

République Algérienne Démocratique Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre:

N° de série:

Faculté des Sciences et Technologies
Département de l'Hydraulique et Génie Civil

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Par : MEDDAH Mouhamed ET BEN OTMANE Ahmed

Thème

**Etude hydrogéologique et hydro chimique de la
nappe de CI quelque forage de la ville de
Ghardaïa**

Soutenu publiquement le : 23/11/2020

Devant le jury :

| | | | |
|----------------------------------|------------|-----------------------|------------------|
| Mr. OULED BELKHIR Cheikh. | MAA | Univ. Ghardaïa | Président |
| Mr. BOULEMAIZ Tayeb | MAA | Univ. Ghardaïa | Examineur |
| Mr. BOUBELLI Salim | MAA | Univ. Ghardaïa | Encadreur |

Année universitaire 2019 / 2020

Dédicace

À ma cher Maman Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

À la mémoire de mon père J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

À Mes Chers Adorables frères et sœur.

À mes amis.

À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail, à tous ceux que j'ai omis de citer.

Mouhamed

Dédicace

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de
mes études,*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents,
et leur soutien moral,*

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon
parcours universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués, et le fruit de votre soutien infailible,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Ahmed

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Puis nous remercions

*Notre maitre, rapporteur de Mémoire. **Docteur Boubli Salim***

Nous vous remercions pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail. Nous avons eu le grand plaisir de travailler sous votre direction, et avons trouvé auprès de vous le conseiller et le guide qui nous a reçus en toute circonstance avec sympathie, sourire et bienveillance.

J'exprime mes remerciements aussi aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail

***A nos professeurs** tout au long de notre cursus universitaire, dont nous avons appris tant de chose, et nous apprenant encore plus dans chaque jour que dieu fait. Toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce travail.*

On vous remercie tous comme un signe de gratitude car notre prophète Mohamed (qu'Allah le bénisse et le salue) Dit «ceux qui ne remercient pas les gens ne remercient pas Dieu».

Résumé

La caractérisation hydrochimique d'un système aquifère implique les analyses physico-chimique de l'eau souterraine, la présente étude s'intéresse à la caractérisation des eaux souterraines dans la zone de Ghardaia.

Les principaux résultats montrent que le faciès chloruré sodique est dominant, avec la présence d'un faciès sulfaté sodique. par ailleurs que les eaux de continental intercalaire (CI) sont classées potables selon les normes Algérienne, et de qualité médiocre à admissible pour l'irrigation. La minéralisation de ces eaux est liée principalement à la dissolution des évaporites.

Mots clés : caractérisation, Continental Intercalaire, minéralisation, Ghardaia.

Summary

The hydrochemical characterization of an aquifer system involves the physico-chemical analyzes of the groundwater, this study is interested in the characterization of groundwater in the Ghardaia area.

The main results show that the sodium chloride facies is dominate, with the presence of a sodium sulphate facies. moreover, the intercalary continental (IC) water is classified as drinkable according to Algerian standards, and of poor quality to admissible for irrigation. The mineralization of these waters is mainly linked to the dissolution of evaporites.

Keywords: characterization: Continental Intercalaire, mineralization, Ghardaia.

ملخص

يتضمن التوصيف الهيدروكيميائي لنظام الخزان الجوفي التحليلات الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية ، وتهتم هذه الدراسة بتوصيف المياه الجوفية في منطقة غرداية. تظهر النتائج الرئيسية أن سحنات كلوريد الصوديوم هي السائدة ، مع وجود سحنات كبريتات الصوديوم. علاوة على ذلك ، تصنف المياه القارية الداخلية (CI) على أنها صالحة للشرب وفقاً للمعايير الجزائرية ، وذات نوعية رديئة بالنسبة للري. يرتبط تمعدن هذه المياه بشكل أساسي بتفكك المبخرات. **الكلمات المفتاحية:** التوصيف ، المتداخل القاري ، التمدن ، غرداية.

Liste des Figures

Chapitre I. Contexte général

| | |
|--|-----|
| Figure I-1 : Limites administrative de la wilaya de Ghardaïa..... | 3 |
| Figure I-2 : <i>Variation des précipitations moyenne annuelle, Station de Noumérat (2007 - 2018).</i> | 5 |
| Figure I-3 : <i>Variation des précipitations moyenne mensuelle, Station de Noumérat (2007-2018)</i> | 6 |
| Figure I-4 : <i>Variation des températures moyennes mensuelle, Station de Noumérat(2007*2018)</i> | 7 |
| Figure I-5 : <i>diagramme Ombrothermique de la station de Noumérat (2007-2018).</i> | 8 |
| Figure I-6 : <i>Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Noumérat (2007-2018)</i> ... | 9 |
| Figure I-7 : <i>Vitesses des vents moyennes enregistrées à la station de Noumérat (2007-2018)</i> | 10 |
| Figure I-8 : <i>Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de C.V.Thornthwaite de la station de Noumérat (2007-2018)</i> | 13 |
| Figure I-9 : <i>Bassins versants de la région du M'Zab (DUBIEF., 1953).</i> | 15 |
| Figure I-10 : <i>Bassins versants et hydrographie de la région du M'Zab (ANRH, 2011)</i> | 15 |
| Figure I-11- <i>Carte géologique du bassin du Sahara (OSS, 2003)</i> | 17 |
| Figure I-12 : <i>Coupe stratigraphique des provinces de la plate-forme saharienne (ALNAFT)</i> | 20. |
| Figure I-13 : <i>carte géologique de l'Algérie</i> | 21 |
| Figure I-14 - <i>Carte géologique de la région de Ghardaïa (Busson, 1952)</i> | 21 |
| Figure I-15 – <i>carte satellite des forages de la zone d'étude</i> | 24 |

Chapitre II. Contexte Géologique

| | |
|---|----|
| Figure II-1 : <i>Carte de la limite du système aquifère SASS (UNESCO/ERSS,1972)</i> | 24 |
| Figure II-2 : <i>Les formations géologiques et les aquifères du bassin du SASS (OSS, 2003)</i> | 25 |
| Figure II-3 : <i>Carte piézométrique du Complexe Terminal (OSS, 2003)</i> | 26 |
| Figure II-4 : <i>Les zones d'affleurement du Continental Intercalaire (OSS, 2003)</i> | 28 |
| Figure II-5 : <i>Coupe hydrogéologique Sud-Ouest Nord-Est du bassin du SASS(ERSS, 1972).</i> | 29 |
| Figure II-6 : <i>Carte piézométrique du Continental Intercalaire (OSS, 2012).</i> | 29 |
| Figure II-7 : <i>Carte piézométrique de la nappe phréatique de la vallée de l'oued M'Zab (ANRH, 2011)</i> | 32 |
| Figure II-8: <i>Carte de la variation du toit du Continental Intercalaire Dans la région de Ghardaïa</i> .. | 33 |
| Figure II-9: <i>Carte de la variation de la profondeur du Continental Intercalaire dans la région de Ghardaïa</i> | 34 |

| | |
|--|----|
| Figure II-10: Coupes litho stratigraphiques des forages albiens(Nord de Ghardaïa) | 36 |
| Figure II-11 : Evolution de l'exploitation des eaux du Continental Intercalaire par usage du 2005 au 2016..... | 37 |

Chapitre III. Matériels et méthodes

| | |
|---|----|
| Figure III-1 : Approche méthodologique d'étude..... | 40 |
|---|----|

Chapitre IV. Caractérisation des eaux souterraines

| | |
|--|----|
| Figure IV-1 : Box plots de pH ‘boites à moustaches’, n Albien = 10..... | 48 |
| Figure IV-2 : Box plots de la conductivité électrique, n Albien = 10..... | 48 |
| Figure IV-3 : pourcentage des éléments chimique dans l'eau de la nappe Albienne..... | 50 |
| Figure IV-4 : Diagramme de Piper pour la nappe Albienne..... | 52 |
| Figure IV-5 : Caractérisation du faciès chimique de la nappe du l'Albien..... | 53 |
| Figure IV-6 : Représentation graphique en ACP de la nappe de l'Albien..... | 54 |
| Figure IV-7 : Représentation graphique des Individus de la nappe de l'Albien.. .. | 55 |
| Figure IV-8 : Le Couple Na/Cl..... | 56 |
| Figure IV-9 : Le Couple Na/C.E. | 57 |
| Figure IV-10 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité. | 59 |
| Figure IV-11 : Qualité de l'eau vis-à-vis le pH..... | 59 |
| Figure IV-12 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Cl..... | 60 |
| Figure IV-13 : Qualité de l'eau vis-à-vis le SO ₄ ⁻² | 60 |
| Figure IV-14 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Cation..... | 60 |
| Figure IV-15 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Mg..... | 61 |
| Figure IV-16 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Na..... | 61 |
| Figure IV-17 : Qualité de l'eau vis-à-vis le K..... | 61 |
| Figure IV-18 : Risque de SAR..... | 63 |

Liste des tableaux

Chapitre I. Contexte général

| | |
|--|----|
| Tableau I-1 : Humidités relatives moyennes enregistrées (Station Noumérat, ONM 2007-2018)... | 9 |
| Tableau I-2 : Vitesses moyennes des vents enregistrées (Station Noumérat, ONM 2007-2018).. | 10 |
| Tableau I-3 : <i>Bilan d'eau de la station de Noumérat (2007-2018)</i> | 12 |

Chapitre II. Cadre hydrogéologique

| | |
|---|----|
| Tableau II-1 : Evolution du volume d'exploitation des eaux du Continental Intercalaire par usage (ANRH,2016)..... | 37 |
|---|----|

Chapitre IV. Caractérisation des eaux souterraines

| | |
|--|----|
| Tableau IV-1 : <i>Calcul de la minéralisation à partir de la conductivité mesurée à 20°C</i> (Rejsek, 2002). | 49 |
| Tableau IV-2 : Variations des concentrations des cations selon | 51 |
| Tableau IV-3 : Variations des concentrations des anions | 51 |
| Tableau IV-4 : Matrice de corrélation des éléments physico-chimiques..... | 55 |
| Tableau IV-5 : Normes Algérienne de potabilité des eaux (Journal officiel, 2011). | 58 |
| Tableau IV-6 : Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation..... | 63 |

Liste des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics du Sud.

ADE : l'Algérienne Des eaux.

ONM : Office Nationale de Météorologie.

CI : Nappe Continental Intercalaire.

CT : Nappe Complexe Terminal.

Phr : Nappe phréatique.

C.E : Conductivité électrique.

ACP : Analyse en Composantes Principales.

SAR : Sodium Adsorption Ratio.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 1

Chapitre I. Contexte général

| | |
|--|----|
| I.1. Cadre Géographique | 3 |
| I.1.1. Caractéristiques de la région | 4 |
| I.2. Cadre Climatique | 4 |
| I.2.1. Les précipitations | 5 |
| I.2.1.1. Précipitation annuelles | 5 |
| I.2.1.2. Précipitation moyenne mensuelle..... | 5 |
| I.2.2. Les températures | 6 |
| I.2.3. Diagramme pluviométrique (P=2T) | 7 |
| I.2.4. L'humidité relative de l'air | 8 |
| I.2.5. Les vents | 9 |
| I.2.6. Notion du bilan d'eau | 10 |
| I.2.6.1 Etude de l'évapotranspiration | 11 |
| I.2.6.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) | 11 |
| I.2.6.3 Calcul du ruissellement et d'infiltration | 13 |
| I.3 Cadre Hydrologique..... | 14 |
| I.3.1. Oued Zegrir | 16 |
| I.3.2. Oued N'sa | 16 |
| I.3.3. Oued M'Zab..... | 16 |
| I.3.4. Oued Metlili | 16 |
| I.4. Cadre géologique | 16 |
| I.4.1. Cadre géologique régionale | 17 |
| I.4.1.1. La plate-forme saharienne..... | 18 |
| I.4.1.2. Aperçu lithostratigraphique..... | 18 |

| | |
|--|----|
| I.4.2. Cadre géologique locale | 21 |
| I.4.2.1. Albien..... | 22 |
| I.4.2.2. Cénomaniens..... | 22 |
| I.4.2.3. Turonien | 22 |
| I.4.2.4 Sénonien..... | 20 |
| I.4.2.4.1 <i>Sénonien inférieur</i> | 20 |
| I.4.2.4.2 Sénonien supérieur..... | 22 |
| I.4.2.5. Miopliocène..... | 22 |
| I.4.2.6. Quaternaire..... | 23 |
| I.5. Localisation des forages de la zone d'étude | 23 |
| I.6. Conclusion..... | 24 |

Chapitre II. Contexte Géologique

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 24 |
| II.2. Définition du système aquifère (SASS)..... | 24 |
| II.3. Le complexe terminal (CT)..... | 25 |
| II.4. Le continental intercalaire (CI) | 26 |
| II.4.1. Limites du Continental Intercalaire | 27 |
| II.4.2 Géométrie du Continental Intercalaire | 28 |
| II.4.3. Piézométrie et zones d'alimentation du CI | 28 |
| II.4.4. La réserve du Continental Intercalaire | 30 |
| II.4.5. Exploitation du Continental Intercalaire | 30 |
| II.5. Le système aquifère local..... | 31 |
| II.5.1. Les nappes superficielles (phréatiques)..... | 31 |
| II.5.1.1 La nappe du Sénonien carbonaté | 31 |
| II.5.1.2 La nappe du Turonien | 31 |
| II.5.1.3 Les nappes alluvionnaires | 31 |
| II.5.2. Alimentation des nappes superficielles..... | 31 |
| II.5.3. Piézométrie des nappes phréatiques..... | 32 |
| II.6. Le Continental Intercalaire dans la région de Ghardaïa..... | 33 |
| II.6.1. Le toit du CI (Albien) | 33 |
| II.6.2. Profondeur du CI (Albien) | 34 |
| II.6.3. Interprétation des coupes lithologiques du CI..... | 35 |
| II.6.3.1 Zone de Ghardaïa..... | 35 |
| II.6.3.2. Exploitation du CI dans la région de Ghardaïa..... | 36 |

| | |
|------------------------|----|
| II.7. conclusion | 38 |
|------------------------|----|

Chapitre III. Contexte hydrogéologique

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction | 40 |
| III.2. Approche méthodologique | 40 |
| III.3. Protocole d'échantillonnage | 41 |
| III.4. Méthodes d'étude | 41 |
| III.4.1. Mesure in situ | 41 |
| III.4.2. Méthode d'analyse au laboratoire | 42 |
| III.4.2.1. Les paramètres physiques | 42 |
| III.4.2.2. les paramètres chimiques | 42 |
| III.4.2.2.1 La dureté totale (TH) | 42 |
| III.4.2.2.2 Calcium (Ca^{+2}) et Magnésium (Mg^{+2}) | 42 |
| III.4.2.2.3 Titre alcalimétrique complet (TAC) | 42 |
| III.4.2.2.4. Les Chlorures (Cl^-) | 42 |
| III.4.2.2.5 Sodium Na^+ et de Potassium K^+ | 43 |
| III.4.2.2.6 Sulfates (SO_4^{-2}) | 43 |
| III.4.2.2.7 Nitrates (NO_3^{-2}) | 43 |
| III.5. Matériels et mode opératoire | 43 |
| III.6. Traitement des données hydrochimiques | 44 |
| III.6.1. Précision des mesures | 45 |
| III.6.2. Méthodes d'analyse graphique | 45 |
| III.6.2.1 Diagrammes | 45 |
| III.6.2.1.1 Diagramme de piper | 45 |
| III.6.2.2. XLSTAT | 46 |

Chapitre IV. Matériels et méthodes

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction | 47 |
| IV.2. Caractéristiques physiques des eaux | 47 |
| IV.2.1. pH des eaux | 47 |
| IV.2.2. La conductivité électrique | 48 |
| IV.2.3. La minéralisation totale | 49 |
| IV.3. Caractérisation chimique des eaux | 50 |
| IV.3.1. Les éléments majeurs | 50 |

| | |
|--|----|
| IV.3.1.1. Les cations..... | 50 |
| IV.3.1.2. Les anions..... | 51 |
| IV.4. Analyse en Composantes Principales..... | 53 |
| IV.4.1. ACP des eaux de la nappe Albienne | 53 |
| IV.5. Corrélations entre les éléments majeurs | 55 |
| IV.6. Potabilité des eaux (normes et qualité) | 57 |
| IV.6.1. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine | 58 |
| IV.6.1.1. Les éléments mesurés in-situ..... | 59 |
| IV.6.1.2. Les anions..... | 59 |
| IV.6.1.3. Les cations..... | 60 |
| IV.6.2. Qualité des eaux destinées à l'irrigation | 62 |
| IV.6.2.1. Les risques du (SAR)..... | 62 |
| IV.7. Conclusion..... | 64 |
| Conclusion générale..... | 65 |
| Références bibliographiques | 67 |

Introduction générale

Introduction Générale

Dans le monde, les eaux souterraines représentent 8 à 10 millions de km³ ce qui correspond 98 à 99% des réserves d'eau douce (moins de 1% pour les lacs), ce qui ne correspond néanmoins qu'à moins de 1% du volume de l'hydrosphère. Globalement, les 2/3 des prélèvements d'eau souterraine se font pour l'irrigation agricole, 1/4 est consacré à l'alimentation en eau potable (consommation humaine) et 1/10 aux industries ou aux extractions minières. La situation est évidemment très variable selon les différentes parties du monde (MARGAT, 2008).

L'aquifère du continentale intercalaire (CI) est le plus important aquifère de l'Afrique du Nord. C'est une structure géologique unique caractérisée par la présence de sable et de grès avec une épaisseur significative capable de stocker d'énormes quantités d'eau.

La zone de Ghardaïa est située au-dessus de cet aquifère qui constitue la principale source d'eau potable et d'irrigation dans la région. La demande croissante sur ces ressources en eau souterraines nécessite l'adoption d'une étude complète de cette aquifère afin d'assurer leur durabilité, d'éviter les risques de leur épuisement et la dégradation de leur qualité.

L'objectif de notre travail est une contribution à l'étude de la variation des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe de continentale intercalaire à travers le territoire de la région de Ghardaïa dans l'objectif d'une gestion rationnelle des ressources en eau dans la région.

A partir de l'examen des résultats des analyse des eaux souterrains de la nappe continentale intercalaire de la région de Ghardaïa . Nous essayons de répondre à la question suivante :

Quelle est la qualité des eaux souterraines conformément aux normes algériennes et internationales ?

Notre travail a été structuré en quatre chapitres :

Chapitre 1. Généralités sur la zone étudiée : cette partie présente la situation géographique, le contexte climatique le cadre hydrologique, la géologie régionale et la géologie locale, de la région de Ghardaïa.

Chapitre 2. Etude hydrogéologique : ce chapitre a été consacré à une étude hydrogéologique de la région de Ghardaia, par l'établissement des coupes

lithostratigraphiques afin de comprendre la géométrie des réservoirs et l'extension de différents niveaux géologique.

Chapitre 3. Matériels et méthodes Le troisième chapitre est consacré au mode d'échantillonnage, aux méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines ainsi que le traitement des résultats et outil informatique.

Chapitre 4. Étude hydrochimique : dans cette partie nous avons représenté les résultats des analyses physico-chimiques, les faciès chimiques. Nous avons également évalué la qualité des eaux vis-à-vis à la potabilité et à l'usage agricole, et en fin nous avons étudié l'origine de la minéralisation des eaux de continental intercalaire, en utilisant les méthodes statistiques.

A l'issue de ce travail nous présentons une **Conclusion générale** et **des recommandations** faisant sortir les résultats de l'étude et à prendre en considération.

Première partie

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I

CADRE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE, HYDROLOGIQUE ET GEOLOGIQUE

I.1. Cadre Géographique

La wilaya de Ghardaïa est située au centre de la partie du nord de Sahara à 600 Km au sud d’Alger, occupant une position centrale reliant les Hauts Plateaux et le Sahara. Ses coordonnées géographiques sont 3° 40’ de longitude Est et 32° 29’ de latitude Nord et son altitude est d’approximativement 530 m. (A.N.R.H., 2011), limitée entre :

- Au Nord par la wilaya de Laghouat (200 Km) ;
- Au Nord Est par la wilaya de Djelfa (300 Km) ;
- A l’Est par la wilaya D’Ouargla (200 Km) ;
- Au Sud par la wilaya de Tamanrasset (1470 Km) ;
- Au Sud- Ouest par la wilaya D’Adrar (400 Km) ;
- A l’Ouest par la wilaya Del -Bayadh (350 Km). (fig. I -1).

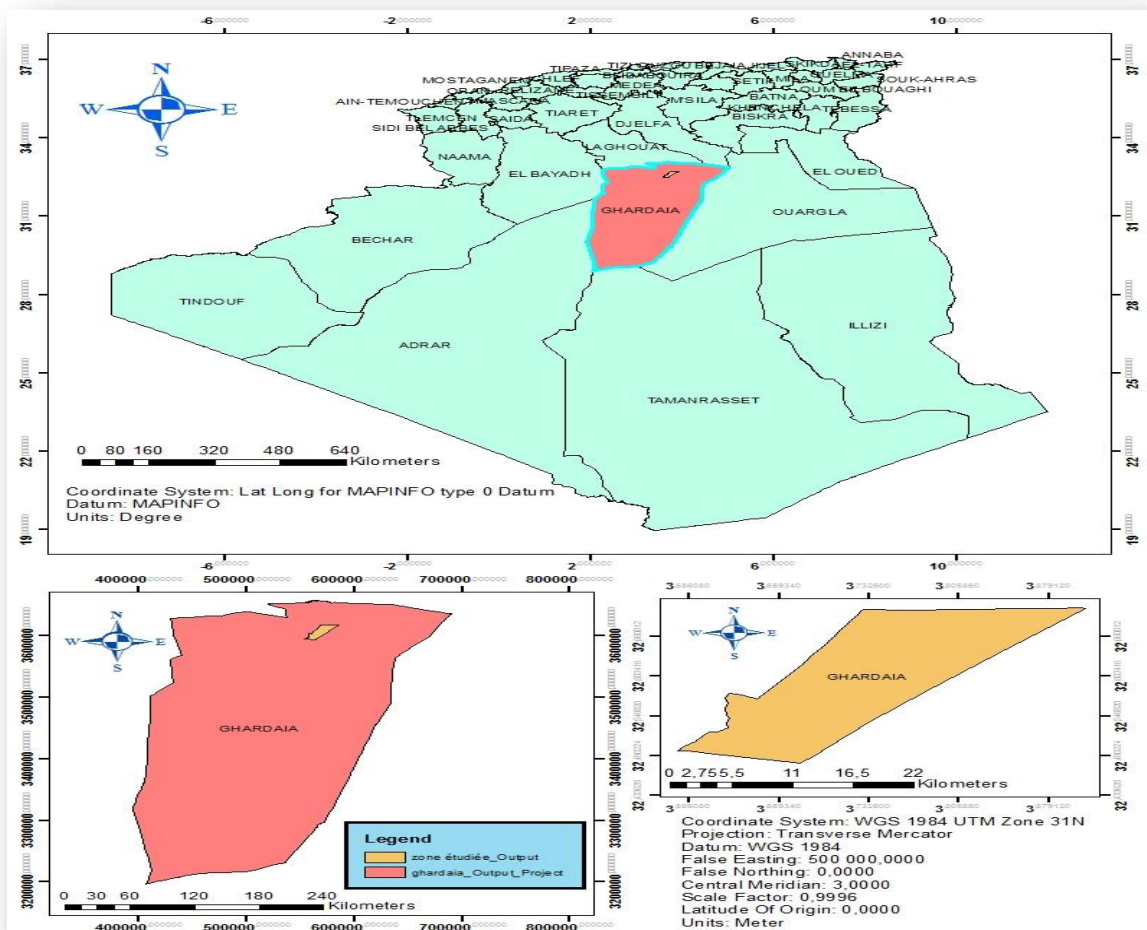


Figure I-1 : Limites administrative de la wilaya de Ghardaïa

Ses coordonnées géographiques sont : entre une longitude de : 3° 40' 43.62" Est, une latitude de 32° 30' 37.83" au Nord.

I.1.1 Caractéristiques de la région

Les Escarpements rocheux et les oasis déterminent le paysage dans lequel sont localisées les villes de la pentapole du M'Zab et autour duquel gravitent d'autres oasis (Berriane, Guerrara, Zelfana, Metlili et beaucoup plus éloignée au Sud El-Menia).

L'appartenance au milieu saharien et aride contrait fortement l'occupation de l'espace. L'implantation des villes s'est faite par rapport aux grands axes de circulation et aux oasis et leur développement a été étroitement lié aux conditions naturelles (eau, climat, relief...).

Le couvert végétal est pauvre. La structure et la nature du sol ne sont pas favorables à l'existence d'une flore naturelle riche. La verdure est plutôt créée par l'homme. Cependant la région n'est pas dépourvue de végétation naturelle ; elle est rencontrée dans les lits d'oueds.

C'est une région très active où le secteur tertiaire est prépondérant avec le commerce, le tourisme et l'artisanat ainsi que l'agriculture et l'industrie.

I.2. Cadre Climatique

Par son emplacement géographique, l'Algérie doter de trois zones climatiques distinctes ; la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

La région de Ghardaïa fait partie de la troisième zone, elle est caractérisée par des hivers froid et courts, des étés longs, chaud et secs.

Dans ce qui suit nous présentons un aperçu hydro climatologique, pour nous permet d'établir le bilan hydrique et les liaisons existant entre les différents paramètres climatologiques caractérisant la région.

Pour cette étude, nous avons récoltés les données climatiques de la station de Noumérat (ONM-Ghardaïa), sur une série allant du 2007-2018. La station est située près de l'aéroport de Ghardaïa ses coordonnées géographiques sont :

| Station Noumérat | Coordonnées | | |
|------------------|--------------|---------------|----------|
| | Latitude (N) | Longitude (E) | Altitude |
| | 32°40' | 3°81' | 450 |

I.2.1. Les précipitations

Les précipitations représentent le paramètre climatique le plus important, notamment dans les zones arides et semi-arides. Elles constituent également le facteur essentiel du régime hydrologique.

Comme dans la majeure partie des régions sahariennes, les précipitations à Ghardaia, sont marquées par leur caractère faible et irrégulier.

I.2.1.1. Précipitation annuelles

Sur un cycle de onze ans (2007-2018), nous allons examiner la variation des précipitations observées

L'étude des variations des précipitations en fonction du temps pour la station de Noumérat montre une précipitation moyenne annuelle de 68,78 mm (fig. I.2).

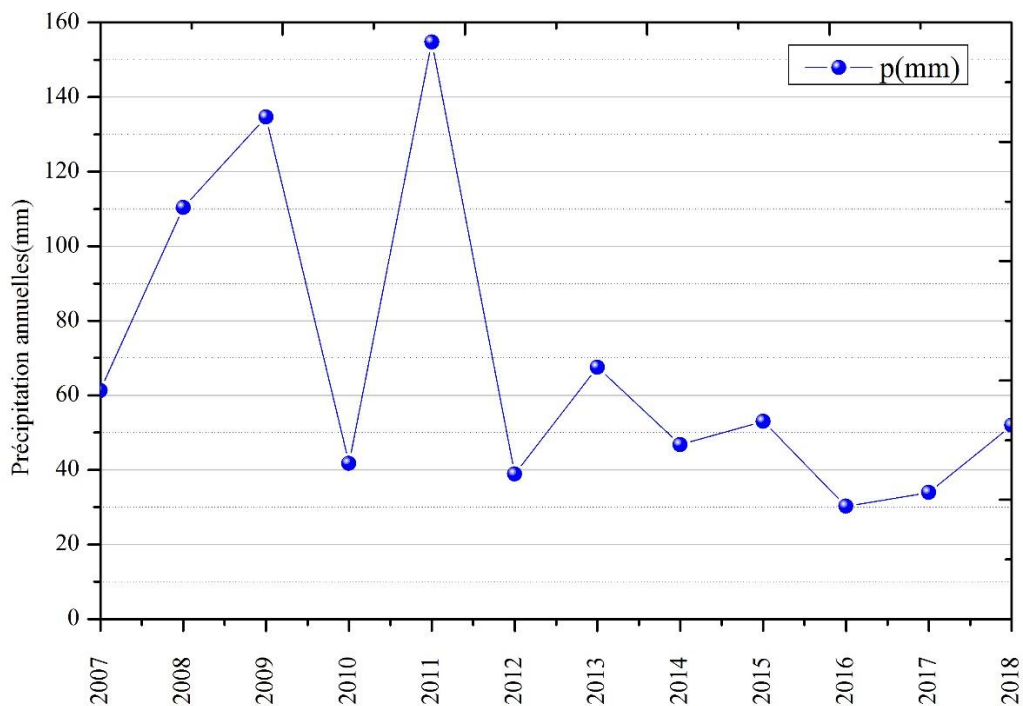


Figure I-2: Variation des précipitations moyenne annuelle, Station de Noumérat (2007 - 2018).

