

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Larbi TébessiTébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de : Sciences de la terre et de l'univers



Mémoire de fin d'études :

Présentée en vue de l'obtention Master académique en Géologie

Option : Hydrogéologie Appliqué

Présenté par :

BOUTABBA CHIRINE

Thème

Influence de l'arboriculture sur la contamination des eaux de la nappe phréatique d'Oued Mellagou (wilaya de Khenchela)

Jury d'évaluation :

Encadreur : Dr. RAHAL.OMAR

MCA. Université de TEBESSA

Examineur 1 : Pr. GOUAIDIA.LAIACHI

UFM. Université de TEBESSA

Examineur 2 : Dr. SEGHIR.KARIMA

UFM. Université de TEBESSA

Année universitaire : 2024-2025



Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier du fond du cœur notre Créateur tout-puissant qui m'a guidé tout au long de mon parcours pour atteindre ce niveau. De nombreuses personnes m'ont aidé et encouragé, sans oublier mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience :

J'ai eu le privilège d'avoir comme directeur de thèse le Professeur Dr Rahal Omar qui n'a pas hésité à me faire confiance et a accepté de partager ses connaissances et son expérience pour faire de cette thèse d'ingénieur une réussite. Je tiens à le remercier pour ses conseils et son soutien constants tout au long de mon travail de recherche.

Je remercie également tous mes professeurs du Département de Géologie de l'Université Larbi Tibsi, en particulier le Dr Layadi Mehdi qui n'a pas hésité à me fournir les informations et les conseils dont j'avais besoin pour mon travail de recherche.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé dans cette recherche dans la ville de Khenchela.

Monsieur Hassan du laboratoire de la Faculté des Sciences de la Terre qui m'a aidé à réaliser la partie expérimentale de cette recherche.

Je tiens également à remercier mon oncle Issam qui m'a accompagné lors des sorties sur le terrain et qui a été mon soutien pendant cette période

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

CHIRINE



Dédicace

À l'homme qui m'a guidé dans la bonne direction et m'a rappelé que les choses s'obtiennent avec de la patience et de la foi.

Mon père

À celui qui a patiemment attendu les fruits de sa bonne éducation.

À ma mère.

À mon deuxième pilier,

Mon frère

A ma princesse et mon ange,

Ma sœur.

A celui avec qui je passerai le reste de ma vie,

Mon mari.

A la mémoire de mes grands-parents.

À tous les membres de ma famille élargie.

À tous ceux que j'aime.

A tous ceux qui sont toujours là pour m'aider, cette dédicace est pour vous remercier de votre patience et de m'aider à avancer chaque jour.

À tous mes amis

Je dédie ce mémoire

** CHIRINE **

ملخص

تواجه منطقة سهل ملاقو الغريني (غرب خنشلة) العديد من مصادر التلوث (مثل الزراعة، التربية، المكبات البرية، وغيرها)، والتي تزايدت بشكل كبير دون اتخاذ أي إجراءات لحماية البيئة ولا سيما المياه. هذا يتعرض لمخاطر محتملة نتيجة للتغيرات المستمرة وسيتعرض لمزيد من التهديدات في المستقبل بسبب نقص كميات التغذية (المناخ شبه الجاف والاستخدام المفرط لها)

تم إجراء الفحوصات الكيميائية على 15 موقع تقع في قلب السهل. أظهرت النتائج المستخلصة التلوث الناتج عن استخدام الأسمدة الكيميائية التي تحملها مياه الري والجريان السطحي، بما في ذلك الكلوريدات والكبريتات. وهذا قد يضع مستقبل المياه والأنشطة الاقتصادية والاجتماعية في المنطقة في موضع خطر.

الكلمات الرئيسية: ملاقو، التلوث، الكبريت، كلوريد، المياه الجوفية

Abstract

The Mellagou alluvial plain west of Khenchela is endangered by a variety of pollution sources, including livestock, agriculture and landfills that have spread in the area without any safeguards for the environment, especially water resources. These resources could be at risk due to ongoing change, and future threats of insufficient amounts of recharge (semi-arid climate and overexploitation) will make them even more vulnerable.

Translated with DeepL.com (free version)

Fifteen sites in the center of the plain were used for chemical analyses. The results indicate that the use of chemical fertilizers carried by irrigation water and runoff water has contaminated the water with sulfates and chlorides. The region's socio-economic activity and water supply may be at risk as a result.

Keywords: groundwater, sulfate, chloride, pollution, and Mellagou

Résumé

La plaine alluviale de Mellagou, située à l'ouest de Khenchela, fait face à plusieurs sources de pollution (agriculture, élevage, dépôts illégaux, etc.) qui ont proliféré dans la région sans aucune mesure de sauvegarde environnementale ou protection des ressources en eau. Ces ressources sont susceptibles d'être continuellement altérées et plus menacées à l'avenir en raison du manque de volumes de recharge (climat semi-aride et leur surexploitation).

Quinze sites situés au cœur de la plaine ont fait l'objet d'une analyse chimique.

Les données recueillies indiquent la présence d'une contamination par les chlorures et les sulfates résultant de l'utilisation d'engrais chimiques transportés par l'eau d'irrigation et les eaux de ruissellement.

Cette situation pourrait menacer l'avenir des ressources en eau et des activités socio-économiques dans la région.

Mots clés : Mellagou, contamination, sulfate, chlorure, nappes phréatiques.

Liste des abréviations et des acronymes

- ADE** : Algérienne des eaux.
- ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- ACP** : Analyse en Composante Principale. **AEA** : Alimentation en Eau pour l'Agriculture. **AEI** : Alimentation en eau pour l'Industrie.
- AEP** : Alimentation en eau Potable.
- AHC** : Classification hiérarchique ascendante.
- APC** : Commune.
- ABHcsm** : Agence des Bassins Hydrographiques (Constantinois–Seybouse–Mellegue).
- AD** : Année Déficitaire. **AE** : Année Excédentaire. **BE** : Basses eaux.
- BI** : Balance Ionique.
- CGG** : Compagnie Générale de la Géophysique.
- CI** : Crétacé Inférieur.
- CM** : Calcaire Maestrichtien.
- CP** : Coefficient Pluviométriques.
- CS** : Crétacé Supérieur.
- DA** : Déficit Agricole.
- DHW** : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya.
- Dj** : Djebel (montagne).
- EDTA** : Acide éthylène–diamine–tétracétique.
- ETP** : Evapotranspiration potentielle.
- ETR** : Evapotranspiration réelle.
- EX** : Excédent.
- Exp** : Exemple.
- Fig** : Figure.
- h/J** : heure par jour.
- Ha** : hectare.
- hab** : habitant.
- HE** : Hautes eaux.
- Km** : Kilomètre.
- meq** : Milliéquivalent.
- MPQ** : Mio–Plio–Quaternaire.

Liste des abréviations et des acronymes

mg : milligramme. **mm** : millimètre. **NE** : Nord–Est.

NP : Niveau Piézométrique.

NW : Nord–Ouest.

P : Point d'eau.

Pge : Page.

pH : potentiel d'Hydrogène.

Pop : population.

r : quantité en réaction. **SE** : Sud–Est.

SE : Sondage Electrique (dans le chapitre concernant la géophysique).

SSW–NNE : Sud Sud Ouest –Nord Nord Est.

SW : Sud–Ouest.

RFU : Réserve Facilement Utilisable.

RT : Résistance Transversale.

T : Température.

Ω m : Ohm. Mètre.

°C : Degré Celsius.

m : mètre.

Liste des Figures

LISTE DES FIGURES

FIGURE N° I- 01 : SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA WILAYA DE KHENCHELA. -----	6
FIGURE N° I- 02 : (A) LES RELIEFS DE LA WILAYA DE KHENCHELA ET (B) PRINCIPALES ZONES AQUIFERES (DPAT, 2012)-----	7
FIGURE N°I- 03 : LOCALISATION ADMINISTRATIVE DE LA COMMUNE DE BOUHMAMA ET LA ZONE D'ETUDE.-----	9
FIGURE N° I- 04 : CARTE DES GRANDS BASSINS VERSANT DU NORD ALGERIEN (HASSAD ,2021)-----	9
FIGURE N° I- 05 : REPRESENTATION DE LA POPULATION DE LA COMMUNE DE BOUHMAMA. RGPH2008	11
FIGURE N° I- 06 : L'EVOLUTION DE LA POPULATION A TRAVERS LES DIFFERENTS RECENSEMENT GENERALE DE LA POPULATION ET DE L'HABITAT. (CHERGUIA ET ALL 2023)-----	12
FIGURE N° I- 07 : LES ALTITUDES DU BASSIN VERSANT D'OUED MELLAGOU (HASSAD 2021)-----	15
FIGURE N° I- 08 : PRINCIPALES UNITES STRUCTURALES DU NORD-OUEST DE L'AFRIQUE (D'APRES, G. BUSSON 1970) -----	16
FIGURE N° I- 09 : LOCALISATION DES PRINCIPAUX ENSEMBLES GEOMORPHOLOGIQUE-----	16
FIGURE N° I- 10 : LES PENTES DE BASSIN VERSANT D'OUED MELLAGOU-----	18
FIGURE N° I- 11 : LA REPARTITION DES UNITES DES SOLS A TRAVERS LE BASSIN VERSANT D'OUED MELLAGOU (HASSAD 2021)-----	19
FIGURE N° I- 12 : LE RECTANGLE EQUIVALENT DE BASSIN VERSANT D'OUED MELLAGOU (HASSAD 2021)	20
FIGURE N°I- 13 : COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT OUED MELLAGOU (CHERGUIA ET AL 2023) -----	21
FIGURE N° I- 14 : LES PENTES DU BASSIN VERSANT DE OUED MELLAGOU (BELKOUM ET AL 2017)-----	24
FIGURE N° I- 15 : LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT D'OUED MELLAGOU-----	26
FIGURE N° I- 16 : COUPE GEOLOGIQUE 2 SUD-EST, NORD-OUEST DANS LA REGION DE KHENCHELA (203 CARTE GEOLOGIQUE DE KHENCHELA -----	30
FIGURE N° I- 17 : LA CARTE GEOLOGIQUE DE BASSIN VERSANT D'OUED MELLAGOU. -----	31
FIGURE N°II-01 : CARTE DE LA PLUVIOMETRIE DE LA WILAYA DE KHENCHELA (ANAT 1992).-----	13

