les sédiments superficiels prélevés au niveau d'Oued Moulouya (Iavazzo et al., 2012) et Oued Sbou (Hayzoun et al., 2014), Oued Fes (Hayzoun et al., 2014) et Oued Day (Barakat et al., 2012). Les teneurs des éléments métalliques (Cu, Zn, Fe, Cr, Al et Pb, Ni, et Mn) obtenus classent toujours les trois Oued comme un milieu aquatique non contaminé. Cette comparaison a montré que les concentrations de la présente étude sont inférieures aux concentrations des autres Oueds du Maroc ainsi que les concentrations de la croûte terrestre (Wedepohl, 1995).

**Tableau 24: Etude comparative entre les concentrations métalliques des sédiments de la présente étude et quelques rivières du Maroc et la croûte continentale supérieure (UCC).**

|                       | Rivière                       | Cu ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) | Zn ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) | Cr ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) | Ni ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) | Pb ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) | Al ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) | Fe ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) | Mn ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| lavazzo et al. (2012) | Moulouya                      | 13,0-368,0                  | 46,0-182,0                  | 5,0-60,0                    | -                           | 1,3-204,0                   | 10,0-51,3                 | 4,4-28,9                  | 0,2-0,4                   |
| Hayzoun et al. (2014) | Sbou                          | 171                         | 236                         | 115                         | 46                          | 100                         | -                         | -                         | -                         |
| Hayzoun et al. (2014) | Fes                           | 244                         | 365                         | 881                         | 84                          | 184                         | -                         | -                         | -                         |
| Barakat et al. (2012) | Day                           | 740,8                       | 145,5                       | 311,7                       | -                           | 135,3                       | -                         | -                         | -                         |
| présente étude        | Oued El Abid,                 | 0,12-6,16                   | 10,02-19,86                 | 6,88-13,79                  | 0,43-7,66                   | 5,41-13,62                  | 11,81-20,12               | 5,61-16,86                | 0,10-0,17                 |
| présente étude        | Oued Srou                     | 3,3-5,47                    | 5,32-18,1                   | 7,27-16,03                  | 1,52-5,02                   | 4,3-12,47                   | 10,84-21,45               | 5,70-15,07                | 0,10-0,2                  |
| présente étude        | Oued Ahançal                  | 3,71-5,75                   | 10,31-14,58                 | 2,34-9,26                   | 0,59-6,7                    | 4,65-6,89                   | 14,83-19,15               | 7-13,39                   | 0,11-0,19                 |
| Wedepohl, 1995        | Croute Continentate superieur | 14,3                        | 52                          | 35                          | 18,6                        | 17                          | 77,4                      | 30,9                      | 0,53                      |

## V. Conclusion

Ce chapitre a permis de déterminer les niveaux de contamination métallique sédimentaire dans les trois sites d'étude. L'examen de la distribution des éléments traces métalliques Fe, Al Mn, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn dans les sédiments de l'Oued Srou, Oued El Abid et Oued Ahançal montre que les concentrations ne dépassent pas les valeurs recommandées de la croûte terrestre (UCC).

L'intensité de la pollution des sédiments a été évaluée par le calcul du facteur d'enrichissement, facteur de contamination et de l'indice de géo-accumulation. Ils ont été déterminés à partir de la valeur moyenne de la croûte continentale. Des valeurs d'enrichissement obtenues pour Fe, Mn, et Pb montrent un enrichissement modéré par ces métaux au niveau de quelques stations d'Oued El Abid et Oued Srou.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'évaluation de la qualité environnementale de trois bassins appartenant au bassin versant d'Oum Er Rbia, il constitue un premier état des lieux de ce bassin dans sa partie moyenne et haute Oum Er Rbia. Le choix de notre zone d'étude a été porté sur l'Oued El Abid le plus grand affluent de l'Oued Oum Er Rbia et son affluent Oued Ahançal, ses eaux sont notamment utilisées pour la potabilisation et pour l'irrigation, aussi Oued Srou fait partie de l'étude et constitue un important affluent d'Oued Oum Er Rbia dans la partie haute Oum Er Rbia.

Ces dernières décennies, cette partie du bassin versant Oum Er Rbia commence à subir des pressions anthropiques dues à la croissance démographique importante, au développement de quelques activités industrielles ainsi qu'aux activités agricoles. Ces activités produisent des volumes d'eaux usées non traitées rejetées directement dans le milieu naturel, ce qui peut menacer la qualité de l'eau, l'homme et son environnement.

Cette étude est une première étude complète des milieux aquatiques en intégrant trois composantes ; l'eau, le sédiment et la nature des affleurements traversés par les trois rivières.

Ce travail nous a permis :

- De caractériser spatialement les eaux des trois Oueds du point de vue caractéristique physico-chimique et éléments traces métalliques ;
- D'évaluer l'impact de la géologie des bassins versant et l'impact des facteurs anthropique sur la qualité des eaux et des sédiments des trois Oueds.

Les eaux d'Oued El Abid, ont révélé que la tendance générale des teneurs des paramètres analysés montre une détérioration significative de la qualité au niveau de la partie qui commence de la ville de Bzou jusqu'au point de confluence avec l'oued Oum Er Rbia. Des concentrations élevées en TH, Ca, Mg et OD sont enregistrées en aval dépassant légèrement les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) adoptées dans ce travail. Les teneurs en ETM varient généralement d'une station à l'autre et d'un bassin à l'autre. Une potentielle pollution métallique a également été détectée dans quelques stations par les éléments traces métalliques suivants Cd, Fe et Pb.

Les eaux de l'Oued Ahançal ont montré que tous les paramètres répondent aux normes adoptées dans ce travail. Quant aux éléments traces métallique les analyses ont prouvé que ces eaux sont indemnes de toute contamination qualifiant ces eaux comme non polluées par ces éléments.

Les eaux de l'Oued Srou présentent une qualité potentiellement dégradée du fait que la majorité des éléments chimiques analysés à savoir la conductivité électrique, la dureté totale, les chlorures, le calcium, le sodium, le magnésium, les sulfates dépassent les normes marocaines et celles fixées par l'organisation mondiale de la santé (OMS). Le Fer (Fe), le cadmium (Cd) et le Plomb (Pb) montrent des valeurs élevées excédant la norme recommandée. Aucun signe lié à la pollution organique (nitrites, nitrates et ammonium) n'a été détecté, mais en revanche, une signature naturelle est la cause de cette détérioration.

Ces constatations ont été confirmées par un traitement statistique des paramètres analysés dans l'eau, ce traitement nous a permis de caractériser l'origine supposée de la pollution. Au niveau d'Oued El Abid elle est due, en premier lieu, au processus naturel qui résulte du contexte géologique, en relation avec la diversité lithologique du bassin et en deuxième lieu à l'action anthropique qui se manifestent par le rejet des eaux usées et les déchets de l'élevage riche en potassium. Pour l'Oued Srou la pollution est liée seulement à une contamination naturelle liée à la lithologie du bassin. En ce qui concerne Oued Ahançal les eaux présentent une bonne à excellente qualité.

L'aptitude des eaux à l'irrigation a été envisagée par l'étude de plusieurs indices tels que le SAR, la salinité, KI et MH. Au niveau d'Oued El Abid et Oued Ahançal ces indices ont prouvé que l'eau est de bonne qualité et utilisable sans danger pour l'irrigation par contre au l'Oued Srou la salinité élevée de ces eaux peuvent causer des effets négatifs et des dommages irréversibles au sol et à la plante objet d'irrigation.

Comme pour les eaux les teneurs en éléments ETM varient généralement d'une station à l'autre et d'un bassin à l'autre. Par ailleurs sur le plan spatial, on constate que les teneurs de ces éléments sont en dessous de la valeur moyenne de la croûte continentale supérieure (UCC) utilisées comme référence en raison du manque de données de fond géochimique de référence dans la zone géographique étudiée. Les variations spatiales des éléments traces métalliques dans les sédiments d'Oued El Abid, Oued Ahançal et Oued Srou présentent des concentrations métalliques faibles et qui répondent à la moyenne adoptée d'UCC et donc ces sédiments sont indemnes de toute pollution métallique. L'étude de la contamination métallique des sédiments a été évaluée par le calcul de facteurs et d'indices. Le calcul des facteurs d'enrichissement (FE normalisé avec Al) indique un enrichissement modéré en Fe, Mn, et Pb pour Oued El Abid et Oued Srou. Oued Ahançal présente des valeurs inférieures à 2 pour tous les éléments traces métalliques et montre donc une bonne qualité de ces eaux. Cependant, les calculs de facteurs de contaminations et des indices de géo-accumulation n'ont montré pratiquement aucune



contamination issue des apports naturels ou anthropiques et sont donc indemne de toute pollution métallique.

La présente étude a montré que les eaux d'Oued El Abid connaissent une dégradation d'origine anthropique de la qualité de ces eaux essentiellement dans sa partie avale après le barrage de Bin El Ouidane et précisément à partir de la ville de Bzou, ce tronçon reçoit les rejets des eaux usées non traitées et où les activités des unités des huiles d'olive sont très répandue. Par contre la pollution détectée au niveau des eaux de l'Oued Srou est due au processus naturel lié à la géologie des terrains du bassin versant Oued Srou. En revanche, Oued Ahançal montre une excellente qualité de ces eaux.

La qualité des eaux et des sédiments de la zone d'étude est à surveiller et à contrôler si on veut sauvegarder le rôle réel des écosystèmes aquatiques. De source fixe ou diffuse, anthropique ou naturelle, ces résultats ont pour vocation d'orienter les autorités locales à prendre des mesures afin d'anticiper toute éventuelle pollution et pour préserver la qualité de cette ressource en eau essentielle pour l'environnement et la santé publique.

## Référence bibliographique:

- Abdel-Mageed A.B., Oehme F.W., (1990): A review on biochemical roles, toxicity and interactions of zinc, copper and iron: IV. Interactions. *Veterinary and human toxicology*; 32:456–458.
- Abderamane H., Razack M., Vassolo S., (2012): hydrogeochemical and isotopic characterization of the groundwater in the chari-baguirmi depression. Republic of Tchad. *Journal of Environmental Earth Sciences*. 69(7): pp 2337–2350.
- Aboubaker M., Jalludin M., Razack M., (2013): Hydrochemistry study of a volcanosedimentary aquifer using major ion and environmental isotope data. Dalha basalts aquifer, southwest of Republic of Djibouti. *Environ Earth Sci* 70(7): pp 3335–3349.
- Adjagodo A, Kelomè N.C., Vissin E.W., et al., (2017) : Pollution Physique Et Bactériologique De L'eau Du Fleuve Dans La Basse Vallée De L'ouémé Pendant Les Périodes De Basses Et Hautes Eaux Au Bénin. *EuropeanScientific Journal, ESJ* ;13.
- Agostinho A.A., Gomes L.C., Veríssimo S., Okada E.K., (2004): Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Paraná River: effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment. *Rev. Fish Biol. Fish.* 14, 11–19. <https://doi.org/10.1007/s11160-004-3551-y>
- Agoumi A., (1999) : Introduction à la problématique des changements climatiques. *Projet maghrébin sur les changements climatiques RAB/94/G31: somigraf*, 43.
- Alloway, B. J., (1995): *Heavy metals in soils*. 2nd edition. London: Blackie academic and professional.
- Alloway et Ayres. (1997): *Chemical principales of environmental pollution*. Blackie Academic and professional, an imprint of chapman and hall, London, 394pp.
- Appelo C.A.J. Postma D., (2005): *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2°Ed, Balkema, Rotterdam, 536p.
- Arnoux, A., Roux, M.R., (1987) : Etude sédimentologique, minéralogique et géochimique de la carotte n°3-Berre. *Laboratoire d'hydrologie et de molysmologie aquatique, Université Aix-Marseille II*, p.
- Ashley R.P., Lloyd J.W., (1978): An example of the use of factor analysis and cluster analysis in ground water chemistry interpretation. *J Hydrol* 39: pp355–364.
- Azzaoui, S., Hanbali, M. E., Leblanc, M., (2002): Copper, lead, iron and manganese in the Sebou drainage basin; sources and impact on surface water quality. *Water Pollution Research Journal of Canada* 37, 773–784.
- Audry S., Blanc G., Schäfer J., (2006): Solid state partitioning of trace metals in suspended particulate matter from a river system affected by smelting-waste drainage. *Science of the Total Environment*.;363:216–236.
- Audry S., Grosbois C., Bril H., et al. (2010): Post-depositional redistribution of trace metals in reservoir sediments of a mining/smelting-impacted watershed (the Lot River, SW France). *Applied Geochemistry*. 25:778–794.
- Baes C.F., Mesmer R.E., (1976): *The hydrolysis of cations*. John Wiley, New York.
- Baize, D., (1997) : *Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France)*. Références et stratégies d'interprétation. INRA Editions, Paris, 408 p.
- Bakalowicz M., (1979) : contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'état Univ. P et M. Curie, Paris VI.
- Bakalowicz, M., (1980) : un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-Carbonate. *Coll. Cristallisation, Déformation, Dissolution des carbonates*, 17-18-11-1980 Bordeaux, 11-23.
- Barakat M., El Baghdadi J., Rais B., Aghezzaf M., Slassi, (2016): Assessment of spatial and seasonal water quality variation of OumErRbia River (Morocco) using multivariate statistical techniques, *Int. Soil Water Conserv. Res*, 4 284–292.
- Barakat A., El Baghdadi M., Rais J., Nadem S., (2012): Assessment of Heavy Metal in Surface Sediments of Day River at Beni-Mellal region, Morocco. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 4, 797-806.