I.2.1.2. Précipitation moyenne mensuelle

La représentation des moyennes mensuelles des relevés pluviométriques sur la période d'observation (fig. I-3) nous amènons aux remarques suivantes :

- la moins arrosé est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle égale à 1,5 mm ;
- Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant le mois de septembre et avec respectivement 20,1 et 9,9 mm.

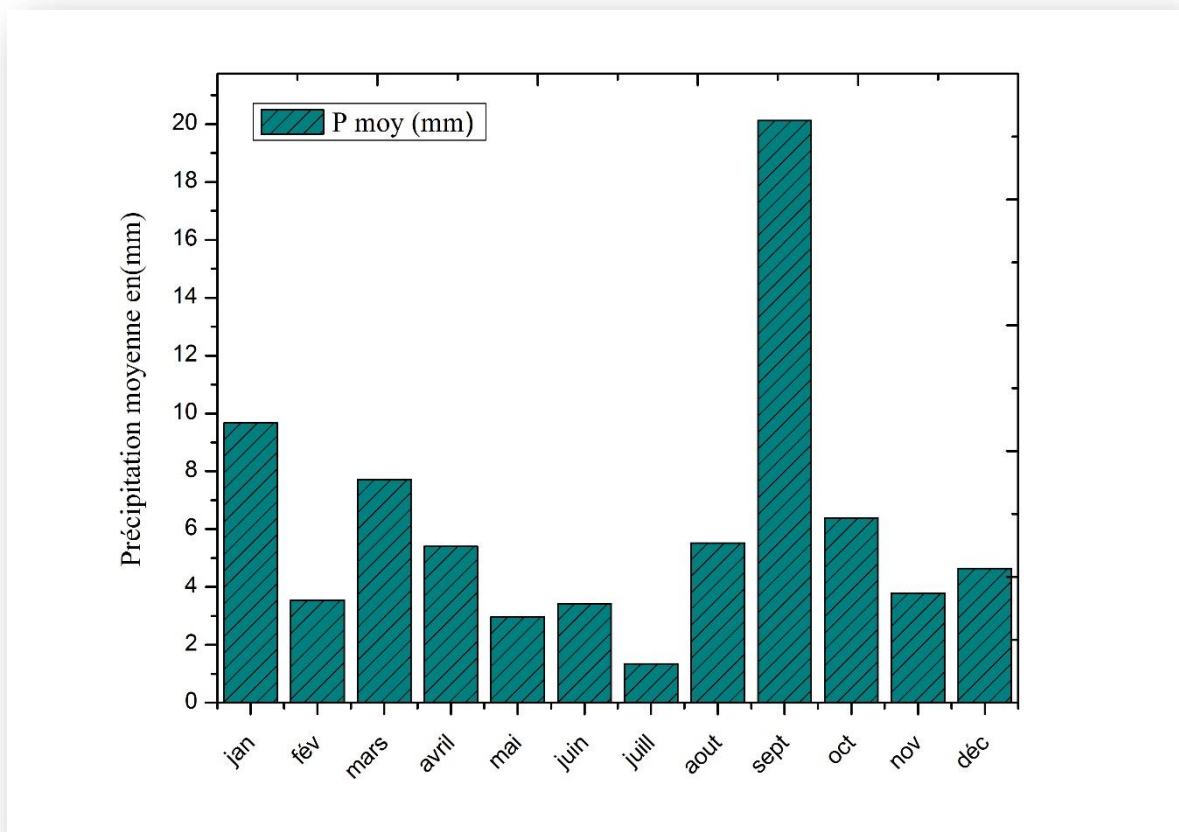


Figure I-3: Variation des précipitations moyenne mensuelle, Station de Noumerat (2007 - 2018).

I.2.2. Les températures

Le paramètre température est indispensable à la climatologie, car il est très important dans les problèmes d'évaporation, d'évapotranspiration de toute la région.

Les données des températures de l'air recueillies à la station de Noumerat, montres que le climat de Ghardaia se caractérise par des températures très élevées, avec 35,3 °C de température maximal en moyenne et 11 °C de température minimal en moyenne.

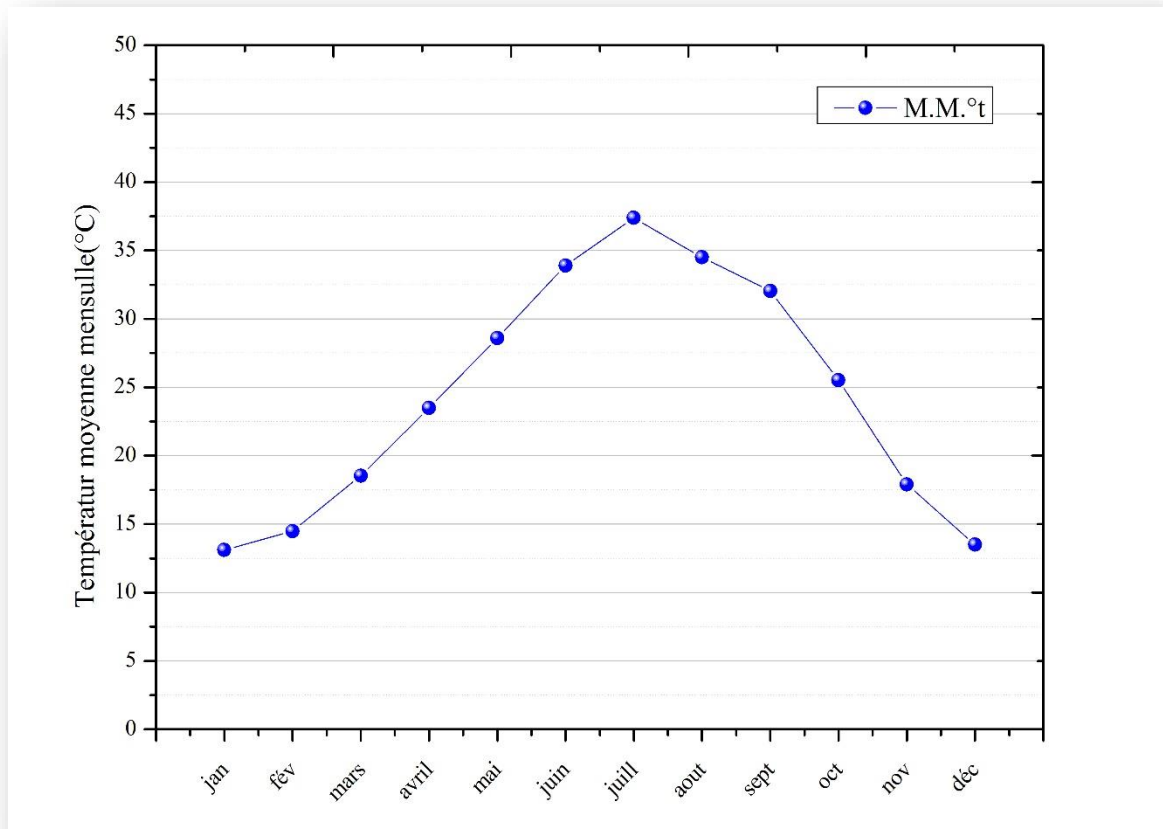


Figure I-4: Variation des températures moyennes mensuelle, Station de Noumérat (2007 - 2018).

I.2.3. Diagramme pluviométrique ($P=2T$)

L'indice Ombrothermique de Gausson (1952) a franchi le temps à cause de sa simplicité et de son efficacité, pour Gausson un mois est considéré comme sec si le quotient des précipitations mensuelles P exprimé en mm, par la température moyenne T exprimé en °C est inférieur à 2, et la représentation sur un même graphique des températures et des précipitations moyennes mensuelles avec en abscisse les mois permet d'obtenir le diagramme Ombrothermique qui mettent immédiatement en évidence les périodes sèches et les périodes pluvieuses (GUYOT, 1997), et les échelles prises en ordonnées sont telles que 1° C correspond à 2 mm de précipitations, donc on a une période sèche chaque fois que la courbe des températures passe au-dessus la courbe des précipitations (GUYOT, 1997) ; cette période peut être facilement calculée (HUFTY, 2001).

Selon le diagramme (fig I-5) on a Un période dans la région, période sèche dans tous saison mais par pourcentage différence. La saison Automne est en peu sèche par rapport les autres saisons.

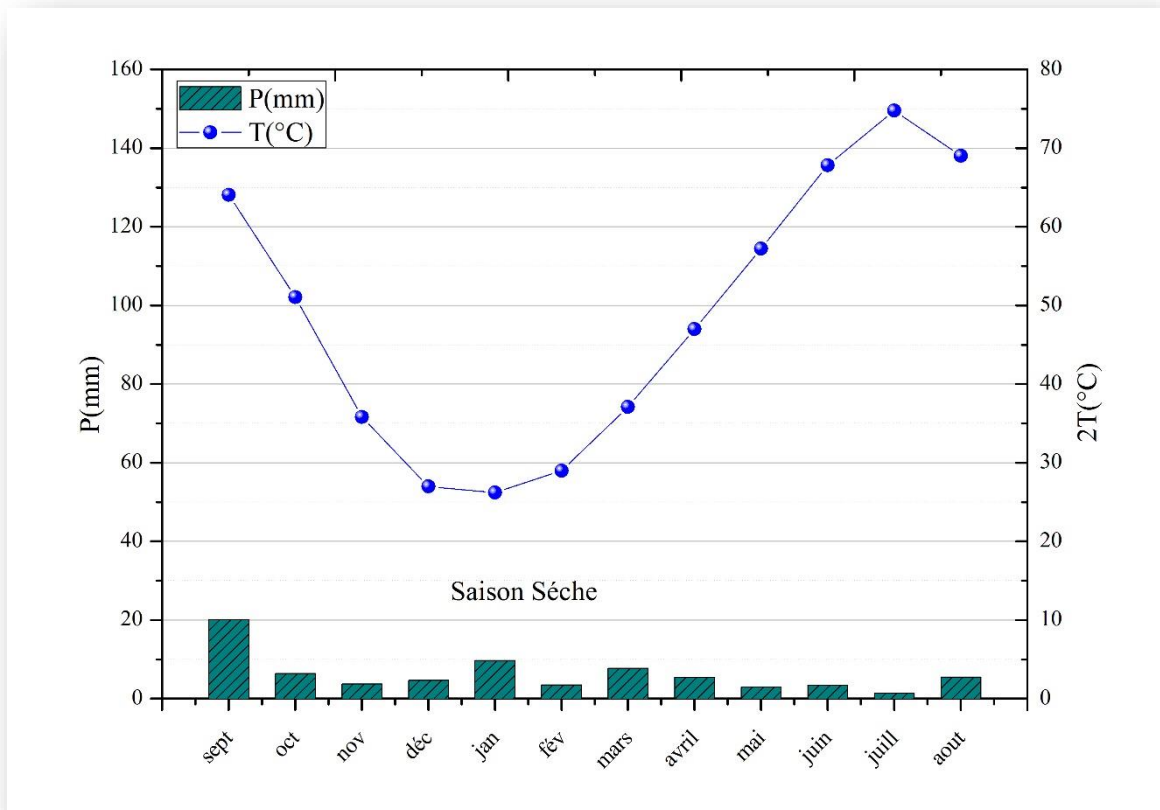


Figure I-5: Diagramme ombro-thermique à la station de Noumérat (2007-2018)

I.2.4. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, correspond au rapport de pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa) sur la pression de vapeur saturante (Pr) à la même température.

Ce paramètre est relativement faible dans la zone d'étude ; la moyenne est de 42,02 %. Cette faiblesse s'explique par l'aridité du climat et la concentration des masses d'air chaudes du Sahara. Les valeurs moyennes mensuelles sont insérées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.1 : Humidités relatives moyennes enregistrées (Station Noumérat, ONM 2007-2018).

| Mois | Jan | Fév. | Mar | Avr | Mai | Jun | Juil. | Aout | Sep | Oct. | Nov. | Déc. | Moy |
|------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H% | 51,18 | 46,63 | 37,72 | 36 | 30,72 | 27 | 21,72 | 30,8 | 40,18 | 47,37 | 53,27 | 60,27 | 42,02 |

Cependant la période hivernale est relativement humide (37,72 – 60,27 %) (fig.I-6). En été les fortes températures dissipent la vapeur d'eau atmosphérique, ce qui explique les faibles valeurs de l'humidité (< 30%).

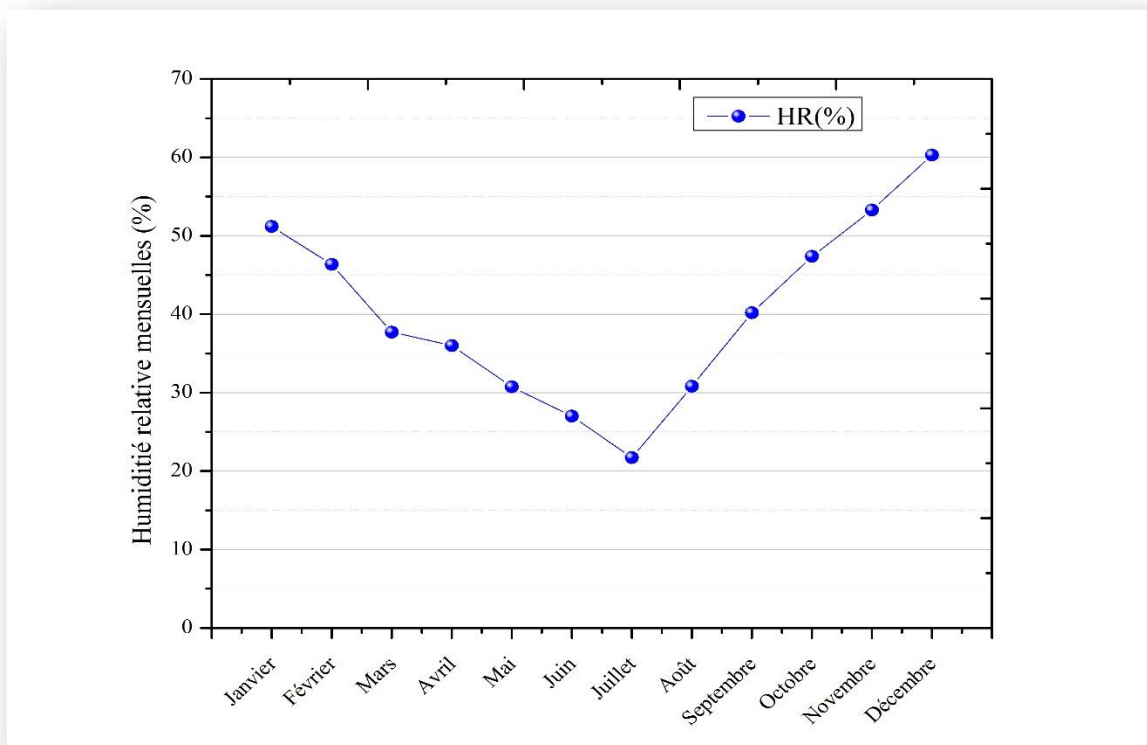


Figure I-6: Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Noumérat (2007-2018).

I.2.5. Les vents

C'est un agent climatique influent directement sur le climat d'une région, en raison des dégâts qu'il cause, notamment en agriculture.

Ces vents soufflent essentiellement durant les mois : Mars, Avril, Mai, Juins, Juillet et septembre (tableau I-2), avec une intensité moyenne de 21,18 à 23,8 km/h, ils occasionnent des gênes importantes en transportant des quantités considérables de sable et en favorisant les phénomènes de désertification. En outre, ils contribuent d'une manière notable à l'assèchement de l'atmosphère (Dubief, 1963).

Tableau I.2 : Vitesses moyennes des vents enregistrées (Station Noumérat, ONM 2007-2018).

| Mois | Jan | Fév. | Mar | Avr | Mai | Jun | Juil. | Aout | Sep | Oct. | Nov. | Déc. | Moy |
|---------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|
| V(km/h) | 20,9 | 20,5 | 23,8 | 23,3 | 23,9 | 22,5 | 21,18 | 22,8 | 23,6 | 19,72 | 18,36 | 18,2 | 21,56 |

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année avec des vitesses moyennes mensuelles de 21,56 m/s environ (fig.I-7); alors que les vitesses maximales sont enregistrées aux mois de Mars et Septembre (respectivement 23,8 et 23,6 km/h).

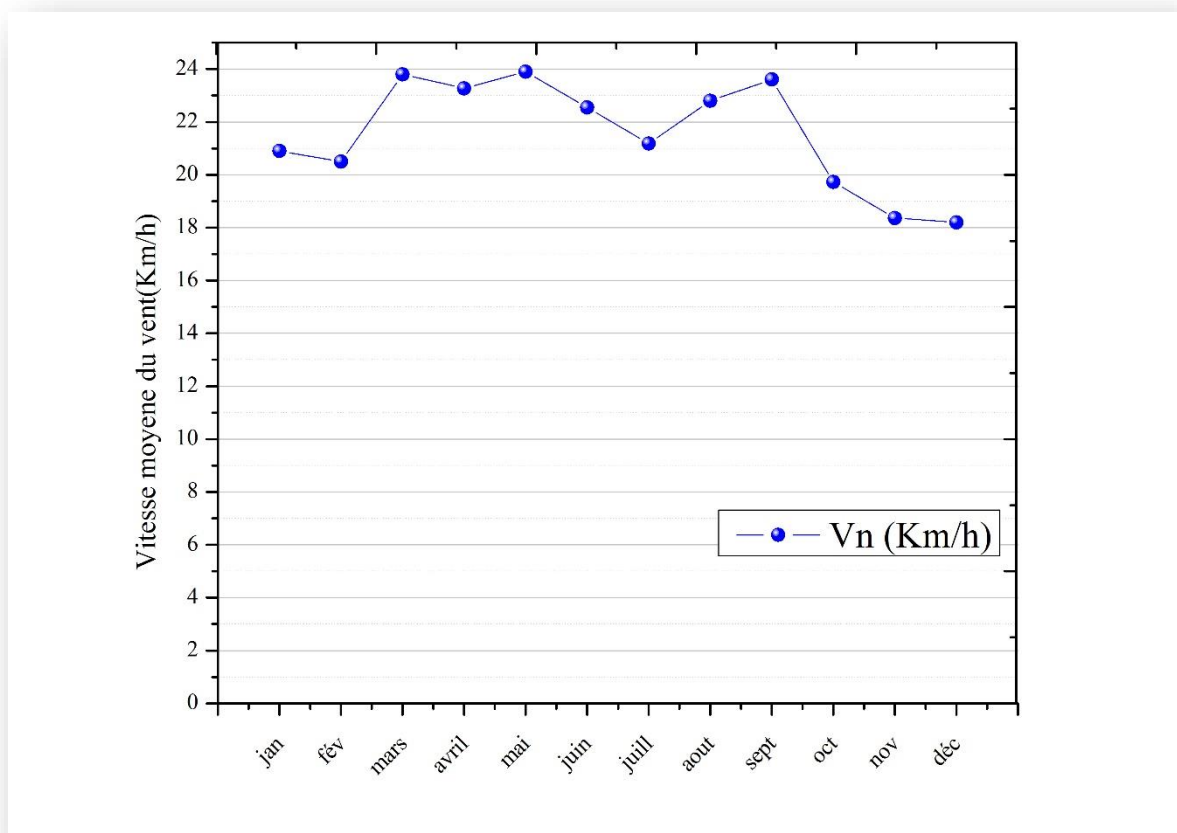


Figure I-7: Vitesses des vents moyennes enregistrées à la station de Noumérat (2007-2018).

I.2.6. Notion du bilan d'eau

L'établissement du bilan hydrique a pour but de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, DA, EXC), qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrologique (Laborde, 1982).

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est totale, il y a un surplus d'eau accompagné généralement par un écoulement et dès que la RFU diminue, il y a un épuisement du stock au point où la RFU sera complètement vide, il y aura un déficit agricole (DA)

I.2.6.1. Etude de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration constitue l'élément le plus important du bilan hydrologique après les précipitations, représentée par une quantité d'eau et restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur.

L'évapotranspiration englobe l'ensemble des phénomènes d'évaporation (physique) et transpiration (biologique).

Le phénomène d'évapotranspiration réelle et potentielle peut être mesuré directement sur le terrain à partir d'un bac d'évaporation ou d'un évaporomètre, grâce également à des lysimètres, ou calculer par des formules empiriques telles que celle de **Turc** ou de **Thornthwaite** ...etc.

I.2.6.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle s'identifie au déficit d'écoulement et peut se calculer à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie et la température. L'évapotranspiration réelle est liée à la quantité de pluie tombée dans le bassin et de la réserve maximale en eau du sol.

Formule de Turc

$$ETR = P / (0.9 + P^2/L^2)^{1/2} \quad \text{où} \quad L = 300 + 25t + 0.05t^3$$

Avec :

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm

P : Précipitation annuelle en mm

T : Température moyenne annuelle en °C.

L : Pouvoir évaporant.

Tableau I.3 : Bilan d'eau de la station de Noumérat (2007-2018).

| Mois | T _p (°C) | i | ETP (mm) | P _r (mm) | BH (mm) | ETR (mm) | Def (mm) | RFU (mm) | Exc (mm) |
|-------------|------------------------|-------|-------------|------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S | 32.03 | 16.6 | 100 | 20.13 | -79.87 | 20.13 | -79.87 | 0 | 0 |
| O | 25.53 | 11.8 | 90 | 6.39 | -83.61 | 6.39 | -83.61 | 0 | 0 |
| N | 17.91 | 6.9 | 30 | 3.78 | -26.22 | 3.78 | -26.22 | 0 | 0 |
| D | 13.49 | 4.5 | 10 | 4.64 | -5.36 | 4.64 | -5.36 | 0 | 0 |
| J | 13.1 | 4.3 | 20 | 9.67 | -10.33 | 9.67 | -10.33 | 0 | 0 |
| F | 14.49 | 5.0 | 45 | 3.54 | -41.46 | 3.54 | -41.46 | 0 | 0 |
| M | 18.54 | 7.3 | 50 | 7.72 | -42.28 | 7.72 | -42.28 | 0 | 0 |
| A | 23.49 | 10.4 | 80 | 5.4 | -74.6 | 5.4 | -74.6 | 0 | 0 |
| M | 28.6 | 14.0 | 100 | 2.96 | -97.04 | 2.96 | -97.04 | 0 | 0 |
| J | 33.9 | 18.1 | 150 | 3.43 | -146.57 | 3.43 | -146.57 | 0 | 0 |
| J | 37.38 | 21.0 | 120 | 1.35 | -118.65 | 1.35 | -118.65 | 0 | 0 |
| A | 34.5 | 18.6 | 180 | 5.52 | -174.48 | 5.52 | -174.48 | 0 | 0 |
| Σ ou MOY | 24.41 | 138.6 | 975 | 74.53 | -900.47 | 74.53 | -900.74 | 0 | 0 |

On remarque de cet tableau (I.3) : $P < ETP$ dans ce cas puisera dans les réserve du sol jusqu'à ce que l'ETR sera à égale de précipitation annuelle (24.41mm/an) donc (ETR=P).

Le déficit agricole (DA) est existe à toute l'année, notamment la saison d'Eté, il est diminué jus qu'a la saison Hiver ou le déficit est très faible.

On a aussi l'excédent égale RFU (00) c'est-à-dire que la précipitation plus faible et température plus élevée.

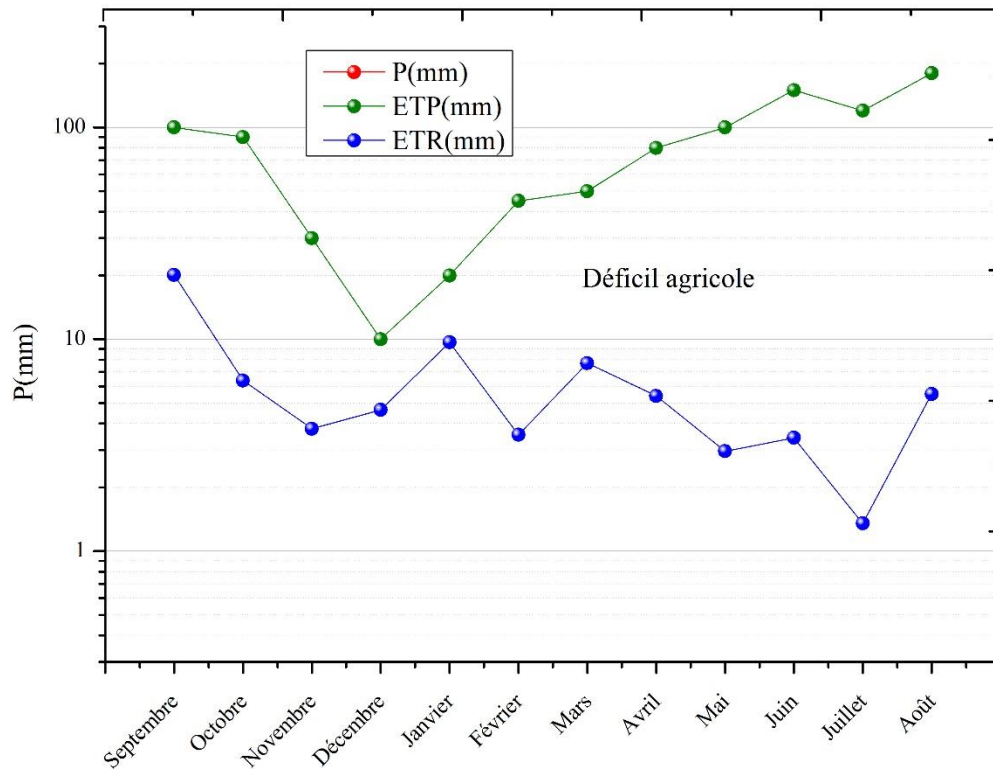


Figure I-8: Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de C.V.Thornthwaite de la station de Noumérat (2007-2018).

I.2.6.3. Calcul du ruissellement et d'infiltration

L'infiltration, correspond au phénomène de passage de l'eau à travers la surface du sol, de sa pénétration dans le sol et de son mouvement descendant dans la zone non saturée du sous-sol.

$$R = \left[\frac{P^3}{3[ETP]^2} \right]$$

Avec : **R** : Ruissellement en (mm)

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle en (mm).

NB : Cette formule n'est valable que pour des valeurs de précipitations moyennes annuelles ne dépassent pas les 600 mm

Si la précipitation P est supérieure à 600mm, on utilise la formule suivante : $R = P^3 / 3$

A l'station de Ghardaïa :

$P=74.53$ mm, $ETP=975$ mm $\Rightarrow R=0.14$ mm soit 0.18% des précipitation.

L'infiltration est la quantité d'eau franchissant la surface du sol, elle renouvelle les stocks d'eau souterraine et entretient le débit de l'écoulement souterrain et sortant après circulation dans les formations hydrogéologiques perméables du sous – sol.