Liste des Tableau et Figures

FIGURE N° II- 02 : HISTOGRAMME DE VARIATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (1997-2024).	41
FIGURE N°II-03 : HISTOGRAMME DE VARIATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES (1997-2024).	42
FIGURE N° II-04: DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE GAUSSEN.	43
FIGURE N° II-05 : HISTOGRAMME DE VARIATION DES TEMPERATURE MOYENNES MENSUELLES (1997-2024).	44
FIGURE N° II-06 : HISTOGRAMME DE VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES (1997-2024).	44
FIGURE N° II-07 : LE REGIME PLUVIOMETRIQUE SAISONNIER POUR UNE PERIODE DE 30 ANS (1994-2024).	45
FIGURE N° II-08 : LE DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE (1994-2024) DANS LA REGION DE LA PLAIN MELLAGOU	50
FIGURE N° III-01 : INVENTAIRE DE POINTS D’EAU DE LA REGION DE MELLAGOU AVRIL 2025	56
FIGURE N°III-02 : INVENTAIRE DE POINTS D’EAU DE LA REGION DE MELLAGOU AVRIL 2025	57
FIGURE N° III-03 : CARTE PIEZOMETRIQUE 2005	59
FIGURE N° III-04 : CARTE PIEZOMETRIQUE 2005	60
FIGURE IV-01: DETERMINATION DU SODIUM ET POTASSIUM	68
FIGURE N°IV-02: DETERMINATION DE CALCIUM ET MAGNESIUM	69
FIGURE N°IV-03 : DETERMINATION DE SULFATES ET NITRATE	70
FIGURE N°IV-04 : DETERMINATION DES CHLORURES	71
FIGURE N°IV-05 : CARTE ISO-TENEURS DE LA CONDUCTIVITE	73
FIGURE N°IV-06 : CARTE ISO-TENEURS DU POTENTIEL HYDROGENE	74
FIGURE N°IV-07 : CARTE ISO-TENEURS DU RESIDU A SEC	75
FIGURE N°IN-08 : CARTE ISO-TENEURS DE CALCIUM	76
FIGURE N°IV-09 : CARTE ISO-TENEURS DE MAGNESIUM	77

Liste des Tableau et Figures

FIGURE N°IV-10 : CARTE ISO-TENEURS DE SODIUM-----	78
FIGURE N°IV-11 : CARTE ISO-TENEURS DE POTASSIUM -----	79
FIGURE N°IV-12 : CARTE ISO-TENEURS DE BICARBONATES-----	81
FIGURE N°IV-13 : CARTE ISO-TENEURS DE CHLORURE-----	82
FIGURE N°IV-14 : CARTE ISO-TENEURS DE SULFATES-----	83
FIGURE N°IV-15 : CARTE ISO-TENEURS DE NITRATES-----	84
FIGURE N°IV-16 : DIAGRAMME DE PIPER DES EAUX SOUTERRAINS DE MELLAGOU-----	85
FIGURE N°IV-17 : DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF-----	87
FIGURE N°IV-18 : CLASSIFICATION DES EAUX PAR DIAGRAMME DE WILCOX-----	88
FIGURE N°IV-19 : DIAGRAMME DE WILCOX DES EAUX SOUTERRAINES DE MELLAGOU (RIVERSIDE) -----	89
FIGURE N°IV-20 : CORRELATION DES ELEMENTS CHIMIQUES EN FONCTION DE CALCIUM 1 -----	90
FIGURE N°IV-21 : CORRELATION DES ELEMENTS CHIMIQUES EN FONCTION DE CALCIUM 2 -----	91
FIGURE N°IV-22 : RELATIONS DES ELEMENTS MAJEURS EN FONCTION DE CHLORURE -----	92
FIGURE N°IV-23 : RELATIONS DES ELEMENTS MAJEURS EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITE 1 -----	92
FIGURE N°IV-24 : RELATIONS DES ELEMENTS MAJEURS EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITE 2 -----	94
FIGURE N°IV-25 : CORRELATION DES ELEMENTS CHIMIQUES EN FONCTION DE CALCIUM 3 -----	95
FIGURE N° IV-26 : RELATIONS DES ELEMENTS MAJEURS EN FONCTION DU SODIUM 1-----	96
FIGURE N° IV-27 : RELATIONS DES ELEMENTS MAJEURS EN FONCTION DU SODIUM 2-----	97
FIGURE N° IV-28 : CORRELATION DES ELEMENTS CHIMIQUES AVEC TDS-----	98
FIGURE N° IV-29 : VARIATION DE L'INDICE DE SATURATION DES MINERAUX-----	99

Liste des Tableau et Figures

Liste des Tableau

TABLEAU N° I- 01 : DISTRIBUTION DE LA POPULATION EN FONCTION DE LA DISPERSION (DPSI 2010)----	10
TABLEAU N° I-02 : DISTRIBUTION DE LA POPULATION SELON LA DISPERSION EN AVRIL 2008.-----	11
TABLEAU N° I-03 : TABLEAU DE L'ÉVOLUTION DE LA POPULATION À TRAVERS LES DIFFÉRENTS RGPH---	12
TABLEAU N° I-04 : REPARTITION HYSOMETRIQUE DU BASSIN D'OUED MELLAGOU PAR TRANCHE D'ALTITUDE. -----	22
TABLEAU N° I- 05 : CLASSIFICATION DU RELIEF EN FONCTION DE « DS » D'APRES L'O.R.S.T.O.M-----	25
TABLEAU N° I- 06 : LES OUVRAGES DE RETENUES COLLINAIRES. -----	27
TABLEAU N° 07 : REPARTITION DES PUIITS ET LEURS NATURES -----	27
TABLEAU N° I- 08 : LES PROPRIETES DES MATERIAUX DE BASSIN VERSANT EN TERMES DE PERMEABILITE. -----	33
TABLEAU N° II-01 : LES COORDONNEES DE STATION METEOROLOGIQUE :-----	14
TABLEAU N° II- 02 : LE REGIME PLUVIOMETRIQUE SAISONNIER POUR UNE PERIODE DE 30 ANS (1994-2024).-----	45
TABLEAU N° II-03 : INDICES D'ARIDITE MENSUELS (I) (SOURCE : STATION METEOROLOGIQUE DE KHENCELA).-----	46
TABLEAU N° II-04 : ETR SELON TURC A LA STATION DES BOUHMAMA (1994-2024) -----	48
TABLEAU N° II-05 : BILAN HYDROLOGIQUE MOYEN (1994-2024) DE LA PLAINE DE MELLAGOU, PAR LA METHODE DE THORNTHWAITE -----	50
TABLEAU N° II- 06 : POURCENTAGE ET VOLUME DE PRECIPITATION ET RUISSELLEMENT ET INFILTRATION -----	51
TABLEAU N° IV-01 : REPRESENTATION DE PIPER DES EAUX SOUTERRAINES DE MELLAGOU (MAI 2025) :-	86
TABLEAU N° IV-02 : REPRESENTATION DE WILCOX DES EAUX SOUTERRAINES DE MELLAGOU (MAI 2025):89	
TABLEAU N° IV-03 : REPRESENTATION DE RIVERSIDE DES EAUX SOUTERRAINES DE MELLAGOU (MAI 2025) :-----	90

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	-----	
CHAPITRE I :	CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ET GEOLOGIQUES	-----
I/ Introduction	-----	6
II/ Présentation générale de la wilaya de Khenchela :	-----	6
II-1. Situation géographique :	-----	6
II-2. Situation administrative :	-----	6
III/ Présentation générale de région de Bouhmama :	-----	7
IV/ Présentation générale de la zone d'étude :	-----	8
IV-1. Situation géographique :	-----	8
IV-2. Localisation de la zone d'étude :	-----	8
a/ Les coordonnées géographiques :	-----	8
V / La Population :	-----	9
V-1 Densité et répartition spatiale de la population :	-----	9
V-2. Évolution de la population :	-----	11
VI-1. Les cultures céréalières (orge et blé) :	-----	13
VI-2. Les cultures irriguées :	-----	13
VI-3. Les maquis soient des forêts dégradées :	-----	13
VI-4. Les forêts :	-----	14
VII/ L'hydrogéologie de la Wilaya de Khenchela :	-----	14
VIII/ Géomorphologies :	-----	14
VIII-1. Topographique :	-----	14
VIII-1-1/ La zone de montagne :	-----	14
VIII-1-2/ La zone des piémonts :	-----	15
VIII-1-3/ La zone de plaine :	-----	17
VIII-3. Pédologie :	-----	18
VIII-4. Les caractéristiques géométriques et morpho métriques :	-----	19
VIII-4-1/ Paramètres géométriques :	-----	19
VIII-4-2/ Indice de forme ou indice de compacité Gravelius :	-----	19
VIII-4-3/ Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius :	-----	20
VIII-4-4/ L'orographie :	-----	21

Liste des matière

VIII-4-5/ l'altitude maximale :	21
VIII-4-6/ L'altitude minimale :	21
VIII-4-7/ Courbe hypsométrique :	21
VIII-4-8/ Les altitudes caractéristiques :	22
VIII-4-9/ Les pentes :	23
IX/ Le Réseau hydrographiques :	25
XI/ Cadre Géologique :	28
XI-1/ Introduction :	28
XI-5/ Les mouvements tectoniques dans la région d'étude :	31
XI-6/ La perméabilité :	32
XII/ Conclusion :	34
CHAPITRE II	HYDRO-CLIMATOLOGIE
I - Introduction	13
II - Climatologie :	14
III - Les facteurs climatiques :	14
III - 1 Les précipitations :	14
III - 1-1 - Précipitations moyennes mensuelles :	41
III - 1-2- Précipitation moyenne annuelle :	42
III - 1-3- Diagramme pluviométrique:	42
III - 1-4- Coefficient pluviométrique (Cp) :	43
III - 2 - Les températures :	43
III - 2-1- Températures moyennes mensuelles :	44
III - 2-2- Température moyenne annuelle :	44
IV - Le régime pluviométrique saisonnier :	45
VII - Indice de Paul Moral :	47
VIII - ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION :	47
VIII -1- Introduction :	47
VIII - 2- Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :	47
VIII -3- Evapotranspiration réelle (ETR) :	48
VIII-3-1- Formule de TURC :	48

Liste des matière

CONCLUSION GENERALE: -----101

REFERENCE -----104

A decorative border of black graduation caps with gold tassels is arranged around the top and left sides of a large, empty rectangular frame.

Introduction générale



Introduction générale

L'eau est vitale pour tous les êtres vivants, surtout pour l'homme, et sa présence en volume et en qualité adéquate favorise la santé humaine, la croissance économique ainsi que le bien-être des pays.

En Algérie, les besoins en eau potable augmentent avec la croissance de la population, et la qualité de l'eau, en particulier des eaux souterraines, est un problème majeur. Les eaux souterraines sont l'une des principales sources de demande en eau en Algérie, et sont aujourd'hui considérées comme la meilleure source d'eau douce pour répondre aux besoins domestiques, agricoles et industriels, et elles jouent un rôle important.

Les conditions climatiques contrôlent le mouvement continu de l'eau sur Terre, et chaque perturbation d'une variable climatique (température, précipitations) affecte directement et indirectement le cycle hydrologique et donc la ressource en eau souterraine. Nous pouvons également dire que la gestion de la ressource est particulièrement problématique dans l'interruption de l'agriculture en raison des années de sécheresse successives qui coïncident avec des approvisionnements annuels rares et erratiques en eau de surface et en eau souterraine.

L'eau d'irrigation n'est jamais totalement pure ; elle contient toujours des sels dissous qui peuvent avoir un impact sur les cultures et le sol.

En fonction de sa quantité et compte tenu du fait que le comportement varie en fonction du type de sels utilisés, il est nécessaire d'appliquer des techniques agricoles adaptées à l'eau disponible ; il est nécessaire d'étudier la composition chimique de l'eau à la lumière de ses effets sur les plantes et le sol.

Bouhamama est l'une des zones touchées par la question du stress hydrique ; cette zone est connue pour son orientation agricole, qui exerce une pression sur l'aquifère en raison de la surexploitation et de l'utilisation intensive d'intrants agricoles (engrais et pesticides).