### Référence Bibliographique

- Belabed B-E, Bendjema A, Boudjelida H, et al. (2011): Evaluation of the metal contaminations in the surface sediments of the Oubeira lagoon, National Park of ELKala, Algeria. *Archives of Applied Science Research*.;51–62.
- BELAMIE R. & PHELIPPOT S. (1982)- Etude du niveau de contamination des sédiments de plusieurs cours d'eau du bassin Parisien (France) par les métaux et les composés organochlorés CEMAGREF, division qualité des eaux, pêche et pisciculture; rap. n016, 8p
- Belhadj M., (2012) : Etude de la pollution de l'Oued Chélif et traitement par Plasma Glidarc des rejets industriels de la BCR. Thèse de Doctorat. Université de Mostaganem, 271 p.
- Bensefa-Colas L., Andujar P, Descatha A., (2011): Mercury poisoning. *Revue de Médecine Interne*; 32:416–24.
- Bendjama A., (2014) : Variations de la qualité des eaux et son impact sur le sol des zones humides du PNEK. Thèse Sciences de la Mer de l'université badji mokhtar annaba.
- Bennasser L.M., Fekhaoui M. & Mameli O. 2000. Assessment of the metallic contamination of the low Sebou sediments. *Ann. Chimica*, 90, 637-644.
- Boust D., Hebert D., Roset M., Ouddane B., Martin E., Skiker M., Fischer J.C., Boughriet A., Ben Aakame R., (2015) : Caractérisation hydro-chimique, toxicologique et évaluation des risques sanitaires des eaux souterraines de la région de Sidi-Kacem (Maroc), Thèse de doctorat en Chimie Spécialité : Toxicologie et Environnement à l'université MOHAMMED V FACULTE DES SCIENCES Rabat.
- Ben Alaya, M., Zemni, T., Mamou, A. et Zargouni, F., (2014) : Acquisition de salinité et qualité des eaux d'une nappe profonde, Tunisie: approche statistique et géochimique. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (2), 395–419.
- Benbouih H, Nassali H, Leblans M, et al. (2005) : Contamination en métaux traces des sédiments du Lac Fouarat (Maroc). *Africa Science*, 10–125.
- Bernard D., (1966) : Limnologie - Étude des eaux continentales. Paris : Gauthier-Villars. 678 p.
- Berner E.K, Berner R.A., (1987): The global water cycle. *Geochemistry and Environment*. New Jersey: Prentice-Hall
- Bisson M., Diderich R, Hulot C, et al. Zinc, Cadmium, Plomb, Mercure et ses dérivés. 2005.
- Bombardier M., (2007) : Développement d'outils écotoxicologiques pour l'évaluation de sédiments. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine (France), 217 p
- Bouaicha R., et. Benabdelfadel A., (2010): Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc, *Sécheresse* 2010; 21 (1e): 1-5
- Bougherira N., Hani A., Toumi F., et al., (2017) : Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux de la plaine de la Meboudja (Algérie). *Hydrological Sciences Journal*. 62:1290–1300.
- Boukdir A., El Meslouhi R., Mabrouki M., El Mahboul A., Mbaki V.R.E., Zitouni A., Baite W., Echakraoui, Z., (2017): Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in Oued El Abid Watershed, Morocco.
- Bourrelier P., Berthelin J., (1998) : Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Lavoisier, Paris. CR, Acc Sci,42.
- Bremond R, Vuichard R., (1973) : Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de la protection de la nature et de l'environnement. OSPEPE, Paris. 179 p.
- Bricker O.P, Jones B.F., (1995): Main factors affecting the composition of natural waters. In: Salbu B, Steinnes E, editors. Trace elements in natural waters. Boca Raton: CRC Press: 1-20.
- Calmano W., Hong J., Förstner U., (1993): Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water science and technology*; 28:223–235.
- Canavan R.W., Van Cappellen P., Zwolsman J.J.G., et al. (2007): Geochemistry of trace metals in a fresh water sediment: field results and diagenetic modeling. *Science of the total environment*.;381:263–279.
- Castelle S, Schäfer J, Blanc G, et al. (2007) 50-year record and solid state speciation of mercury in natural and contaminated reservoir sediment. *Applied Geochemistry*. 22:1359–1370.

### Référence Bibliographique

- Centre Régional d'Investissement (CRI), 2016. Secteurs d'activité: Agriculture [WWW Document]. URL <http://coeurdumaroc.ma/cri/public/documents/secteur-agriculture-59181.pdf> (accessed 7.24.18).
- Chapman P M, Wang F, Janssen C, et al., (1998): Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release biavailability, risk assessment, and remediation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.55; 2221–2243.
- Charlesworth M., Service M., (2000): An assessment of metal contamination in Northern Irish coastal sediments. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* 100b, 1–12.
- Caidat Bzou, 2009. Diagnostic Territorial Participatif de la commune rurale de BZOU.
- Cardona A; JJ, Carrillo-Rivera; R, Huizar-Alvarez y E, Graniel-Castro, 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico, *Environmental Geology* 45:350–366
- Chiffolleau J., Claisse D., Cossa D., et al. (2001) : La contamination métallique Programme Seine Aval.
- Cherifi, O. Loudiki, M. (1999): Flood transport of dissolved and suspended matter in the El Abid river basin (Morocco). *Hydrobiologia* 410, 287-294.
- Chow M.F., Shiah F.K., Lai C.C., Kuo H.Y., Wang K.W., Lin C.H., Chen T.Y., Kobayashi Y., Ko C.Y., (2016): Evaluation of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Fei-Tsui Reservoir basin, Taiwan, *Environ Earth Sci*, 75 6.
- Conrad J.E., Colvin C., Sililo O., Gorgens A., Weaver J., Reinhardt C., (1999): Assessment of the impact of agricultural practices on the quality of groundwater resources in South Africa, *Water Research Commission Report* 641/1/99.
- Daki Y., Lachgar R., Zahour G., et Mohamed K., (2015) : Caractéristiques générales du bassin versant de l'Oum Er Rbia. *Premières Journées des Jeunes Chercheurs en Géosciences*, Bouznika 20-21 Mars.
- Dawdy D.R, Feth J.H., (1967): Application of factor analysis in study of chemistry of groundwater quality, Mojave river Valley California. *Water Resources* 3(2): pp 505–510.
- Debieche T.H, (2002) : Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. (application à la basse plaine de la Seybouse-Nord-est Algérien). Thèse Doctorat ; université de Franche-Comté. France. 235 p.
- Deneux-Mustin S., Roussel-Debet S., Mustin C., et al. (2003) : Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces: influence des micro-organismes du sol. *Tec and Doc*, Paris, 282 p.
- Derwich E, Benaabidate L, Zian A, et al. (2010) : Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec Oued Fes. *Larhyss Journal*. Jun;101-112.
- De Burbure C., Buchet J.P., Leroyer A., et al. (2005): Renal and neurologic effects of cadmium, lead, mercury, and arsenic in children: evidence of early effects and multiple interactions at environmental exposure levels. *Environmental health perspectives*; 114:584–590.
- De Villers J., Squilbin M., Yourassowsky C., (2005) : Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface. *Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement*.
- Diab W., (2016) : Etude des propriétés physico-chimiques et colloïdales du bassin de la rivière Litani, Liban. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine (France), 214 p.
- Diaw M., Faye S., Stichler W., Maloszewski P., (2012): Isotopic and geochemical characteristics of groundwater in the Senegal River delta aquifer: implication of recharge and flow regime. *Environ Earth Sci* 66(4): pp 1011–1020.
- Diaz, R. J., 2001, Overview of Hypoxia around the World, *Journal of Environmental Quality* 30(2), pp. 275–281.
- Dib I., (2010) : L'impact de L'activité Agricole et Urbaine sur la Qualité des Eaux Souterraines de la Plaine de Gadaine - Ain Yaghout (Est- Algérien). Thèse de magister; Université HadjLakhdar Batna, Algérie. 144 p.

### Référence Bibliographique

- Doig L.E., Liber K., (2006): Influence of dissolved organic matter on nickel bioavailability and toxicity to *Hyalella azteca* in water-only exposures. *Aquatic Toxicology* 76, 203-216.
- Domenico P.A., Schwartz, F.W., (1998): *Physical and chemical hydrogeology*, 2<sup>e</sup>Ed John Wiley and sons, Inc, New York, USA.
- DRPE Rapport National sur les Ressources National sur les Ressources en Eau au Maroc (2004).
- Dufour P, Slepoukha M., (1975) : l'Oxygène dissous en lagune Ebrié: influences de l'hydroclimat et des pollutions. *Documents Scientifiques, Centre de Recherches Océanographiques, Abidjan*; 6:75–118.
- Durand J.H., 1982. *Les sols irrigables : étude pédologique*. 399 p
- Edmunds W. M., Cook Darling J.M., Kinniburgh D.G., Bath A. H. Morgan-Jones M., Andrews J. N. (1987): Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, UK: a basis for groundwater quality management. *Applied Geochemistry*,
- Egbunike M.E., (2007): Hydrogeochemical analysis of water samples in Nando and Environs of the Anambra Basin of South Eastern Nigeria, *Pac. J. Sci. Technol.*, 8 32–35.
- Elbouqdaoui K., Ezzine H., Badraoui M., Rouchdi M., Zahraoui M., OZER A., (2005) : Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc), *Geo-Eco-Trop*, 29 25–36.
- Elgettafi M., Himi M., Casas A., El Mandour A., 2011. Hydrochemistry characterisation of ground water salinity in Kert aquifere, NE Morocco. *Geographia Technica*, No. 2, 2011, pp. 15 to 22.
- El Jihad MD., (1999) : L'eau dans le haut bassin-versant de l'Oum-er-Rbia (Maroc), ressources, utilisations et conflits. Thèse de doctorat, université de Poitiers, 606 p.
- El Jihad M.D., (2005) : Croissance urbaine et problèmes d'assainissement liquide et pluvial dans le bassin du Srou (Maroc central), *Sécheresse*, 16, 41–52
- El Jihad M.I., (2010) : Les difficultés de gestion des ressources « naturelles » et de développement rural dans un milieu anthropisé: l'expérience du Projet Oued Srou (Maroc central), *Norois*, 3, 216, 25-45.
- El-Mohrit M., (2005) : Hydrochimie, éléments traces métalliques, incidences écotoxicologiques sur les différentes composantes d'un écosystème estuarien (Bas Loukos). Thèse de Doctorat. Option sciences de l'environnement. Faculté des sciences, Université de Rabat-Maroc.
- El Wartiti M., Malaki A., et El Mahmoudi N., (2012) : Évaluation effective de la Vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de Gharb à l'aide du SIG et la méthode DRASTIC (NW du Maroc). Chapitre IV : Hydrochimie et Vulnérabilité des aquifères souterrains. 25 p.
- Fetter C.W., (2000): *Applied hydrogeology*. 4<sup>e</sup>Ed, Prentice hall, 598p.
- Förstner U., Ahlf W., Calmano W., (1989): Studies on the transfer of heavy metals between sedimentary phases with a multi-chamber device: combined effects of salinity and redox variation.;
- Freiberg et al., (1979): *Handbook on the toxicology of metals*. Elsevier/ North Holland Biomedical press, Amsterdam, New York, Oxford.
- Friant S.L., (1979): Trace metal concentration in selected biological, sediment and water column samples in northern New England river. *Water Air Soil pollution*, 11, 455-465.
- Gaujous D, (1995) : *La pollution des milieux aquatiques, aide-mémoire*, Édition2, Éditeur Tec & Doc Lavoisier, 220 p.
- Geffard O., (2001) : Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés: évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires [PDF]. France: université Bordeaux I. 376 p.
- Georgeaud, V., Rochette, P., Ambrosi, J.P., Vandamme, D., Williamson, D., (1997): Relationship between heavy metals and magnetic properties in a large polluted catchment: the Etang de Berre South of France. *Physics and Chemistry of the Earth* 22, 211-214.
- Gibbs R.J., (1970): Mechanisms Controlling World Water Chemistry, *Science* 04 Dec 1970: Vol. 170, Issue 3962, pp. 1088-1090 DOI: 10.1126/science.170.3962.1088
- Giorgetti, C., (1981) : Etude de l'état de pollution des sédiments de l'étang de Berre. 2<sup>e</sup>me partie : la pollution inorganique. Université de Marseille, p. 132.