La formule de bilan globale : $P = R + I + ETR$

On aura : $I = P - R - ETR$

Avec : P : précipitation moyenne mensuelle en mm

R : Ruissellement en mm

I : l'infiltration en mm

ETR : évapotranspiration réelle calculée selon la formule de Thornthwaite en mm .

I.3. Cadre Hydrologique

La région de Ghardaïa est jalonnée par un grand réseau d'oueds dont les principaux sont : Oued Sebseb; Oued Metlili; Oued M'zab; Oued N'sa et Oued Zegrir. L'ensemble de ces oueds constitue le bassin versant de la dorsale du M'Zab (Fig I-9, Fig I-10).

Ils drainent en grande partie les eaux de la dorsale de l'Ouest vers l'Est, leur écoulement est sporadique, il se manifeste à la suite des averses orageuses que connaît la région (DUBIEF 1953).

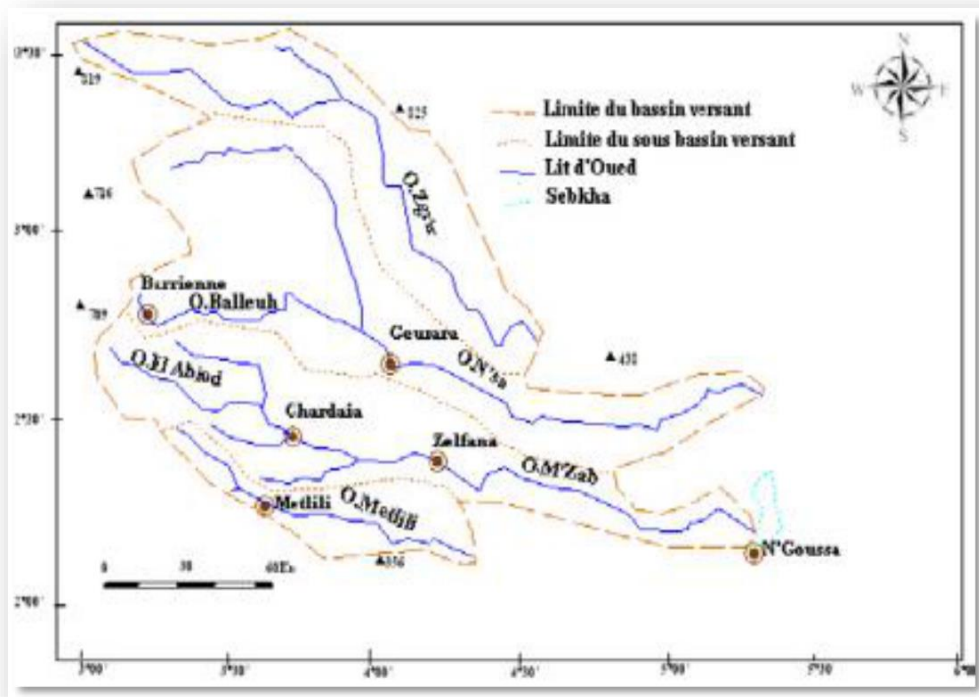


Figure I-9: Bassins versants de la région du M'Zab (DUBIEF., 1953).

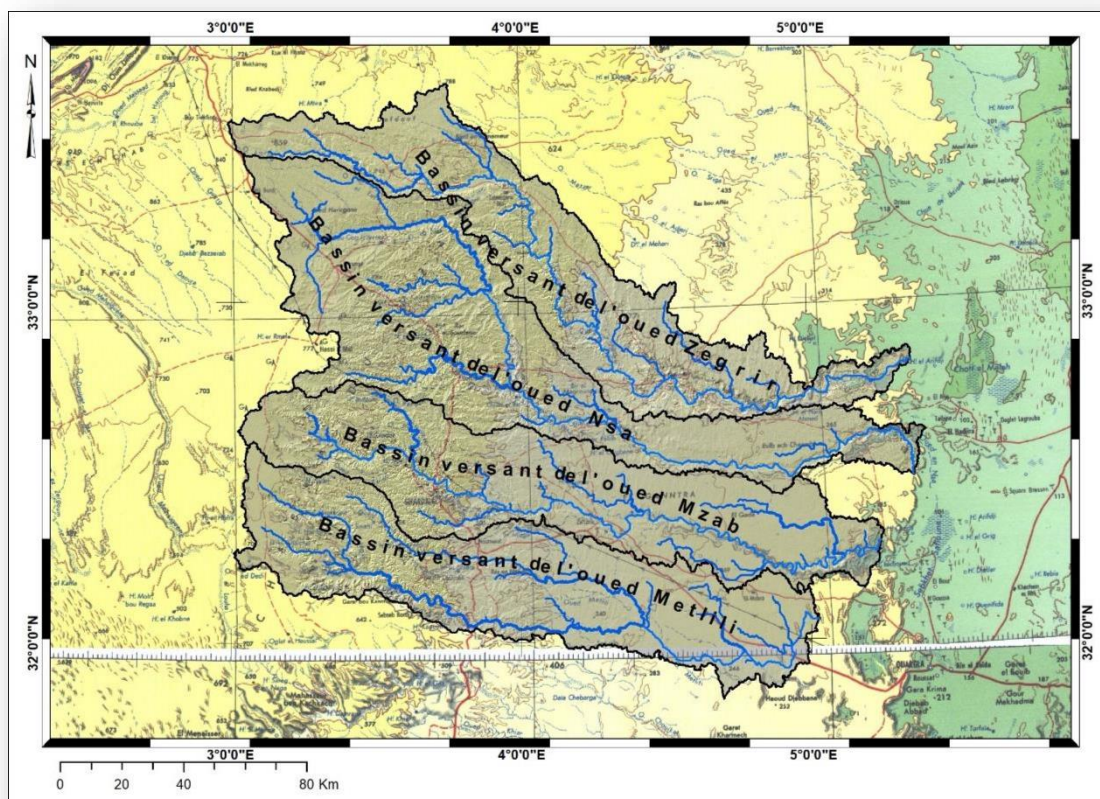


Figure I-10- Bassins versants et hydrographie de la région du M'Zab (ANRH, 2011).

I.3.1. Oued Zegrir

Limité à la hauteur de Guerrara, ce bassin couvre une superficie de 4100 km². Situé en majeure partie sur les affleurements du Miocène et du Pliocène continentaux, il est parsemé de nombreuses daïas, parfois drainées par des oueds (OULD BABA SY 2005).

I.3.2. Oued N'sa

Le bassin du N'sa, présente une superficie de 7800 km² environ ; les limites orientales sont peu précises par suite de la nature géologique de la région. L'artère maîtresse, longue de 320 km, part de la région de Tilrempt, vers 750 m d'altitude, pour aboutir à la Sebkret Safioune, au N de Ouargla, à la cote 107m (OULD BABA SY 2005).

I.3.3. Oued M'Zab

L'oued M'Zab est limité par deux grands oueds : Oued N 'Sa au Nord et Oued Metlili au Sud. La superficie du bassin du M'Zab est de 5000 km environ (DUBIEF 1953). Ses contours sont imprécis dans la partie orientale. L'oued M'Zab coule sensiblement d'Ouest en Est sur 320 km de la région de Botma-Rouila, à 750 m d'altitude (où il prend sa source sous le nom d'Oued El-Abiod), à la Sebkhet Safioune qui est à la cote 107 m avec une pente assez forte entre Ghardaïa et Bounoura (OULD BABA SY 2005).

I.3.4. Oued Metlili

Le bassin du Metlili, limité à l'oasis du même nom, ne dépasse pas 400 km². Il est mal délimité dans sa partie orientale, appartenant au domaine du Pliocène continental, par suite des caractéristiques très spéciales de cet étage géologique sous cette latitude.

D'une longueur totale de 214 km, l'Oued de Metlili est barré à 134 km de son origine par le cordon dunaire de l'Areg Rhanem. Plus en aval, son lit est parsemé de daïas qui absorbent une partie des eaux de ruissellement dont la plus importante est la Daïa Ghemta (OULD BABA SY 2005).

I.4. Cadre géologique

L'étude géologique d'une région est indispensable pour pouvoir déterminer les formations susceptibles de contenir des nappes aquifères à partir de leur lithologie.

De nombreux auteurs qui ont publié des travaux sur la géologie du Sahara septentrional (Glangeaud, 1932, Conrad., 1969, Busson;1970, Fabre, 1976). Nous pensons

que ces travaux assez cohérents peuvent nous donner une conclusion sur la géologie de la région d'étude.

I.4.1. Cadre géologique régionale

Au Sahara algérien, les travaux de (Busson 1972 ; FABRE 1976) constituent les références de base pour une bonne compréhension de la géologie du Sahara algérien. Toutefois, un complément d'information est recherché dans les différentes cartes géologiques couvrant cette région (OSS 2003). Des études récentes sont réalisés par SONATRACH et ENAGEO, ces auteurs ont travaillé et publiés des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, surtout dans le cadre de la géologie pétrolière.

La région de Ghardaïa fait partie du bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est Septentrional. De la base du bassin au sommet, les forages de reconnaissances ont mis en évidence les séries sédimentaires suivantes :

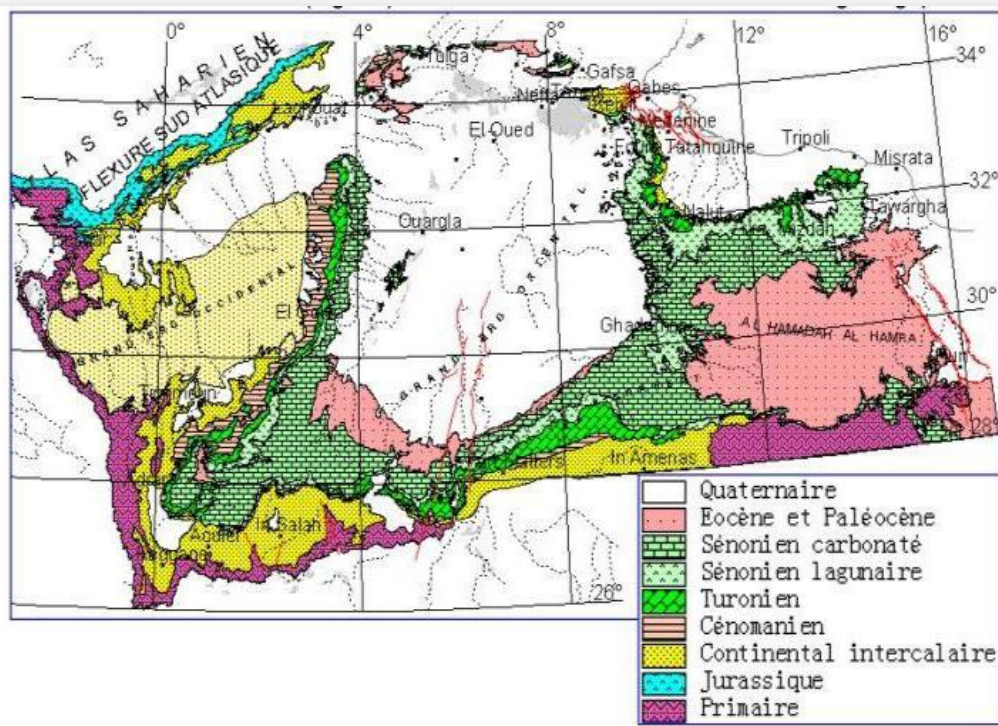


Figure I-11- Carte géologique du bassin du Sahara (OSS, 2003).

I.4.1.1 La plate-forme saharienne

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique :

- le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine ;
- la plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

La plate-forme saharienne, située au sud de l'Algérie alpine, s'étend sur une superficie de 8.000.000 km², et appartient au Craton Nord Africain. Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au Paléozoïque en plusieurs bassins séparés par des zones hautes (Leikine. M., 1971, Fabre, 1976; Coward et Ries, 2003). On distingue d'ouest en est :

- Les bassins de Tindouf et de Reggane situés sur les bordures nord et nord-est du bouclier Reguibat. La couverture sédimentaire atteindrait 8 000 m dans le bassin de Tindouf et 6 500 m dans celui de Reggane ;
- Le bassin de Béchar limité au nord par le Haut Atlas, au sud et à l'ouest par la chaîne d'OugarLa. Sa couverture sédimentaire atteindrait 8 000 m ;
- Le bassin d'Ahnet-Timimoun limité au nord par le haut fond d'Oued Namous, à l'ouest par la chaîne d'OugarLa, au sud par le bouclier Touareg et à l'est par la dorsale d'Idjerane-Mzab. La couverture serait en moyenne de 4 000 m ;
- Les bassins du Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya sont limités à l'ouest par la dorsale d'Idjerane-Mzab et à l'est par la dorsale Amguid-El Biod. Au sud, les sédiments paléozoïques affleurent dans le Mouydir. Au nord, dans la dépression d'Aguemour-Oued Mya, comblée par une puissante série paléozoïque et méso-cénozoïque (5 000 m à Oued Mya ;

La synclise d'Illizi-Ghadamès est limitée à l'ouest par la dorsale d'Amguid-El Biod et à l'est par le môle de Tihemboka et les confins tuniso-libyens. Dans le bassin de Ghadamès, la couverture sédimentaire (supérieure à 6 000 m).

I.4.1.2 Aperçu lithostratigraphique

Le Sahara septentrional algérien a été l'objet d'une prospection très active de la part des pétroliers et des hydro géologues. Sur le plan stratigraphie et lithologique, les pétroliers ont

modélisé la Plate-forme Saharienne en un certain nombre de bassins répartis dans la province occidentale, la province orientale et la province triasique.

a) La province occidentale

La province occidentale comprend les bassins de Béchar, Tindouf, Reggane, Ahnet, Mouydir, Timimoun et Sbaa (Aliev et al., 1971; Beuf et al, 1971; Fabre, 1988). Ces dépressions sont à remplissage paléozoïque, Cambrien à Namurien (fig I-2.a). Le Méso-Cénozoïque y est peu développé. La puissance des séries varie de 3500 à 8000m.

b) La province orientale

Cette province, appelée synéclise Est Algérie, se compose des bassins d'Illizi et de Ghadamès séparés par le môle d'Ahara. La série sédimentaire type discordante sur le Précambrien (fig I-12.b), présente tous les termes, du Cambrien à l'Actuel. Une série sableuse d'âge Mio-pliocène recouvre localement les formations terminales du Mésozoïque. Enfin le Quaternaire discontinu, de faible épaisseur, constitue le dernier élément de la série stratigraphique.

c) La province triasique

Située dans la partie septentrionale de la Plate-forme Saharienne, la province triasique est un anticlinorium de direction Est-Ouest où les éléments majeurs suivants ont été individualisés :

- la voûte de Tirlhemt et le haut fond de Talemzane;
- le système structural de Djemâa-Tougourt;
- le système de dislocation d'El Agreb-Messaoud;
- le môle de Dahar.

Ces éléments sont séparés par des dépressions (Oued Mya) où l'on rencontre les séries types de la province triasique. Les dépôts paléozoïques sont souvent très érodés, aussi profondément que l'Ordovicien ou le Cambrien (Fig I-12.C).

Le Mésozoïque, discordant sur le Paléozoïque, est présent du Trias au Crétacé. Le Cénozoïque est représenté par une série détritique du Mio-Pliocène.

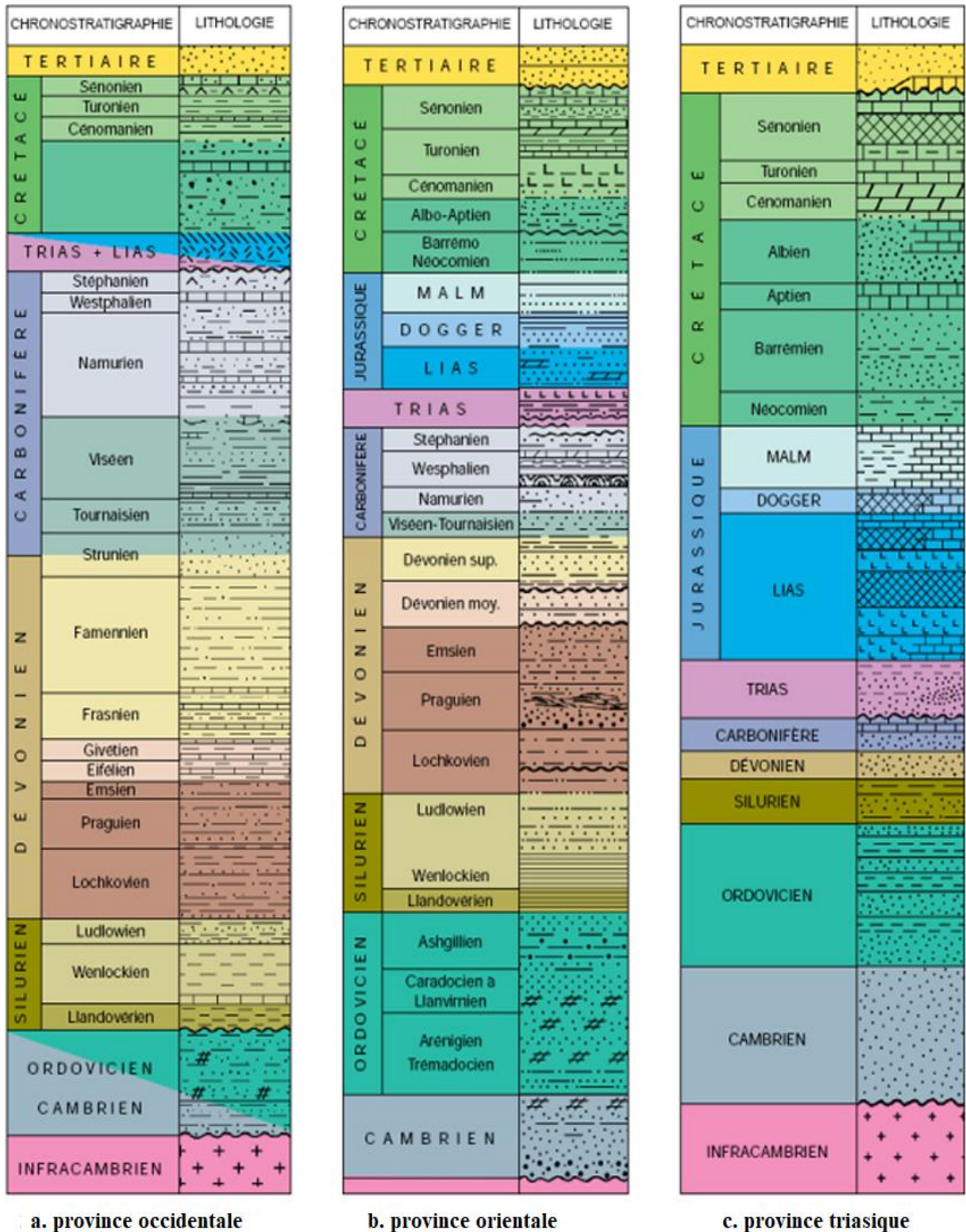


Figure I-12 : Coupe stratigraphique des provinces de la plate-forme saharienne (ALNAFT).

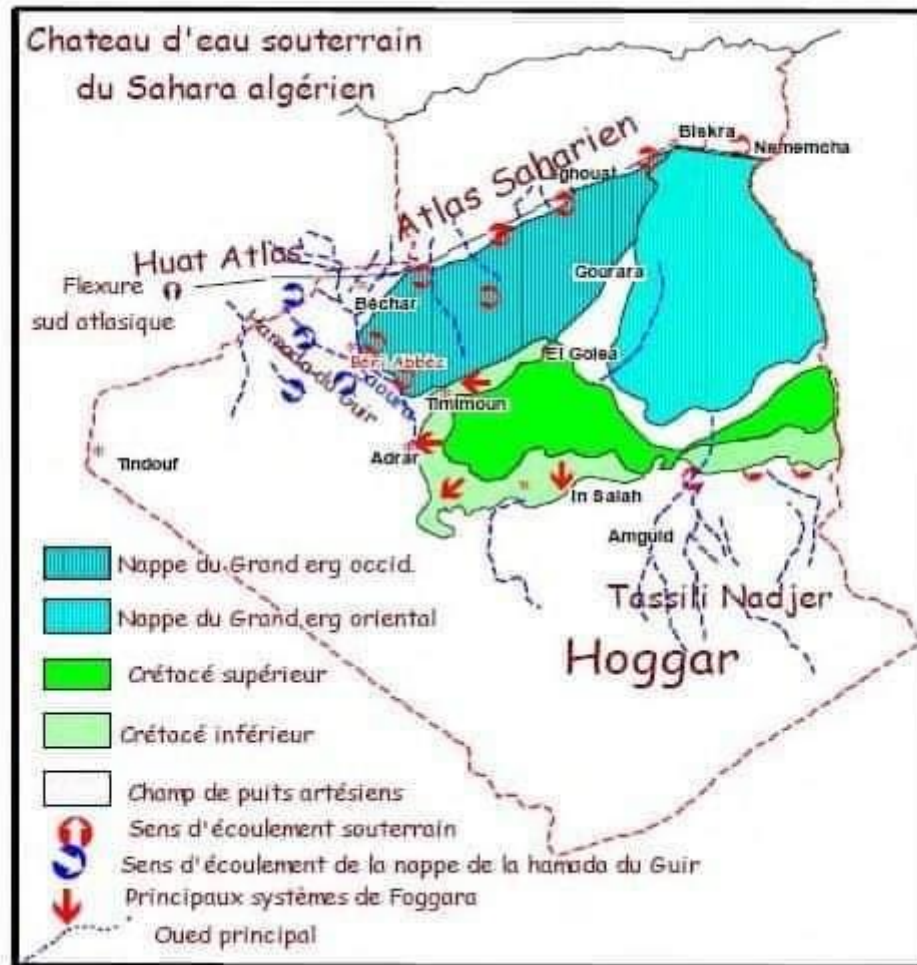


Figure I-13 : carte géologique de l'algérie.

I.4.2. Cadre géologique locale

La wilaya de Ghardaïa est située sur les bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Bas - Sahara, les terrains affleurant sont en grande partie attribués au Crétacé supérieur. Du point de vue lithologique, ces affleurements sont de type (ANRH 2016) :

- Argiles verdâtres et bariolées à l'Ouest et le Sud-Ouest attribués au Cénomaniens ;
- Calcaires massifs durs ; blanc grisâtre au centre, attribués au Turonien ;
- Calcaires marneux et argiles gypseuses à l'Est, attribués au Sénonien ;
- Sables rougeâtre consolidés à Est et au Nord-Est attribués au Miopliocène ;
- Alluvions quaternaires tapissant le fond des vallées des oueds.

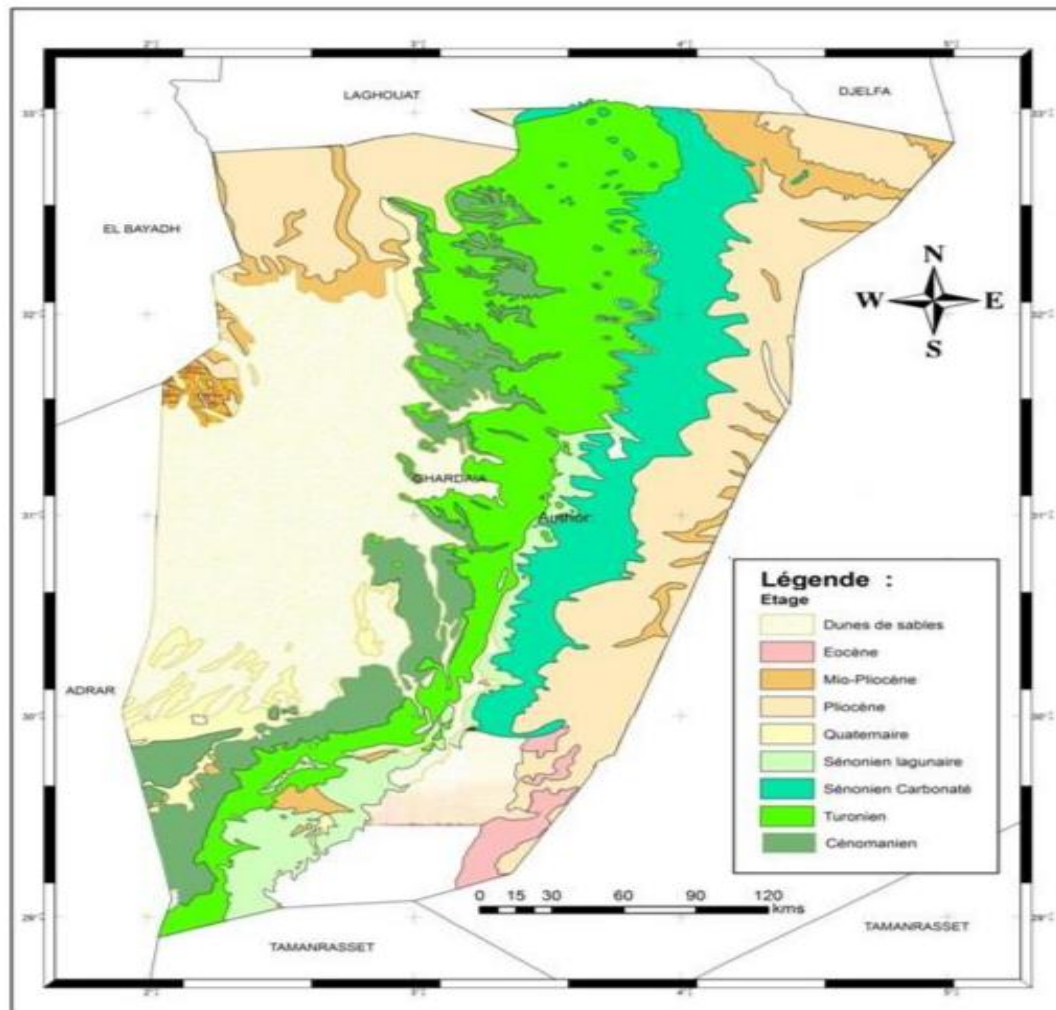


Figure I-14 - Carte géologique de la région de Ghardaïa (Busson, 1952).

I.4.2.1. Albien

Il correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire. Ce sont des grés, sable argileux est sable. Elle est recoupe par les sondages sur une épaisseur de 500 mètres et sont représentés par des sables fins a grossier jaunâtres par fois rougeâtres à rose, avec des intercalations d'argiles verdâtres. Cet étage représente une grande importance hydraulique pour la région.

I.4.2.2. Cénomanién

Cet étage présent un facies argileux, formé essentiellement par d'argiles grises, brunes, parfois noirâtres, compactes et bariolée à gypses vitreux, argiles grisâtres claires

sableuses à la base. L'épaisseur moyenne du cénomanien dans la région du M'Zab est de 230 mètres.

I.4.2.3. Turonien

Constitue le plateau rocheux de la dorsale du M'Zab, ayant une épaisseur de l'ordre de 110 mètres. Il s'agit d'une formation essentiellement calcaires dolomitiques à souvent fossilifères. On note aussi des structures d'Endokarst fossiles, occasionnant des pertes totales ou partielles de la boue lors de l'exécution des sondages hydrauliques (ACHOUR, 2014).

I.4.2.4. Sénonien

Il est constitué de deux formations lithologiques superposées :

I.4.2.4.1. Sénonien inférieur

Le sénonien inférieur est caractérisé par des argiles marneuses jaunâtres et rouges, avec des intercalations de bancs de gypses et d'anhydrites, présentés dans les forages hydrauliques dans la région de Guerrara et Zelfana, il atteint de 79 mètres d'épaisseur.

I.4.2.4.2. Sénonien supérieur

Il affleure seulement dans la partie orientale de la dorsale du M'Zab et coiffe l'ensemble des buttes témoins de celle-ci. Il est formé de calcaire marneux à argiles.

I.4.2.5. Miopliocène

Recoupé par les sondages exécutés à l'Est du M'Zab (Guerrara), formé un dépôt de sables rouge plus moins consolidés. Grés durs à tendre rose, à lits argileux. Présente sur une profondeur de 65 mètres.