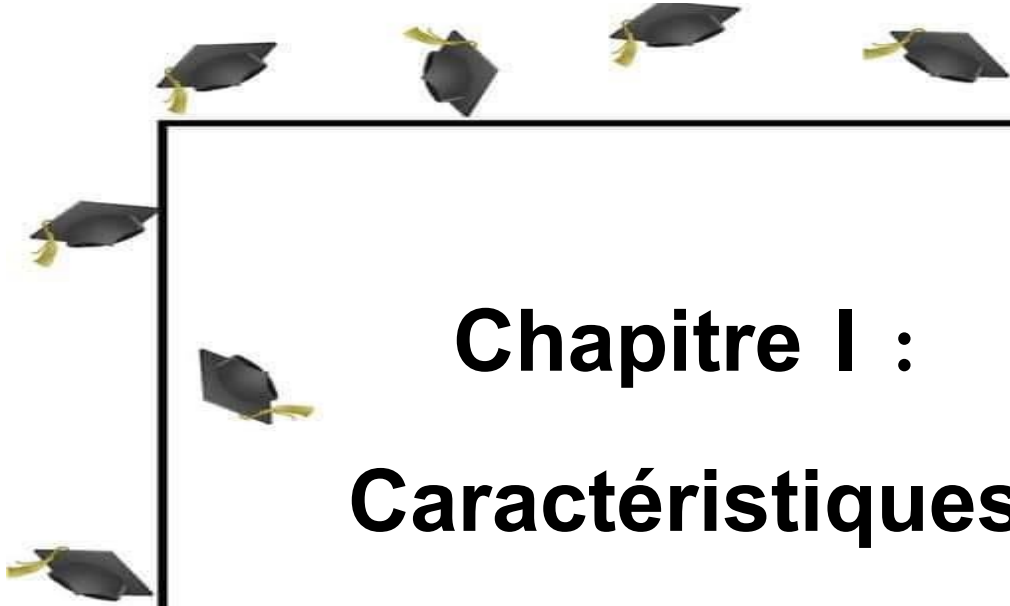
Plusieurs recherches ont été menées sur la zone de l'Oued Mallagou, mais celles-ci se sont principalement concentrées sur le plan hydrogéologique ; notre étude constitue donc la deuxième du genre. Elle porte le titre suivant : Influence de l'arboriculture sur la contamination des eaux de la nappe phréatique d'Oued Mellagou (wilaya de Khenchela)

L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence de l'arboriculture fruitière sur la contamination des eaux de la nappe phréatique dans la zone de oued mellagou (bouhamama)

Introduction générale

Dans cette optique, nous avons organisé notre travail en cinq chapitres interdépendants :

1. -Le premier chapitre : traite de la situation géographique, de la description des caractéristiques géomorphologiques et du réseau hydrographique de la région
2. –le deuxième chapitre : Caractéristiques géologiques et structurales de la zone d'étude
3. –le troisième chapitre : Consacré à l'hydrométéorologie et à l'évaluation des différents termes du bilan hydrique (l'évapotranspiration ; la précipitation ; l'infiltration ; le ruissellement) Sur la base des informations fournies par les stations concernées
4. –le quatrième chapitre : Cette étude est consacrée à l'étude hydrogéologique de la zone. Ceci nous a permis d'identifier les différents systèmes aquifères, de déterminer les changements dans les débits et d'identifier le régime d'écoulement directement affecté par les précipitations.
5. Le dernier chapitre : est consacré à l'étude hydrochimique de l'eau : selon la nature de ses éléments chimiques et son impact négatif sur les eaux souterraines en raison des matériaux agricoles (pesticides et des engrais).
6. Une conclusion générale avec des recommandations.

A decorative border of seven black graduation caps with gold tassels, arranged in a semi-circle around the top and left sides of the central text box.

Chapitre I :

Caractéristiques

géographiques et

géologiques



I/ Introduction

L'analyse hydrogéologique d'une zone spécifique exige une représentation physique de celle-ci, étant donné que divers facteurs physiques (localisation géographique, conditions topographiques et réseau hydrographique...) peuvent influencer la définition du contexte hydrogéologique, qui peut, dans des circonstances propices, contribuer à l'évolution socio-économique locale. Nous avons tenté d'atteindre cet objectif en nous appuyant sur des données académiques et techniques, tout en utilisant divers outils informatiques tels que GlobalMapper et ArcMap.

II/ Présentation générale de la wilaya de Khenchela :

II-1. Situation géographique :

La Wilaya de Khenchela se trouve à l'est de l'Algérie, au sud-est du bassin des hauts plateaux Constantinois, et au pied du mont des Aurès. Elle est localisée entre les latitudes 34°06'36" et 35°4'21" Nord et les longitudes 06°34'12" et 07°35'56" Est, couvrant une superficie de 9.715 kilomètres carrés (Bouali 2015).

II-2. Situation administrative :

La Wilaya de Khenchela est issue de la refonte territoriale de 1984. Elle était rattachée entre 1977 et 1984 à trois Wilayas différentes (DHWK, 2012) (Fig.1) :

- Au Nord par la Wilaya d'Oum El Bouaghi.
- Au Sud par la wilaya d'El Oued.
- A l'Est par la wilaya de Tébessa.
- A l'Ouest par la wilaya de Biskra et Batna

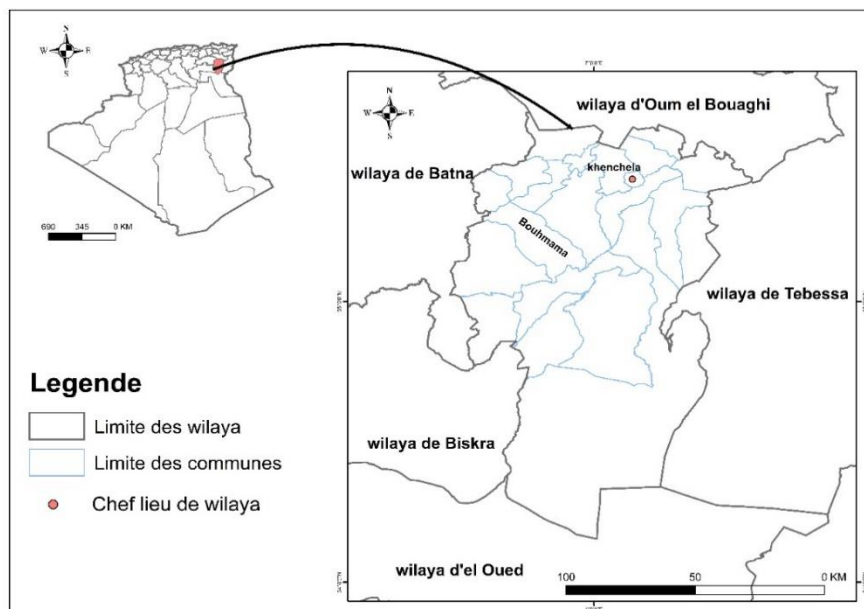


Figure N° I- 01 : Situation géographique de la Wilaya de Khenchela.

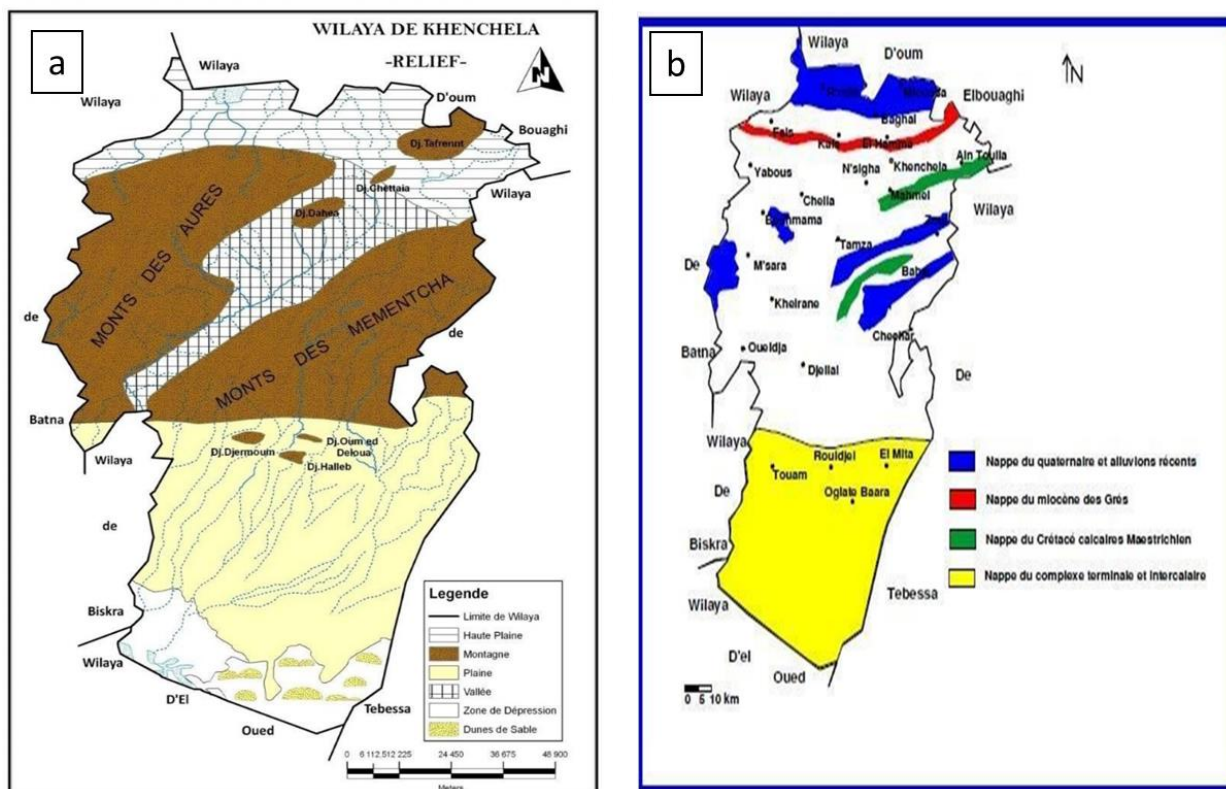


Figure N° I- 02 : (a) Les reliefs de la Wilaya de Khenchela et (b) principales zones aquifères (DPAT, 2012)

III/ Présentation générale de région de Bouhmama :

Bouhmama, située au Nord-Ouest de la Wilaya de Khenchela (dans l'est des Aurès), se trouve aux coordonnées suivantes : 39°06'25", 39°30'25" (latitude nord) et 4°86'10", 5°1'75" (longitude est). Elle est quasiment entièrement encadrée par les montagnes :

- **Nord-Ouest** : Massif de Chélia ;
- **Nord** : Contreforts du massif de Chélia ;
- **Est** : Massif de Beni-Melloul ;
- **Sud-Est** : Gorges de Mellagou

Bouhmama, une commune, couvre une superficie totale de 409 km², ce qui représente 4,20% du territoire de la Wilaya de Khenchela. En termes de disposition géographique, Bouhmama se caractérise par une structure territoriale s'éte :

- ✓ **Au Nord-Ouest** par les communes d'Inoughissène (Batna) et Yabous au Nord-Est, par la commune de Chélia .
- ✓ **À l'Est**, par la commune de Tamza ;
- ✓ **À l'Ouest**, par la commune de M'Sara ;
- ✓ **Au Sud**, par la commune de Kheirane ;
- ✓ **Ouest à 37 km**, à vol d'oiseau du chef-lieu de la Wilaya de Khenchela ndant du nord-ouest vers le sud-est et délimitée.(Hassad 2021)

IV/ Présentation générale de la zone d'étude :