### Référence Bibliographique

- Gouaidia L., et al. (2011) : Évaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est Algérien). Article de recherche: *Revue Sécheresse*; vol. 22, N° 1 : pp 35–42
- Gupta S, Mahato A, Roy P, Datta JK, Saha RN., (2008): Geochemistry of groundwater, Burdwan District, West Bengal, India. *Environ Geol* 53: pp 1271–1282.
- Hamzeh M., (2012) : Dynamique, comportement et toxicité des éléments traces métalliques à l'interface eau-sédiment dans l'estuaire de la Seine. Thèse de Doctorat. Université de Lille1 (France), 263 p.
- Hakanson L., (1980): An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*; 14:975–1001
- Han Y., Wang G., Cravotta C.A., Hu W., Bian Y., Zhang Z., Liu Y., (2013): Hydrogeochemical evolution of Ordovician limestone groundwater in Yanzhou, North China. *Hydrol Process*, 27 2247–2257.
- Hans Wedepohl K., (1995): The composition of continental crust\*. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*;1217–1232.
- Hassani D., Mokssit A., Et Henia L., (1998): Changements climatiques et ressources en eau dans les pays du Maghreb, 55.
- Hayzoun H., (2014) : Caractérisation et quantification de la charge polluante anthropique et industrielle dans le bassin du Sebou. Thèse de Doctorat. Université de Toulon (France), 175 p.
- Hecker P., Schaezler D.J., Kramer G.R., (1972). Effects of heavy metals on micro organism application to process design. *Engineering Bulletin of Purdue university*, n° 141, part. 1, p 350-368.
- Hernandez L., Probst A., Probst J.L., et al. (2003): Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *Science of the Total Environment*; 312:195–219.
- Hilal I., (2017) : protection des eaux superficielles par cartographie du risque à la contamination: Cas du barrage 9 avril 1947 (Nord Maroc) Thèse Hydrologie-Hydrogéologie SIG, Université Abdelmalek Essaadi Faculté des Sciences Tetouan.
- Hitchon B., Billings G.K., Klován J.E., (1971): Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin-III factors controlling chemical composition. *Geochim Cosmochim* 35: pp 567–598.
- Hoepffner C., Houari, M.R., Bouabdelli, M., (2006): Tectonics of the North African Variscides (Morocco, western Algeria): an outline. *Comptes Rendus Geosci.* 338, 25–40.
- Huang K-M., Lin S., (2003): Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan. *Chemosphere*; 53:1113–1121.
- Hull V, Parrella L, Falcucci M., (2008): Modelling dissolved oxygen dynamics in coastal lagoons. *Ecological Modelling.*;211:468–480.
- Hussein MT., (2004): Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeol J* 12: pp 144-158.
- Huynh T.M.D., (2009) : Impact des métaux lourds sur l'interaction plante/ver de terre/ microflore tellurique. Thèse de Doctorat. Université de Paris Est (France), 170 p.
- Ibouh H., El Bchari F., Bouabdelli M., Souhel A., Youbi N., (2001) : L'accident tizal-azourki haut atlas central du maroc: déformations synsedimentaires liasiques en extension et conséquences du serrage atlasique. *Estud. Geol.* 57, 15–30.
- Ibrahim H., Juahir M.E., Toriman A., Mustapha A., Azid H.A., Isiyaka, (2015): Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in the Terengganu river basin, *Malaysian J. Anal. Sci.*, 19, 338–348.
- Irabien MJ, Cearreta A, Leorri E, et al. (2008): A 130 year record of pollution in the Suances estuary (southern Bay of Biscay): implications for environmental management. *Marine Pollution Bulletin*; 56:1719–1727.

### Référence Bibliographique

- Ivanowsky A., (2016) : Ouvrages d'assainissement des eaux et qualité du milieu récepteur en zone urbaine. Cas de rejets dans la Marque à Villeneuve d'Ascq. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1 (France), 229 p.
- Iavazzo P., Ducci D., Adamo P., et al. (2012): Impact of past mining activity on the quality of water and soil in the High Moulouya Valley (Morocco). *Water, Air, & Soil Pollution.*;223:573–589.
- Jellali M., (1997): développement des ressources en eau au Maroc Options Méditerranéennes, sér A /n°31, Séminaires Méditerranéens.
- Jalali M., (2007): Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example from Tajarak, western Iran, *Environ Geol.*, 52, 1133–1149.
- Jalali M., (2009): Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran. *Environ Geo* 156: pp 1479–1488
- Jayakumar R, Siraz L., (1997): Factor analysis in hydrogeochemistry of coastal aquifers- a preliminary study. *Environ Geol* 31: pp174–177.
- Jayaprakash M, Giridharan L., Venugopal T., Krishna Kumar S.P., Periakali P., (2008): Characterization and evaluation of the factors affecting the geochemistry of groundwater in Neyveli, Tamil Nadu, India. *Environ Geol* 54: pp 855-867.
- Johnson M.F., Wilby R.L., (2015): Seeing the landscape for the trees: metrics to guide riparian shade management in river catchments. *Water Resources Research* ;51:3754-3769.
- Kaiser H.F., (1960) : The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141–151.
- Karaoui I., Arioua A., El Amrani Idrissi A., Nouaim W., Elhamdouni D., Ouhamchich K.A., Hssaisoune M., Hnini, R., (2017): Evaluation of the River-Shallow Aquifer Exchange Process Effect on Surface Water Quality Deterioration. *J. Geosci. Environ. Prot.* 05, 121–132. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.56013>
- Karaoui I., (2019): Contribution de la télédétection et de la simulation à l'évaluation de la qualité des eaux. Cas du bassin versant Oued El Abid (Haut Atlas, Maroc). Thèse Hydrologie et télédétection, Université Sultan Moulay Slimane faculté des Sciences et Techniques Béné-Mellal
- Karroum L. A., El Baghdadi M., Barakat A., Meddah R., Aadraoui M., Oumenskou H., Ennaji W., (2019): Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of the Srou River and its tributaries (Middle Atlas, Morocco) for drinking and agricultural purposes. *Desalination and Water Treatment*, 146, 152–164.
- Karroum L. A., El Baghdadi M., Barakat A., Meddah R., Aadraoui M., Oumenskou H., Ennaji W., (2019): Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of El Abid River, Middle Atlas, Morocco » *Desalination and Water Treatment*,143, 118–125.
- Keegan G.M., Learmonth I.D., Case C., (2008): A systematic comparison of the actual, potential, and theoretical health effects of cobalt and chromium exposures from industry and surgical implants. *Critical reviews in toxicology.*;38:645–674.
- Kirchner W.B., Brabowski S., (1972) : Manganèse in lacustrine ecosystem: A review. *Water resources bulletin* - p.1259-1264.
- Krimissa S, (2005) : nappes superficielles en zone semi-aride : origine des eaux et de la salinité, renouvellement, exemple des nappes Massa er Sous (Maroc). Thèse en science de la terre et de l'environnement de l'Université de Franche-Comté.
- Kpoda N.W., Sorgho H., Poda J-N, et al. ; (2013) : Endémie bilharzienne à Schistosomamansoni à la vallée du Kou: caractérisation du système de transmission et impact socioéconomique. *Comptes Rendus Biologies.*;336:284–288.
- Kozlova T., Wood C.M., McGeer J.C., (2009): The effect of water chemistry on the acute toxicity of nickel to the cladoceran *Daphnia pulex* and the development of a biotic ligand model. *Aquatic Toxicology* 91, 221-228.

### Référence Bibliographique

- Kuldip S., Hundal H., Dhanwinder S., (2011): Geochemistry and assessment of hydrogeochemical processes in groundwater in the southern part of Bathinda district of Punjab, northwest India. *Environ Earth Sci* 64: pp 1823–1833.
- Kumar, A. Dua, (2008): Water quality index for assessment of water quality of River Ravi at Madhopur, *Glob. J. Environ. Sci.*, 8, 49–57.
- Larrose A., (2011): Quantification et spatialisation de la contamination en éléments traces métalliques du système fluvio-estuarien girondin. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux 1 (France), 400 p.
- Lawrence F.W., Upchurch S.B., (1983): Identification of recharge areas using factor analysis. *Ground Water* 20: pp 680–687.
- Lesven L., (2008) : Devenir des éléments traces métalliques au sein du sédiment, un compartiment clé de l'environnement aquatique. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France 246 P.
- Leynaud G., (1968) : Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique B.T.I. Ministère de l'agriculture.
- Li P., Tian R., Xue C., Wu J., (2017): Progress, opportunities and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 13224–13234.
- Liu C.W., Lin K.H., Kuo., Y.M, (2003): Application of factor analysis in the assessment of groundwater in a Blackfoot disease area in Taiwan, *Sci. Total. Environ.*, 313, 77–89
- Livingstone D.A., (1963): Chemical Composition of Rivers and Lakes, in *Data of Geochemistry*, US Geol. Survey Prof. Paper, 440 G, 64 pp.
- Lock K., Janssen C.R., (2002): Ecotoxicity of nickel to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus* and *Folsomia candida*. *Chemosphere* 46, 197-200
- Loizeau J-L, Makri S, Arpagaus P, et al. (2017) : Micropolluants métalliques et organiques dans les sédiments superficiels du Léman. [cited 2018 Jan 30]; Available from: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:100462>.
- Lounnas A., (2009) : Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi Kroma de Skikda. Mémoire de Magister, Université de Skikda (Algérie), 120 p.
- Mandal R., Hassan N.M., Murimboh J., Chakrabarti C.L., Back M.H., (2002): Chemical speciation and toxicity of nickel species in natural waters from the Sudbury area (Canada). *Environment Science and Technology* 36, 1477–1484.
- Mariotti A., (1982) : Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie (France), 488 p.
- Martin J. (1981) : Le Moyen Atlas central, étude géomorphologique. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, n° 258 bis. Rabat : Ministère de l'Énergie et des Mines; 446 p
- Mathis B.J., & Cummings T.F., (1973): Selected metals in sediment, water and biota in the Illinois River. *J.W.P.C.F.*, 1573-1583.
- Mekaoussi N., (2014) : Comportement des éléments chimiques dans les eaux de surface de Hammam Debagh (est Algérien). Mémoire de Magister, Université de Batna (Algérie), 126 p.
- Mekhalif F., (2009) : Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. Mémoire de Magister. Université de Skikda (Algérie), 139 p
- Merabet S., (2010) : Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux brutes et distribuées du barrage réservoir de Beni Haroun, thèse de magister, université de Constantine.
- Metahri M.S., (2012) : Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse de Doctorat. Université de tizi-Ouzou (Algérie), 172 p.
- Meybeck, M., (2003): Global occurrence of major elements in rivers. In: Drever, J.I. (Ed.), *Treatise on Geochemistry, Surface and Ground Water, Weathering, and Soils*. Elsevier, pp. 207-223.
- Ministère de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement, (2001) : État de l'environnement du Maroc