I.4.2.6. Quaternaire

Formé par des alluvions et de sables plus moins grossiers, argileux, remplissant les bas-fonds des vallées des oueds. L'épaisseur de cet horizon varie entre 20 à 30 mètres.

I.5. Localisation des forages de la zone d'étude

Les forages est situé dans la ville de Ghardaïa, dans les quartier dite laadira ; bouhraoua ; ben smmara ; karkoura ; bin djebline ; Ain Lebeau ; hadj mesaoud ; melika ; chaabat teli ; thniat Imakhzane.

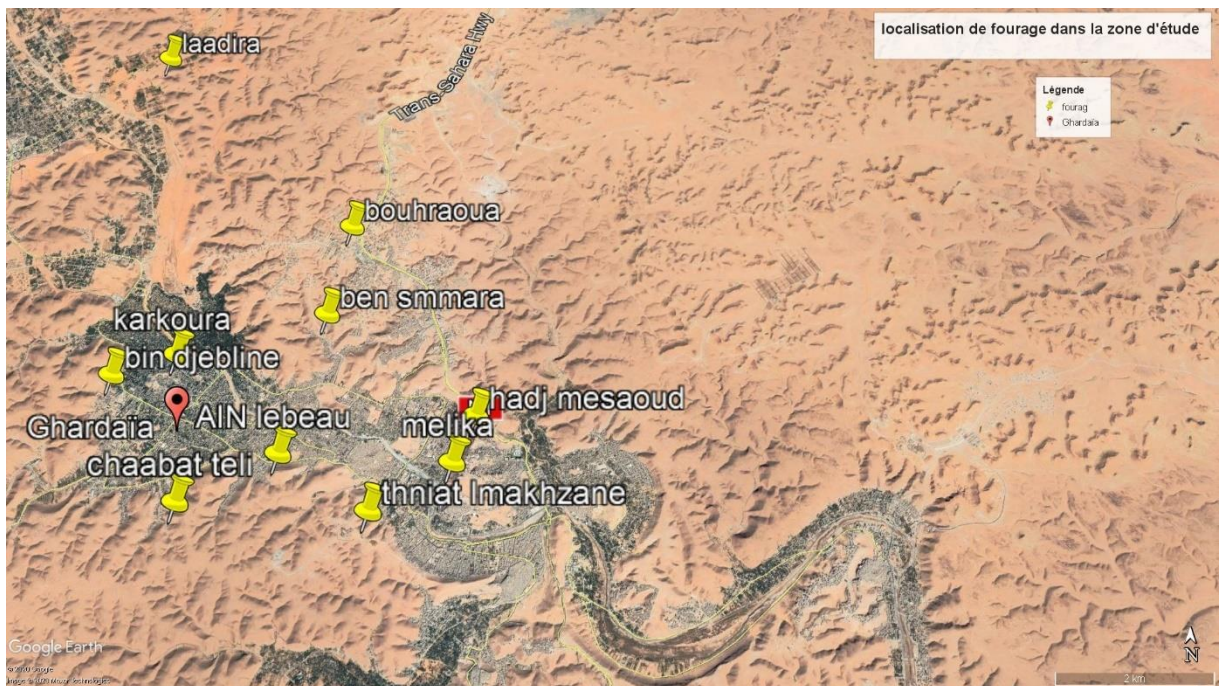


Figure I-15 – carte satellite des forages de la zone d'étude. (Google Earth)

I.6. Conclusion

La wilaya de Ghardaïa située au centre de la partie Nord du Sahara, étendue sur une superficie de 86560 Km², comprend du point de vue géomorphologique trois parties différentes : la chebka au centre, la plaine de dalle du Hamada à l'Est et les régions en sablées au Sud-Ouest.

Son climat est typiquement saharien aride, marqué notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations et par amplitude thermique et les températures très élevées.

La région est tracée par un grand réseau d'oueds dont les principaux sont : Oued Sebseb, Oued Metlili, Oued N'sa, Oued Zegrir et oud M'Zab, l'ensemble de ces oueds constitue le bassin versant de la dorsale du M'Zab.

Du point de vue géologique, la région de Ghardaïa est située sur les bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Bas-Sahara. Les terrains affleurant sont en grande partie attribués au Crétacé supérieur, composés principalement par des dépôts calcaires turoniens dolomitiques. Le quaternaire correspond au dépôt de recouvrement alluvionnaire de la plupart des vallées des oueds de la région de Ghardaïa.

CHAPITRE II

Cadre Hydrogéologique

II .1. Introduction

Notre secteur d'étude fait partie de la plateforme saharienne. Les études géologiques ont montré qu'elle forme un grand bassin sédimentaire, et les études hydrogéologiques de (UNESCO/ERSS 1972) et (OSS 2003) ont montré l'existence d'un grand réservoir aquifère multicouches, il a été nommé le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS).

II .2. Définition du système aquifère (SASS)

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) couvre une vaste superficie plus d'un million de Km², il est reparti entre trois pays à savoir l'Algérie de 700000Km² soit 60%, la Tunisie de 80000Km² soit 10% et la Libye de 220 000 Km² soit 30%. Il s'étend du Nord depuis l'atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et le rebord méridional du Tihert au Sud et de l'Ouest depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au graben d'Hun en Libye à l'Est.

Ce bassin renferme une série des couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs nommés le Complexe Terminal(CT) et le Continental Intercalaire(CI).

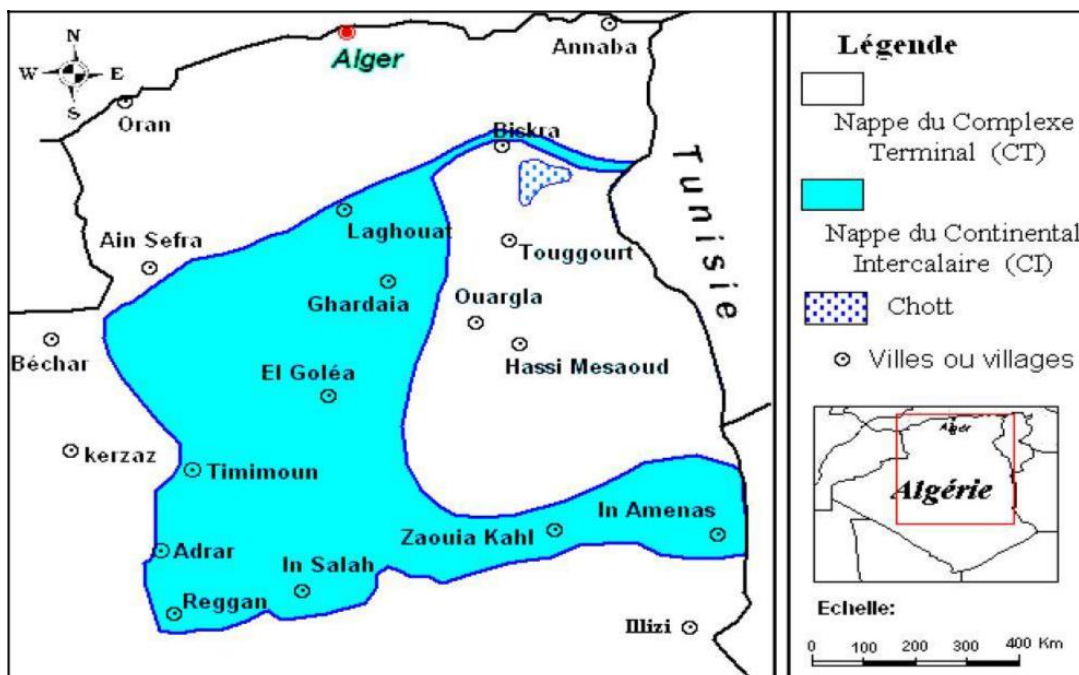


Figure II .1- Carte de la limite du système aquifère SASS (UNESCO/ERSS, 1972)

La dorsale du Ghardaïa divise le domaine du SASS en deux bassins ; le bassin occidental de 280.000 km² drainé vers le Sud, et le bassin oriental de 500.000 km² drainé vers le Nord-Est.

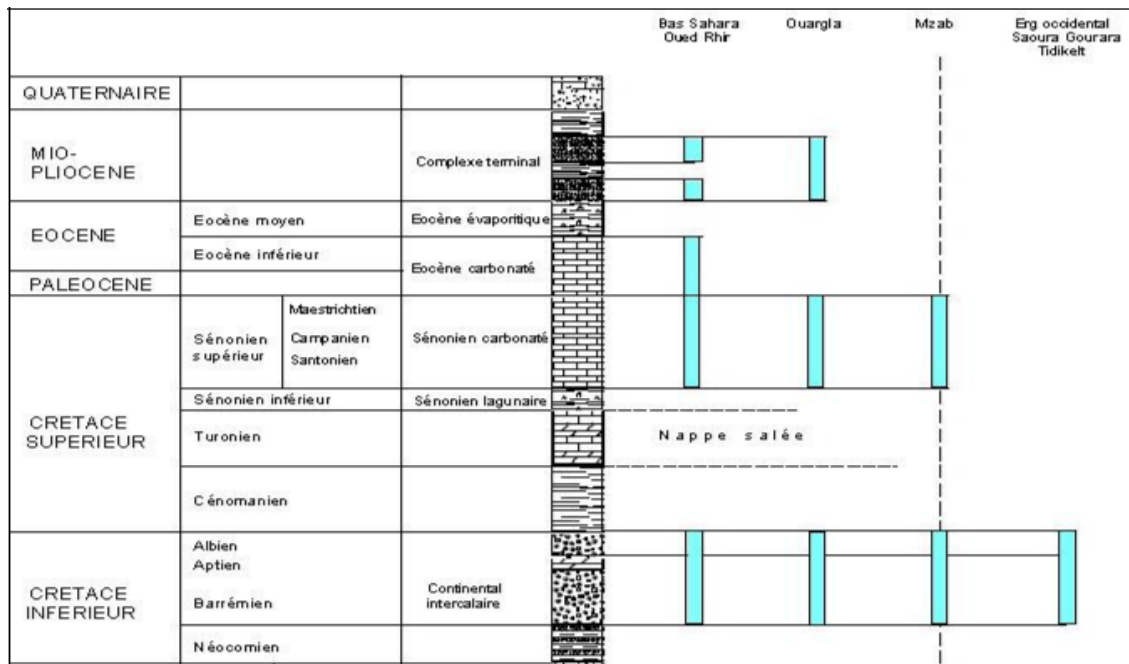


Figure II .2- Les formations géologiques et les aquifères du bassin du SASS (OSS, 2003)

II .3. Le complexe terminal (CT)

Le Complexe Terminal est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène (Busson 1972 ; FABRE 1976).

Le terme de « nappes du Complexe Terminal » qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique.

Les intercommunications entre Sénonien, Eocène et Mio-pliocène sont évidentes sur l'ensemble du Bassin, à l'exception de la région des chotts où l'Eocène moyen et supérieur imperméable viennent s'intercaler.

La nappe turonienne est plus individualisée par suite de la couverture imperméable du

Sénonien inférieur. Cependant, ses niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du Mio-Pliocène sur la bordure du bassin.

La profondeur du CT est comprise entre 100 et 600 m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m, il affleure aux endroits suivants :

- Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens;
- À l'Est, le long du flanc oriental du Dahar;
- Au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït;
- À l'Ouest, région de Ghardaïa sur la dorsale du M'Zab.

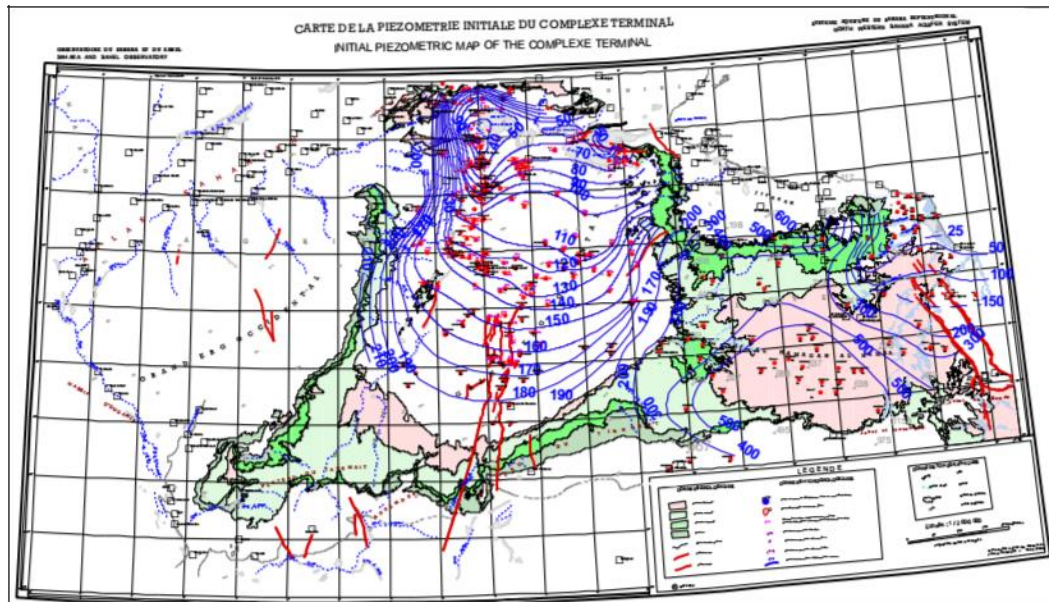


Figure II .3- Carte piézométrique du Complexe Terminal (OSS, 2003)

L'examen de la carte piézométrique met en évidence les zones d'alimentations, à savoir :

- L'Atlas Saharien du Nord-Ouest.
- Le Dahar à l'Est.
- Le Tinrhert au Sud.
- Les monts de la dorsale du M'zab

Les zones exutoires sont principalement centrées sur les Chotts algéro-tunisiens (Chotts Melrhir) et Merouana en Algérie et Djérid, El Gharsa en Tunisie) et sur le golfe de Syrte en Libye.

Etant donné que la limite de la nappe du CT est située plus à l'Est de la région du M'zab, cette dernière n'est pas captée avec succès dans la région de Ghardaïa notre secteur d'étude. De ce fait, nous n'abordons en détail que la nappe du Continental Intercalaire.

II .4. Le continental intercalaire (CI)

Le terme du Continental Intercalaire désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins : à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne, au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultat de la transgression cénomaniennne.

Le Continental Intercalaire affleure tout au long de l'Atlas saharien et au Nord-Est au pied de la falaise du Dahar. Plus au Sud, le "CI" repose directement sur les formations marines du Paléozoïque, lequel forme en affleurement une ceinture continue allant de la frontière marocaine, à la limite N-W du bassin, jusqu'à la ville d'Hun à l'extrême S-E de la région.

II .4.1. Limites du Continental Intercalaire

Les limites du CI ont été basées à la fois sur l'étude des affleurements géologiques et sur l'étude des sondages, elles sont :

- Au Nord-Ouest, le versant Sud de l'Atlas saharien, marqué en affleurement par le contact Albien-Cénomaniens ;
- Au Sud-Ouest, la limite des affleurements paléozoïques de l'Ougarta, marqués par le cours des oueds Zousfana et Saoura ;
- Au Sud, la limite des affleurements du CI sur le Paléozoïque, allant en continuité d'Adrar à Hun, décrivant les limites septentrionales des Tassilis ;
- Au Nord, l'accident sud Atlasique au Nord des Chotts, relayé vers le golfe de Gabès par la faille d'EL Hamma – Médenine ;
- Au Nord-Est, les affleurements du CI au pied de la falaise du Dahar; à l'Est, les formations aquifères du Crétacé inférieur se prolongent bien au-delà du graben de Hun, mais à l'Est du méridien 16° et en passant au bassin de Syrte, les eaux du CI deviennent saumâtres : c'est ce passage qui a été adopté comme limite de la zone d'étude de la nappe d'eau douce du CI (OSS 2003).

La dorsale du Ghardaïa, divise le domaine du CI en deux sous-bassins hydrogéologiques : le bassin oriental et le bassin occidental. L'ensemble couvre une surface de 1100.000 de km², et une épaisseur moyenne de 358mètres (OULD BABA SY 2005). La partie Sud du réservoir du CI est largement affectée par les accidents Nord-Sud d'Amguid El Biod qui se prolonge du socle primaire d'El Hoggar.

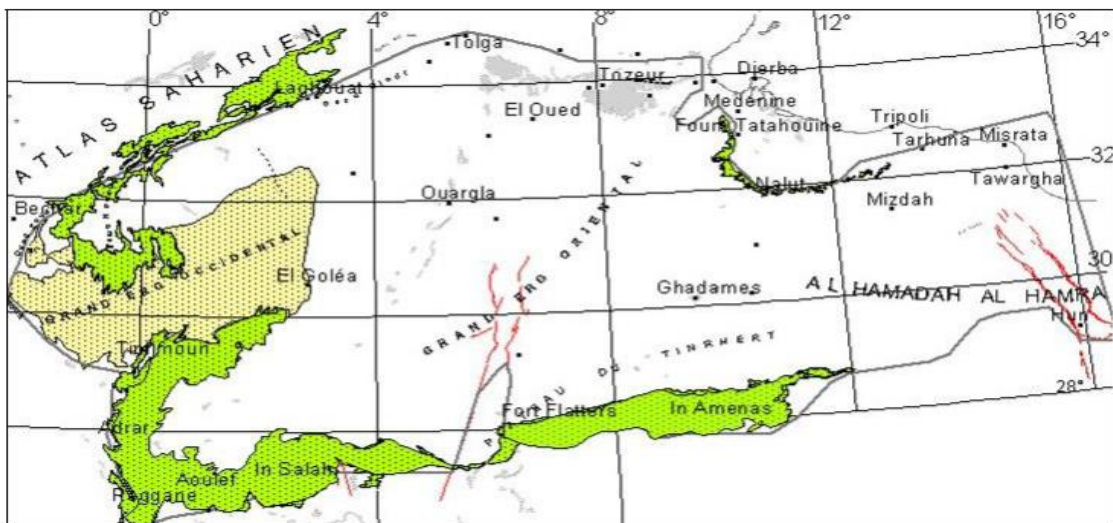


Figure II .4- Les zones d'affleurement du Continental Intercalaire (OSS, 2003)

II .4.2. Géométrie du Continental Intercalaire

L'épaisseur utile totale de ce réservoir (épaisseur des dépôts perméables à eau douce) dépasse 250 m dans la plus grande partie du système étudié.

Elle atteint 1000 m au Nord-Ouest (Ouest de Ghardaïa) et au Centre (Ouest de la dorsale primaire d'Amguid).

La nappe du CI est libre dans les zones d'affleurement, captive non jaillissante sous le Grand Erg Occidental, de Ghardaïa, le Tademaït, le Grand Sud Tunisien et la Hamada El Hamra.

Elle est fortement artésienne jaillissante (avec des températures élevées) sur tout le domaine Oued Rhir, Souf, Djérid, Grand Erg Oriental et Chott Fedjaj (BELLAOUEUR 2008).

II .4.3. Piézométrie et zones d'alimentation du CI

La carte piézométrique du CI élaborée dans le cadre du projet SASS (OSS 2003) montre que les écoulements des eaux de la nappe en prévenance de l'Atlas saharien, se trouvaient scinder au niveau l'axe de la dorsale du Ghardaïa, en deux directions privilégiées ; un écoulement vers le Sud et le Sud-Ouest, régions de Tidikelt, Touat et Adrar.

L'autre direction vers le Nord-Est, vers la zone des chotts et vers la nappe de la zone côtière de la Tunisie.

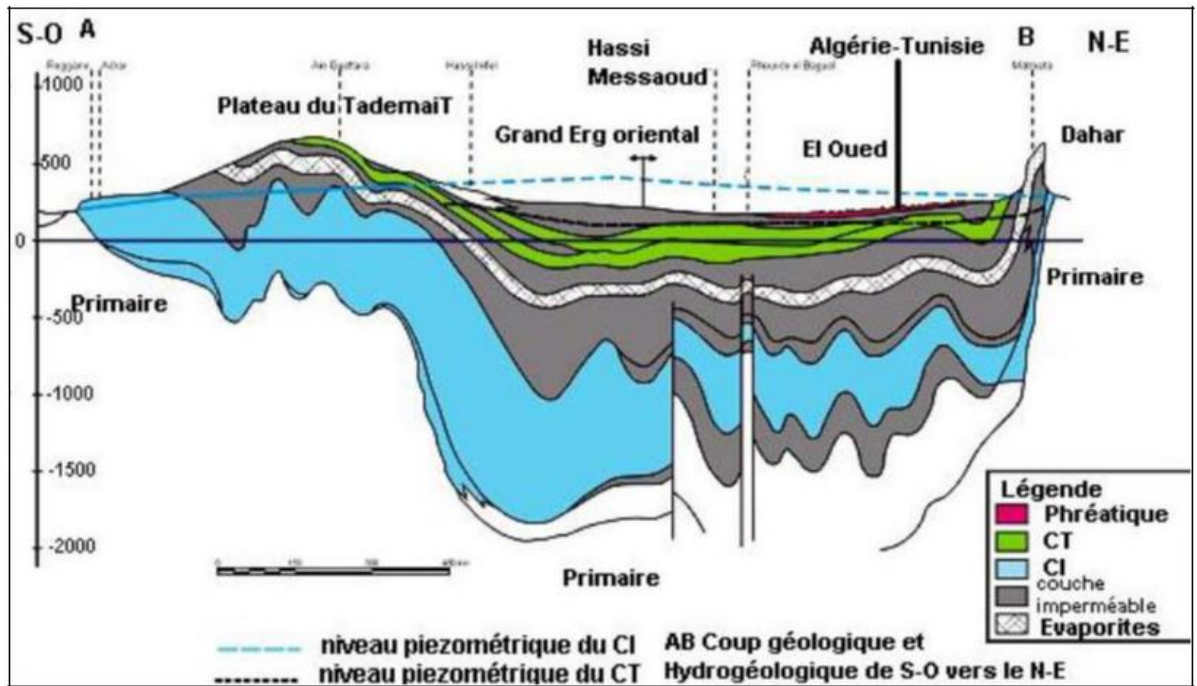


Figure II .5- Coupe hydrogéologique Sud-Ouest Nord-Est du bassin du SASS (ERSS, 1972)

Dans la région de Ghardaïa, notre zone d'étude, la dorsale du M 'Zab d'un axe orienté N-S qui sépare l'écoulement des eaux du CI dans les sous-bassins Occidental et Oriental en ces deux directions distincte précitées (Nord vers Sud et Nord vers Est).

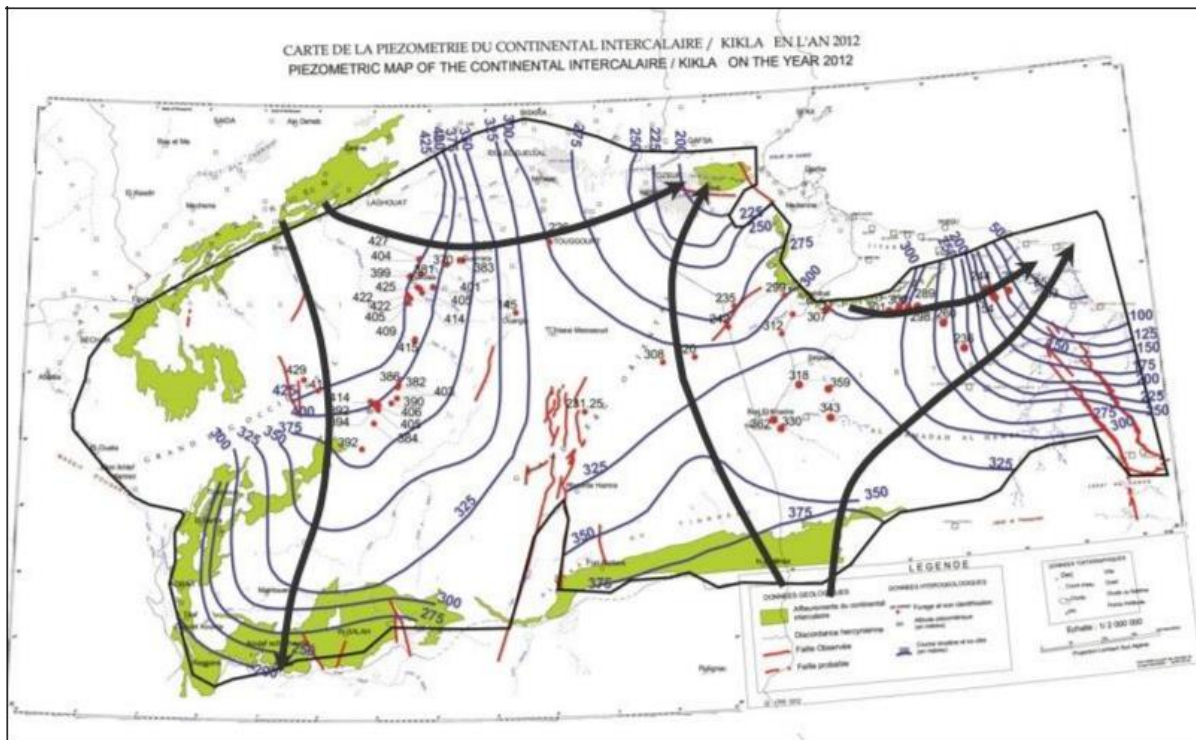


Figure II .6- Carte piézométrique du Continental Intercalaire (OSS, 2012)

II .4.4. La réserve du Continental Intercalaire

L'étude de l'UNESCO/ERSS (1972) évalue le volume d'eau moyen de l'ensemble des aquifères du CI et CT à $60.000 \times 10^9 \text{ m}^3$. MARGAT (1992) fait état de 40.000×10^9 de m^3 , comme réserve de l'aquifère du CI.

| Réservoir aquifère | Volume d'eau moyen (10^9 m^3) | Flux moyen (10^9 m^3) | Durée de renouvellement (Années) |
|--------------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| Continental intercalaire | S | Q | S / Q |
| (CI) | 20,000 | 0,3 | 70,000 |

(OULD BABA SY, 2005)

Selon l'étude sur la réserve de (OULD BABA SY 2005) ; pour une épaisseur moyenne du CI de 358mètres et une aire du domaine du CI évaluée à 1.100.000 Km^2 . La porosité efficace moyenne de l'aquifère est de 5% (OSS 2003) .Ce qui donne une réserve totale théorique de 20.000×10^9 de m^3 , soit 20.000 milliard de m^3 d'eau (OULD BABA SY, 2005).

II .4.5. Exploitation du Continental Intercalaire

Les études historiques ont montré que le continental intercalaire a été exploité depuis de longs siècles par les systèmes traditionnels des foggaras. Favorisées par les conditions hydrogéologiques dans ces zones, les foggaras sont introduites sur les rebords occidentaux et méridionaux du plateau de Tademaït dès le vingtième siècle.

Les premiers forages artésiens ont été d'autre part réalisés vers la fin du siècle dernier (El-Menia et Aïn-Salah), mais leur débit est resté faible jusqu'aux années 1950.

La réalisation des premiers grands forages profonds dans les zones de Zelfana, Guerrara, Ouargla et Oued Rhir a rapidement porté le débit d'exploitation à plus de $3 \text{ m}^3 / \text{s}$ vers les années de 1970 (BELLAOUEUR 2008).

Actuellement, l'exploitation annuelle par forages sur l'ensemble du bassin du SASS (Algérie, Lybie et Tunisie) est évaluée de plus de 2,7 milliards de m^3 (OSS, 2012), travers de plus de 9000 points d'eau forages et foggaras.

II.5. Le système aquifère local

II.5.1. Les nappes superficielles (phréatiques)

Dans la région de Ghardaïa, trois types de nappes superficielles ont été distinguées :

- La nappe d'eau contenue dans les calcaires du Sénonien carbonaté,
- La nappe d'eau contenue dans les calcaires fissures du Turonien
- Les nappes alluvionnaires de l'Inféro-flux (Oueds).