IV-1. Situation géographique :

Le sous bassin versant d'Oued Mellagou, qui se trouve dans la partie nord-est de l'Algérie englobe l'ensemble de la commune de Bouhm. D'après la réorganisation récente des unités hydrologiques en Algérie, le sous-bassin versant d'Oued Mellagou fait partie de l'ensemble des Hauts Plateaux constantinoise - Chott Melghir ([Cherguia et All, 2023](#))

IV-2. Localisation de la zone d'étude :

Le sous bassin versant Oued Mellagou est situé dans le massif des Aurès (partie orientale de l'Atlas saharien), il fait partie du grand bassin hydrologique de Chott Melghir (Bassin versant numéro 06). Et draine les versants Sud - Est du massif des Aurès. Ce sous bassin versant est situé à :

- **30 km au Sud-Ouest** du chef-lieu de la Willaya de Khenchela.
- **15 km au Sud-Ouest** de Kais.
- **Enivrent de 50 km de Sud – Est** de la Willaya de Batna

La délimitation est partielle :

- **-Au Sud**, elle s'étend jusqu'à la commune de Babar ;
- **-Au Nord**, jusqu'à la commune de Taouziant ;
- **-À l'Est**, elle englobe la commune de Tamza ;
- **-À l'Ouest**, elle va jusqu'à la commune de M'Sara.

a/ Les coordonnées géographiques :

Les coordonnées géographiques correspondantes sont obtenues en limitant le sous-bassin versant sur les cartes topographiques. :

- **La longitude** : 6°61mn et 6°93mn.
- **La latitude** : 35°10 mn et 35°42mn

b/ Les coordonnées Lambert suivantes :

- **La longitude** : 885.609 Km et 855.040 Km.
- **La latitude** : 242.881 Km et 208.636 Km.

Il est limité :

- **Au Sud** par la commune de Babar.
- **Au Nord** par la commune de Touffana.
- **A l'Est** par la commune de Tamza.
- **A l'Ouest** par la commune de Lemsara

Notre sous-bassin versant ([Fig.3](#)), est intégré dans le vaste bassin versant de Chott Melghir (numéro 06 du bassin versant). Il se situe au cœur de la région montagneuse de l'Aurès, dominée au nord-ouest par le massif de Beni Imloul - Chelia qui abrite le sommet le plus élevé de l'Algérie du Nord, « Ras Kelt ». « houm ». Son altitude est de 2326 m, tandis que le massif Ouled Yagoub - Beni Oudjana, situé au nord-est du sous-bassin versant, atteint une hauteur de 2143 m au Djebel Bazez ([Cherguia et All, 2023](#))

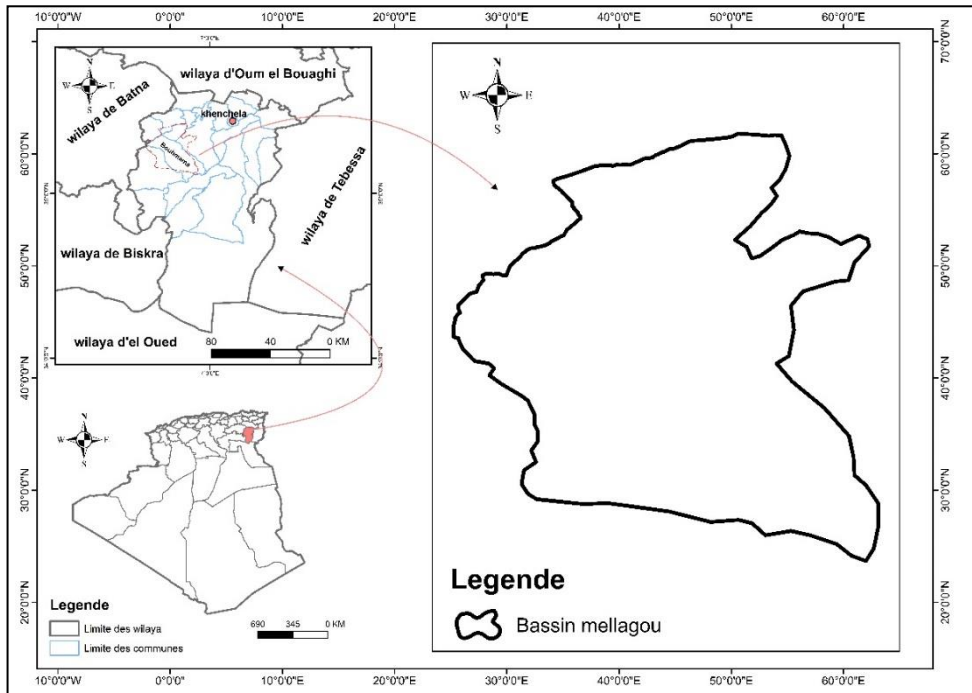


Figure N°I- 03 : Localisation administrative de la commune de Bouhmama et la zone d'étude.

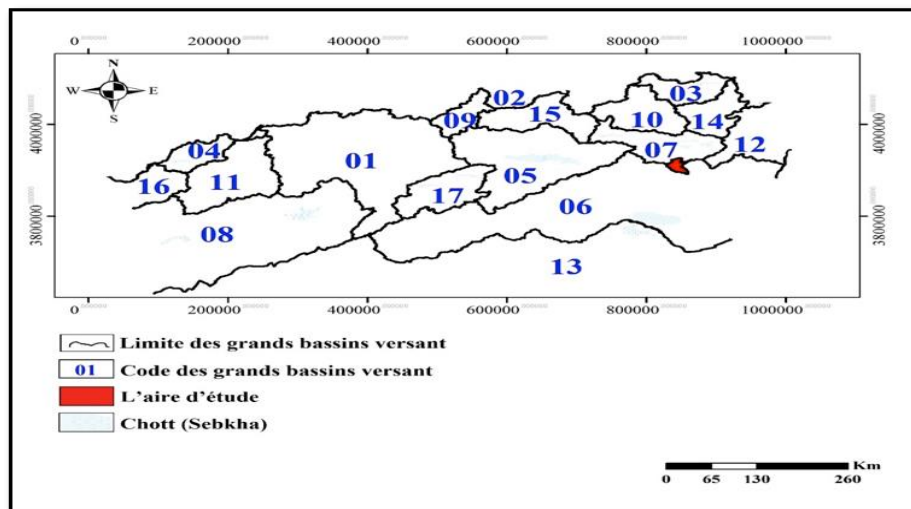


Figure N° I- 04 : carte des grands bassins versant du nord Algérien (Hassad ,2021)

V/ La Population :

V-1 Densité et répartition spatiale de la population :

D'après l'annuaire statistique de la DPSI de Khenchela, en date du 31/12/2010, on estimait que la commune de Bouhmama comptait une population totale de 11220 résidents.

En tenant compte de la superficie de 409 Km² de la commune, la densité moyenne se chiffrerait à approximativement 27,43 individus au Km², une valeur inférieure à celle de la Wilaya qui s'établissait autour de 42 personnes au Km² en 2010.

De plus, l'étude des informations relatives à la distribution de la population en termes de dispersion révèle un fort déséquilibre sur l'ensemble du territoire de la commune.

Effectivement, une grande part de la population se trouve dans le chef-lieu qui héberge à lui seul plus de 71 % de la population globale (c'est-à-dire 8010 résidents), au détriment de la zone dispersée qui ne constitue qu'approximativement 29 % de la population totale, soit 3210 individus **(DPSI 2010)**.

**Tableau N° I- 01 : Distribution de la population en fonction de la dispersion
(DPSI 2010)**

Population total	ACL		Zone éparsé	
	Nombre	%	Nombre	%
11220	8010	71.39	3210	28.61

Par conséquent, la population dispersée est principalement répartie dans la zone éparsé et le long des routes principales (CC 7, CC 21, CC 13, CC 38, CC 39). Il s'agit de petits ensembles de tailles variées en fonction de la densité, tous connectés au chef-lieu de la commune par des voies communales.

La zone dispersée comprend six hameaux majeurs en supplément de l'habitat disséminé à travers le reste du territoire. Nous mentionnons parmi les hameaux de plus de cinq cents (500) résidents :

1-Le hameau d'Ouled Ali Benflous, qui s'étend de manière chaotique en bordant l'agglomération principale de Bouhmama à l'ouest et au nord, est organisé par la route CC 38. Selon le recensement de 2008, la population s'élevait à 536 habitants. **(RGPH, 2008)**

2-Le hameau d'Ouled Si Moussa, situé à l'ouest de la localité principale de Bouhmama, est structuré par la route communale CC38. Selon le recensement de 2008, ce village abritait 507 résidents. **(RGPH, 2008)**

3-Le hameau de Bouzouamel, situé au Sud-Est de la localité principale de Bouhmama, est relié et organisé par la voie communale CC21. Selon le recensement de 2008, ce village avait une population de 528 habitants. **(RGPH, 2008)**

4-Les hameaux de moindre importance sont ceux qui sont connectés au centre administratif de la commune de Bouhmama par la route communale CC07. On parle de Bouhmama El Kadima (224 résidents selon le RGPH 2008), Ouled Meriem (395 résidents selon le RGPH 2008) et Chir Ouled Billal, dont les habitants sont comptés avec ceux de la région étudiée. **(RGPH, 2008)**

Tableau N° I-02 : Distribution de la population selon la dispersion en avril 2008.

Dispersion	Population		Total	Nombre de Logements
	Masculin	Féminin		
Bouhmama centre	5086	5527	7582	1661
			3031	894
Zone éparsé				
Total commun	5086	5527	10613	2555

État civil TRC
2008

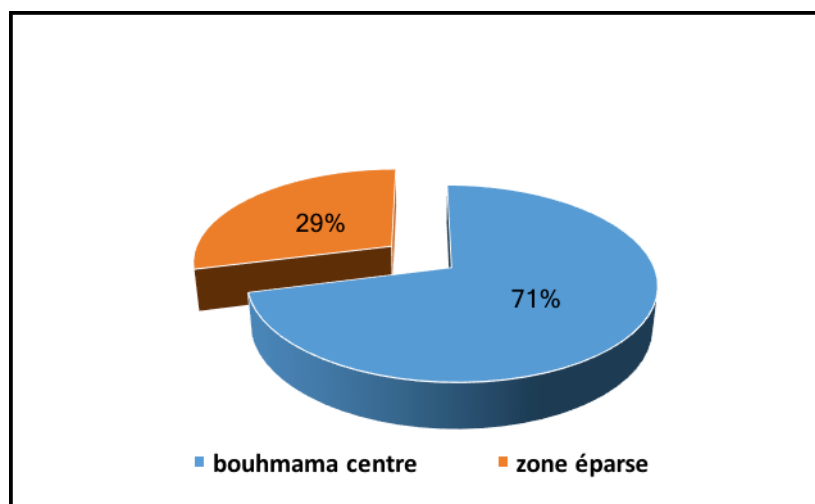


Figure N° I- 05 : Représentation de la population de la commune de Bouhmama. RGPH2008

V-2. Évolution de la population :

L'évolution démographique de la commune de Bouhmama a été, en règle générale, modeste comparée à celle de la population globale de la Wilaya. Les taux d'augmentation démographique observés durant les trois périodes intercensitaires (1977/1978, 1987/1998, et 1998/2008) ont subi une baisse significative, passant de 2,95 % par an pendant la période 1977/1987 à 2,52 % par an entre 1987 et 1998 avant de tomber à 0,94 % par an durant l'intercensitaire 1998/2008.