### Référence Bibliographique

- Moroccan Standards for surface water Quality (2002). Official Bulletin No 5062. [http://www.sgg.gov.ma/BO/bulletin/Fr/2002/BO\\_5062\\_fr.PDF](http://www.sgg.gov.ma/BO/bulletin/Fr/2002/BO_5062_fr.PDF). Accessed 01.01.16
- Moussa A., Zouari K, Oueslati N, (2008): Geochemical study of groundwater mineralization in the Grombalia shallow aquifer, north-eastern Tunisia: implication of irrigation and industrial waste water accounting. *Environ Geol.* doi:10.1007/s00254-008-1530-7.
- Muller G., (1979): Schwer metalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*;79:778–783.
- Négre P., Rigollet C., (2011): Dynamique de l'eau, de l'érosion à la sédimentation. *Geosciences*;13:64–71.
- Nehme N., (2014) : Evaluation de la qualité de l'eau du bassin inférieur de la rivière de Litani, Liban: approche environnementale. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine (France), 359 p.
- N'guessan Y.M., Wango T.E., Adopo K.L., et al., (2016) : Caractéristiques géochimiques des eaux de surface dans un environnement agricole : cas des bassins versants de la Gascogne (Région Midi Pyrénées, SW de la France)/[Geochemical characteristics of surface waters in an agricultural environment: Case of Gascogne catchments (Midi Pyrénées Region, SW France)]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*; 17:394.
- Nisbet M., Verneau J., (1970) : Composantes chimiques des eaux courantes. *Ann. Limnol.* T 6 Fasc., 2: 161-190.
- Nishijo M., Nakagawa H., Morikawa Y., et al. (1995): Mortality of inhabitants in an area polluted by cadmium: 15 year follow up. *Occupational and environmental medicine.*;52:181–184.
- Nandimandalam JR., (2011): Evaluation of hydrogeochemical processes in the Pleistocene aquifers of Middle Ganga Plain, Uttar Pradesh, India. *Environ Earth Sci* 65(4):pp 1291–1308.
- Novaes CG, Bezerra MA, da Silva EGP, Santos AMP, Romão ILS, Santos Neto JH (2016) A review of multivariate designs applied to the optimization of methods based on inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES). *Microchem J* 128:331– 346. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.05.015>
- Nwankwoala H.O., Warmate T., (2014): Geotechnical assessment of foundation conditions of a site in Ubima, Ikwerre local government area, Rivers State, Nigeria, *Int. J. Eng. Res. Dev.*, 9 50–63.
- Ogbukagu I.K.N, (1986): Water Supply of Njikoka and Awka Areas of the Anambra Basin, Nigeria, *J. Afr. Earth Sci.* 5 519-526.
- OMS-IPCS., (1998): Environmental Health Criteria n°200: copper, World Health Organization, International Programme on chemical safety.
- Paliwal K.V., (1967): Effects of gypsum application on the quality of irrigation water, *Madras Agric. J.*, 59, 646–647.
- Paramasivama K.R.V., Suresh G., (2015): Impact of sediment characteristics on the heavy metal concentration and their ecological risk level of surface sediments of Vaigairiver, Tamilnadu, India. *Spectrochimica Acta Part A : Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 137:10.
- Parkhurst DL., Appelo CAJ., (1999): User's guide to PHREEQC (Version 2)-A Computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. United States Geological Survey, Water Resources Investigations Report 99-4259, Washington, 326 p. (2), 251-274.
- Pasternak K., (1969): Bottom sediment of the polluted dam reservoir at otmuschow. *Actahydrobio*, 84, 87-108
- Patel J.Y., Vaghani M.V. (2015): Correlation study for assessment of water quality and its parameters of Par River Valsad, Gujarat, India, *Int. J. Innov. Emerg. Res. Eng.*, 2, 150–156
- Patil N.S., Deshmukh N., (2012) Physico-chemical parameters for testing of water – A review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES* 3: 14.
- Pekey H., Karakaş D., Ayberk S., et al. (2004): Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey. *Marine pollution bulletin*; 48:946–953.

### Référence Bibliographique

- Purushothaman P., SomeshwarRao M., Rawat Y.S., (2014): Evaluation of hydrogeochemistry and water quality in Bist-Doab region, Punjab, India, *Environ. Earth Sci.*, 72, 693.
- Raj S.M., Jayaprakash M., (2008): Distribution and enrichment of trace metals in marine sediments of Bay of Bengal, off Ennore, south-east coast of India. *Environmental Geology*; 56:207–217.
- Razack M., & Dazy J., (1990): Hydrochemical characterization of groundwater mixing in sedimentary and metamorphic reservoirs with combined use of Piper's principle and factor analysis. *J. Hydrol.*, 114, pp371-393.
- Riad S., (2003) : Typologie et analyses hydrologiques des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse université de Lille.154p.
- Richards L.A., (1954): *Agriculture Handbook* Washington, USDA, Vol.60.
- RNO, (1998) : Surveillance du milieu marin. Travaux du Réseau National d'Observation de la Qualité du Milieu Marin. Edition 1998, in: environnement, I. (Ed.). Ifremer.
- Rodier J., Legube B., Merlet, N. (2009). *L'Analyse de l'Eau* Dunod, Paris
- Rollin, C., Quiot, F., 2006. *Éléments traces métalliques : Guide méthodologique, recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines*. INERIS, Rapport INERIS-DRC-06- 66246/DESP-R01a, 119 p.
- Romic M, Romic D. (2003): Heavy metals distribution in agricultural top soils in urban area. *Environmental Geology*;
- Rooney C.P., Zhao F.J., McGrath S.P., (2007): Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation. *Environmental Pollution* 145, 596-605.
- Rosso A., Lafont M., Exinger A., (1993) : Effets des métaux lourds sur les peuplements d'oligochètes de l'Ille et de ses affluents (Haut-Rhin, France), *Annls Limnol.* 29 (3-4) 1993 : 295-305.
- Rouamba J., Nikiema E., Rouamba S., et al. (2016) : Accès à l'eau potable et risques sanitaires en zone périphérique de Ouagadougou, Burkina Faso. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*; 64:S211.
- Salloum M., (2013): Étude multidimensionnelle de la qualité des eaux de surface dans un régime méditerranéen. Cas de quatre rivières au Liban : Damour, Ibrahim, Kadisha-Abou Ali, et Oronte [En ligne]. Thèse Chimie et microbiologie de l'eau. Poitiers : Université de Poitiers.
- Samake H., (2002) : Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période (2000 et 2001) 77p.
- Sarva Mangala Praveena, Aris A.Z., Radojevic M., et al., (2010): Heavy Metals Dynamics and Source In Intertidal Mangrove Sediment of Sabah, Borneo Island. *Thai Society of Higher Education Institutes on Environment*. p.
- Schoeller H., (1962) : *les eaux souterraines.*, Masson, Paris, 642 p
- Schulz O., De Jong C., (2004): Snowmelt and sublimation: field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8, 1076–1089.
- Seyhan E.V., Van de Caried A.A, Engelen G.B., (1985): Multivariate analysis and interpretation of the hydrochemistry of a dolomite reef aquifer, Northern Italy. *Water Resources* 21: pp 1010–1024.
- SedNet. (2006): *Sediment Management-an essential element of River Basin Management Plans*. Report on the SedNet Round Table Discussion. Venice, 22-23 Nov
- Serghini A., El Abidi A., Idrissi I., Mouhir L., Fekhaoui M., El Houssine Z., (2001) : Evaluation de la contamination métallique des sédiments du complexe zones humides de la ville de Mohammedia (Maroc), *Bulletin de l'institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la vie*, 2001, n°23, 77-81
- Shrestha S. and Kazama F. (2007): Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modeling and Software*, vol. 22(4), p. 464-475.
- Simeonov V., Stratis J.A., Samara C., Zachariadis G., Voutsas D., Anthemidis A., T. Kouimtzis, Assessment of the surface water quality in Northern Greece, *Water Res.*, 37 (2003) 4119–4124.

### Référence Bibliographique

- Simler R., (2009): Diagrammes software. Downloadable at <http://www.lha.univavignon.fr/LHA-Logiciels.htm>.
- Singh K.P., Malik A., Mohan D., Sinha S., (2004): Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India), a case study, *Water Res.*,38 3980–3992.
- Singh O., Labana S., Pandey G., et al., (2003): Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. *ApplMicrobiol Biotechnol.* 61; 405-412.
- Some Y.S.C., Soro T.D., Ouedraogo S., (2014) : Étude de la prévalence des maladies liées à l'eau et influences des facteurs environnementaux dans l'arrondissement de Nomgr-Masson: cas du quartier Tanghin (Ouagadougou-Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*; 8:289–303.
- Spears D.A., Reeves M.J., (1975): The influence of superficial deposit on groundwater quality in the Vale York, *Q. J. Eng. Geol.*, 8 255-270.
- Stephens S.R., Alloway B.J., Parker A., et al. (2001): Changes in the leachability of metals from dredged canal sediments during drying and oxidation. *Environmental Pollution.*;114:407–413.
- Stevenson J., (1994) : *Humus chemistry: Genesis, composition, Reactions.* John Wiley and Sons (second edition), New York.
- STRACHAN S., Trace elements. *Current Anaesthesia and Critical Care* 21:44-48. Sueker, J.K., 2005. Chromium. *Environmental Forensics; Contaminant Specific Guide*, (2010) 81-95.
- Strady E., Dang V.B.H., Némery J., et al. (2017): Baseline seasonal investigation of nutrients and trace metals in surface waters and sediments along the Saigon River basin impacted by the megacity of Ho Chi Minh (Vietnam). *Environmental Science and Pollution Research*; 24: 3226–3243.
- Stumm W., Morgan J.J., (1970): *Aquatic chemistry; an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters.*
- Sujatha D., Reddy RB., (2003): Quality characterization of groundwater in the south-eastern part of the Ranja Reddy district, Andhra Pradesh, India. *Environ Geol* 44(5): pp 579–586.
- Sutherland R.A., (2000): Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology* 39 611–627.
- Sy I., Traoré D., Diène A.N., et al. (2017) : Eau potable, assainissement et risque de maladies diarrhéiques dans la Communauté Urbaine de Nouakchott, Mauritanie. *Santé Publique*; 29:741–750
- Szabolcs I., Darab C., (1964): The Influence of Irrigation Water of High Sodium Carbonate Content of Soils, in: I. Szabolcs, Ed., *Proc.8th International Congress of the International Society of Soil Science*, Research Institute of Soil Science and Agrochemistry, Hungarian Academy of Science, pp. 803–812.
- Taghzout F., (2015) : Impact environnemental des rejets d'eau le long du littoral occidental Algérien. Mémoire de Magister. Université d'Oran (Algérie), 170 p.
- Taïbi A.N., El Khalki Y., El Hannani M., (2015) : Atlas régional Région du Tadla Azilal Maroc. Université d'Angers, pp.99, 978-2-915751-58-1. hal-01153495
- Tarik A., (2005) : Qualité physico-chimique de l'eau de boisson et la solubilité de certains médicaments utilisés chez la volaille dans certaines Région du Maroc. Thèse pour l'obtention du doctorat vétérinaire IAV Hassan II. Rabat. Maroc, 183pp.
- Templeton D., (1990): *Biological Monitoring of Chemical Exposure in the Workplace*, World Health Organization, Geneva.
- Thouvenin B., Boutier B., Chiffolleau J., et al. (2004) : Contribution à la dynamique et de la spéciation des contaminants. *Rapport Seine-Aval 2003*, thème 1,153.
- Tiwari A.K., Singh A.K., Hydrogeochemical investigation and groundwater quality assessment of Pratapgarh district, Uttar Pradesh, *J. Geol. Soc. India*, 83 (2014) 329–343.
- Touhari F., (2015) : Etude de la Qualité des Eaux de la vallée du Haut Cheliff. Thèse de doctorat es-sciences de l'école nationale supérieure d'hydraulique.