II.5.1.1 La nappe du Sénonien carbonaté

Cette nappe est contenue dans les calcaires fissurés du Sénonien carbonaté à 180 mètres de profondeur. Les dépôts argilo-marneux du Sénonien lagunaire au-dessous forment le substratum imperméable de cet aquifère (ANRH, 2012). Elle constitue le prolongement occidental de la nappe du complexe terminal, cette nappe est localisée dans la partie Nord-Est de Ghardaïa, elle est captée avec succès dans la vallée de l'Oued Zegrir (Guerarra) par des sondages par battage à une profondeur de 180m en moyenne (ANRH, 2012).

II.5.1.2 La nappe du Turonien

Les affleurements des couches calcaires du Turonien dans la région de Ghardaïa, peuvent contenir des nappes d'eau de faibles importance (ANRH, 2012). Ces assises calcaires d'une épaisseur moyenne de 110m, présentent parfois des fissures et des karsts dans lesquels l'eau peut s'infiltrer (ACHOUR 2014).

II.5.1.3 Les nappes alluvionnaires

Les nappes phréatiques de surface sont très fréquentes dans notre zone d'étude. Elles sont formées d'alluvions et de sables du Quaternaire. Constituées de galets et de poudingues qui tapissent les lits des oueds de la dorsale du M'zab. Les alluvions reposent sur les couches calcaires dures du turonien. L'épaisseur de ces alluvions peut atteindre 25 à 30 mètres.

La profondeur du niveau d'eau varie entre 10 et 30m. Ces nappes présentent un intérêt très important dans le domaine agricole, elles servent comme une source vitale pour l'irrigation des oasis implantées dans les vallées des oueds et elles servent également pour l'alimentation en eau potable à l'amont, surtout dans la vallée de Dayet, Berriane, Metlili, et Sebseb.

II.5.2. Alimentation des nappes superficielles

Etant donné que ces nappes sont de surface type libre, elles sont directement alimentées par les eaux de pluie, ainsi que les fréquents écoulements des oueds ou elles se trouvent.

Selon les fellahs, le niveau statique de ces nappes phréatiques a largement baissé ces dernières décennies par suite des périodes de sécheresse que subie la région. Les eaux de la

nappe profonde du CI (albien) de certains forages destinés pour l'irrigation et l'AEP contribuent aussi à l'alimentation de ces nappes.

II.5.3. Piézométrie des nappes phréatiques

Selon les cartes piézométriques établies par l'ANRH sur les nappes phréatiques des oueds de la région de Ghardaïa, le sens des écoulements suit l'écoulement de surface des oueds, suivent les bassins versants pour chaque nappe. De l'amont vers l'aval s'écoulent suivant une direction du Nord-Ouest vers le Sud-Est.

Le niveau statique est profond en amont, et moins profond en aval et parfois la nappe affleure en surface, c'est le cas de la nappe de la vallée du M'Zab. Le gradient est variable de l'amont vers l'aval selon les perméabilités des alluvions.

Il faut mentionner aussi que les massifs carbonates calcaires du Turonien présentent parfois des fissures et des karsts où l'eau des pluies peut s'infiltrer et forment des poches d'eau de faible réserve exploitées par des forages à battage.

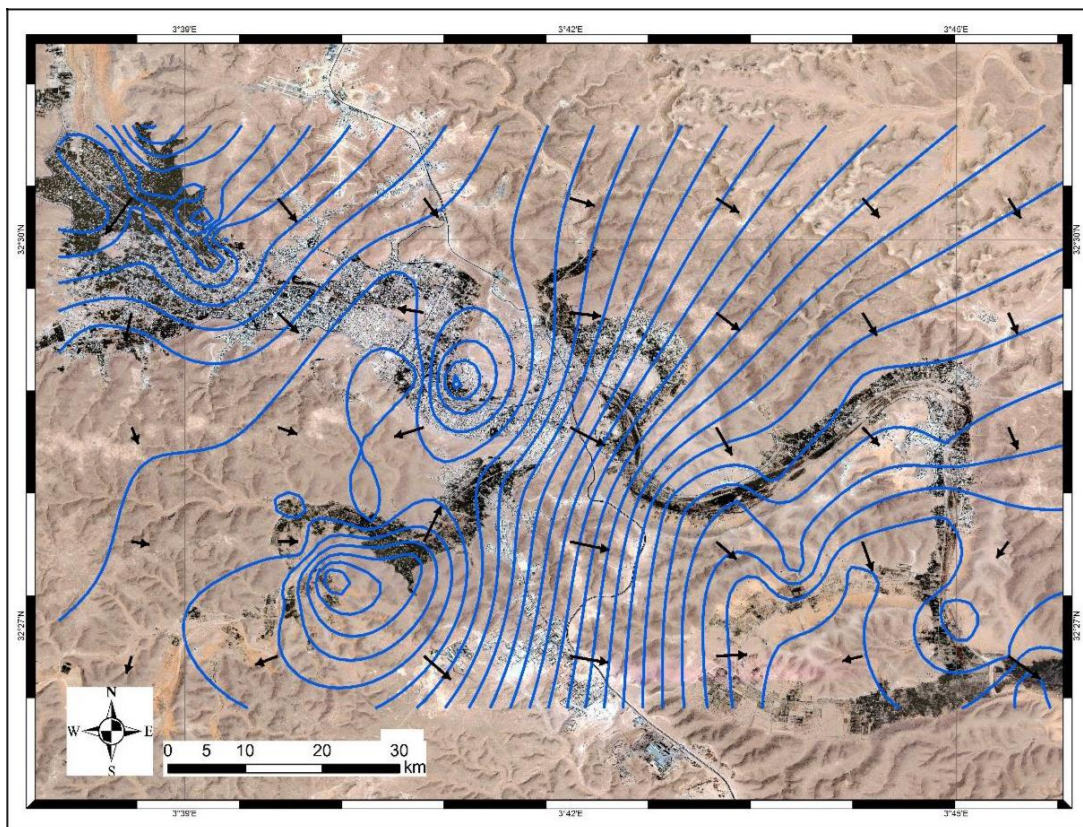


Figure II .7- Carte piézométrique de la nappe phréatique de la vallée de l'oued M'Zab (ANRH, 2011)

II.6. Le Continental Intercalaire dans la région de Ghardaïa

Dans la région de Ghardaïa, l'étage principal exploité est de l'âge Albien. Il est composé de sables fins et de grès jaunâtres à gris à intercalations d'argiles. Cette masse grésosableuse est exploitée avec succès par plusieurs forages dans tout le territoire de la wilaya de Ghardaïa.

II.6.1. Le toit du CI (Albien)

L'étude des coupes litho-stratigraphiques des forages de la région, nous a permis de localiser le toit de l'aquifère albien. L'utilisation de l'interpolation par la méthode du Krigeage, sous le logiciel ArcGIS, nous avons obtenu la carte d'égale profondeur du toit sur l'ensemble de notre secteur d'étude.

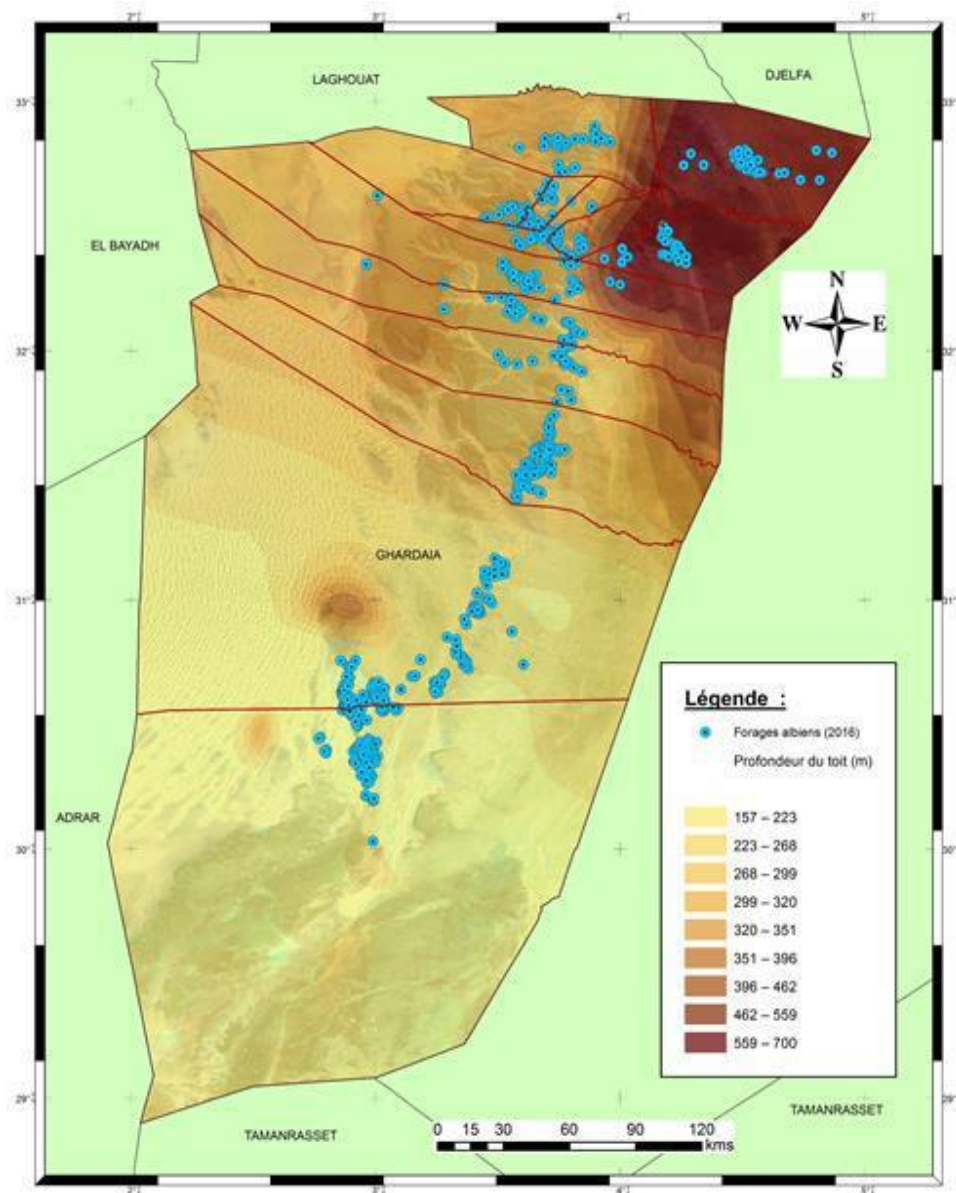


Figure II .8- Carte de la variation du toit du Continental Intercalaire
Dans la région de Ghardaïa

La carte montre une large variation des profondeurs du toit de l'aquifère albien dans notre secteur d'étude, on observe que le toit de l'aquifères est moins profond il varie entre 60 et 150 m dans les zones sud-ouest exemple (Hassi fhal et El-Menia) ce que explique le nombre important des forages dans ces zones notamment à usage agricoles.

Cependant la profondeur du toit est plus élevée dans les zones nord est Guerrara et Zelfana elle varie entre 650 et 700 m ce qui explique le nombre modéré des forages albiens dans ces régions.

Dans les communes entourant le chef-lieu, comme Metlili, Daya, Bonoura, Atteuf, Berriane, Sebseb et Mansoura la variation des profondeurs du toit est de 250 à 320 m.

II.6.2. Profondeur du CI (albien)

La carte de profondeur montre la même allure que la carte du toit de l'aquifères. Les forages réalisés présentent des faibles profondeurs au zone Sud-Ouest Meniaet Hassi Garade 80 à 250 m, allant à 550 m dans les zone centre à Ghardaïa, Atteuf, Bonoura, Daya Berriane Sebseb, et une forte profondeur qui atteint plus de 1000 m au Nord- Est Guerrara et Zelfana.

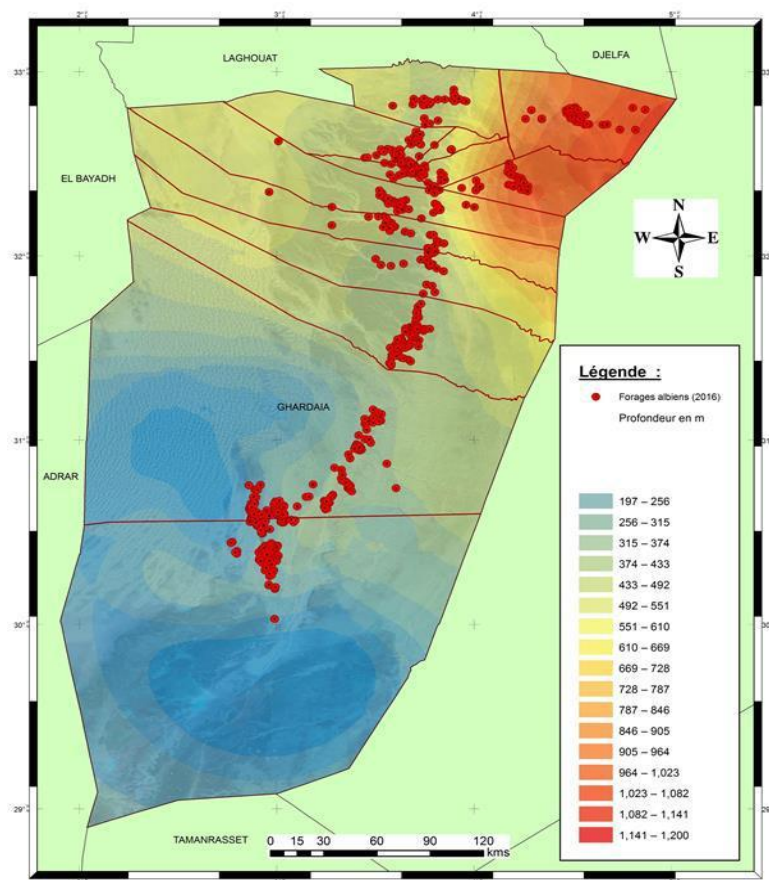


Figure II .9- Carte de la variation de la profondeur du Continental Intercalaire dans la région de Ghardaïa

II.6.3. Interprétation des coupes lithologies du CI

Les profils lithologiques des forages exécutés dans notre région d'étude, nous ont permis de faire la description et l'interprétation lithologique de l'étage Albien exploité. La coupe lithologique est reconstituée sur la base de l'analyse des cuttings (débris de la roche forée) du sondage à chaque mètre. Pour la zone de notre secteur d'étude nous avons sélectionné une coupe représentative : Zone de Ghardaïa. (Rapports de fin de sondage /ANRH).

II.6.3.1 Zone de Ghardaïa

Le forage est destiné pour renforcer l'Alimentation en Eau Potable de la population de la ville de Ghardaïa, il a pour coordonnées géographiques :

- Latitude : 32° 29' 20" N,
- Longitude : 3° 40' 38" E
- Altitude Z : 499m.

Le Turonien :

De 0 à 67 mètres. Calcaire dur riche en dolomie, grisâtre à blanc massif, karstiques, Marneux jaunâtre à calcaire à la base.

Le Cénomaniens :

De 67 à 219 mètres. Il s'agit d'argiles verdâtres grises, brunes. Argiles grises et verdâtres à gypses fibreux blanc, argiles grisâtres claires.

Le Vraconien :

De 219 à 292 mètres. Il s'agit d'argiles bariolées marrons et verdâtres à gypses fibreux, sableuses à la base.

L'Albien :

A partir de 292 mètres. Sables bruns moyen à fin argileux, sables jaunes, gris, sables fins bruns et roses, sables, sables fins brun, grès rose et brun à ciment argileux, sables à argiles rouge, sables fins roses gréseux, grès rouge, argile rouge plastique à la base.

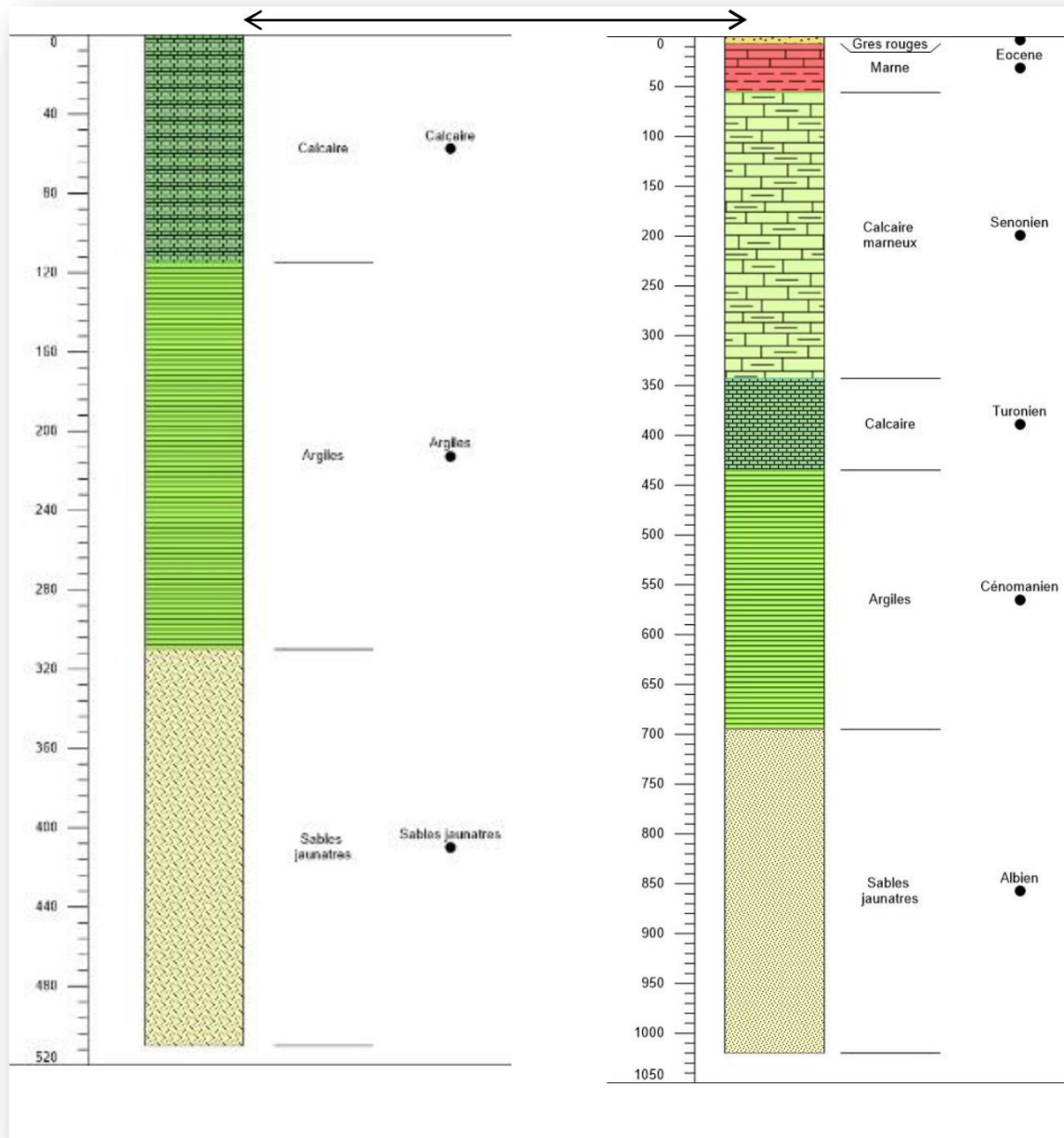


Figure II.10- Coupes litho stratigraphiques des forages albiens (Nord de Ghardaïa)

II.6.3.2. Exploitation du CI dans la région de Ghardaïa

Les données qui nous a récolté auprès des différents services qui gèrent l'eau ; la Direction des Services Agricole (**DSA**), la Direction des Ressources en Eau (**DRE**), l'Algérienne des Eaux (**ADE**) et l'ANRH, montrent que le volume d'eau exploité de la nappe de CI est passé de 186,5Hm³ en 2005 puis en 2011 de 367,47 Hm³, pour atteindre 419,76 Hm³ en 2016, soit 419,76 Millions de m³ d'eau soutiré annuellement de la nappe (ANRH 2016).

Tableau. II .1 : Evolution du volume d'exploitation des eaux du Continental Intercalaire par usage (ANRH, 2016).

| Usage | Volume d'eau exploité (hm ³ /an) | | |
|---------------|---|---------------|---------------|
| | 2005 | 2011 | 2016 |
| AEP | 43.49 | 58.74 | 68.5 |
| IRR | 137.02 | 302.02 | 344.33 |
| AEI | 5.99 | 6.71 | 6.93 |
| Totaux | 186.5 | 367.47 | 419.76 |

Nous observons que le secteur agricole mobilise une grande quantité d'eau par rapport aux autres secteurs, soit 344,33hm³/an, a cause des programmes des développements lance par l'état dans ce domaine, notamment la mise en valeur par la concession et l'APFA (Accès au Propriété Foncier Agricole) depuis les années 2000.

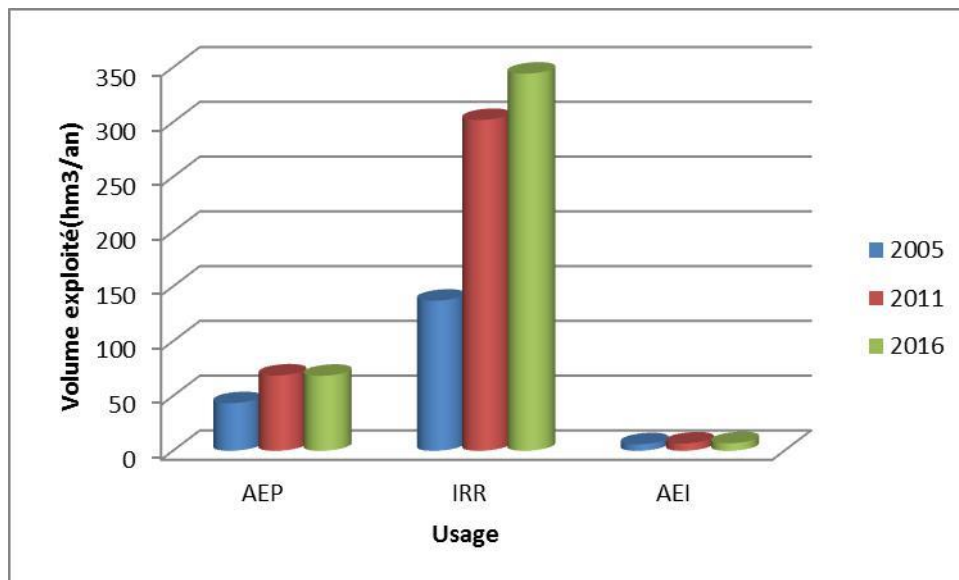
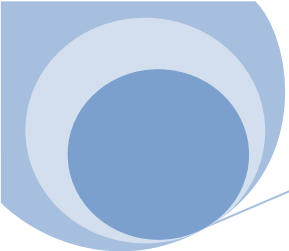


Figure II .11- Evolution de l'exploitation des eaux du Continental Intercalaire par usage du 2005 au 2016

D'après l'historique on remarque une grande évolution de la consommation d'eau pour l'irrigation au cours de cette période 2005-2016. suivie par les besoins en eau pour l'AEP. Par contre les besoins en eau pour l'industrie n'ont pas connu une grande évolution au cours de cette période.

II.7. Conclusion

La région de Ghardaïa fait partie de système aquifère de Sahara septentrional (SASS), les principales ressources en eau dans la région sont d'origine souterraine. Elles sont stockées dans deux types d'aquifères : les aquifères superficiels qui sont abrités dans les calcaire du sénonien carbonaté, calcaire fissurés du turonien et dans les alluvions des vallées des oueds de la région, alimentée directement par les eaux des pluies, ainsi que les fréquents écoulements des oueds, et l'aquifère profonde souvent captif du continentale intercalaire, qui est composé de sable, grés et d'argiles sableuses d'âge Albien. Selon la région elle est captée à une profondeur allant de 80 à 1000 m, par des forages à différents usages ; l'irrigation, l'industrie et l'AEP.



Deuxième PARTIE

Résultats et discussions



CHAPITRE III

Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Le présent chapitre représente deux phases d'étude pour but de décrire une combinaison des processus d'analyses ainsi que les logiciels utilisés pour assurer une exploitation des résultats sous différentes formes (graphique, statistique, et géochimique).

La première phase de l'étude est l'échantillonnage qui se fait par la prospection, et la description du terrain ainsi que le choix des localités dans toute la cuvette de la Wilaya de Ghardaïa.

La deuxième phase est la méthodologie de collecte des données des analyses physico-chimiques ainsi que la méthodologie de traitement des données adoptée, afin de caractériser la composition hydrogéochimique.

III.2. Approche méthodologique

Notre travail de recherche consiste à étudier les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et de les classer selon les normes de potabilité et de l'irrigation pour avoir déterminé la destination de chaque type d'eau selon les résultats obtenus (Fig. III-1)

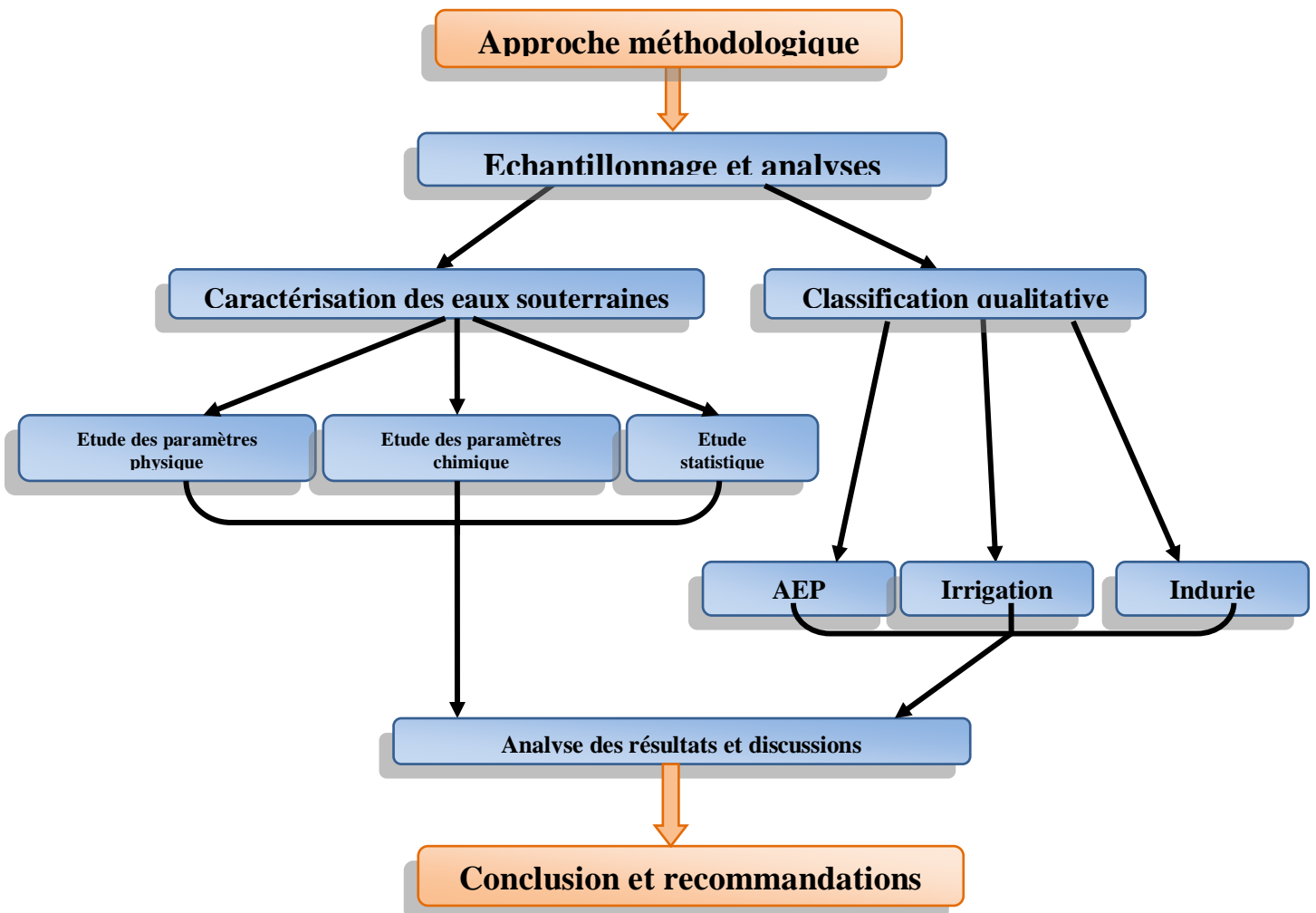


Figure III-1 : Approche méthodologique d'étude

III.3. Protocole d'échantillonnage

L'échantillonnage est une étape indispensable des études hydrochimiques, l'objectif de cette étape est l'obtention d'échantillons représentatifs de la qualité des eaux prélevées.