Par conséquent, la population de la commune de Bouhmama, qui se chiffrait à environ 5500 habitants lors du RGPH de 1977, a grimpé à 7354 habitants selon le RGPH de 1987. Lors du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) en 1998, ce nombre a presque doublé par rapport à celui de 1977, atteignant 9669 résidents. Lors du dernier recensement de la population (RGPH) en 2008, cette commune comptait une population de 10 613 résidents. (Anonyme, 2012)

Tableau N° I-03 : Tableau de l'évolution de la population à travers les différents RGPH

Année	1977	1987	1998	2008	2010
Population total commun	5500	7354	9669	10613	11220

(CHERGUIA et al 2023)

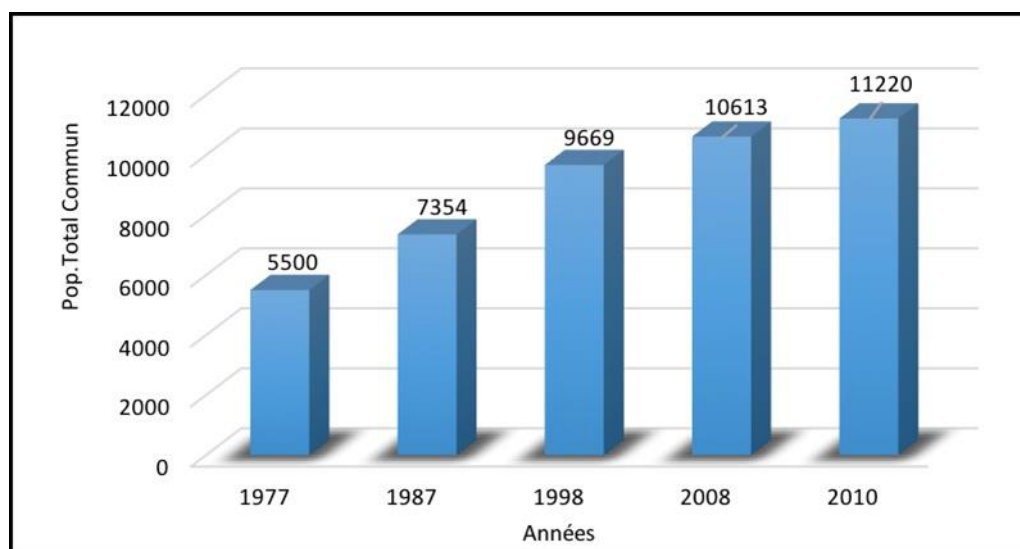


Figure N° I- 06 : l'évolution de la population à travers les différents Recensement Générale de la Population et de l'Habitat. (CHERGUIA et all 2023)

L'étude de la progression de la population par dispersion indique clairement qu'en 2010, la proportion de la population regroupée au sein de la commune par rapport au total a augmenté, passant de 52,42 % en 1987 à 71,39 %. Ce phénomène s'explique par l'attrait que l'ACL exerce sur les populations dispersées dans la même commune, au détriment d'une zone peu dense fortement repousseuse qui a enregistré une perte d'environ 17 % de sa part de population communale.

VI/ Couvert végétale :

La plupart de la couverture végétale du sous-bassin versant d'Oued Mellagou est constituée de forêt, ce qui représente approximativement deux tiers de sa superficie. La forêt de Beni-Meloul s'étend sur la section ouest du sous-bassin versant. La section orientale se situe près de la forêt de Beni-Oudjana (Ouled Yagoub).

On observe aussi parfois, de manière descendante, un bouleversement radical du climat et, simultanément, une régression des formations végétales. On remarque un changement des étages à climat ligneux vers des étages à végétation herbacée, caractérisé par la présence d'une shate dont la hauteur et le degré de recouvrement sont indéniablement « faibles ». La variation

notable de la couverture végétale d'une altitude à une autre et d'un versant à un autre, ne peut être expliquée que par la pédogenèse principalement associée à la nature et la qualité de la matière organique qui arrive et disparaît chaque année au contact du sol, ainsi que par le changement climatique. (BELKOUM et al 2017)

VI-1. Les cultures céréalières (orge et blé) :

On retrouve ces terres luxuriantes et fécondes aux pentes douces (0 – 3 %) dans la plaine de Mellagou ainsi que dans les petites zones forestières. Ces terres s'étendent sur une superficie totale de 8500 hectares, dont 6600 hectares sont consacrés au blé dur et 1900 hectares à l'orge. (HASSAD 2021)

VI-2. Les cultures irriguées :

- L'arboriculture

Dans la zone d'étude, les arbres fruitiers à pépins sont prédominants, en particulier les pommiers qui occupent le premier rang. La superficie consacrée à ces derniers s'accroît progressivement grâce à leur valeur économique et aux conditions favorables (eau, altitude, température, sol, etc.). On observe principalement des vergers dans la plaine où l'implantation de forages et de puits est fréquente. L'arboriculture couvre une superficie totale de 2130 hectares dont 1400 hectares sont dédiés aux pommiers. Les autres espèces comme l'amandier, l'abricotier et le pêcher n'occupent qu'une superficie limitée. (Belhadj et al 2017)

- Les cultures fourragères

Les fourrages utilisés sont des fourrages consommés en leur état frais, comprenant deux variétés : le Maissorgo et l'Orge-avoine. Ces cultures sont cultivées en irrigation et situées au cœur de la plaine de Mellagou (dans la partie sud de Bouhmama), s'étendant sur une superficie totale de 170 hectares. (Carrard et al 2019)

- Les cultures maraîchères

Dans notre région d'analyse, ces cultures occupent une surface relativement restreinte de 134 hectares comparée aux grandes cultures et à l'arboriculture. On y trouve principalement des oignons, des pommes de terre et de l'ail, qui sont largement autoconsommés localement, et qui se positionnent en tête en termes de production. (HASSAD 2021)

- Parcours, steppe, maquis et les prairies

Les sols de parcours ne sont pas adaptés au labourage, ils peuvent être dédiés à un pâturage structuré, et couvrent une superficie totale de 10 163 hectares. Les parcours de plateau d'Eziriz, caractérisés par une densité élevée d'Alfa, sont entourés sur tous les côtés par des forêts de pin d'Alep dégradées. Parmi les différentes espèces de plantes fourragères que l'on rencontre dans les pâturages steppiques.

La majorité des trajets se situe dans la clairière au sein de la forêt de pins d'Alep. Dans la section méridionale de la plaine de Mellagou, on découvre la steppe Alfatière (steppe Ténacissima), qui s'étend sur une superficie de 3213 hectares, tandis que la superficie totale est de 4566 hectares. La steppe d'Artimisia couvre une vaste zone, représentant 6,56% de la superficie totale du sous-bassin versant. (HASSAD 2021)

VI-3. Les maquis soient des forêts dégradées :

S'appellent maquis de Chaîne vert occupent la partie Nord-Ouest de sous bassin versant. Les prairies sont des terrains humides dédiés au pâturage, généralement localisés dans des dépressions fréquemment inondées au sein de la plaine de Mellagou. Les terres non cultivables : ce sont généralement des terrains sur lesquels aucune activité agricole peut être menée en raison de leur :
 - incapacité à concevoir.
 - conditions (Itinéraire, zone détériorée, zone de protection contre l'érosion).
 - Relief : inclinaison prononcée. (Carrard et al 2019)

VI-4. Les forêts :

Le bassin versant de l'Oued Mellagou abrite un large éventail de flore comprenant des essences précieuses comme : le cèdre, le pin d'Alep, le genévrier de Phénicie, le chêne vert, le genévrier oxycèdre et le genévrier thurifère.

La forêt est le principal élément, puisqu'elle couvre 61,37% de la superficie totale du bassin, dont 17% sont composés de maquis.

Ce patrimoine boisé, en ce qui concerne les formations forestières de la wilaya, n'échappe guère aux divers phénomènes dévastateurs auxquels il est soumis. Ceci est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs.

La majeure partie de la superficie du bassin versant est occupée par des terrains forestiers.

Trois circonscriptions forestières gèrent ces forêts :

- Celle de Kais supervise la portion orientale du sous-bassin versant Beni-Oudjana, avec une superficie totale de 12105 hectares. Elle est aussi responsable, dans la municipalité de Chélia, d'une superficie de 2134 hectares et dans Bouhmama, d'une aire de 977 hectares.

La gestion de la portion ouest du sous-bassin versant est assurée par la circonscription de Bouhmama, laquelle englobe le massif de Chélia et les forêts de Beni-Imloul sur une superficie totale de 15119 hectares. - La circonscription d'El Hamma, quant à elle, s'occupe d'une partie des forêts d'Ouled Yagoub, couvrant une superficie de 9983.08 hectares.

.(HASSAD 2021)

VII/ L'hydrogéologie de la Wilaya de Khenchela :

Les estimations en eaux souterraines de la Wilaya ont été établies par l'ANAT sur la base des caractéristiques de nombreux forages. Trois (03) nappes ont été différenciées, et ce grâce à leurs profondeurs moyennes

-La nappe phréatique (en moyenne inférieure à 100 m de profondeur) est captée par plusieurs forages répartis à travers la Wilaya (Nord, Est et Sud). Cette nappe alimente plusieurs sources d'intérêt local (Ain El Fedj, Ain Karma, Ain Frengal), le point d'exsurgence de ces sources est généralement une faille ou une fracture.

-Une nappe moyenne (des grès miocènes) : sa profondeur varie de 100 à 300 m est captée par des nombreux forages à travers la Wilaya.(CHERGUIA et al 2023)

VIII/ Géomorphologies :

VIII-1. Topographique :

Trois unités topographiques qui caractérisent la commune. Elles se présentent comme suit :

VIII-1-1/ La zone de montagne :

Ce secteur abrite la forêt de Pin d'Alep (massif forestier) et en dépit d'un terrain particulièrement accidenté, l'érosion ne s'est pas révélée grâce à une couverture végétale dense (Vila, 1977).

Les montagnes se distinguent par une différence d'altitude significative entre le sommet et le fond des vallées, et surtout par l'intensité de leur inclinaison.

Chaque montagne observée possède des attributs spécifiques comme l'altitude et l'exposition (Fig.7).

-Au Nord : Se présentent par Dj.Foural à 1698 m.

-Au Nord-Est : Se présentent par Dj.Aures à une altitude de 1548 m.

-A l'Est : Dj.Taafist est à 1399 m avec une exposition Ouest. Dj.Tebak est à 1254 m avec une exposition Sud-est.

-Au Nord-Ouest Notons bien que Dj.Chélia qui culmine 2328 m exposition Sud-Est.

-A l'Ouest : Dj.Taourirt est à de 1734 m d'altitude avec exposition Sud-Est.

-Au Sud-Est : Nous remarquons ainsi Dj. El Kanouf avec une altitude de 1104 m exposé Sud-Ouest.