### Référence Bibliographique

- Toulhoat P., (1996) : Evolution chimique des eaux profondes et de surface. Les techniques, Décembre. 26-37.
- Turekian K.K., (1978): Cobalt. - Dans: Wedepohl, K.H. (éd.). Handbook of geochemistry, vol. II-3, Springer- Verlag, Berlin, 27-B-1 à 27-O-1.
- Usunoff E.J., Guzman A.G., (1989): Multivariate analysis in hydrochemistry. An example of the use of factor and correspondence analysis. Ground Water 17. pp 27–34.
- Voravit C., San Diego-Mcglone M.L., (1997): Aluminium normalization of heavymetal data from estuarine and coastal sediments of the Gulf of Thailand. Thammasat Int. Journal of Science Education and Technology 2, 37–46.
- Wacila B., (2012) : contribution à l'étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et différents maillons de la chaine trophique du littoral extrême ouest algérien. France: Université De Tlemcen. 149 p.
- Hans Wedepohl K., (1995) The composition of continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta.1217–1232.
- Wilson A.L., (1972): A method for determination of manganese in water” the water research association -53p.
- Xua G.L.J., Gao M., Hua G., Kong X., (2015): Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the near-shore area, north Shandong Peninsula. Marine pollution bulletin 95: 6.
- Yahya H. S. A., (2017) : Contribution à l'Etude des Ressources en Eau dans la plaine des Triffa : Impact de la Pollution Anthropique sur la Qualité des Eaux Souterraines.
- Yang M., Sañudo-Wilhelmy S.A., (1998): Cadmium and manganese distributions in the Hudson River estuary: interannual and seasonal variability. Earth and Planetary Science Letters. 160:403–418.
- Yidana S., Ophori D., Yakubo B., (2008): Hydrochemical evaluation of the Voltaian system.The Afram Plains area, Ghana. J Environ Manag 88: pp 697–707
- Yidana S.M., Sakyi P.A., Stamp G., (2011): Analysis of the suitability of surface water for irrigation purposes: the southwestern and coastal river systems in Ghana, J. Water Resour. Prot., 3, 695–710
- Yitbarek A., Razack M., Ayenew T., Zemedagegnehu E., Azagegn T., (2012): Hydrogeological and hydrochemical framework of Upper Awash River basin, Ethiopia: with special emphasis on interbasins groundwater transfer between Blue Nile and Awash Rivers. Journal Afr Earth Sc 65: pp 46-60.
- Yjjou M., (2009) : Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle de perte en sol au niveau du bassin versant d'Oum ErRbia, Mémoire de Master en sciences des sols et environnement, Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès, 104p.
- Yjjou M., Bouabid R., El Hmaidi A., Essahlaoui A., (2012a) : Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle de perte en sol au niveau du bassin versant d'Oum Er Rbia, International conference of GIS-Users, Taza GIS-days, Fès, Proceeding Book, , 433-435.
- Yjjou M., Bouabid R., El Hmaidi A., Essahlaoui A., (2012b) : Caractérisation topographique et climatique via le SIG du bassin versant du haut Oum Er-Rbia en amont du barrage El Hansali (SW du Moyen Atlas, Maroc), Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research, 3, 2, 104-109.
- Yjjou M., Bouabid R., El Hmaidi A., Essahlaoui A., El Abassi M., (2014) : Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. The International Journal of Engineering And Science (IJES), Volume 3, Issue 8, Pages 83-91.
- Yuce G., (2007): A Geochemical study of the groundwater in the Misli basin and environmental implications. Environ Geol 51: pp 857–868.
- Zerahn B., Kofoed-Enevoldsen A., Jensen B.V., et al. (1999): Pulmonary damage after modest exposure to zinc chloride smoke. Respiratory medicine; 93:885–890.

*Référence Bibliographique*

Zhang, Y., 1124. Epuration naturelle : de la rivière à la zone humide de rejet. Dr. L'université Lorraine.

Zaichick V, Zaichick S (2014) Use of INAA and ICP-MS for the assessment of trace element mass fractions in adult and geriatric prostate. J Radioanal Nucl Chem 301: 383-397.

## Annexe

## Annexe 1 :

Tableau 1: Caractéristiques physicochimiques des eaux de l'Oued El Abid

| Echantillon | T °C | pH  | CE<br>µs/cm | TH<br>(mg/l) | Turbidité<br>(NTU) | DO<br>(mg/l) | Na <sup>+</sup><br>(mg/l) | K <sup>+</sup><br>(mg/l) | Ca <sup>2+</sup><br>(mg/l) | Mg <sup>2+</sup><br>(mg/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/l) | Cl <sup>-</sup><br>(mg/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/l) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup><br>(mg/l) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/l) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(mg/l) |
|-------------|------|-----|-------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---|---------------------------|---|--|--|--|
| OA1         | 14,2 | 8,1 | 611         | 462          | 10,3               | 7,68         | 8,5                       | 2,1                      | 60,43                      | 97,60                      | 280,6                                   | 11,715                    | 58                                      | 0,006                                  | 0,036                                  | 0,01                                   |
| OA2         | 16   | 8   | 320         | 237          | 1000               | 8,32         | 7,4                       | 2,02                     | 44                         | 46,29                      | 219,6                                   | 10,65                     | 63                                      | 0,018                                  | 0,041                                  | 0,084                                  |
| OA3         | 17,9 | 7,8 | 320         | 234          | 1000               | 7,84         | 7,5                       | 1,79                     | 51,04                      | 44,50                      | 244                                     | 6,39                      | 28,932                                  | 0,0157                                 | 0,0602                                 | 0,0941                                 |
| OA4         | 20   | 8,1 | 460         | 301          | 1000               | 7,84         | 37,3                      | 3,2                      | 61,8                       | 58,23                      | 207,4                                   | 39,05                     | 66,355                                  | 0,0115                                 | 0,0948                                 | 0,0689                                 |
| OA5         | 19,7 | 7,9 | 600         | 430          | 1000               | 7,84         | 62,4                      | 2,61                     | 100,4                      | 81,86                      | 213,5                                   | 78,1                      | 56                                      | 0,032                                  | 0,048                                  | 0,011                                  |
| OA6         | 18,3 | 7,9 | 600         | 435          | 1000               | 7,84         | 62,7                      | 2,81                     | 83,88                      | 85,39                      | 231,8                                   | 86,265                    | 71,04                                   | 0,024                                  | 0,074                                  | 0,098                                  |
| OA7         | 20   | 8   | 490         | 360          | 387                | 7,84         | 54,2                      | 2,75                     | 92,17                      | 64,64                      | 207,4                                   | 56,8                      | 62,943                                  | 0,022                                  | 0,0955                                 | 0,0592                                 |
| OA8         | 18   | 8,2 | 570         | 420          | 33,4               | 8,48         | 59,3                      | 2,82                     | 102,3                      | 72,36                      | 183                                     | 76,325                    | 69,7                                    | 0,0103                                 | 0,031                                  | 0,085                                  |
| OA9         | 11,9 | 8,1 | 300         | 219          | 276                | 7,04         | 7,5                       | 2,32                     | 52,96                      | 40,38                      | 231,8                                   | 31,95                     | 58,2                                    | 0,0154                                 | 0,083                                  | 0,064                                  |
| OA10        | 13,2 | 8   | 300         | 219          | 1000               | 7,52         | 6,9                       | 2,89                     | 40,3                       | 53,26                      | 207,4                                   | 3,55                      | 50,691                                  | 0,0248                                 | 0,0629                                 | 0,0699                                 |
| OA11        | 14,5 | 7,7 | 346         | 266          | 1000               | 7,68         | 5,6                       | 1,91                     | 53,33                      | 49,50                      | 268,4                                   | 3,55                      | 61,2                                    | 0,01                                   | 0,0652                                 | 0,027                                  |
| OA12        | 16   | 8   | 260         | 188          | 152                | 7,36         | 7,3                       | 2,07                     | 50,52                      | 34,41                      | 164,7                                   | 2,84                      | 67,2                                    | 0,0188                                 | 0,072                                  | 0,053                                  |
| OA13        | 15,5 | 7,9 | 320         | 238          | 1000               | 6,8          | 25,8                      | 2,87                     | 73,1                       | 35,20                      | 141,6                                   | 35,5                      | 83,6                                    | 0,0195                                 | 0,013                                  | 0,036                                  |
| OA14        | 16,9 | 7,7 | 280         | 220          | 1000               | 6,48         | 19,9                      | 3,04                     | 71,38                      | 36,14                      | 280,6                                   | 28,4                      | 43                                      | 0,0238                                 | 0,022                                  | 0,097                                  |
| OA15        | 17,4 | 7,8 | 280         | 211          | 1000               | 6,48         | 8,47                      | 2,23                     | 62,43                      | 36,13                      | 231,5                                   | 32,9                      | 68,2                                    | 0,038                                  | 0,0121                                 | 0,012                                  |

Annexe

|             |      |     |     |     |      |      |       |      |        |        |       |       |        |        |        |        |
|-------------|------|-----|-----|-----|------|------|-------|------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| <b>OA16</b> | 16   | 7,7 | 420 | 334 | 1000 | 6,48 | 29,92 | 2,19 | 85,58  | 39,50  | 183   | 35,5  | 34,6   | 0,023  | 0,044  | 0,014  |
| <b>OA17</b> | 17,2 | 7,7 | 430 | 319 | 1000 | 5,28 | 27,34 | 3,66 | 83,8   | 59,88  | 231,8 | 35,5  | 49     | 0,021  | 0,0625 | 0,146  |
| <b>OA18</b> | 19,9 | 7,9 | 330 | 460 | 1000 | 5,6  | 28,79 | 2,87 | 67     | 41     | 232,1 | 49,7  | 60,8   | 0,032  | 0,0722 | 0,282  |
| <b>OA19</b> | 19   | 8   | 420 | 315 | 239  | 6,1  | 34,84 | 2,53 | 73,67  | 58,69  | 244   | 55,1  | 73,03  | 0,0154 | 0,026  | 0,07   |
| <b>OA20</b> | 22,4 | 7,9 | 510 | 380 | 115  | 7,04 | 43,64 | 2,04 | 89,57  | 69,63  | 231,8 | 60,35 | 81,088 | 0,0233 | 0,0789 | 0,0178 |
| <b>OA21</b> | 19,4 | 7,7 | 364 | 380 | 256  | 7,36 | 32,2  | 1,58 | 69,14  | 52,65  | 268,4 | 63,9  | 61,476 | 0,0122 | 0,0377 | 0,0213 |
| <b>OA22</b> | 19,4 | 7,9 | 400 | 306 | 10,1 | 6,08 | 40,02 | 2,21 | 85,72  | 53,57  | 231,8 | 42,6  | 74,2   | 0,041  | 0,024  | 0,063  |
| <b>OA23</b> | 22   | 7,8 | 460 | 342 | 52,1 | 6,24 | 36,3  | 2,77 | 82,77  | 63,04  | 244   | 42,6  | 51,6   | 0,038  | 0,022  | 0,053  |
| <b>OA24</b> | 22,3 | 7,9 | 750 | 560 | 347  | 6,08 | 85,36 | 2,42 | 120,14 | 104,41 | 256,2 | 120,7 | 48,6   | 0,048  | 0,031  | 0,05   |
| <b>OA25</b> | 23   | 7,9 | 770 | 570 | 592  | 5,92 | 94,07 | 2,01 | 137    | 103,97 | 256,2 | 142   | 42,356 | 0,0426 | 0,0831 | 0,0527 |
| <b>OA26</b> | 24,1 | 7,9 | 713 | 600 | 771  | 4,8  | 100,8 | 1,82 | 153    | 105,33 | 256,2 | 142   | 48     | 0,043  | 0,037  | 0,042  |
| <b>OA27</b> | 24,9 | 7,9 | 723 | 642 | 959  | 5,24 | 95,34 | 2,54 | 145,9  | 120,65 | 256,2 | 205,9 | 43,853 | 0,0245 | 0,171  | 0,0409 |