Pour assurer un échantillonnage sans modification des caractéristiques physico-chimiques de l'eau, le préleveur doit avoir une connaissance précise des conditions du prélèvement tel que :

- estimation visuelle de la qualité globale de l'eau (rejeter les eaux contenant des matières en suspension, sable...etc.)
- laisser couler l'eau durant un certain temps pour éviter les eaux stagnantes dans la vanne du forage.

Ces conditions, son important pour la qualité des résultats analytiques, (Rodier, 2009).

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en plastique de 1000 ml de capacité, ils sont rincés avec l'eau à analyser et hermétiquement fermés sans laisser de bulles d'air dans le flacon. Ces dernières doivent être clairement identifiées à l'aide d'étiquettes indiquant le nom de forage, la date et l'heure de prélèvement (Rodier1996).

Pour la conservation des échantillons à une température de 4°C, nous avons utilisé des glacières avec des agents en glaces, puis transportés au laboratoire dans un délai ne dépassant pas 4 heures selon les normes exigées.

L'analyse a été effectuée rapidement moins de 48 h après le prélèvement.

III.4. Méthodes d'étude

III.4.1 Mesure in situ

Certains paramètres physico-chimiques sont rarement maintenus constants pendant la conservation des échantillons et doivent être mesurés sur le terrain. Deux paramètres on été mesurer in situ, la température et le pH.

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau (Rodier ,1984). La connaissance de ce paramètre permet aussi de donner des indications sur les profondeurs et la circulation des eaux souterraines (De Villers et al. 2005).

Le pH est dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant hydrogéologique traversé. (B.Dussart, 1966 ; R.Bermond, 1973).

Le pH et la température ont été mesuré avec pH-mètre de type HI 931000.

III.4.2 Méthode d'analyse au laboratoire

Nous avons suivi la qualité des eaux souterraines à travers des analyses qui ont été effectuées au niveau des laboratoires de l'ADE (Algérienne des eaux), unité de Ghardaïa. Les procédures de dosage sont déduites des méthodes d'analyse standard (Tardat-Henry, 1984 ; Rejesk, 2002 ; Rodier, 2005).

III.4.2.1 Les paramètres physique

La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (Pescod, 1985 ; Rodier, 1984).

La conductivité électrique et la charge totale en sels dissous (TSD) ont été mesurées à l'aide d'un conductimètre de type WTW LF330/tetra.

III.4.2.2 les paramètres chimique

Les paramètres à étudier sont : les cations (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{+2} , TH) et les anions (Cl^- , SO_4^{-2} , NO_2^- , NO_3^{-2} , PO_4^{-3} , TAC), par des différentes méthodes.

III.4.2.2.1 La dureté totale (TH)

La dureté totale d'une eau est la concentration totale en ions calcium, magnésium et autres cations bivalents et trivalents de cette eau (Ghazali et al., 2013).

III.4.2.2.2 Calcium (Ca^{+2}) et Magnésium (Mg^{+2})

Pour le calcium : le titrage des ions de calcium avec une solution aqueuse de sel disodique (EDTA) à un pH compris entre 12 et 13. Le HSN, qui forme un complexe rouge avec le calcium, est utilisé comme indicateur.

Pour le magnésium : Le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage. Lors du titrage, l'EDTA réagit tout d'abord avec les ions calcium combinés avec l'indicateur qui vire alors de la couleur rouge à la couleur bleu clair (Rodier J., 1996).

III.4.2.2.3 Titre alcalimétrique complet (TAC)

Se réalise par la méthode volumétrique. Le titre alcalimétrie complet ou TAC correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates. Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence d'un indicateur coloré (Rodier J., 1996).

III.4.2.2.4 Les Chlorures (Cl^-)

Réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition d'un petit excès d'ions argent et formation du chromate d'argent brun-rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés

comme indicateur. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage. Durant le titrage, le pH est maintenu entre 5 et 9,5 afin de permettre la précipitation (ADE, 2015).

III.4.2.2.5 Sodium Na^+ et de Potassium K^+

Principe : Aspiration de l'échantillon dans une flamme de gaz présentant une énergie thermique suffisante pour provoquer l'émission de radiations caractéristiques du sodium et du potassium présents dans la solution. Mesure de l'intensité à une longueur d'onde de 589.0nm pour le sodium et de 766.5nm pour le potassium (ADE, 2015).

Pour le sodium en utilisons une solution de NaCl come solution étalon.

Pour le potassium la solution étalon et celle de KCl.

Les résultats de Sodium et de potassium en mg/l.

III.4.2.2.6 Sulfates (SO_4^{2-})

Les ions sulfates sont précipités à l'état de sulfate de baryum et évalués gravimétriquement.

III.4.2.2.7 Nitrates (NO_3^{2-})

La teneur en nitrates dans l'eau des puits liée à l'apport des engrais (Chapman & Kimstach, 1996).

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosnylate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique.

III.5. Matériels et mode opératoire

| <i>paramètres</i> | <i>Mode opératoire</i> |
|------------------------|--|
| pH, T° | étalonnage de l'appareille avec la solution tampon pH=4, pH=7 et pH= 10 ; A la fin de la mesure, rincer l'électrode avec de l'eau distillée. |
| C.E, TDS | D'une façon générale, opérer de la verrerie rigoureusement propre et rincée, avant usage, avec de l'eau distillée. Faire la mesure en prenant soin que l'électrode soit complètement immergée dans le récipient continuant de l'eau à examinée. La conductivité est donnée directement en $\mu\text{S}/\text{cm}$. |
| TH | <ul style="list-style-type: none"> * Prendre 50 ml (25ml d'eau à analyser) et complété d'eau distillé ; * 4ml solution tampon PH=10 (solution de NH_4Cl) ; * présence de l'indicateur coloré la solution ; * colorer en rouge foncé ou violet ; * titrage avec l'EDTA 0,01N ; * virage est atteint par la couleur Bleu royale. <p>Expression des résultats $[\text{TH}] \text{ mg/l} = \text{VEDTA} \times F \times 20$.</p> |
| Ca²⁺ | Prendre 50 ml d'eau à analyser ; Ajouter 2 ml de NaOH à 2 N ; Ajouter du Murexide ; Pince de HSN ; Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage (violet). $[\text{Ca}^{2+}] \text{ mg/l} = V1 \times F \times 8.016$. |
| Mg²⁺ | Prendre 50 ml d'eau à analyser ; Ajouter 2 ml de NH_4OH (10,1 N) ; Ajouter noir eriochrome ; Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage (bleu). $[\text{Mg}^{2+}] \text{ mg/l} = (V2-V1) \times F \times 4.86$. |

| | |
|-------------------------------|--|
| TAC | Prendre 100 ml (50ml d'eau à analyser) et complété d'eau distillé. Ajouter 2 gouttes méthylorange. Et titrer avec HCL jusqu'au virage (Rouge brique). $TAC \text{ mg/l} = (V-0.5) \times F \times 12.2$ |
| Cl ⁻ | Prendre 100 ml (50ml d'eau à analyser) et complété d'eau distillé ; Ajouter 3 gouttes de K ₂ CrO ₄ (coloration jaunâtre) ; Titrer avec Ag NO ₃ à 0,01 N jusqu'à coloration brun rougeâtre. $Cl \text{ mg/l} = \frac{Vs + C + F + f}{Va}$ |
| SO ₄ ⁻² | <p>Introduire 100ml d'eau à analyser dans un bécher. Ajouter 5ml d'acide chlorhydrique à 10% .Chauffer jusqu'à ébullition tumultueuse en agitant constamment pour éviter les projections. Faire tomber goutte à goutte 20 ml de solution de chlorure de baryum à 10% .Prolonger l'ébullition pendant 10 minutes sans interrompre l'agitation. Laisser reposer. S'assurer que la précipitation est complète par l'addition d'une petite quantité de chlorure de baryum.</p> <p>Décanté le liquide surnageant encore chaud en le laissant écouler le long d'un agitateur au-dessus du filtre sans cendres. Laisse, placer sur un entonnoir de joulie .Entrainer le moins possible de précipiter au cours de cette opération.</p> <p>Laver le précipité resté dans le bécher avec de l'eau bouillante. Agiter. Laisser déposer 5 minutes.</p> <p>Décanté à nouveau sur le filtre. Pour finir, entrainer le précipité sur le filtre, en détachant, avec un agitateur muni d'un bout de caoutchouc, la parcelle de sulfate adhérent aux parois du bécher. Laver le précipité à l'eau distillée bouillante jusqu'à ce que les eaux de lavage ne précipitent plus par le nitrate d'argent (élimination de l'excès de chlorure de baryum).</p> <p>Laver une dernière fois à l'alcool puis à l'éther. Porter le filtre et l'entonnoir à l'étuve à 500 C0 jusqu'à dessiccation complété. Renverser délicatement le filtre au-dessus d'une capsule de platine préalablement tarée après avoir été portée au rouge et refroidie dans un dessiccateur . Tapoter Légèrement le filtre pour faire tomber les particules adhérent au filtre. Saisir la pointe du filtre entre les mors d'une pince métallique et calciner au-dessus de la capsule en laissant tomber la pointe avant que la flamme ne l'atteigne. Laisser refroidir. Ajouter 2à3 gouttes d'acide nitrique. Evaporer doucement en évitant les projections, de préférence au bain-marie. Calciner .Laisser refroidir dans un dessiccateur et peser .Soit P le poids de sulfate de baryum trouvé</p> $SO_4^{-2} \text{ mg/l} = \Delta P * 4415.5$ |
| NO ₃ ⁻² | Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser ; Ajouter 2 à 3 gouttes de NaOH à 30 % ; Ajouter 1 ml de salicylate de sodium ; Evaporer à sec au bain marie ou à l'étuve 75 - 88° C ; (ne pas surcharger ni surchauffer très longtemps) laisser refroidir ; Reprendre le résidu avec 2 ml H ₂ SO ₄ et laisser reposer 10 mn ; Ajouter 15 ml d'eau distillée ; Ajouter 15 ml de tartrate double de sodium et de potassium puis passer au Spectromètre UV-Visible à la longueur d'onde de 415 nm. |

III.6. Traitement des données hydrochimiques

Différentes bases de données hydrochimiques ont été élaborées à partir des données récoltées. Cette section présente l'élaboration de ces bases de données hydrochimiques ainsi que les différentes méthodes d'analyse appliquées aux bases de données résultantes afin de caractériser la chimie de l'eau souterraine.

III.6.1. Précision des mesures

Une fois les résultats d'analyse obtenus, ces derniers doivent être vérifiés.

Un premier contrôle a été réalisé en calibrons les instruments de mesure avant chaque début de journée de prélèvements, pour assurer un maximum de précision aux résultats.

Un second contrôle de la validité des résultats s'est basé sur le calcul de la balance ionique, en se basant sur le principe de neutralité de l'eau suivant la relation (Hem, 1970 ; Appelo et Postma, 2005).

La balance ionique s'exprime en pourcentage d'erreur et se calcule par rapport de la différence des anions et des cations sur leur somme, le tout est multiplié par 100. Soit:

$$B.I(\%) = \frac{\sum_{\text{cation}} - \sum_{\text{anion}}}{\sum_{\text{cation}} + \sum_{\text{anion}}} \times 100$$

Remarque : la somme des cations et la somme des anions, exprimés en milliéquivalent par litre d'eau (méq/L).

$$\text{méq/L} = \text{mg/l} * \text{valence} / \text{masse atomique}$$

La valeur du pourcentage obtenu peut être positive ou négative. (Subramani et al. 2010) considèrent acceptable un écart de $\pm 10\%$ d'erreur sur la balance ionique. À l'inverse, si l'erreur évaluée est supérieure à $\pm 10\%$, l'analyse est rejetée. Au total, 11 échantillons dépassent cette limite tableau (IV-1).

Le calcul de la balance ionique est fait à l'aide du logiciel DIAGRAMMES 6.48 (Logiciel d'hydrochimie, 2013).

III.6.2. Méthodes d'analyse graphique

Un important aspect de l'étude des eaux souterraines est la compilation et la présentation des données chimiques de la façon la plus avantageuse possible afin de faciliter notre compréhension (D'Amore et al., 1983).

Pour caractériser au mieux la géochimie de l'eau échantillonnée, une représentation graphique (le diagramme de piper) a été réalisée.

III.6.2.1 Diagrammes

III.6.2.1.1 Diagramme de piper

Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour

les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques (Sekiou et al, 2014).

III.6.2.2. XLSTAT

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des «individus» (forages, sources) sur lesquels sont mesurées des «variables quantitatives» (les éléments majeurs et les éléments traces) disposées en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs (Cloutier et al., 2008 ; Yidana et al., 2008).

CHAPITRE V

Caractérisation des eaux souterraines

IV.1. Introduction

Les eaux souterraines sont les eaux de sous-sol, ils sont une ressource naturelle très importante et a un rôle important dans l'économie. En général, les eaux souterraines sont une source fiable d'eau pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable et l'industrie.

La composition et la qualité des eaux souterraines sont à l'origine liées à la nature géologique du terrain. Elles ont un impact direct sur celle des eaux de surface, ainsi que sur les écosystèmes aquatiques et terrestres associés.

Les eaux souterraines sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, mais la croissance démographique et la modernisation de l'agriculture ainsi que le développement industriel entraînent un grand problème de détérioration de la qualité de cette source souterraine, déjà en quantité limitée (Degremont, 1978).

L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la région d'étude.

Les résultats physico-chimiques obtenus seront la base de nos interprétations :

- Déterminer les faciès chimiques des eaux ;
- Donner une idée sur la potabilité et l'aptitude de ces eaux à l'irrigation selon les normes ;

Une représentation graphique facilitant et aidant l'interprétation.

IV.2. Caractéristiques physiques des eaux

Les paramètres mesurés sur le terrain concernent, le pH et la conductivité électrique.

IV.2.1. pH des eaux

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau (aptitude à dissoudre le calcaire).

Le pH des eaux de la nappe albienne varie entre 7,55 et 8,06. Il apparaît que le pH de toutes ces eaux est voisin de la neutralité avec un caractère alcalin. Les valeurs du pH enregistrées oscillent entre 7,55 et 8,06 avec une médiane de 7,9 (fig. IV-1).

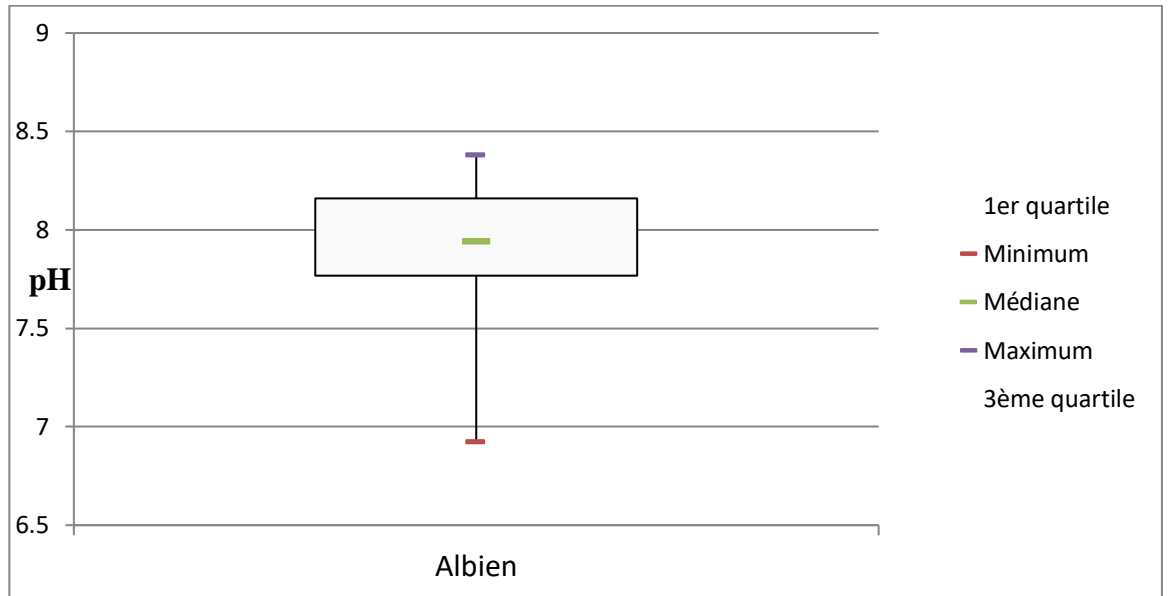


Figure IV-1 : Box plots de pH "boîtes à moustaches", n Albien = 10.

Les expériences de (Bouchahm et Achour, 2008), ont montré que le pH des eaux du Sahara Septentrional dans toutes les eaux est voisin de la neutralité avec un caractère plus ou moins alcalin.

IV.2.2. La conductivité électrique

La conductivité électrique est généralement liée à la concentration des sels dissous, elle a aussi une liaison avec la nature lithologique, la vitesse d'écoulement d'une nappe et le temps de séjour d'une eau.

La conductivité est également en fonction de la température de l'eau, et proportionnelle à la minéralisation (Mens et Derouane, 2000 ; Rodier, 2009).

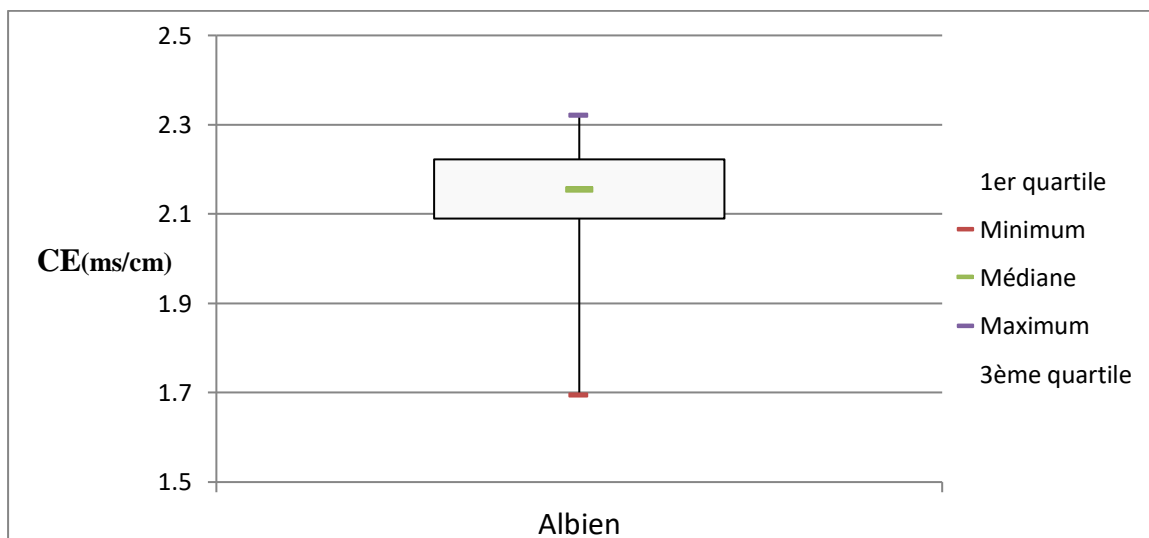


Figure IV-2 : Box plots de la conductivité électrique, n Albien = 10.

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux (fig. IV-2) varient entre 1,694 et 2,32 mS/cm.

IV.2.3. La minéralisation totale

La conductivité électrique traduit le degré de minéralisation globale, elle nous renseigne sur le taux de salinité. Le calcul de la conductivité permet une évaluation rapide et approximative de la minéralisation globale ou la salinité de l'eau et même permet d'en suivre l'évolution (Boeglin, J. C., 2000 ; Dib I., 2009).

Tableau IV-1 : Calcul de la minéralisation à partir de la conductivité mesurée à 20°C (Rejsek, 2002).

| Conductivité en $\mu\text{S/cm}$ | Minéralisation en mg/l |
|----------------------------------|--------------------------------|
| < 50 | Conductivité \times 1,365079 |
| Entre 50 et 166 | Conductivité \times 0,947658 |
| Entre 166 et 333 | Conductivité \times 0,769574 |
| Entre 333 et 833 | Conductivité \times 0,715920 |
| Entre 833 et 10 000 | Conductivité \times 0,758544 |
| > 10 000 | Conductivité \times 0,850432 |

La minéralisation correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau, nous l'avons déterminé à partir de la conductivité des échantillons prélevés, pour les eaux de la nappe albienne de Ghardaïa selon la relation suivante :

Minéralisation (mg/l) = Conductivité ($\mu\text{S/cm}$) \times 0,758544.

| Conductivité en $\mu\text{S/cm}$ | Minéralisation en mg/l |
|----------------------------------|------------------------|
| 2200 | 1668,7968 |
| 2320 | 1759,82208 |
| 2080 | 1577,77152 |
| 2160 | 1638,45504 |
| 2230 | 1691,55312 |
| 1694 | 1284,973536 |
| 2150 | 1630,8696 |
| 2120 | 1608,11328 |
| 1836 | 1392,686784 |
| 2280 | 1729,48032 |

IV.3. Caractérisation chimique des eaux

Dans les études de caractérisation des eaux de la nappe albienne de Ghardaïa, l'importance des ions (valeurs exprimées en meq/l) suit l'ordre suivant :

- Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Ca^{+2} - Mg^{+2} - HCO_3^- - K^+ - NO_3^- - F^{+2} .

La contribution relative des ions dominants à la minéralisation des eaux est illustrée sur la (fig. IV-3). Le graphe à secteur apparaît que les chlorures occupent une part importante au niveau du pool ionique de la région.

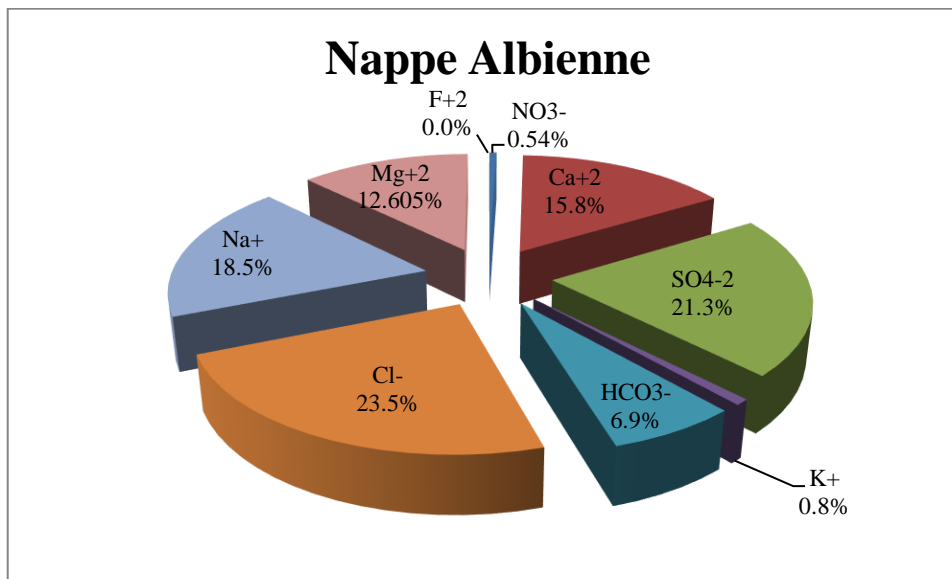


Figure IV-3 : pourcentage des éléments chimique dans l'eau de la nappe Albienne.

IV.3.1. Les éléments majeurs

IV.3.1.1. Les cations

Le calcium (Ca^{+2}), le magnésium (Mg^{+2}), le sodium (Na^+), et le potassium (K^+), sont des paramètres utiles, en combinaison avec les anions pour la détermination de la minéralisation dans l'eau.

Les résultats des analyses chimiques des cations sont présentés dans le tableau IV-2.

La teneur en calcium des eaux de la nappe Albienne varie entre 133,1 et 184,9 mg/l. Une moyenne de 152,6 et un Ecart-type de 17,56 mg/l.

Les données du magnésium sont par ailleurs comprises entre 53,46 et 84,56 mg/l (moy. $73,88 \pm 9,766$ mg/l).

Au niveau de la nappe Albienne le teneur en sodium sont faibles et varient de 150 à 250,3 mg/l ($204,9 \pm 29,73$ mg/l).

Quand au potassium, ces teneurs sont compris entre 11,25 à 20 mg/l ($14,85 \pm 3$ mg/l).

Tableau IV-2 : Variations des concentrations des cations selon.

| Nappe | paramètres | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | K ⁺ |
|----------|------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | | mg/l | | | |
| Albienne | Min | 133,1 | 53,46 | 150 | 11,25 |
| | Max | 184,9 | 84,56 | 250,3 | 20 |
| | Moyenne | 152,6 | 73,88 | 204,9 | 14,85 |
| | Ecart-type | 17,56 | 9,766 | 29,73 | 3,007 |

IV.3.1.2. Les anions

Les chlorures (Cl⁻), les sulfates (SO₄⁻²), les bicarbonates (HCO₃⁻), sont aussi des paramètres utiles, en combinaison avec les cations pour la détermination de la salinité dans l'eau.

Les résultats des analyses chimiques des anions sont présentés dans le tableau (IV-3). Les chlorures prennent une part importante à la minéralisation de la nappe, sa teneur moyenne est de 401,9 ± 48,95 mg/l au niveau de la nappe Albienne (min 330,4 et max 482,2 mg/l).

Les sulfates sont également présents. Leurs teneurs varient entre 380,7 et 620,7 mg/l une moyenne de 493,9 ± 68,75 mg/l pour les eaux de la nappe du l'Albien Les sulfates avec les chlorures sont parmi les éléments majeurs qui déterminent le faciès chimique de l'eau dans la région.

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaire. dolomite....etc.) par des eaux chargées en gaz carbonique. L'équation de dissolution est donnée comme suit : $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$. Dans la nappe du l'Albien, les teneurs en ions bicarbonates varient de 169,6 à 292,8 mg/l (204 ± 35,56 mg/l).

Tableau IV-3 : Variations des concentrations des anions.

| Nappe | paramètres | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | HCO ₃ ⁻ |
|----------|------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | mg/l | | |
| Albienne | Min | 330,4 | 380,7 | 169,6 |
| | Max | 482,2 | 620,7 | 292,8 |
| | Moyenne | 401,9 | 493,9 | 204 |
| | Ecart-type | 48,95 | 68,75 | 35,56 |

IV.3.2. Faciès chimiques et formules caractéristiques des eaux

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et cations sur deux triangles. Les unités utilisées sont les pourcentages en meq/l par rapport au total de ces ions.

L'intersection des deux lignes issues des triangles dans le losange représente l'analyse de l'échantillon. La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de catégoriser les familles des points d'eau.

Pour cette nappe du l'Albien (fig. IV-4) ; (fig. IV-5), les eaux sont de faciès chloruré sodique.