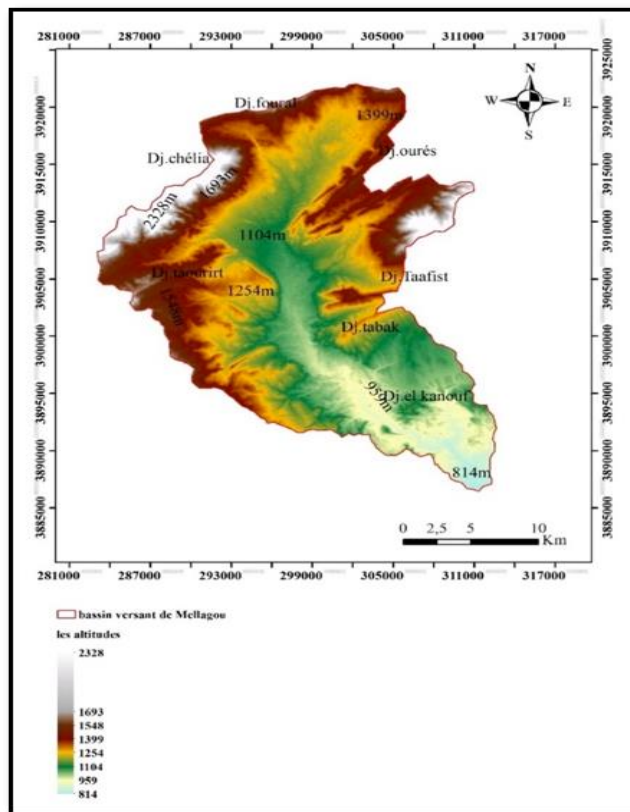


Figure N° I- 07 : Les altitudes du bassin versant d'Oued Mellagou

(HASSAD 2021)

VIII-1-2/ La zone des piémonts :

Il s'agit d'une zone d'accumulation à inclinaison légère, située au pied d'une chaîne montagneuse.

Ils se trouvent à la jonction de deux modalités opposées, à savoir les plaines et les montagnes.

Dans les bas piémonts où l'agriculture est praticable et où le ruissellement des eaux est significatif, ainsi que dans les hauts piémonts destinés à la sylviculture et à l'élevage. Il y a une importante érosion diffuse qui entraîne de nombreux dommages aux terres cultivées.

(Vila, 1977).

- Les glacis

Il s'agit de la configuration topographique la plus typique des hautes plaines et la plus illustrée dans notre domaine d'étude. Il s'agit de terrains longs présentant une pente très douce liée au massif des Aurès, à proximité de la plaine, dont la dénivellation augmente progressivement vers la montagne. Ils sont recouverts d'un matériau clastique de faible calibre et fortement fragmenté en direction du bas. De nombreux ravins divergents traversent cette région. Ces

- Les terrasses

Les terrasses sont disposées en niveaux superposés et peuvent être plus ou moins symétriques, de chaque côté des cours d'eau. Elles illustrent les positions successives des lits fluviaux pour chaque lit donné.

On les observe sur les deux contreforts dans les vallées majeures.

- Les formations alluviales et colluviales

Les vallées des Oued, identifiées comme zones d'épandage, sont des régions où l'érosion se manifeste sur les fonds et les rives des cours d'eau, soit par creusement, soit par érosion latérale.

VIII-1-3/ La zone de plaine :

La plaine, qui ressemble à une botte de forme allongée, couvre une distance d'environ 20 km le long de son axe principal nord-sud. Mis à part les contreforts qui encadrent la plaine elle-même, le relief n'est pas particulièrement marqué ; en ce qui concerne l'altitude, les deux points extrêmes sont (selon la carte de l'état-major) : (Vila, 1977).

-Au Nord : 1247 m.

-Au sud : 845m (vers l'exutoire)

Oued Mellagou représente le courant Oued qui parcourt une grande partie de la plaine, ainsi que ses affluents (Oued L'Azreg, Oued Tamza et Oued Taghit).

-Les cultures

Quand le sol est prêt, c'est surtout du blé et de l'orge qui sont cultivés en plaine et sur les piémonts.

L'espace occupé par l'arboriculture et les cultures maraîchères est très limité et se situe principalement autour des résidences. Sur une superficie totale, 36,12 Km² (3612 Ha) sont dédiés à l'agriculture, ce qui représente 47% de cette dernière.

-La steppe

Soit composé d'Alfa, soit d'Armoise. Elle est principalement localisée sur les piémonts et couvre une superficie de 36,13 km² (3613 hectares), ce qui représente 6,25 % de la superficie totale.

-Le Maquis

Composé de Genévriers oxycèdre et de chêne vert altérés. Il est situé sur les pentes et les basses pentes, occupant une superficie de 3,67 km² (367 hectares), ce qui équivaut à 4,87% de la surface totale.

-Les garrigues

Il s'agit de maquis très dégradés en raison d'une exploitation destructrice. Composées de végétation ligneuse naine et situées sur les collines calcaires basses, elles couvrent une superficie de : 0,84 km² (84 hectares), ce qui représente 1,01 % de la surface totale.

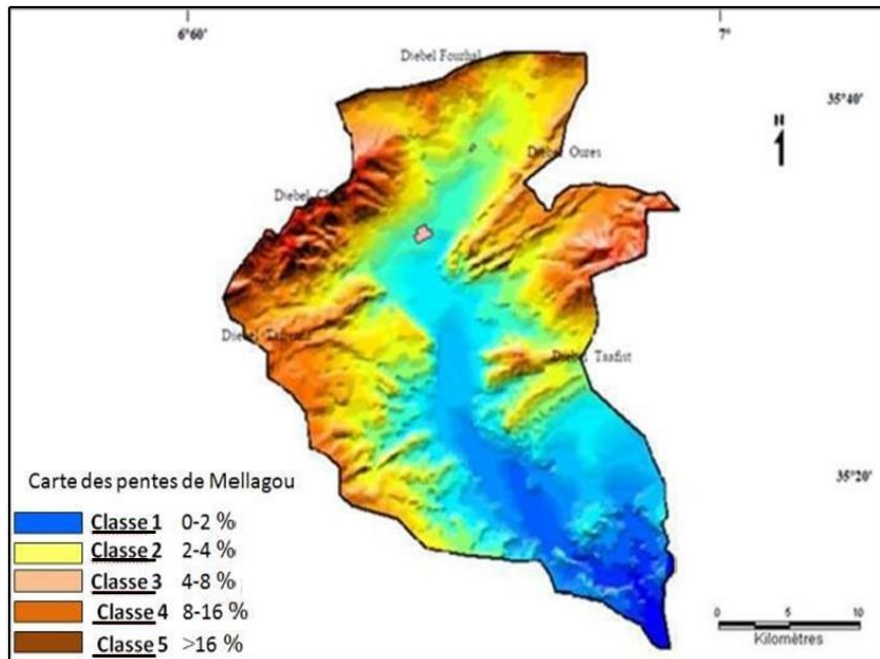
VIII-2. Les Pentes :

Les classes de pente de la plaine de Mellagou peuvent être résumées à partir de la carte qui permet de visualiser le dispositif d'agencement orographique de la commune.

La carte des pentes de la zone d'étude a été générée à partir d'un modèle numérique de terrain (DEM) à l'aide d'un système d'information géographique SIG. Il s'agit, en effet de cinq classes topographiques :

- **Les deux premières (0-2%) et (2-4%)** : concernent la partie de la vallée d'Oued Mellagou.
- **La troisième classe (4-8%)** : correspond aux zones de piémont des relief montagneux concernant la vallée d'Oued Mellagou (Chélia au Nord, Djebel Taafist à l'Est, Ras Tirhezza à l'Ouest) .

La quatrième et le cinquième classe (8-16%) et (>16%) : correspondent aux parties hautes des principaux alignements de reliefs qui incluent les points les plus hautes des reliefs de la commune. (CHERGUIA et al 2023)



topographiques : Toufana, Chélia, Toubount, Dj Djahfa et Taberdga 150 000

Figure N° I- 10 : les pentes de bassin versant d'Oued Mellagou

VIII-3. Pédologie :

L'analyse des ressources pédologiques vise à exposer les configurations du terrain (la morphologie), la composition géologique et, en parcourant le territoire communal, à identifier les possibilités, les limitations et à proposer des directives appropriées pour l'aménagement. L'analyse de la carte des sols (Fig.8) révèle trois principales catégories de sols qui définissent l'espace de la commune de Bouhmama (Fig.8) et qui sont :

- Les sols calcaires humifères.
- Les sols calciques.
- Les sols insaturés humifères.
- Les sols alluviaux basiques.

-Les sols humifères calcaires : ils couvrent une part considérable du territoire de la commune et se trouvent principalement sur les pentes des montagnes situées dans la vallée d'Oued Mellagou.

-Les sols calciques : qui occupent exclusivement la vallée d'Oued Mellagou et qui coiffent principalement toutes les terrasses bordant le cours du Mellagou.

-Les sols humifères insaturés : ils constituent des sols montagneux de faible épaisseur qui se forment sous les forêts et sur des pentes abruptes, que l'on observe au Chélia, au Djebel Taourirt et au Djebel M'Daouer.

-Les sols alluviaux basiques : on observe uniquement à certains endroits, de façon très limitée, des sols alluviaux du Mellagou où se cultive l'arboriculture fruitière en mode irrigué (pommier, pêché) (HASSAD2021)

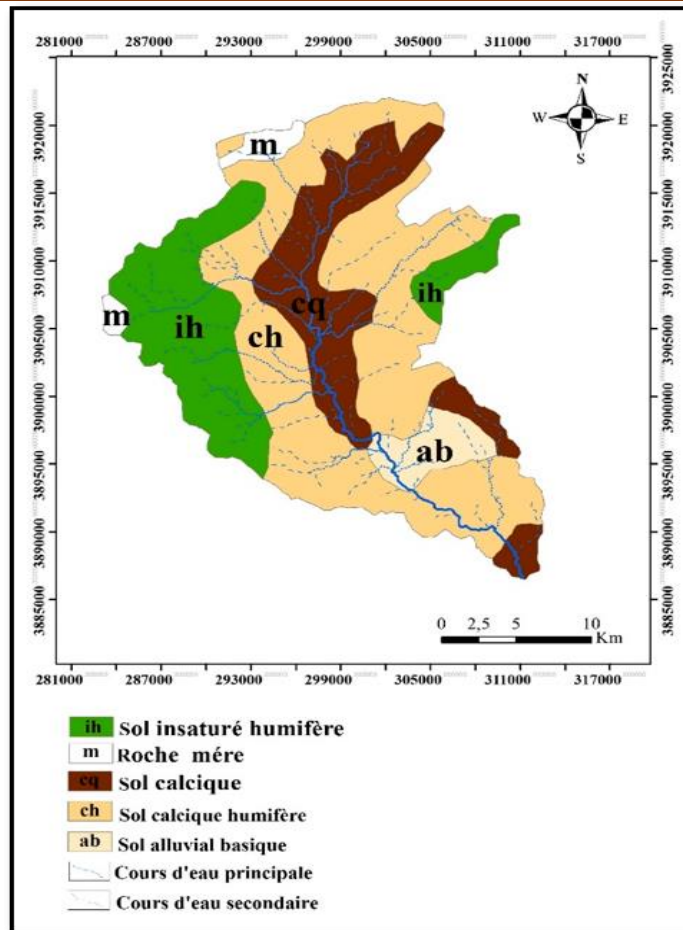


Figure N° I- 11 : la répartition des unités des sols à travers le bassin versant d'Oued Mellagou (HASSAD 2021)

VIII-4. Les caractéristiques géométriques et morpho métriques :

VIII-4-1/ Paramètres géométriques :

a/ La superficie

Il est crucial de connaître la superficie d'un bassin versant, car elle constitue le fondement de tous les calculs hydrologiques et des plans d'aménagement. Pour mesurer cette surface, il faut d'abord définir le bassin en traçant la ligne de partage des eaux, qui est représentée par la ligne des crêtes.