Tableau 2: Concentration des éléments traces métalliques dans les eaux de l'Oued El Abid

| Echantillon   | Cd   | Cr | Cu   | Fe  | Mn  | Ni | Pb   | Zn  |
|---------------|------|----|------|-----|-----|----|------|-----|
|               | µg/l |    |      |     |     |    |      |     |
| OA1           | 4    | 18 | 62   | 2   | 11  | 19 | 16   | 1   |
| OA2           | 1    | 18 | 59   | 202 | 6   | 18 | 15   | 26  |
| OA3           | 2    | 17 | 64   | 327 | 4   | 17 | 17   | 9   |
| OA4           | 4    | 14 | 63   | 232 | 70  | 15 | 17   | 7   |
| OA5           | 2    | 18 | 66   | 51  | 10  | 19 | 16   | 0   |
| OA6           | 3    | 18 | 65   | 155 | 9   | 19 | 20   | 22  |
| OA7           | 1    | 17 | 56   | 50  | 11  | 16 | 16   | 12  |
| OA8           | 1    | 18 | 67   | 43  | 10  | 17 | 17   | 34  |
| OA9           | 1    | 18 | 69   | 71  | 9   | 18 | 16   | 35  |
| OA10          | 3,1  | 19 | 63   | 335 | 54  | 14 | 15   | 23  |
| OA11          | 3    | 18 | 64   | 102 | 11  | 15 | 15   | 6   |
| OA12          | 2,1  | 18 | 71   | 49  | 10  | 19 | 18   | 39  |
| OA13          | 1,5  | 19 | 83   | 49  | 20  | 14 | 13,3 | 58  |
| OA14          | 1,6  | 19 | 71   | 66  | 12  | 15 | 16   | 31  |
| OA15          | 5,5  | 19 | 69   | 170 | 4   | 16 | 20   | 17  |
| OA16          | 5,18 | 19 | 66   | 562 | 5   | 16 | 16   | 13  |
| OA17          | 1,8  | 18 | 73   | 47  | 11  | 18 | 17   | 38  |
| OA18          | 1,6  | 20 | 73   | 111 | 13  | 17 | 19   | 39  |
| OA19          | 1,8  | 18 | 75   | 200 | 4   | 17 | 19   | 34  |
| OA20          | 2,7  | 19 | 70   | 122 | 10  | 17 | 17   | 26  |
| OA21          | 1,7  | 19 | 67   | 313 | 10  | 16 | 18   | 28  |
| OA22          | 1,01 | 19 | 65   | 394 | 11  | 16 | 16   | 27  |
| OA23          | 4,7  | 18 | 68   | 494 | 4   | 19 | 19   | 19  |
| OA24          | 3,18 | 19 | 68   | 598 | 1   | 18 | 19   | 22  |
| OA25          | 5,16 | 19 | 72   | 485 | 9   | 20 | 17   | 25  |
| OA26          | 4,1  | 18 | 71   | 469 | 4   | 19 | 18   | 28  |
| OA27          | 3,13 | 17 | 74   | 590 | 7   | 12 | 17   | 19  |
| OMS<br>(2011) | 3    |    | 2000 | 300 | 100 | 70 | 10   | 500 |



## Annexe 2 :

Tableau 1: Caractérisation physicochimique des eaux de l'Oued Ahançal

| Échantillon | T °C | pH  | CE<br>µs/cm | TH<br>(ppm) | Turbidité<br>(NTU) | OD<br>(mg/l) | Na <sup>+</sup><br>(mg/l) | K <sup>+</sup><br>(mg/l) | Ca <sup>2+</sup><br>(mg/l) | Mg <sup>2+</sup><br>(mg/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/l) | Cl <sup>-</sup><br>(mg/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/l) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> |
|-------------|------|-----|-------------|-------------|--------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---|---------------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>OH1</b>  | 11,5 | 8   | 430         | 320         | 5                  | 8,88         | 33,89                     | 1,99                     | 72,71                      | 51,60                      | 128,1                                   | 49,7                      | 52,8                                    | 0,0098                       | 0,0672                       | 0,04                         |
| <b>OH2</b>  | 13,4 | 7,8 | 380         | 290         | 6                  | 8,88         | 27,8                      | 1,59                     | 65,61                      | 54,57                      | 111,6                                   | 46,15                     | 42                                      | 0,0101                       | 0,0231                       | 0,02                         |
| <b>OH3</b>  | 13,7 | 7,7 | 380         | 290         | 6                  | 7,04         | 28,3                      | 1,65                     | 65,31                      | 54,72                      | 102,3                                   | 42,6                      | 43                                      | 0,0082                       | 0,0208                       | 0,044                        |
| <b>OH4</b>  | 16,8 | 7,5 | 376         | 290         | 7                  | 7,04         | 6,31                      | 1,98                     | 53,11                      | 57,61                      | 130,7                                   | 10,65                     | 32,4                                    | 0,0089                       | 0,024                        | 0,038                        |
| <b>OH5</b>  | 12,3 | 7,6 | 365         | 290         | 6                  | 8,72         | 33,41                     | 1,87                     | 73,89                      | 52,55                      | 104,7                                   | 46,15                     | 42,3                                    | 0,0292                       | 0                            | 0,031                        |
| <b>OH6</b>  | 11,5 | 7,8 | 376         | 300         | 7                  | 8,88         | 25,73                     | 1,98                     | 67,6                       | 56,52                      | 117,2                                   | 31,95                     | 39,3                                    | 0,018                        | 0                            | 0,045                        |

## Annexe 3 :

Tableau 1: Caractérisation physicochimique des eaux de l'Oued Srou

| Samples            | T °C  | pH      | E.C.ms/cm | Turbidité<br>(NTU) | TH<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | Cl <sup>-</sup><br>(mg/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/l) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup><br>(mg/l) | K <sup>+</sup><br>(mg/l) | Ca <sup>2+</sup><br>(mg/l) | Mg <sup>2+</sup><br>(mg/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/l) | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/l) |
|--------------------|-------|---------|-----------|--------------------|--------------|--------------|---------------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---|---|
| SR1                | 11,8  | 8,4     | 1910      | 38,7               | 1430         | 8,48         | 447,3                     | 305,5                                   | 0,0233                       | 0,1506                       | 0,055                        | 336,6                     | 3,41                     | 307,1                      | 273,09                     | 311,1                                   | 30                                      |
| SR2                | 14,8  | 8,6     | 1800      | 90                 | 1380         | 8,48         | 497                       | 440                                     | 0,0231                       | 0,1731                       | 0,042                        | 338,3                     | 3,8                      | 306                        | 261,20                     | 293,75                                  | 42                                      |
| SR3                | 13    | 8,4     | 1520      | 110                | 1070         | 8,64         | 390,5                     | 417,3                                   | 0,026                        | 0,0809                       | 0,03                         | 275,9                     | 3,4                      | 264,6                      | 195,87                     | 311,1                                   | 48                                      |
| SR4                | 17,2  | 8,3     | 1070      | 4,24               | 785          | 8            | 156,2                     | 769,6                                   | 0,0122                       | 0,0896                       | 0,026                        | 260,6                     | 3,2                      | 260,3                      | 127,61                     | 317,2                                   | 0                                       |
| SR5                | 13,5  | 8,5     | 1450      | 74                 | 1100         | 8,48         | 383,4                     | 457,6                                   | 0,0181                       | 0,0714                       | 0,03                         | 250,4                     | 3,3                      | 245,2                      | 207,89                     | 311,1                                   | 18                                      |
| SR6                | 14,2  | 8,1     | 720       | 69,4               | 530          | 8,64         | 113,6                     | 280,8                                   | 0,0138                       | 0,1184                       | 0,01                         | 266,3                     | 4,7                      | 258,6                      | 66,00                      | 317,2                                   | 0                                       |
| SR7                | 12    | 8,3     | 1600      | 89,5               | 1220         | 8,96         | 383,4                     | 464,1                                   | 0,0224                       | 0,0658                       | 0,027                        | 279,3                     | 5                        | 260,4                      | 233,37                     | 305                                     | 36                                      |
| SR8                | 12,3  | 8,2     | 1960      | 117                | 1460         | 8,8          | 475,7                     | 663,9                                   | 0,0194                       | 0,2319                       | 0,02                         | 324,6                     | 4,1                      | 289,6                      | 284,64                     | 317,2                                   | 24                                      |
| SR9                | 13,2  | 8,4     | 2000      | 170                | 1488         | 8,96         | 497                       | 536,9                                   | 0,0937                       | 0,1482                       | 0,06                         | 394,7                     | 3,8                      | 333                        | 280,90                     | 305                                     | 24                                      |
| SR10               | 18,6  | 8,6     | 1250      | 3,87               | 920          | 8,64         | 440,2                     | 369,2                                   | 0,0135                       | 0,0759                       | 0,026                        | 212,3                     | 1,42                     | 216,8                      | 171,02                     | 305                                     | 18                                      |
| SR11               | 16,7  | 8,1     | 1830      | 71,7               | 1350         | 8,8          | 433,1                     | 409,2                                   | 0,241                        | 0,134                        | 0,62                         | 291,7                     | 3,09                     | 266,8                      | 263,43                     | 293,75                                  | 0                                       |
| SR12               | 15    | 8,3     | 2890      | 14,3               | 2000         | 8,24         | 816,5                     | 885,3                                   | 0,0259                       | 0,1612                       | 0,037                        | 483,3                     | 4,18                     | 381,2                      | 393,69                     | 329,4                                   | 18                                      |
| mean               | 14,36 | 8,35    | 1666,67   | 71,06              | 1227,75      | 8,59         | 419,49                    | 499,95                                  | 0,04                         | 0,13                         | 0,08                         | 309,5                     | 3,62                     | 282,47                     | 229,89                     | 309,73                                  | 21,5                                    |
| Moroccan Standards | 20    | 6,5–8,5 | 2700      | 5                  | 300          | 5–8          |                           |   | 0,5                          | 50                           | 0,5                          |                           |                          | 100                        |                            |   |   |
| WHO Standards 2011 |       | 6,5–8,5 |           | 5                  | 500          |              | 200                       | 250                                     | 0,9                          | 11                           | 0,2                          |                           |                          | 75                         | 50                         |   |   |

Tableau 2: Concentration des éléments traces métalliques dans les eaux de l'Oued Srou

| Samples            | Cd   | Cr | Cu   | Fe   | Mn  | Ni | Pb | Zn  |
|--------------------|------|----|------|------|-----|----|----|-----|
|                    | µg/l |    |      |      |     |    |    |     |
| SR1                | 17   | 14 | 50   | 732  | 3   | 11 | 10 | 11  |
| SR2                | 17   | 15 | 32   | 598  | 2   | 3  | 12 | 11  |
| SR3                | 17   | 12 | 37   | 457  | 4   | 18 | 24 | 13  |
| SR4                |      |    |      |      |     |    |    |     |
| SR5                | 17   | 13 | 14   | 313  | 1   | 19 | 9  | 4   |
| SR6                |      |    |      |      |     |    |    |     |
| SR7                | 17   | 12 | 6    | 2114 | 31  | 18 | 15 | 2   |
| SR8                | 15   | 14 | 38   | 1153 | 23  | 20 | 14 | 6   |
| SR9                | 6    | 14 | 104  | 375  | 4   | 19 | 11 | 29  |
| SR10               | 18   | 17 | 58   | 6    | 10  | 22 | 15 | 5   |
| SR11               | 18   | 18 | 59   | 3    | 10  | 22 | 16 | 2   |
| SR12               | 18   | 15 | 49   | 408  | 6   | 23 | 14 | 28  |
| WHO Standards 2011 | 3    |    | 2000 | 300  | 100 | 70 | 10 | 500 |