Selon les formules caractéristiques, les ions s'ordonnent de la manière suivante :

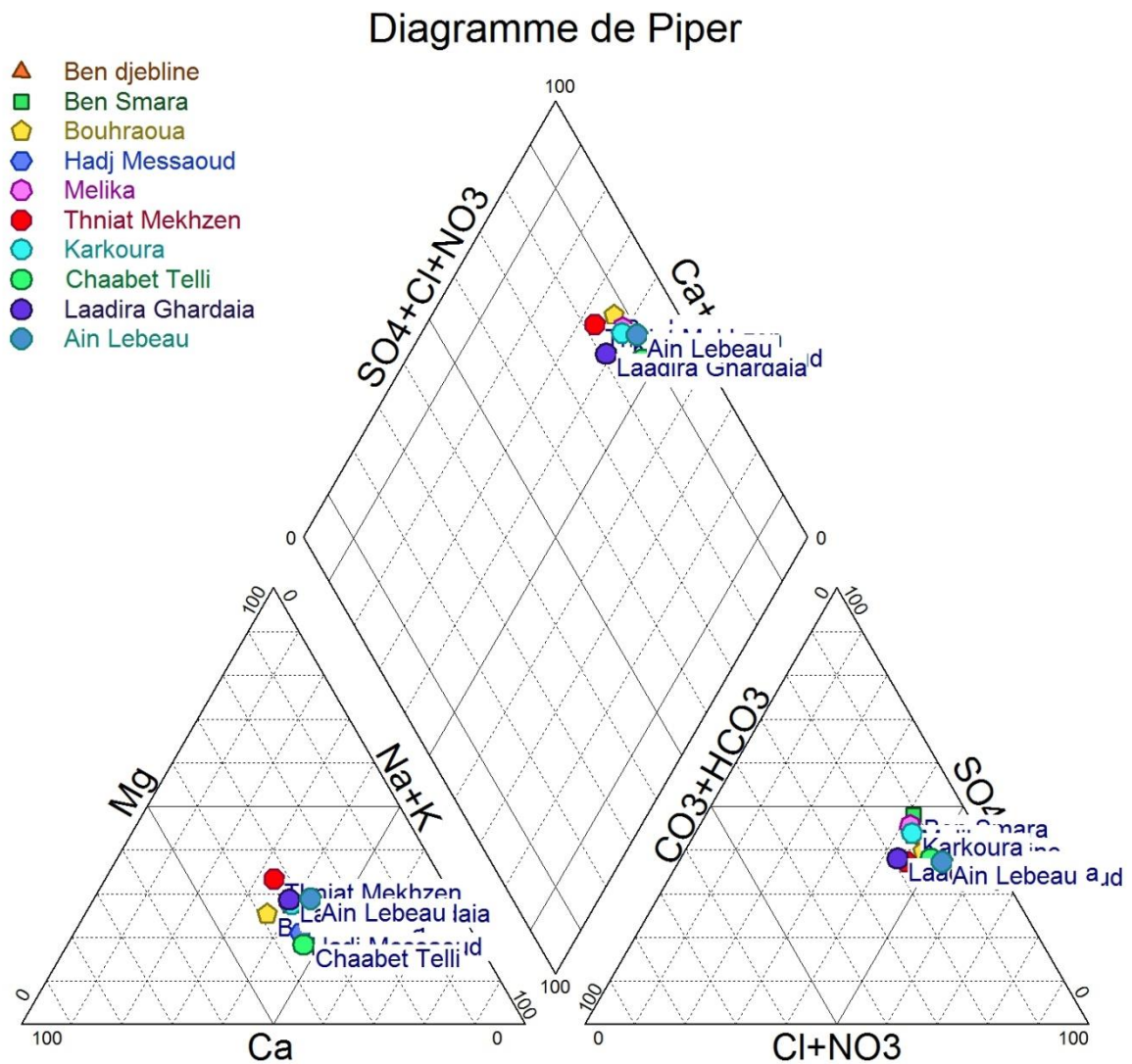


Figure IV-4 : *Diagramme de Piper pour la nappe Albienne.*

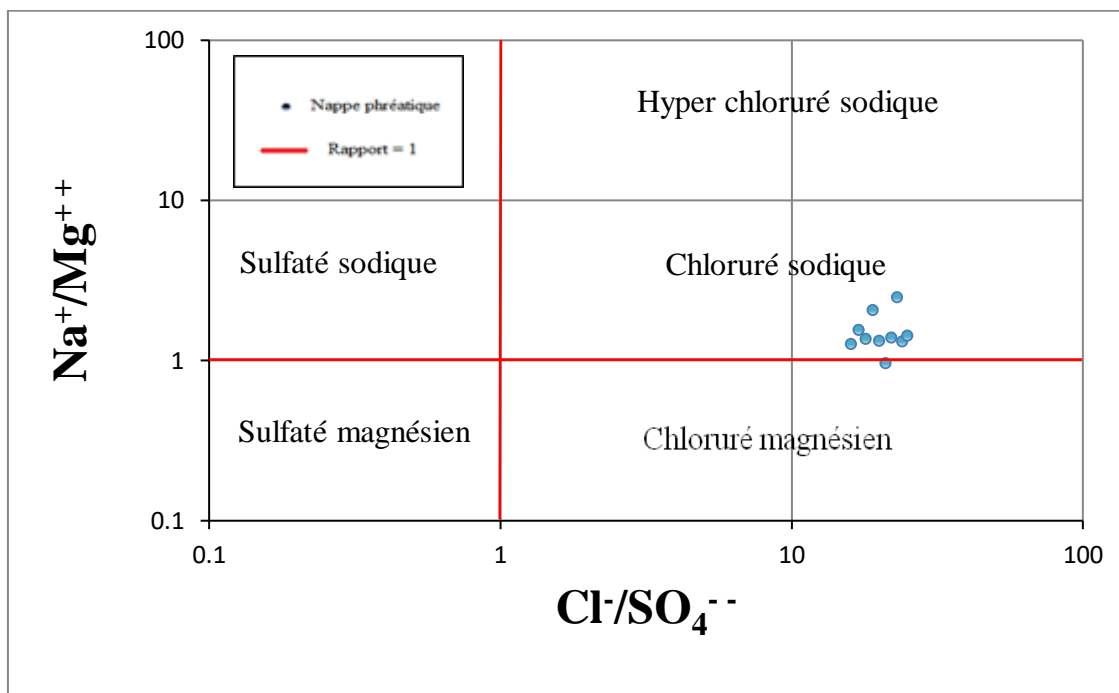


Figure IV-5 : Caractérisation du faciès chimique de la nappe du l'Albien.

IV.4. Analyse en Composantes Principales

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les eaux de la nappe Albienne de Ghardaïa. Le logiciel utilisé est Xlstat premium 2019.2 : <http://www.xlstat.com>.

L'objectif de cette analyse étant de décrire ou de classer les données pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydrochimique des aquifères, En effet, l'étude des ressemblances entre les différents échantillons et les liaisons entre les variables permettent de mettre en évidence les associations existant entre les différentes variables et l'existence éventuelle de sous populations. L'ACP a été faite sur 10 paramètres physico-chimiques provenant de l'analyse d'eaux échantillonnées sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les éléments statistiques utilisés pour faciliter l'interprétation des résultats sont :

- La matrice de corrélation ;
- Les valeurs propres des facteurs ;
- Les vecteurs propres ;

IV.4.1 ACP des eaux de la nappe Albienne

Les pourcentages de variance exprimés par les facteurs F1 et F2 de la nappe Albienne sont respectivement de 38,71 % et de 22,75 %, soit 61,47 % des informations. Les facteurs F3 et F4 expriment respectivement 13,68 % et 11,99 % de la variance. Plusieurs relations entre

les éléments chimiques ont été observées, la projection des variables sur le plan factoriel F1xF2 montre l'existence de trois groupes (fig.IV. 6 fig.IV. 7)

- Le facteur 1 deux groupes, Le premier est exprimé par le Ca^{2+} et Na^+ et le second est exprimé par la TDS, Cl^- , SO_4^{2-} et K^+ . la projection des individus montre que cet axe est représenté surtout par les forages d'Ain Lebeau, Melika, Ben Smara, Hadj Messaoud et Chaabet Telli.
- Le facteur 2, affiche le troisième groupe exprimé par la température F^{2+} , HCO_3^- , pH, Mg^{2+} , NO_3^- . Il est représenté principalement par les forages Ben Djebline, Bouhraoua, Thniet Imakhzen .

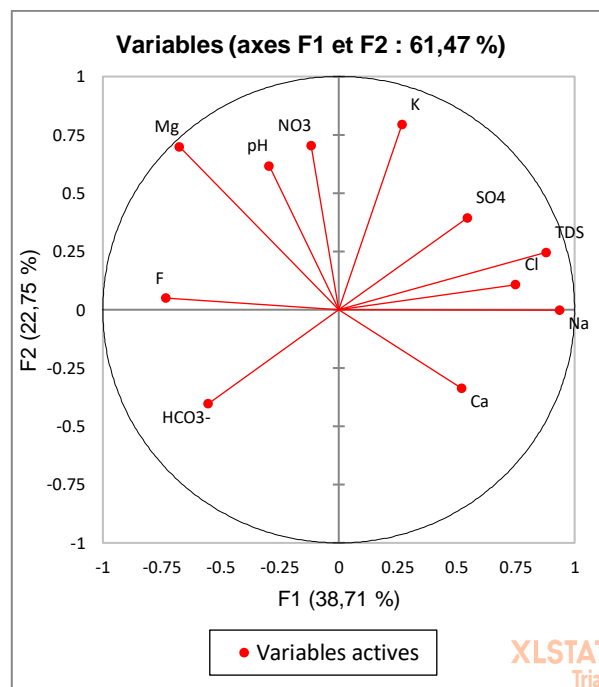


Figure IV-6 : Représentation graphique en ACP de la nappe de l'Albien.

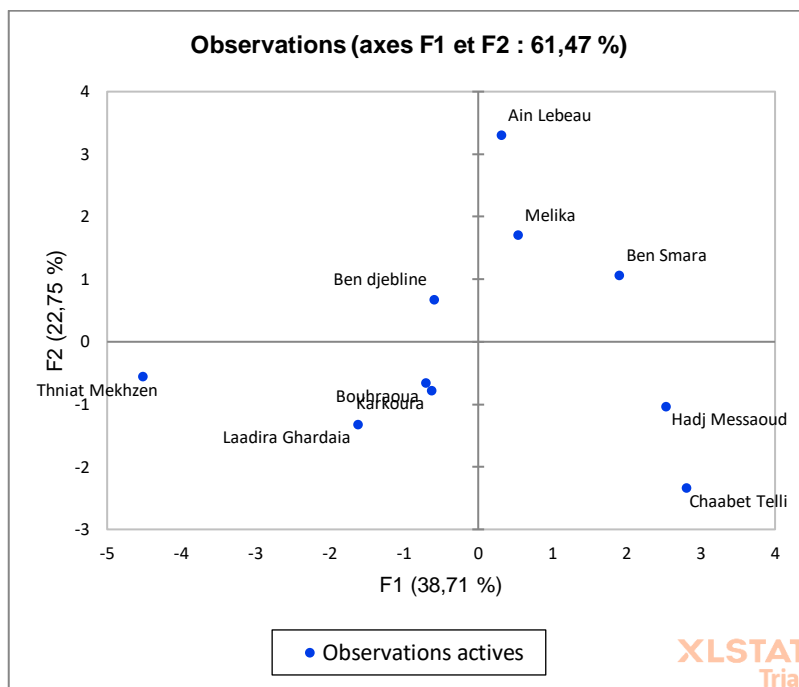


Figure IV-7 : Représentation graphique des Individus de la nappe de l’Albien.

IV.5. Corrélations entre les éléments majeurs

L’examen du tableau de la matrice de corrélation permet de voir qu’il existe une forte corrélation entre :

| | |
|------------------------------------|-------|
| Na ⁺ / Cl ⁻ | 0,898 |
| TDS/Na ⁺ | 0,813 |
| TDS/ SO ₄ ⁺⁺ | 0,730 |

Tableau IV-4 : Matrice de corrélation des éléments physico-chimiques.

| Variables | Cl | NO3 | SO4 | HCO3- | Na | K | Mg | Ca | TDS | pH | F |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cl | 1 | 0,218 | -0,003 | -0,511 | 0,898 | 0,062 | -0,485 | 0,244 | 0,598 | 0,089 | -0,517 |
| NO3 | 0,218 | 1 | -0,074 | -0,032 | 0,027 | 0,480 | 0,550 | -0,179 | 0,140 | 0,282 | 0,346 |
| SO4 | -0,003 | -0,074 | 1 | -0,303 | 0,308 | 0,627 | 0,002 | 0,138 | 0,730 | -0,135 | -0,538 |
| HCO3- | -0,511 | -0,032 | -0,303 | 1 | -0,496 | -0,507 | 0,173 | -0,331 | -0,316 | -0,282 | 0,236 |
| Na | 0,898 | 0,027 | 0,308 | -0,496 | 1 | 0,137 | -0,650 | 0,417 | 0,813 | -0,197 | -0,651 |
| K | 0,062 | 0,480 | 0,627 | -0,507 | 0,137 | 1 | 0,331 | 0,056 | 0,427 | 0,129 | 0,015 |
| Mg | -0,485 | 0,550 | 0,002 | 0,173 | -0,650 | 0,331 | 1 | -0,578 | -0,352 | 0,625 | 0,489 |
| Ca | 0,244 | -0,179 | 0,138 | -0,331 | 0,417 | 0,056 | -0,578 | 1 | 0,350 | -0,523 | 0,029 |
| TDS | 0,598 | 0,140 | 0,730 | -0,316 | 0,813 | 0,427 | -0,352 | 0,350 | 1 | -0,238 | -0,681 |
| pH | 0,089 | 0,282 | -0,135 | -0,282 | -0,197 | 0,129 | 0,625 | -0,523 | -0,238 | 1 | 0,028 |
| F | -0,517 | 0,346 | -0,538 | 0,236 | -0,651 | 0,015 | 0,489 | 0,029 | -0,681 | 0,028 | 1 |

On a représenté les relations entre les éléments chimiques dont le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7 forme de graphiques

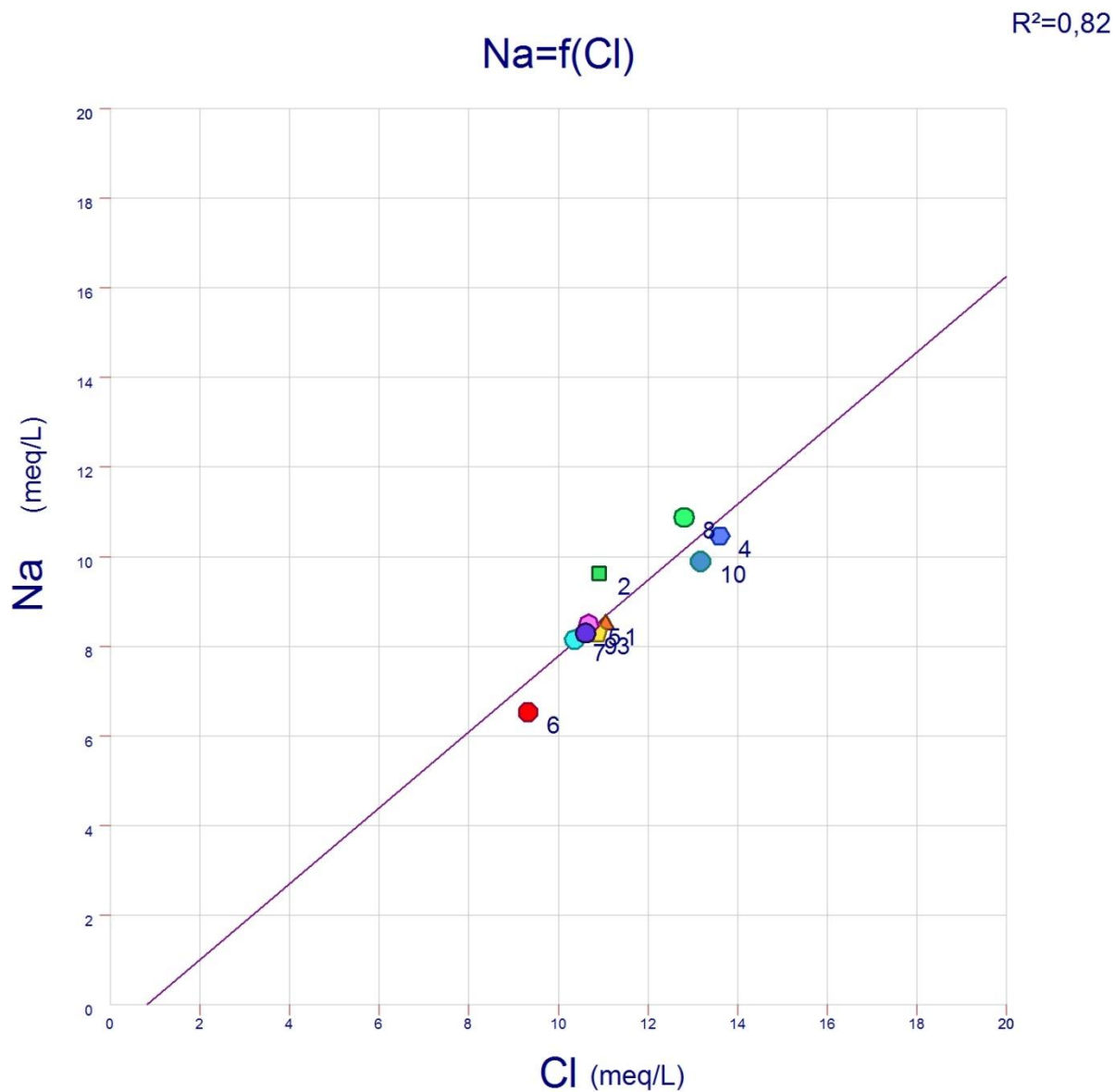


Figure IV-8 : Le Couple Na/Cl

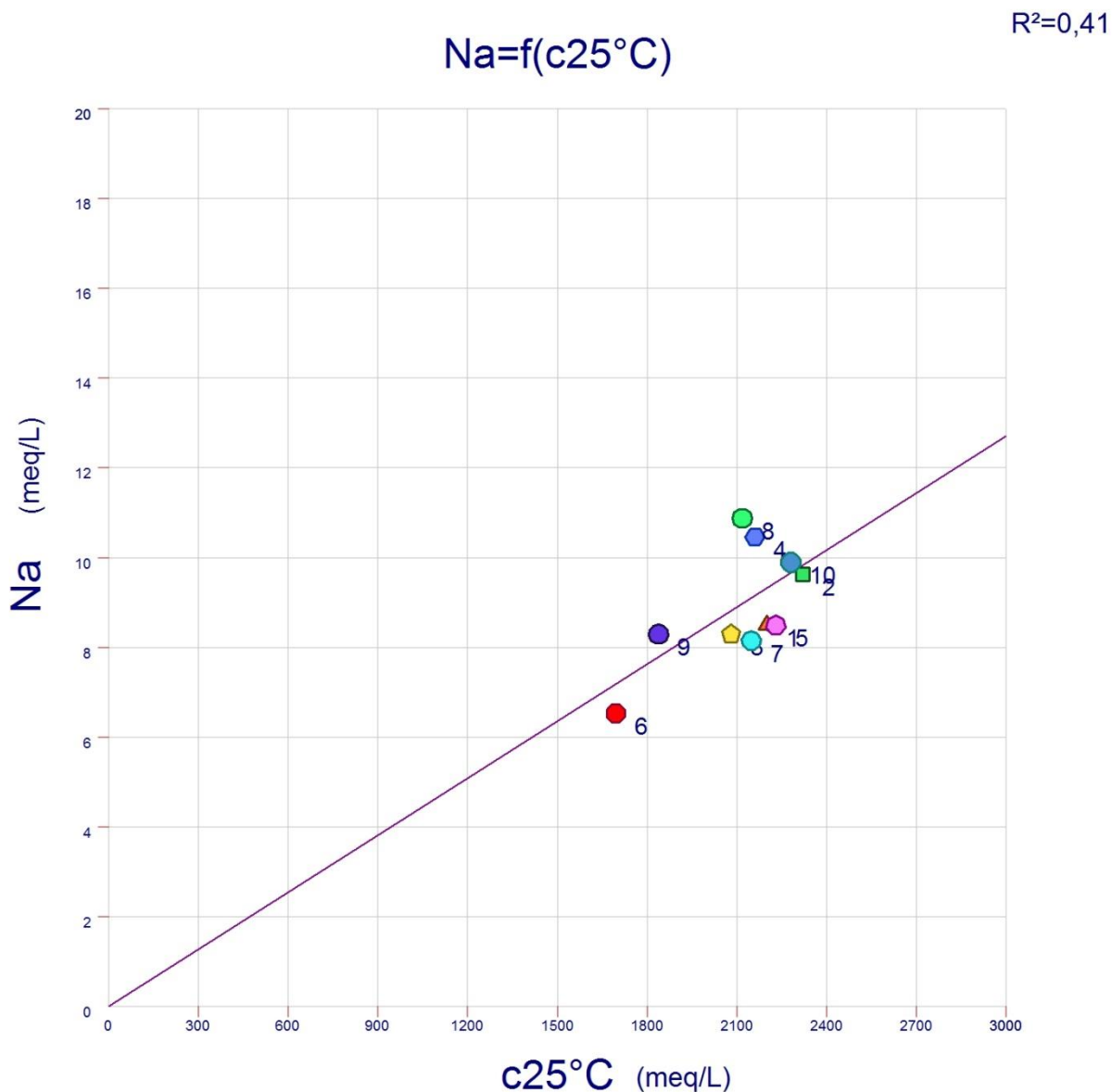


Figure IV-9 : Le Couple Na/C.E

IV.6. Potabilité des eaux (normes et qualité)

Afin de déterminer la qualité des eaux prélevées au laboratoire, il est impératif de vérifier qu'elles répondent aux normes de la qualité des eaux par la détermination de certains facteurs.

Des grandes quantités d'eau sont utilisées quotidiennement pour différentes raisons domestiques (faire de vaisselle, douche, cuisinier...etc.), agricoles (arrosages et irrigation...etc) et industrielles.

La destination d'une eau est déterminée après avoir connaître la qualité de cette eau vis-à-vis des normes demandées par les utilisateurs. Ces normes doit impérativement répondre

aux critères de potabilité données par l’OMS. Tandis qu’à l’irrigation, l’exigence est relativement moindre, elle est basée particulièrement sur la salinité et la texture du sol.

IV.6.1. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Une eau est caractérisée par certains paramètres accessibles à l'analyse. Tous ces derniers constituent la minéralisation de l'eau dont l'importance dépend principalement de la nature géologique des terrains traversés.

Selon la classification de la législation Algérienne, on distingue :

- **Les paramètres physico-chimiques :**

La température, la conductivité électrique, le calcium, le magnésium, le pH, le sodium, le potassium, les chlorures, les sulfates, la dureté totale, les silices, le résidu sec à 180 °C.

L’excès de certains sels (Chlorure de sodium ou de magnésium) dans l’eau peut lui rendre désagréable à la consommation humaine, comme il peut même engendrer des désordres physiologiques (Sulfate de Magnésium laxatif, propriété de certaines eaux minérales).pour cela la réglementation fixe des limites de concentration pour ces ions (Tableau IV-1).

- **Les substances indésirables :** dans cette rubrique, on classe : nitrates, nitrites, ammonium, phosphore.

Tableau IV-5 : Normes Algérienne de potabilité des eaux (Journal officiel, 2011).

| Paramètres | Valeurs limites |
|--|------------------------|
| pH | $\geq 6,5$ et ≤ 9 |
| Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 2800 |
| Résidu sec mg/l | 1500 |
| Dureté mg/l en CaCO_3 | 200 |
| Calcium (Ca^{+2}) mg/l | 200 |
| Magnésium (Mg^+) mg/l | 150 |
| Sodium (Na^+) mg/l | 200 |
| Potassium (K^+) mg/l | 12 |
| Chlorures (Cl) mg/l | 500 |
| Sulfates (SO_4^{-2}) mg/l | 400 |
| Nitrates (NO_3^{-2}) mg/l | 50 |

Afin d’évaluer et représenter la qualité d’eaux présentent dans la région de Ghardaia, nous avons utilisé des histogrammes. La ligne limite des normes Algérienne, facilite l’interprétation de ces histogrammes.

IV.6.1.1. Les éléments mesurés in-situ

Au niveau de la nappe albienne (fig. IV-10), les valeurs de la conductivité électrique varient entre 1694 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2320 $\mu\text{S}/\text{cm}$. les valeurs de la conductivité dans les toutes les forages sont conformement aux normes algériennes.

Les valeurs de pH sont dans les normes (fig. IV-11).

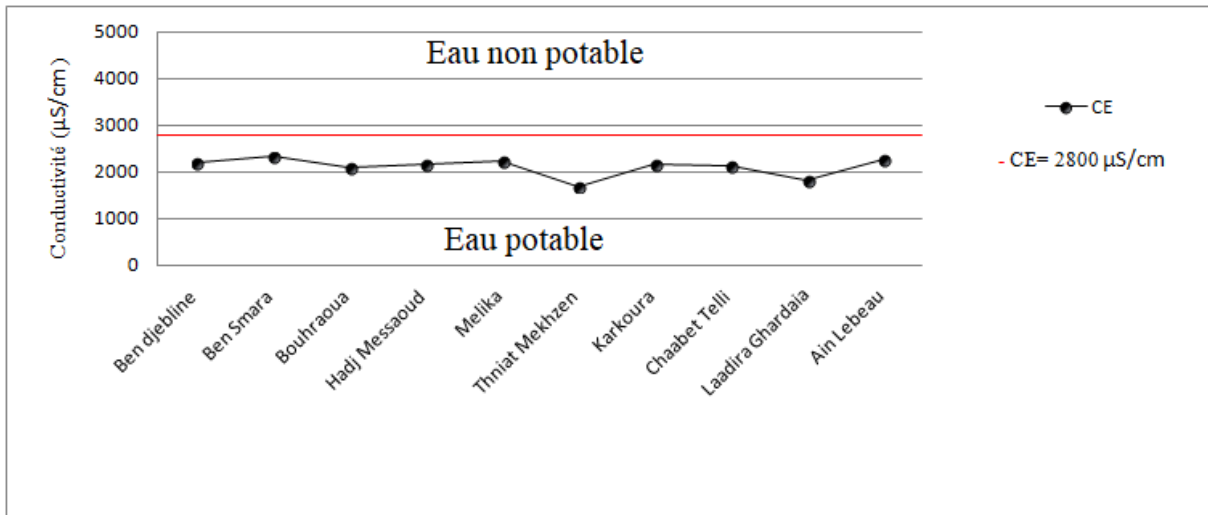


Figure IV-10: Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité.

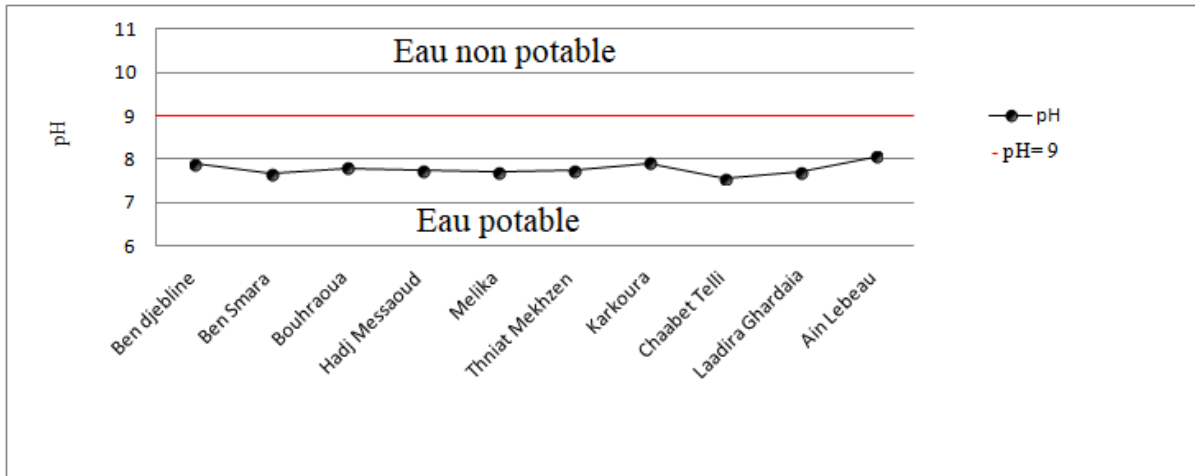


Figure IV-11 : Qualité de l'eau vis-à-vis le pH.