Les contours du sous bassin de l'Oued Mellagou sont clairement définis dans les zones montagnardes où les altitudes sont bien marquées, cependant, ils le sont moins pour les plaines à la topographie plane et aux formations de surface perméables. Grâce au logiciel ArcGis 10.1, la superficie du sous-bassin a été estimée à environ 577,8 km².

b/ Le périmètre = 127,2 km

VIII-4-2/ Indice de forme ou indice de compacité Gravelius :

On dispose de divers indices morphologiques pour décrire le milieu et établir des comparaisons entre les bassins versants. La manière la plus directe serait de confronter le bassin examiné à un modèle de bassin standard. C'est en 1914 que Gravelius (1861-1938), qui était professeur à l'Université de Dresde (Allemagne), a suggéré le coefficient de compacité. L'indice de compacité de Gravelius (KG) représente en réalité le rapport entre la circonférence du bassin et la longueur du cercle ayant une surface équivalente. Si on note P le contour du bassin et A sa surface, le coefficient de compacité peut être exprimé comme suit :

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{A}$$

Cet indice est calculé en se basant sur une carte topographique, en évaluant le périmètre du bassin versant et sa superficie. Il avoisine 1 pour un bassin versant ayant une forme presque circulaire et donc bien compacte ; cependant, il dépasse 1 lorsque le bassin a une forme étirée.

$$Kc = 0.28 \frac{127.2}{\sqrt{577.8}} = 1.48$$

$$Kc=1.48$$

Ainsi, ce bassin présente une forme plutôt allongée. Comme mentionné précédemment, une forme étendue d'un bassin versant engendre des débits de crue faibles du fait du long temps de concentration (HASSAD2021)

VIII-4-3/ Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius :

Afin de mettre en parallèle des bassins versants en tenant compte de l'impact de leurs caractéristiques sur le débit, on introduit le concept du rectangle équivalent. On présume que, dans un bassin spécifique, le flux est à peu près identique à celui d'un rectangle de surface équivalente, présentant un coefficient de Gravelius identique, une distribution hypsométrique similaire sous des conditions climatiques comparables, ainsi qu'une répartition semblable des sols et de la végétation et une densité de drainage identique. Il s'agit d'une transformation strictement géométrique où les lignes parallèles aux largeurs du rectangle et de l'évacuation représentent le côté court ou la largeur du rectangle. (Eskenazi, 1991).

En tenant compte de la longueur **L** et de la largeur **l** du rectangle, ayant connaissance du périmètre **P**, du coefficient de compacité de Gravelius **KG** et de la surface **A** du bassin versant, nous pouvons inférer les valeurs de **L** et **l** :

-La longueur :

$$L = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right)$$

$$L=52.57 \text{ Km}$$

- La largeur

$$l = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right)$$

$$l=10.99 \text{ Km}$$

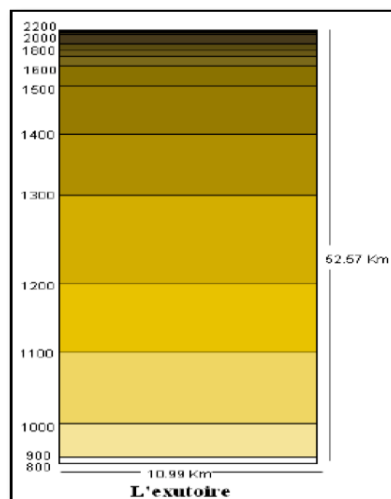


Figure N° I- 12 : le rectangle équivalent de bassin versant d'Oued Mellagou

(HASSAD 2021)

VIII-4-4/ L'orographie :

Le relief joue un rôle primordial, car il influence largement la capacité des terrains à permettre le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. C'est un facteur crucial dans le comportement hydrologique d'un bassin. La majorité des éléments météorologiques et hydrologiques dépendent de l'altitude, étant donné que l'altitude d'un relief est liée au gradient de précipitations et de température, ainsi qu'à la vitesse d'écoulement qui tend à être plus élevée en montagne qu'en plaine. Le tableau 5 présente la distribution du bassin versant (en km² et en % de la surface totale) par tranches d'altitude (CHERGUIA et al 2023)

L'analyse des cartes topographiques 1/50 000 de Toufana, Chélia, Dj Djahfa, Dj Toubount et Taberdga révèle que la zone d'étude est représentée par deux sections :

➤ La partie Nord

Caractérisée par deux massifs montagnards (massif de Chélia et massif de Ouled Yagoub). Où les altitudes varient entre 1000 m et 2326m.

➤ La partie Sud

Elle est caractérisée par les collines et les Djebels dont l'altitude varie entre 800m et 1365m.

VIII-4-5/ l'altitude maximale :

Le point le plus élevé du sous-bassin de l'Oued Mellagou, situé au sommet de Ras Kelthoum, atteint 2326 mètres.

VIII-4-6/ L'altitude minimale :

L'altitude minimale est de 800 mètres dans la plaine à proximité de l'évacuation. Par conséquent, il y a un dénivelé total de 1526 mètres.

L'altitude est un élément crucial, elle influence considérablement la propension des terrains à ruisseler, c'est un atout dans le comportement hydrologique d'un bassin. Ses propriétés hypsométriques facilitent l'élaboration de la classification du relief.

VIII-4-7/ Courbe hypsométrique :

Le relief est caractérisé par sa courbe hypsométrique, celle-ci nous renseigne sur la répartition de la surface en fonction de tranche d'altitude en portant ordonnée les tranches données et en abscisse la surface du bassin pour laquelle chaque point est une cote au moins égale à cette altitude, les surfaces en abscisse sont exprimées en pourcentage de la surface totale du bassin, la répartition altimétrique du bassin versant d'Oued Chéria est représenté sur le [tableau 4 \(HASSAD 2021\)](#)

Le profil hypsométrique du bassin versant de l'oued Mellagou présente une forme généralement irrégulière ([Fig.10](#)).

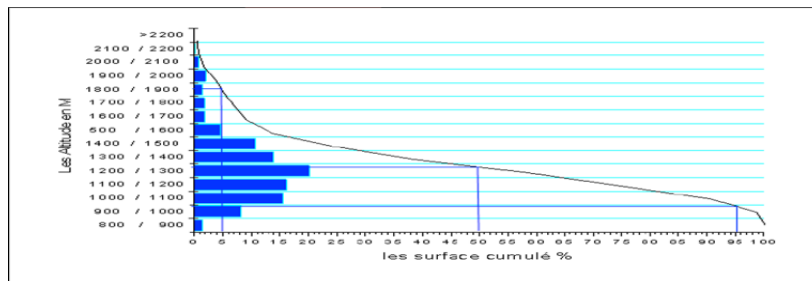


Figure N°I- 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant Oued Mellagou (CHERGUIA et al 2023)

**Tableau N° I-04 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Mellagou
par tranche d'altitude.**

Altitudes en (m)	Surfaces (Km)	Surfaces cumulées (Km)	Surfaces (%)	Surfaces cumulées (%)	Largeur de l'intervalle
>2200	0,19	0,19	0,03	0,03	0,02
2100-2200	1,97	2,16	0,34	0,37	0,18
2000-2100	5,13	7,29	0,89	1,26	0,47
1900-2100	12,1	19,39	2,09	3,36	1,10
1800-1900	8,25	27,64	1,43	4,78	0,75
1700-1800	10,5	38,14	1,82	6,60	0,96
1600-1700	11,6	49,74	2,01	8,61	1,06
1500-1600	27	76,74	4,67	13,26	2,46
1400-1500	61,3	138,04	10,61	23,89	5,58
1300-1400	81,5	219,54	14,11	38,00	7,42
1200-1300	117	336,54	20,25	58,25	10,65
1100-1200	93,8	430,34	16,23	74,48	8,54
1000-1100	91	521,34	15,75	90,23	8,28
900-1000	47,5	568,84	8,22	98,45	4,32
900-800	9,05	577,8	1,57	100,00	0,82
	Σ 577,8		Σ 100		Σ 52,57

(HASSAD 2021)

VIII-4-8/ Les altitudes caractéristiques :

A partir de cette courbe, les altitudes suivantes ont été déterminées :

- L'altitude médiane : L'altitude médiane correspond à une surface cumulée de 50% est Égale à (H50%) = 1340 m
- L'altitude à 95 % de la surface, (H95%) = 1040 m.
- L'altitude à 5 % de la surface, (H5%)= 1380 m.

$$H = \frac{\sum S_i \times H_i}{S}$$

S_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (km).

Hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

S : superficie totale du bassin versant (km).

L'altitude moyenne est ainsi définie : $H'' = 1271,72$ m.

VIII-4-9/ Les pentes :

Les classes de pente du bassin versant d'Oued Mellagou peuvent être résumées à partir de la carte qui permet de visualiser le dispositif d'agencement orographique de la commune (Fig.11). Il s'agit, en effet de cinq classes topographiques :

Les deux premières sections (0-2%) et (2-4%) : se réfèrent à la portion de la vallée d'Oued Mellagou.

La deuxième catégorie (4-8%) : elle se réfère aux régions de piémont des terrains montagneux qui incluent la vallée d'Oued Mellagou (Chélia au nord, Djebel Taafist à l'est, Ras Tirhezza à l'ouest).

La troisième et quatrième classe (8-16%) et (> 16%), correspondent aux parties hautes des principaux alignements de reliefs qui incluent les points les plus hautes des reliefs de la commune. (Belkoun et al 2017)

VIII-4-10/ Les indice de pente :

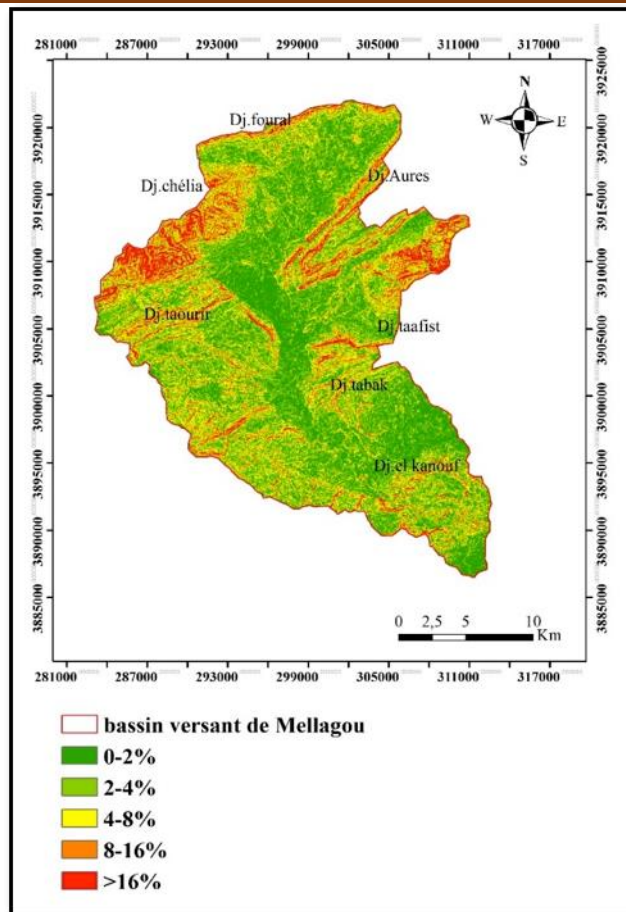
Le relief par sa configuration joue un rôle important vis-à-vis de l'aptitude des différents terrains au ruissellement, elle exerce une influence directe sur la rapidité de l'écoulement et donc sur la puissance de la crue. (HASSAD 2021)

a/ Indice de pente global

Cet indice sert à classer le relief du bassin, il décroît lorsque la surface augmente, et il présente l'avantage d'être très simple. Cet indice est très facile à calculer et très utilisé, il sert de base à une classification d'O.R.S.T.O.N. (Office des Recherches Scientifiques dans les Territoires Outre-Mer). Pour les bassins versant dont la superficie est supérieure à 25 Km² Sur la courbe hypsométrique on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface, on aura les altitudes H5% et H95% entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin et la dénivelée $D = H5\% - H95\%$, L est la longueur de rectangle équivalent en Km. (belkoun et al 2017)

$$I_g = \frac{D}{L} (\text{m/Km})$$

$$I_g = 15,98 (\text{m / Km}).$$



**Figure N° I- 14 : Les pentes du bassin versant de Oued Mellagou
(Belkoum et al 2017)**

B/ Dénivelée spécifique (DS) :

La dénivelée spécifique permet de définir les différents types de relief des bassins versants Elle est exprimée par la relation suivante :

$$Ds = \sqrt{S} \times Ig$$

On a:

$Ig = 15,98\text{m/Km}$.