## Annexe 4 :

Tableau 1: Variations spatiales des ETM dans les sédiments des trois Oueds étudié

|      | Al       | Fe       | Mn     | Pb    | Zn    | Cu   | Cr    | Ni   |
|------|----------|----------|--------|-------|-------|------|-------|------|
|      | mg.kg-1  |          |        |       |       |      |       |      |
| SR1  | 21457,17 | 14512,49 | 128,24 | 6,25  | 14,13 | 3,67 | 9,36  | 3,62 |
| SR2  | 14891,16 | 15073,3  | 121,96 | 5,26  | 12,11 | 4,16 | 9,2   | 1,52 |
| SR3  | 14056,86 | 14726,52 | 133,65 | 4,3   | 6,06  | 4,69 | 7,27  | 4,07 |
| SR4  | 10879,45 | 13379,51 | 121,74 | 7,3   | 9,6   | 3,92 | 8,94  | 4,62 |
| SR5  | 10841,97 | 10655,09 | 103,8  | 6,81  | 11,51 | 3,3  | 9,09  | 4,16 |
| SR7  | 11263,76 | 7947,45  | 108,56 | 8,38  | 11,12 | 3,77 | 7,98  | 4,58 |
| SR8  | 15129    | 13512,91 | 116,34 | 7,97  | 5,32  | 4,3  | 12,91 | 3,29 |
| SR9  | 13752,13 | 12428,26 | 129,18 | 6,33  | 18,1  | 4,12 | 9,04  | 5,02 |
| SR11 | 20580    | 5696,22  | 162,77 | 12,47 | 6,61  | 4,29 | 16,03 | 2,1  |
| SR12 | 15732,92 | 10216,13 | 196,26 | 11,02 | 15,43 | 5,47 | 13,96 | 2,24 |
| OA1  | 11851,13 | 10033,18 | 160,69 | 13,62 | 14,59 | 0,12 | 7,29  | 1,24 |
| OA2  | 15909,72 | 10559,63 | 131,39 | 11,14 | 18,28 | 1,11 | 6,88  | 5,29 |
| OA3  | 18085,06 | 15020,19 | 96,48  | 11,64 | 19,86 | 3,35 | 7,53  | 7,66 |
| OA4  | 16120,91 | 13978,02 | 166,3  | 5,95  | 13,73 | 3,68 | 7,04  | 6,97 |
| OA5  | 11817,07 | 10659,04 | 132,91 | 5,41  | 11,58 | 3,92 | 9,81  | 1,57 |
| OA6  | 14484,24 | 15650,69 | 150,24 | 6,09  | 16,21 | 3,06 | 8,37  | 3,86 |
| OA7  | 14515,78 | 15029,08 | 134,67 | 7     | 16,71 | 2,6  | 11,14 | 4,02 |
| OA8  | 14744,87 | 15446,89 | 174,76 | 7,93  | 16,93 | 4,98 | 12,53 | 5,36 |
| OA9  | 17177,75 | 14745,79 | 162,15 | 8,82  | 15,52 | 2,59 | 10,42 | 0,97 |
| OA10 | 17243,64 | 15400,34 | 109,11 | 8,29  | 14,58 | 3,08 | 9,29  | 4,27 |
| OA11 | 20123,02 | 14522,07 | 137,01 | 9,46  | 11,34 | 5,61 | 11,96 | 6,06 |
| OA12 | 19691,44 | 5609,57  | 100,93 | 8,17  | 14,13 | 6,16 | 12,34 | 5,33 |
| OA16 | 14489,31 | 10278,73 | 155,47 | 11,28 | 15,43 | 4,88 | 11,56 | 6,67 |
| OA17 | 18409    | 8194,13  | 124,98 | 13,01 | 16,01 | 5,08 | 11,24 | 0,43 |
| OA18 | 18376,22 | 12481,68 | 101,5  | 12,43 | 15,05 | 6,04 | 12,09 | 7,62 |
| OA21 | 13631,8  | 14539,75 | 100,29 | 11,67 | 14,58 | 4,35 | 10,61 | 5,78 |
| OA25 | 16050,59 | 15677,07 | 150,47 | 11,21 | 13,99 | 5,56 | 13,13 | 3,69 |
| OA26 | 16355    | 16857,93 | 102,56 | 12,09 | 12,2  | 5,5  | 13,79 | 5,1  |
| OA27 | 14693,43 | 14965,88 | 141,64 | 11,65 | 10,02 | 3,09 | 11,19 | 6,51 |

*Annexe*

|            |              |              |            |           |           |             |           |             |
|------------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| <b>OH1</b> | 16026,23     | 7003,39      | 152,68     | 5,21      | 13,61     | 3,82        | 8,83      | 6,07        |
| <b>OH2</b> | 17298,16     | 10522,3      | 188,69     | 4,65      | 10,45     | 5,15        | 9,26      | 6,26        |
| <b>OH3</b> | 17851,95     | 13387,33     | 126,93     | 4,92      | 10,31     | 3,71        | 3,19      | 6,7         |
| <b>OH4</b> | 14833,48     | 9472,91      | 113,52     | 6,43      | 12,31     | 4,32        | 3,9       | 2,44        |
| <b>OH5</b> | 15838,22     | 13680,59     | 136,94     | 6,57      | 14,58     | 5,07        | 4,61      | 0,59        |
| <b>OH6</b> | 19151,59     | 15711,99     | 134,69     | 6,89      | 10,77     | 5,75        | 2,34      | 2,19        |
| <b>UCC</b> | <b>77400</b> | <b>30900</b> | <b>530</b> | <b>17</b> | <b>52</b> | <b>14.3</b> | <b>35</b> | <b>18.6</b> |

**Tableau 2: Valeurs des facteurs d'enrichissement (FE) dans les sédiments des trois Oueds**

|             | <b>Fe</b>                 | <b>Mn</b> | <b>Pb</b> | <b>Zn</b> | <b>Cu</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> |
|-------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             | <b>mg.kg<sup>-1</sup></b> |           |           |           |           |           |           |
| <b>SR1</b>  | 1,69                      | 0,87      | 1,33      | 0,98      | 0,93      | 0,96      | 0,70      |
| <b>SR2</b>  | 2,54                      | 1,20      | 1,61      | 1,21      | 1,51      | 1,37      | 0,42      |
| <b>SR3</b>  | 2,62                      | 1,39      | 1,39      | 0,64      | 1,81      | 1,14      | 1,20      |
| <b>SR4</b>  | 3,08                      | 1,63      | 3,05      | 1,31      | 1,95      | 1,82      | 1,77      |
| <b>SR5</b>  | 2,46                      | 1,40      | 2,86      | 1,58      | 1,65      | 1,85      | 1,60      |
| <b>SR7</b>  | 1,77                      | 1,41      | 3,39      | 1,47      | 1,81      | 1,57      | 1,69      |
| <b>SR8</b>  | 2,24                      | 1,12      | 2,40      | 0,52      | 1,54      | 1,89      | 0,90      |
| <b>SR9</b>  | 2,26                      | 1,37      | 2,10      | 1,96      | 1,62      | 1,45      | 1,52      |
| <b>SR11</b> | 0,69                      | 1,16      | 2,76      | 0,48      | 1,13      | 1,72      | 0,42      |
| <b>SR12</b> | 1,63                      | 1,82      | 3,19      | 1,46      | 1,88      | 1,96      | 0,59      |
| <b>OA1</b>  | 2,12                      | 1,98      | 5,23      | 1,83      | 0,05      | 1,36      | 0,44      |
| <b>OA2</b>  | 1,66                      | 1,21      | 3,19      | 1,71      | 0,38      | 0,96      | 1,38      |
| <b>OA3</b>  | 2,08                      | 0,78      | 2,93      | 1,63      | 1,00      | 0,92      | 1,76      |
| <b>OA4</b>  | 2,17                      | 1,51      | 1,68      | 1,27      | 1,24      | 0,97      | 1,80      |
| <b>OA5</b>  | 2,26                      | 1,64      | 2,08      | 1,46      | 1,80      | 1,84      | 0,55      |
| <b>OA6</b>  | 2,71                      | 1,51      | 1,91      | 1,67      | 1,14      | 1,28      | 1,11      |
| <b>OA7</b>  | 2,59                      | 1,35      | 2,20      | 1,71      | 0,97      | 1,70      | 1,15      |
| <b>OA8</b>  | 2,62                      | 1,73      | 2,45      | 1,71      | 1,83      | 1,88      | 1,51      |
| <b>OA9</b>  | 2,15                      | 1,38      | 2,34      | 1,34      | 0,82      | 1,34      | 0,23      |
| <b>OA10</b> | 2,24                      | 0,92      | 2,19      | 1,26      | 0,97      | 1,19      | 1,03      |
| <b>OA11</b> | 1,81                      | 0,99      | 2,14      | 0,84      | 1,51      | 1,31      | 1,25      |
| <b>OA12</b> | 0,71                      | 0,75      | 1,89      | 1,07      | 1,69      | 1,39      | 1,13      |

*Annexe*

|             |       |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| <b>OA16</b> | 1,78  | 1,57 | 3,54 | 1,59 | 1,82 | 1,76 | 1,92 |
| <b>OA17</b> | 1,11  | 0,99 | 3,22 | 1,29 | 1,49 | 1,35 | 0,10 |
| <b>OA18</b> | 1,70  | 0,81 | 3,08 | 1,22 | 1,78 | 1,45 | 1,73 |
| <b>OA21</b> | 2,67  | 1,07 | 3,90 | 1,59 | 1,73 | 1,72 | 1,76 |
| <b>OA25</b> | 2,45  | 1,37 | 3,18 | 1,30 | 1,87 | 1,81 | 0,96 |
| <b>OA26</b> | 2,58  | 0,92 | 3,37 | 1,11 | 1,82 | 1,86 | 1,30 |
| <b>OA27</b> | 2,55  | 1,41 | 3,61 | 1,02 | 1,14 | 1,68 | 1,84 |
| <b>OH1</b>  | 1,09  | 1,39 | 1,48 | 1,26 | 1,29 | 1,22 | 1,58 |
| <b>OH2</b>  | 1,52  | 1,59 | 1,22 | 0,90 | 1,61 | 1,18 | 1,51 |
| <b>OH3</b>  | 1,88  | 1,04 | 1,25 | 0,86 | 1,12 | 0,40 | 1,56 |
| <b>OH4</b>  | 1,60  | 1,12 | 1,97 | 1,24 | 1,58 | 0,58 | 0,68 |
| <b>OH5</b>  | 1,85  | 1,26 | 1,89 | 1,37 | 1,73 | 0,64 | 0,16 |
| <b>OH6</b>  | 1,28  | 1,03 | 1,64 | 0,84 | 1,63 | 0,27 | 0,48 |
| <b>UCC</b>  | 30900 | 530  | 17   | 52   | 14.3 | 35   | 18.6 |
| <b>Min</b>  | 0,69  | 0,75 | 1,22 | 0,48 | 0,05 | 0,27 | 0,10 |
| <b>Max</b>  | 3,08  | 1,98 | 5,23 | 1,96 | 1,95 | 1,96 | 1,92 |
| <b>Moy</b>  | 2,01  | 1,28 | 2,50 | 1,28 | 1,42 | 1,37 | 1,14 |