IV.6.1.2. Les anions

Dans l'ensemble des forages de cette nappe du l'Albien (Fig. IV-12) et (fig.IV-13), les chlorures ne dépassent pas la ligne de potabilité, par contre les sulfates dépassent la ligne de potabilité, sauf en ce qui concerne le forage (Thniat Mekhzen) où la concentration de sulfates est de 380 mg/l.

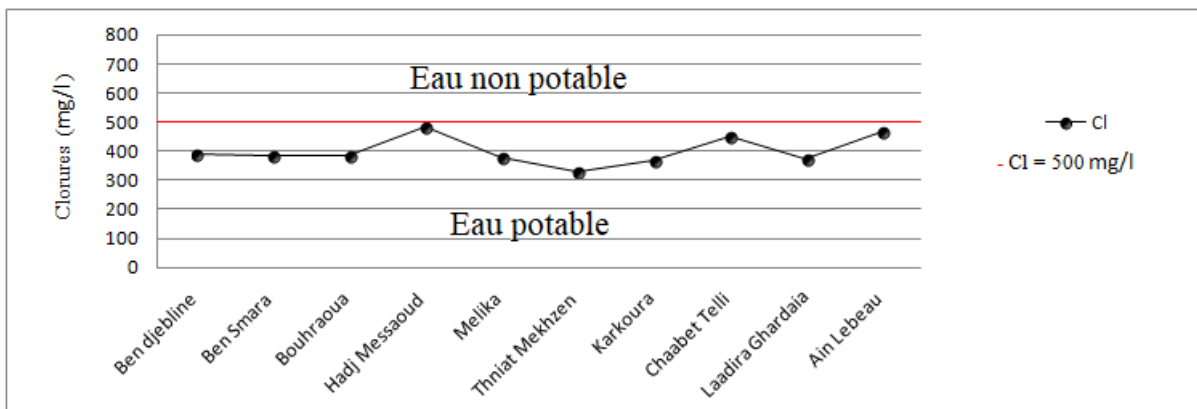


Figure IV-12 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Cl.

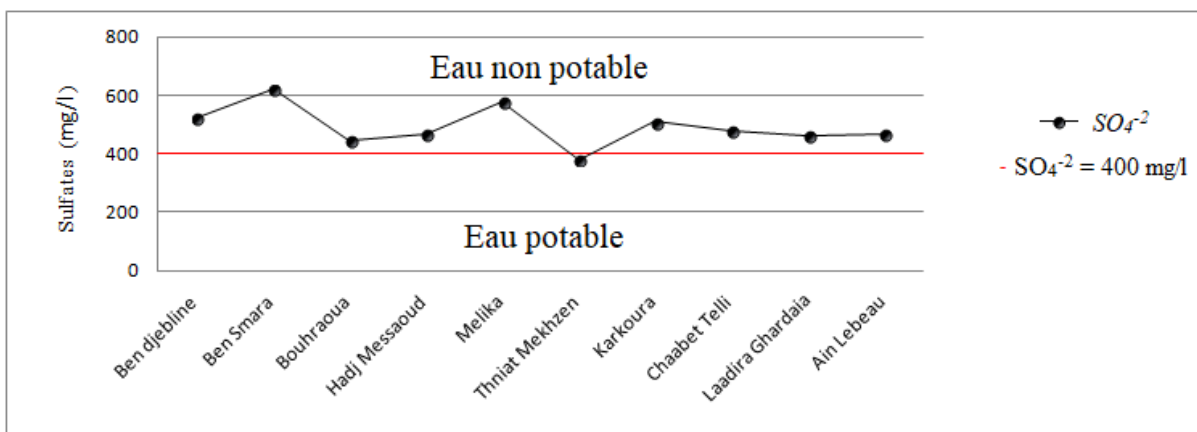


Figure IV-13 : Qualité de l'eau vis-à-vis le SO₄²⁻

IV.6.1.3. Les cations

Pour cette nappe (Fig. IV-13), les concentrations sont tout à fait différentes ou les valeurs du calcium sont faibles, ne dépassent pas 200mg/l, Le magnésium aussi présent des faibles concentrations conformes aux normes algériennes. Par contre le sodium et le potassium présentent des valeurs supérieures à la ligne de potabilité, à l'exception dans le forage (Thniat Makhzen).

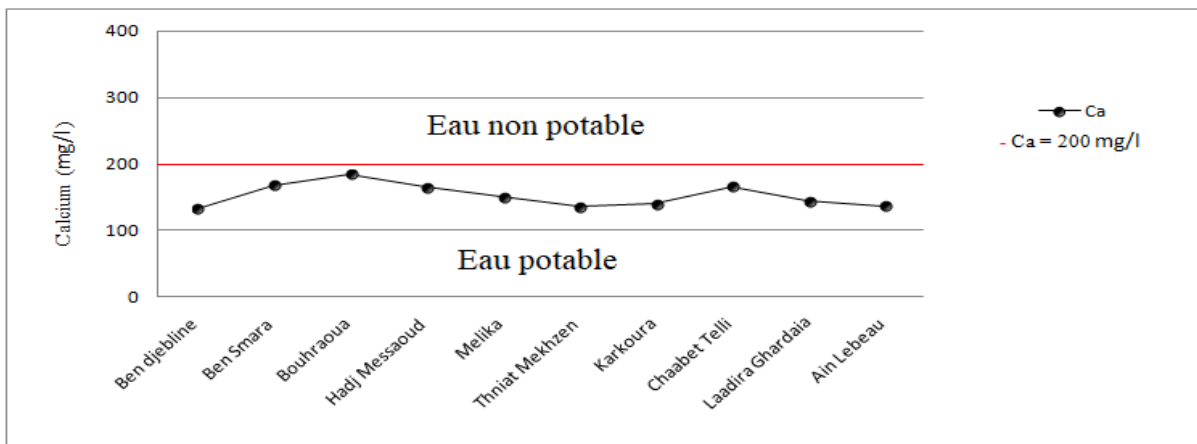


Figure IV-14 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Cation

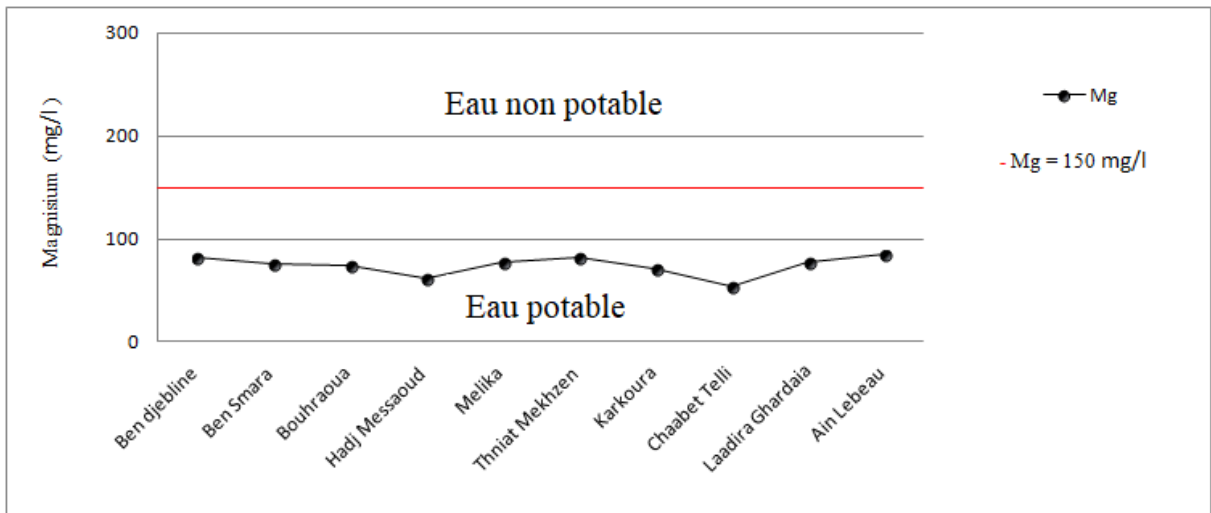


Figure IV-15 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Mg

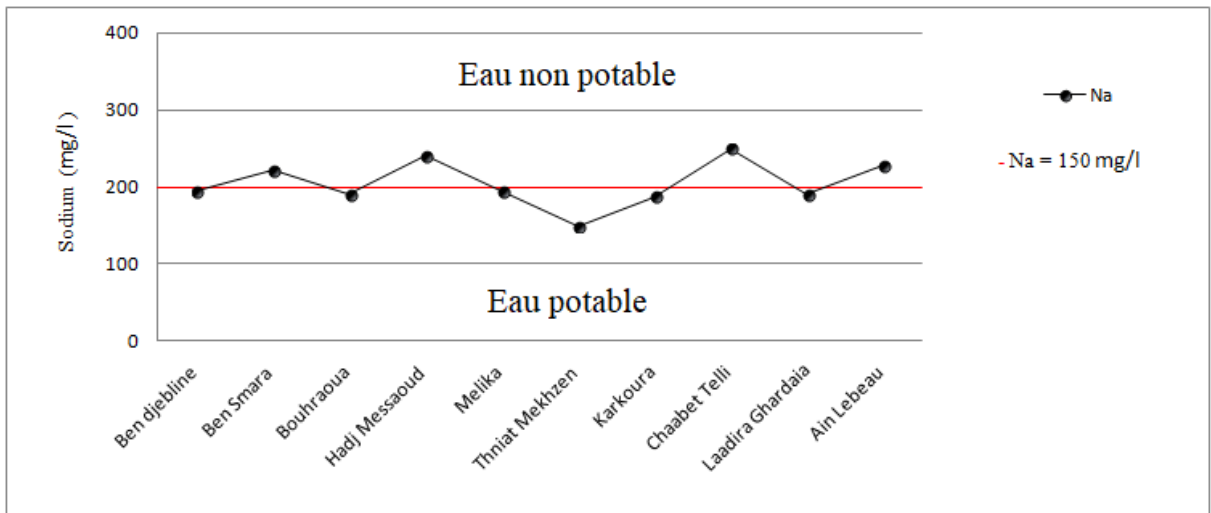


Figure IV-16 : Qualité de l'eau vis-à-vis le Na

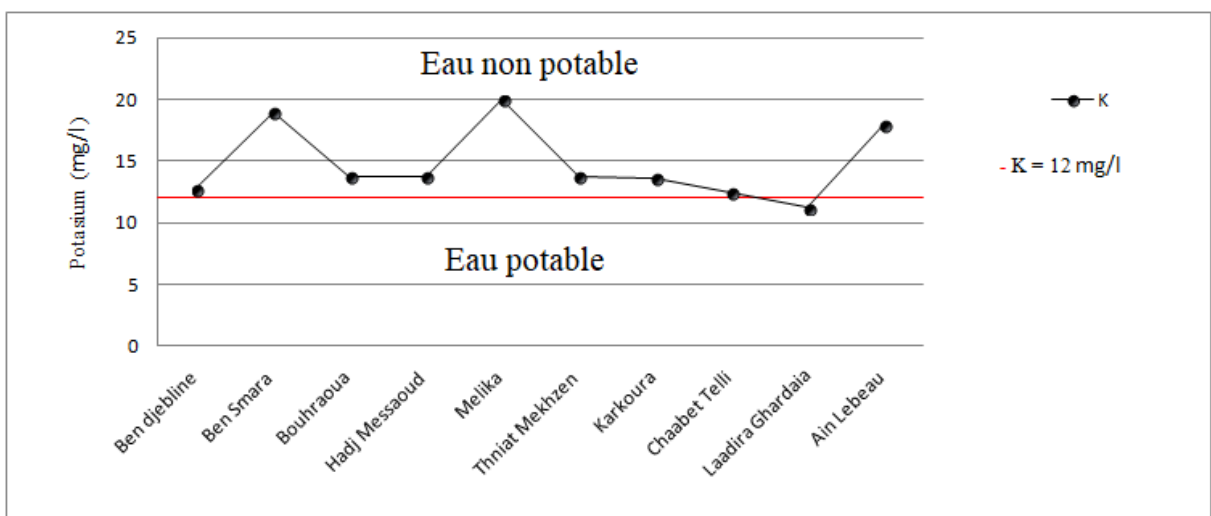


Figure IV-17 : Qualité de l'eau vis-à-vis le K

IV.6.2. Qualité des eaux destinées à l'irrigation

L'agriculture représente le plus important consommateur des ressources en eau. Ces ressources, suivant les régions dont elles proviennent, et leur contact éventuel avec des sources de pollution ont des caractéristiques très diversifiées.

De plus, vu la diminution des apports en eaux constatée depuis plusieurs décennies, les agriculteurs, notamment dans les régions continentales, s'intéressent à l'utilisation des eaux usées et les eaux salées. C'est ainsi que des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation ont été établies afin de :

- protéger le public et les ouvriers agricoles ;
- protéger les consommateurs des produits agricoles ;
- protéger les ressources en eau superficielle et souterraine et les sols ;
- protéger le matériel d'irrigation ;
- maintenir des rendements acceptables.

IV.6.2.1. Les risques du (SAR)

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace les calcium et les magnésium adsorbés (échange de bases) sur les argiles de sol et cause la dispersion des particules dans le sol (c.-à-d. si le calcium et le magnésium sont les cations prédominants adsorbés sur le complexe d'échange du sol, le sol tend à être facilement cultivé et a une structure perméable et granulaire).

Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure, par conséquent l'asphyxie des plantes.

Ce problème est également relié à plusieurs facteurs tels que le taux de salinité (voir ci dessous) et le type de sol. Par exemple les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux sols argileux quand ils sont irrigués avec de l'eau à haut SAR.

L'eau destinée à l'irrigation doit répondre à certaines exigences de sa qualité. Dans ce sens, on utilise le SAR et la minéralisation.

L'indice utilisé est le (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Tableau IV-6: Le risque du SAR dans l’eau d’irrigation

| | SAR | Notes |
|----------------|-----------|---|
| Nul | < 3.0 | Pas de restriction sur l’utilisation d’eau |
| Léger à modéré | 3.0 - 9.0 | Entre 3 et 6, une attention particulière doit être portée sur les récoltes sensibles ; Entre 6 et 8 du gypse doit être utilisé. Récoltes non sensibles. Des échantillons de sol doivent être prélevés et examinés tout les 1 ou 2 jours pour déterminer s’il y a une augmentation des teneurs en Sodium. |
| Elevé | > 9.0 | Domage sévère. |

Le SAR est défini par l’équation suivante (en meq/1) :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

L’ensemble des points d’eaux dans la nappe Albienne (fig. IV-18) présente un risque léger à modéré du SAR pour l’irrigation (plantes et sols), sauf pour le forage (Thniet Makhzen) présente un risque nul.

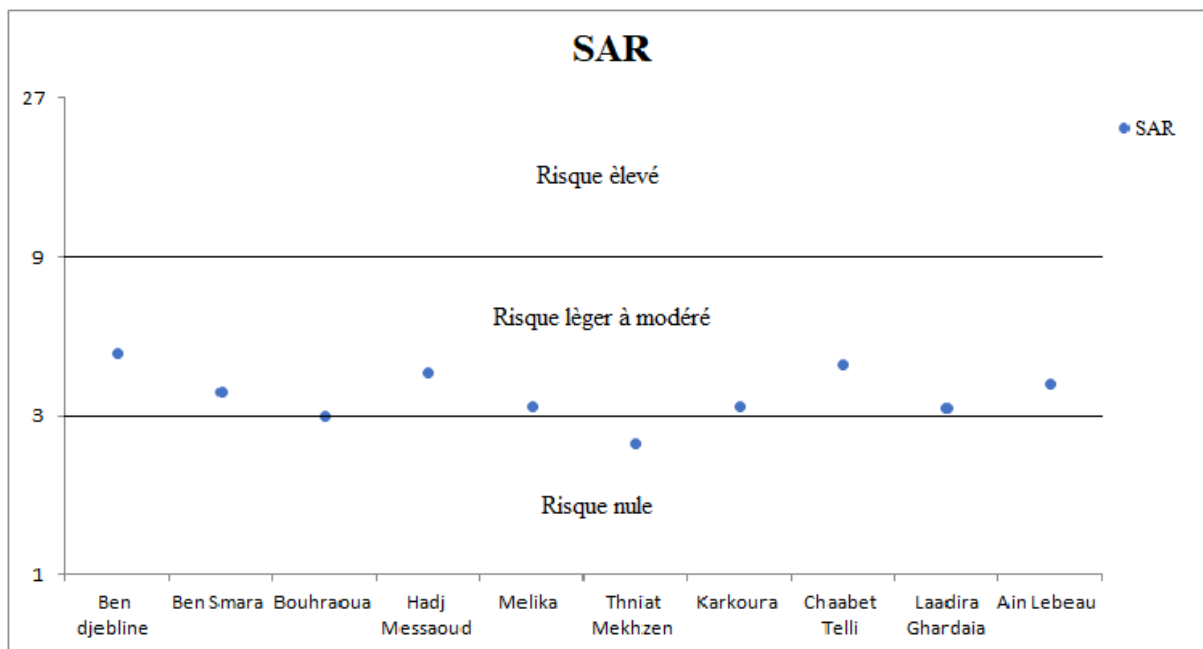


Figure IV-18 : Risque de SAR

IV.7. Conclusion

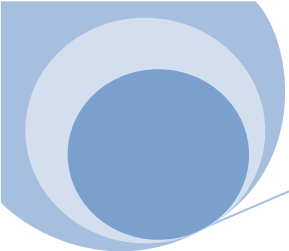
La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de catégoriser les familles des points d'eau, les eaux sont de faciès chloruré sodique.

Selon les formules caractéristiques, les ions s'ordonnent de la manière suivante :



Les résultats obtenus concernant la qualité des eaux de la nappe Albienne de la région de Ghardaïa, montrent que ces dernières ont un excès de teneur en sel de sodium, potassium et sulfate vis-à-vis les normes autorisées pour la consommation humaine.

Dont, la projection des résultats d'analyse physico-chimique obtenus sur le diagramme de classification des risques, indique que la majorité des échantillons de cette nappe, ont un risque moyen vis-à-vis la consommation humaine où les quantités excessives des éléments indésirables dans l'eau posent le problème de la potabilité des eaux et présentent un risque pour la santé publique qui doit être pris en considération par les services concernés de la région d'étude, et la majorité ont un risque léger modéré vis-à-vis l'irrigation.



Conclusion générale

Conclusion Générale

La présente étude concerne la caractérisation des ressources en eaux souterraines de la cuvette de la ville de Ghardaia.

Notre zone d'étude est caractérisée par un climat désertique aride marqué, notamment par des précipitations faibles et irrégulières d'une part, et par des amplitudes thermiques et des températures très élevées d'autre part. Cette aridité n'est pas constatée seulement en fonction du manque des précipitations, mais aussi par une évaporation intense qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui dominent dans la région d'étude.

Du point de vue hydrologique, la région de Ghardaïa est tracée par un grand réseau d'oueds dont les principaux sont Oued Zegrir, Oued Sebseb, Oued Metlili, Oued N'Sa, et oued M'Zab, l'ensemble de ces oueds constitue le bassin versant de la dorsale du M'Zab. Les écoulements sont temporaires et s'effectuent de l'Ouest vers l'Est pour atteindre rarement la dépression de Ouargla.

L'étude géologique, nous a permis de situer la zone d'étude dans son contexte régional et local. Elle est placée sur les bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Bas-Sahara, dont les terrains affleurant sont en grande partie attribués au Crétacé supérieur, composés principalement par des dépôts calcaires turoniens dolomitiques. Le quaternaire correspond au dépôt de recouvrement alluvionnaire de la plupart des vallées des oueds de la région de Ghardaïa.

L'étude hydrogéologique a montré que la région de Ghardaïa fait partie du grand système aquifère du Sahara Septentrional (SASS), ou le Continental Intercalaire (CI) est le principal aquifère capté avec succès avec plus de 766 forages ; soutirant un volume d'eau de plus de 400 millions de mètres cube par an.

L'étude hydrochimique basée sur les résultats d'analyses effectuées sur 10 échantillons, nous avons pu caractériser les eaux de la nappe du continentale intercalaire par l'étude des caractéristiques physico-chimique.

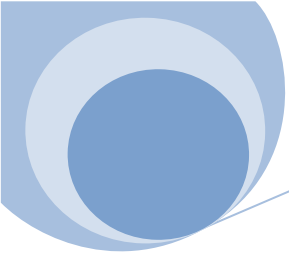
- Les différentes classifications que nous avons utilisées (Schoeller - Berkaloff, Piper, SAR,) ont montré que les eaux de la nappe se regroupent en deux types de faciès chimique qui sont prédominants, chloruré sulfaté calcique et chloruré sulfaté sodique.

Conclusion Générale

- L'étude de la potabilité des eaux de la nappe, elles sont classées potable selon les normes algérienne.
- L'aptitude à l'irrigation a montré que les eaux varient entre Médiocre et admissible.

Pour cette situation nous recommandons ;

1. Une gestion rationnelle de cette ressource, et de lutter contre toute forme de gaspillage d'eau.
2. Dans le domaine agricole, nous recommandons l'utilisation des techniques modernes qui permet d'économiser les eaux en irrigation comme les gouttes à gouttes et l'aspersion)
3. De procéder à des contrôles et au suivi périodique de la nappe du point de vue chimique.
4. De lutter contre tous les forages illicites et de boucher les forages abandonnés ou détériorés.
5. Le traitement de ces eaux avant la distribution et un devoir sacré ; afin de conserver la santé de la population de la zone contre les effets indésirables de ces eaux.



Références bibliographique

Références Bibliographique

1. ACHOUR, M. (2014). Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : Cas de la vallée du M'zab (Ghardaia - Algérie). Département des Sciences de la Terre, Université d'Oran. Magister: 155.
2. Aliev, M., Aït Laoussine, N., Benalicherif, A., Seifoul-Moulukov, R.B., Chikhalibeili, E.CH. Vyssotsky, V.I. et Said, A., 1972. Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz des atlas algériens. Tome 2, 203p.
3. Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution. AA Bakelma. Rotterdam, 380p.
4. ADE.2015 Document sur les matériels et méthodes des analyses des eaux Algérienne.
5. BELLAOUEUR, A. E. A. (2008). Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives (Sahara Nord-Est Septentrional - Algérie), Université El-Hadj Lakhdar – Batna: 146.
6. Busson G., 1970. Le Mésozoïque saharien. Essai de synthèse des données de sondages Algéro-Tunisiens. C.N.R.S-CRZAS. Géol., 11, 788p.
7. Busson, G. (1972). Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Paris: 464.
8. Boeglin J.C., 2000. Contrôle des eaux douces et de consommation humaine. Ed.Techniques de l'ingénieur,24p.

9. Bouchahm N., Achour S, (2008). Hydrochimie des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien-Identification d'un risque de fluorose endémique, la Houille Blanche, n°2, 76-82.
10. B.DUSSART, Limnologie (Etude des eaux continentales. GauthierVillars, Ed., Paris, 1966).
11. Conrad, G., 1969. L'évolution continentale poste-hercynienne du Sahara algérien. Cent. Rech. Zones Arides. Sér. Géol., 10 CNRS ed., Paris, 527p.
12. Coward, M.P. et Ries, A.C., 2003. Tectonic development of North African basins. In: Arthur, T-J., MacGregor, D.S. et Cameron, M.R. (Eds.), Petroleum Geology of Africa: New themes and developing technologies. Geol. Soc. London Spec. Publ., 207, 61-83.
13. Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M. M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. Journal of Hydrology. 353 (3-4), 294-313.
14. Dubief, J., 1953. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Ed., Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique, Service des études scientifiques. Algérie, 457p.
15. Degrémont, 1978. Mémento Technique de l'eau, Ed. Degrémont, Paris.
16. Dubief, J., 1963. Le climat du Sahara. Hors-série, Institut de recherches sahariennes. Mémoire Hors-série, Algérie, 275p.

17. Dib I, 2009. L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine-Ain Yaghout (Est Algérien). Mémoire de Magister en hydraulique, construction hydrotechnique et environnement. Université Hadj Lakhdar. Bantna, Algérie, 127p.
18. D'Amore, F., Scandiffio, G., Panichi, C., 1983. Some observations on the chemical classification of groundwaters. *Geothermics*. 12, 141-148.
19. De Vellers J., Squilbin M., Yourassowsky C., 2005. Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement.
20. Fabre, J., 1976. Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines. Soc. nat. Ed. Diff. Alger. 422p.
21. Fabre, J., 1988. Les séries Paléozoïques d'Afrique : une approche. *J. Afric. Earth Sci.*, 7, 1, 1-40.
22. Glangeaud, J.L., 1932. Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Thèse Sci., Pub. Serv. Carte géol. (Nlle. Sér.). Algérie, 2, 590p.
23. GHAZALI, D., ZAID, A., 2013. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Région de Meknès-Maroc). *Larhyss Journal* 25-36.
24. (A.N.R.H., 2011). Notes relatives aux ressources en eau souterraines de la wilaya de Ghardaïa, Rapport de l'Agence nationale. ressource. Hydrique.

25. Hem, J. D., 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US geological survey water-supply paper, 380p..
26. Jora, 2011. Décret excutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif a la qualité de l'eau de consommation humaine, JO N°18.
27. . Margat J., 1990, Comment gérer les ressources en eau non renouvelables en zone aride, eaux et sols d'Algerie, n°5, p.39-51.
28. Mens et Derouane, 2000. Etat des nappes de l'eau souterraine de Wallonie.
- 29.(A.N.R.H., 2011). Notes relatives aux ressources en eau souterraines de la wilaya de Ghardaïa, Rapport de l'Agence nationale. ressource. Hydrique.
30. ANRH Ghardaïa Rapport de fin de sondage, Forage Zazratou (2012), Ghardaïa
31. OULD BABA SY, M. (2005). RECHARGE ET PALEORECHARGE DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL. DEPARTEMENT DE GEOLOGIE, UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR. Doctorat: 271.
32. PESCOD M.B. (1985). Design, operation and maintenance of wastewater stabilization ponds in treatment and use of sewage effluent for irrigation. Ed pescodand Arar, 93-114.
33. REJESK F,(2002). Analyse des eaux : Aspect réglementaires et techniques, Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, France.
34. Rodier, J. and Bazin, C. (1996). L'analyse de l'eau. Paris: Dunod, 788p.
35. Rodier, J., Legube, B. and Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau. Paris: Dunod, 1047p.

36. Rodier, J. (1984). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.
37. R.BERMOND, R.VUICHAARD, (Les paramètres de la qualité des eaux. Documentation Française, Paris, 179p, 1973).
38. Sekiou, F. , Kellil, A., 2014. Caractérisation et classification empirique, graphique et statistique multivariée d'eaux de source embouteillées de l'Algérie.. Larhyss Journal , pp. 225-246.
39. TARDAT-HENRY M, BEAUDRY J, (1984). Chimie des eaux, Ed. Le Griffon d'argile, INC, Québec.
40. UNESCO/ERSS. (1972). *Etude des Ressources en eau du Sahara Septentrional Algérie-*
41. *Tunisie*. Retrieved from UNESCO:.
42. YIDANA, S.M., OPHORI, D. & BANOENG-YAKUBOB, B., 2008. A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. Journal of Environmental Management, 86: 80–87.
43. https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=fr