**Tableau 3: Valeurs des facteurs de contamination (CF) dans les sédiments des trois Oueds étudié**

|             | <b>Al</b>                 | <b>Fe</b> | <b>Mn</b> | <b>Pb</b> | <b>Zn</b> | <b>Cu</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> |
|-------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             | <b>mg.kg<sup>-1</sup></b> |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>SR1</b>  | 0,28                      | 0,47      | 0,24      | 0,37      | 0,27      | 0,26      | 0,27      | 0,19      |
| <b>SR2</b>  | 0,19                      | 0,49      | 0,23      | 0,31      | 0,23      | 0,29      | 0,26      | 0,08      |
| <b>SR3</b>  | 0,18                      | 0,48      | 0,25      | 0,25      | 0,12      | 0,33      | 0,21      | 0,22      |
| <b>SR4</b>  | 0,14                      | 0,43      | 0,23      | 0,43      | 0,18      | 0,27      | 0,26      | 0,25      |
| <b>SR5</b>  | 0,14                      | 0,34      | 0,20      | 0,40      | 0,22      | 0,23      | 0,26      | 0,22      |
| <b>SR7</b>  | 0,15                      | 0,26      | 0,20      | 0,49      | 0,21      | 0,26      | 0,23      | 0,25      |
| <b>SR8</b>  | 0,20                      | 0,44      | 0,22      | 0,47      | 0,10      | 0,30      | 0,37      | 0,18      |
| <b>SR9</b>  | 0,18                      | 0,40      | 0,24      | 0,37      | 0,35      | 0,29      | 0,26      | 0,27      |
| <b>SR11</b> | 0,27                      | 0,18      | 0,31      | 0,73      | 0,13      | 0,30      | 0,46      | 0,11      |
| <b>SR12</b> | 0,20                      | 0,33      | 0,37      | 0,65      | 0,30      | 0,38      | 0,40      | 0,12      |
| <b>OA1</b>  | 0,15                      | 0,32      | 0,30      | 0,80      | 0,28      | 0,01      | 0,21      | 0,07      |
| <b>OA2</b>  | 0,21                      | 0,34      | 0,25      | 0,66      | 0,35      | 0,08      | 0,20      | 0,28      |

*Annexe*

|             |       |       |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| <b>OA3</b>  | 0,23  | 0,49  | 0,18 | 0,68 | 0,38 | 0,23 | 0,22 | 0,41 |
| <b>OA4</b>  | 0,21  | 0,45  | 0,31 | 0,35 | 0,26 | 0,26 | 0,20 | 0,37 |
| <b>OA5</b>  | 0,15  | 0,34  | 0,25 | 0,32 | 0,22 | 0,27 | 0,28 | 0,08 |
| <b>OA6</b>  | 0,19  | 0,51  | 0,28 | 0,36 | 0,31 | 0,21 | 0,24 | 0,21 |
| <b>OA7</b>  | 0,19  | 0,49  | 0,25 | 0,41 | 0,32 | 0,18 | 0,32 | 0,22 |
| <b>OA8</b>  | 0,19  | 0,50  | 0,33 | 0,47 | 0,33 | 0,35 | 0,36 | 0,29 |
| <b>OA9</b>  | 0,22  | 0,48  | 0,31 | 0,52 | 0,30 | 0,18 | 0,30 | 0,05 |
| <b>OA10</b> | 0,22  | 0,50  | 0,21 | 0,49 | 0,28 | 0,22 | 0,27 | 0,23 |
| <b>OA11</b> | 0,26  | 0,47  | 0,26 | 0,56 | 0,22 | 0,39 | 0,34 | 0,33 |
| <b>OA12</b> | 0,25  | 0,18  | 0,19 | 0,48 | 0,27 | 0,43 | 0,35 | 0,29 |
| <b>OA16</b> | 0,19  | 0,33  | 0,29 | 0,66 | 0,30 | 0,34 | 0,33 | 0,36 |
| <b>OA17</b> | 0,24  | 0,27  | 0,24 | 0,77 | 0,31 | 0,36 | 0,32 | 0,02 |
| <b>OA18</b> | 0,24  | 0,40  | 0,19 | 0,73 | 0,29 | 0,42 | 0,35 | 0,41 |
| <b>OA21</b> | 0,18  | 0,47  | 0,19 | 0,69 | 0,28 | 0,30 | 0,30 | 0,31 |
| <b>OA25</b> | 0,21  | 0,51  | 0,28 | 0,66 | 0,27 | 0,39 | 0,38 | 0,20 |
| <b>OA26</b> | 0,21  | 0,55  | 0,19 | 0,71 | 0,23 | 0,38 | 0,39 | 0,27 |
| <b>OA27</b> | 0,19  | 0,48  | 0,27 | 0,69 | 0,19 | 0,22 | 0,32 | 0,35 |
| <b>OH1</b>  | 0,21  | 0,23  | 0,29 | 0,31 | 0,26 | 0,27 | 0,25 | 0,33 |
| <b>OH2</b>  | 0,22  | 0,34  | 0,36 | 0,27 | 0,20 | 0,36 | 0,26 | 0,34 |
| <b>OH3</b>  | 0,23  | 0,43  | 0,24 | 0,29 | 0,20 | 0,26 | 0,09 | 0,36 |
| <b>OH4</b>  | 0,19  | 0,31  | 0,21 | 0,38 | 0,24 | 0,30 | 0,11 | 0,13 |
| <b>OH5</b>  | 0,20  | 0,38  | 0,26 | 0,39 | 0,28 | 0,35 | 0,13 | 0,03 |
| <b>OH6</b>  | 0,25  | 0,41  | 0,25 | 0,41 | 0,21 | 0,40 | 0,07 | 0,12 |
| <b>UCC</b>  | 77400 | 30900 | 530  | 17   | 52   | 14.3 | 35   | 18.6 |
| <b>Min</b>  | 0,14  | 0,18  | 0,18 | 0,25 | 0,10 | 0,01 | 0,07 | 0,02 |
| <b>Max</b>  | 0,28  | 0,55  | 0,37 | 0,80 | 0,38 | 0,43 | 0,46 | 0,41 |
| <b>Moy</b>  | 0,20  | 0,40  | 0,25 | 0,50 | 0,25 | 0,29 | 0,27 | 0,23 |

Tableau 4: Valeurs des indices de géo-accumulation (Igeo) dans les sédiments des trois Oueds étudié

|             | Al                  | Fe    | Mn    | Pb    | Zn    | Cu    | Cr    | Ni    |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | mg.kg <sup>-1</sup> |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>SR1</b>  | -2,44               | -1,68 | -2,63 | -2,03 | -2,46 | -2,55 | -2,49 | -2,95 |
| <b>SR2</b>  | -2,96               | -1,62 | -2,70 | -2,28 | -2,69 | -2,37 | -2,51 | -4,20 |
| <b>SR3</b>  | -3,05               | -1,65 | -2,57 | -2,57 | -3,69 | -2,19 | -2,85 | -2,78 |
| <b>SR4</b>  | -3,42               | -1,79 | -2,71 | -1,80 | -3,02 | -2,45 | -2,55 | -2,59 |
| <b>SR5</b>  | -3,42               | -2,12 | -2,94 | -1,90 | -2,76 | -2,70 | -2,53 | -2,75 |
| <b>SR7</b>  | -3,37               | -2,54 | -2,87 | -1,61 | -2,81 | -2,51 | -2,72 | -2,61 |
| <b>SR8</b>  | -2,94               | -1,78 | -2,77 | -1,68 | -3,87 | -2,32 | -2,02 | -3,08 |
| <b>SR9</b>  | -3,08               | -1,90 | -2,62 | -2,01 | -2,11 | -2,38 | -2,54 | -2,47 |
| <b>SR11</b> | -2,50               | -3,02 | -2,29 | -1,03 | -3,56 | -2,32 | -1,71 | -3,73 |
| <b>SR12</b> | -2,88               | -2,18 | -2,02 | -1,21 | -2,34 | -1,97 | -1,91 | -3,64 |
| <b>OA1</b>  | -3,29               | -2,21 | -2,31 | -0,90 | -2,42 | -7,48 | -2,85 | -4,49 |
| <b>OA2</b>  | -2,87               | -2,13 | -2,60 | -1,19 | -2,09 | -4,27 | -2,93 | -2,40 |
| <b>OA3</b>  | -2,68               | -1,63 | -3,04 | -1,13 | -1,97 | -2,68 | -2,80 | -1,86 |
| <b>OA4</b>  | -2,85               | -1,73 | -2,26 | -2,10 | -2,51 | -2,54 | -2,90 | -2,00 |
| <b>OA5</b>  | -3,30               | -2,12 | -2,58 | -2,24 | -2,75 | -2,45 | -2,42 | -4,15 |
| <b>OA6</b>  | -3,00               | -1,57 | -2,40 | -2,07 | -2,27 | -2,81 | -2,65 | -2,85 |
| <b>OA7</b>  | -3,00               | -1,62 | -2,56 | -1,87 | -2,22 | -3,04 | -2,24 | -2,79 |
| <b>OA8</b>  | -2,98               | -1,59 | -2,19 | -1,69 | -2,20 | -2,11 | -2,07 | -2,38 |
| <b>OA9</b>  | -2,76               | -1,65 | -2,29 | -1,53 | -2,33 | -3,05 | -2,33 | -4,85 |
| <b>OA10</b> | -2,75               | -1,59 | -2,87 | -1,62 | -2,42 | -2,80 | -2,50 | -2,71 |
| <b>OA11</b> | -2,53               | -1,67 | -2,54 | -1,43 | -2,78 | -1,93 | -2,13 | -2,20 |
| <b>OA12</b> | -2,56               | -3,05 | -2,98 | -1,64 | -2,46 | -1,80 | -2,09 | -2,39 |
| <b>OA16</b> | -3,00               | -2,17 | -2,35 | -1,18 | -2,34 | -2,14 | -2,18 | -2,06 |
| <b>OA17</b> | -2,66               | -2,50 | -2,67 | -0,97 | -2,28 | -2,08 | -2,22 | -6,02 |
| <b>OA18</b> | -2,66               | -1,89 | -2,97 | -1,04 | -2,37 | -1,83 | -2,12 | -1,87 |
| <b>OA21</b> | -3,09               | -1,67 | -2,99 | -1,13 | -2,42 | -2,30 | -2,31 | -2,27 |
| <b>OA25</b> | -2,85               | -1,56 | -2,40 | -1,19 | -2,48 | -1,95 | -2,00 | -2,92 |
| <b>OA26</b> | -2,83               | -1,46 | -2,95 | -1,08 | -2,68 | -1,96 | -1,93 | -2,45 |
| <b>OA27</b> | -2,98               | -1,63 | -2,49 | -1,13 | -2,96 | -2,80 | -2,23 | -2,10 |
| <b>OH1</b>  | -2,86               | -2,73 | -2,38 | -2,29 | -2,52 | -2,49 | -2,57 | -2,20 |



*Annexe*

|            |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>OH2</b> | -2,75 | -2,14 | -2,07 | -2,46 | -2,90 | -2,06 | -2,50 | -2,16 |
| <b>OH3</b> | -2,70 | -1,79 | -2,65 | -2,37 | -2,92 | -2,53 | -4,04 | -2,06 |
| <b>OH4</b> | -2,97 | -2,99 | -2,81 | -1,99 | -2,66 | -2,31 | -3,75 | -3,52 |
| <b>OH5</b> | -2,87 | -1,76 | -2,54 | -1,96 | -2,42 | -2,08 | -3,51 | -5,56 |
| <b>OH6</b> | -2,60 | -1,56 | -2,56 | -1,89 | -2,86 | -1,90 | -4,49 | -3,67 |
| <b>UCC</b> | 77400 | 30900 | 530   | 17    | 52    | 14.3  | 35    | 18.6  |
| <b>Min</b> | -3,42 | -3,05 | -3,04 | -2,57 | -3,87 | -7,48 | -4,49 | -6,02 |
| <b>Max</b> | -2,44 | -1,46 | -2,02 | -0,90 | -1,97 | -1,80 | -1,71 | -1,86 |
| <b>Moy</b> | -2,90 | -1,95 | -2,59 | -1,66 | -2,62 | -2,55 | -2,56 | -2,99 |