$S = 577,8\text{Km}^2$.

$\sqrt{S} = 24,03\text{Km}$.

$Ds = 384,12\text{ m}$.

Le dénivelé spécifique permet d'utiliser la classification de L'O.R.S.T.O.M (Office des Recherches Scientifiques dans les Territoires Outre-Mer) qui permet définir les différents types de relief des bassins versant quelque soient leurs superficies.

D'après la classification de L'O.R.S.T.O.M. (Office des Recherches Scientifiques dans les Territoires Outre-Mer. (HASSAD 2021)

**Tableau N° I- 05 : Classification du relief en fonction de « Ds » d'après
L'O.R.S.T.O.M**

R1	Relief très faible.	Ds<10m
R2	Relief faible.	10<Ds<25m
R3	Relief assez faible.	25<Ds<50m
R4	Relief modéré.	50<Ds<100m
R5	Relief assez fort	100<Ds<250m
R6	Relief fort.	250<Ds<500m
R8	Relief très fort	Ds>500m

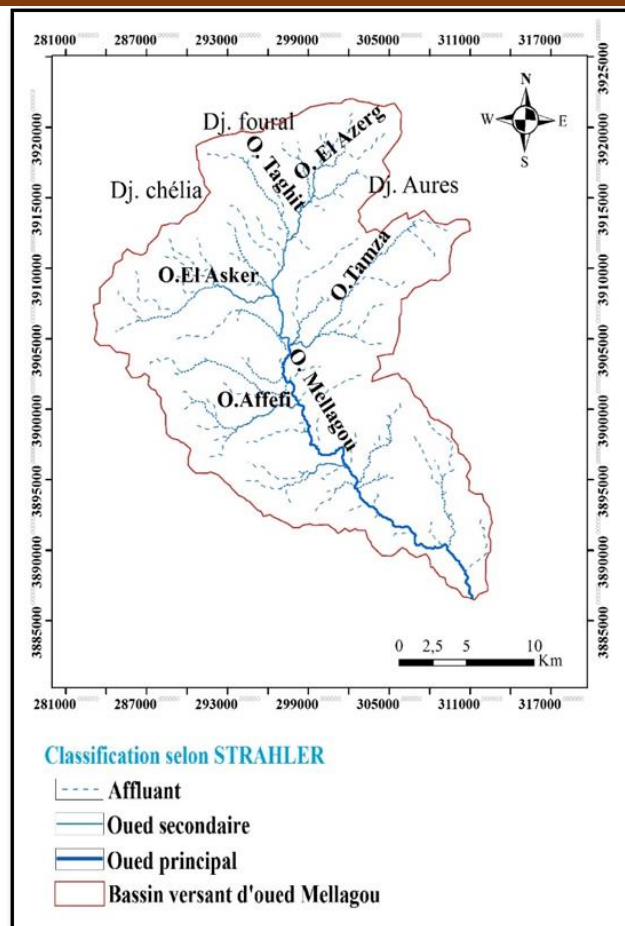
(HASSAD 2021)

Les valeurs de Ds, traduisent bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief. Notre bassin versant présente un relief fort (R6) car : 250 m < Ds < 500m.

IX/ Le Réseau hydrographiques :

Oued Mellagou : résulte de la confluence de deux bras, celui du déversoir du Djebel Aurès (1.551m), connu sous le nom d'oued Amar, qui reçoit à droite l'Oued Nord Timaroden et l'Oued Taghit, aussi appelé l'Oued Tafrent, qui descend du flanc nord du Chélia et facilite de bonnes liaisons vers l'ouest et vers le nord. Une fois qu'il se joint à l'Oued Taghit, ce bras est désigné sous le nom d'oued Azreg et fusionne avec le bras Ouest. Il descend (Fig12). Sur le versant sud du Chélia, le col de Tizougarine s'ouvre, donnant naissance à l'Oued Aguelmène, suivi de l'oued El Aksser qui irrigue le village de Bouhamama. Ces cours d'eau se rejoignent pour former l'Oued Mellagou. Oued Mellagou serpente de cette manière à travers de nombreux méandres avant de se déverser dans Al Abiod puis Oued El Arab.

La majorité des Oueds présents dans le sous-bassin versant d'Oued Mellagou ne sont pas permanents. Ce sont tous des affluents du grand Oued, connu sous le nom d'Oued Mellagou. Les principaux cours d'eau qui proviennent du Nord sont : Oued Taghite et Oued Azreg. Ces deux oueds prennent leur source du côté est des plaines de Mellagou et se dirigent vers le sud. Outre les deux précédents, on compte également les Oueds suivants : Oued Zenague et Oued Taghit qui traversent la partie orientale de la commune de Chélia. On trouve Oued Lakhsoume et Oued Askar, deux affluents provenant de la région d'El Ksour, juste à côté de l'ancienne Bouhmama. À la plaine se joignent Oued Djaarir et Oued Tamza. Suite à l'ajout d'Oued Tamza et Asker, le grand Oued Mellagou voit le jour, qui s'unit ensuite avec l'Oued El Abiod et l'Oued El Arab. Le modèle numérique de terrain (DEM) a servi à créer la carte hydrographique de la région étudiée, en utilisant un système d'information géographique (SIG). (HASSAD 2021)



(HASSAD 2021)

Figure N° I- 15 : Le réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Mellagou

X/ Les Ressources hydriques :

La zone montagneuse de Mellagou dispose d'un potentiel hydrique important que ce soit en eau superficielle et souterraine ; Les eaux superficielles sont les eaux de ruissellement superficiel de pluie qui sont caractérisée par l'écoulement en hiver et assèchement en été. La zone est dominée par un réseau hydrographique très dense d'un régime d'écoulement irrégulier.

En dehors des eaux superficielles ; l'eau souterraine constitue un réservoir d'eau d'une importance primordiale, et offre souvent l'unique source d'approvisionnement en eau.

L'exploitation de la nappe aquifère remplie d'eau pendant les périodes pluviales nécessitent la réalisation d'ouvrage tel que puits, forages et sources. (HASSAD 2021)

X-1/ Les eaux superficielles :

- Les Oueds et Leurs exploitation

Tableau N° I- 06 : les ouvrages de retenues collinaires.

Nom de l'ouvrage	Bouyelfene	Djaarir	Talaoufounes
Capacité m3	20000	15000	10000
Année de réalisation	1987	1987	1987
Superficies irriguées	15	10	10
Etat de l'ouvrage	Bon	Envasé	Envasé
Observation	Réhabilité 2001	/	/

(DAC 2007)

La plupart des retenues collinaires sont inexploitées à cause de :

- Problème d'envasement sauf la retenue de Bouyelfène qui a été aménagée dans le cadre de programme de concession en 2001.
- Aménagement hydraulique pour l'irrigation inexistant
- Problème d'infiltration au niveau de la digue.
- Evacuateurs des crues endommagées

X-2/ Les eaux souterraines :**- Les forages**

La profondeur de la nappe alluvionnaire de la zone d'étude varie entre 70 à 150 m, dont le nombre de forages captant la nappe est de 125 leur débit varient de 3 à 35 L/S. la date de réalisation est 1987 / 2024, leur destination est l'irrigation et l'AEP. Dont la superficie irriguée est 794 Ha. (Les statistiques de la DAC 2007).

- Répartition des puits et leurs natures :**Tableau N° 07 : Répartition des puits et leurs natures**

La zone	Bassin versant de Mellagou
Nombre de puits	Total : 143 -Fonctionnels : 130
Profondeur en M	6 / 22
Débit (L/S)	0.2 / 1
Superficie (Hé)	52

(Gaagai, 2009)

XI/ Cadre Géologique :

XI-1/ Introduction :

L'analyse de l'environnement géologique est fondamentale à toute étude hydrogéologique ou hydrogéochimique. Elle permet d'identifier les matériaux et les structures des formations géologiques susceptibles d'être aquifères et qui conditionnent l'écoulement des eaux souterraines et superficielles.

Nos connaissances géologiques sur la région d'étude sont largement inspirées des travaux et des études régionales et des synthèses sur le massif des Aurès sur les hautes plaines steppiques et sur les zones humides.

La plupart de ces études ont été axées sur les caractères stratigraphiques, géomorphologiques, sédiment-logiques et structuraux (Houha, 1996 et 2007).

Les données géologiques fournissent des indications précieuses sur la nature du substrat où se développe la végétation. Cette dernière répond d'une manière assez fidèle à la nature lithologique et aux formes géomorphologiques. La plupart de ces études ont été axées sur les caractères stratigraphiques, géomorphologiques, sédiment-logiques et structuraux (Laffitte, 1939).

En dépit, de la diversité des structures et morphologiques dans cette région des Aurès, marquées, à la fois, par ses massifs montagneux imposants tels que le Djebel de Chélia, ses zones de piémont sur lesquels se sont développés d'importants cônes de déjection marquant le passage entre le domaine de montagne et de plaine, la structure géologique reste dans son ensemble assez simple :

Des anticlinaux et synclinaux balisant le domaine de montagnes et de piémonts organisés dans leur ensemble selon une direction Nord-Est-Sud-Ouest. - Des plaines et des vallées évasées résultantes, soit de la dynamique érosive et /ou de l'évolution géologique et qui correspondent, soit à des synclinaux perchés, soit à des anticlinaux évidés ou à des structures plus complexes. (Houha, 1996 et 2007 ; Laffitte, 1939 ; Guiraud, 1973 ; Vila, 1977 ; Benkoumchi, et al.1996)

XI-2/ Lithostratigraphie :

Selon le relevé stratigraphique établi par divers géologues, notamment R. Laffitte, les strates les plus anciennes sont attribuées au Tertiaire tandis que les plus récentes sont assignées au Quaternaire. ((CHERGUIA et al 2023)

XI-3/ Stratigraphie :

La stratigraphie de Bouhmama est principalement caractérisée par la prépondérance des formations secondaires. Les formations quaternaires ne se retrouvent que dans la vallée de l'Oued Mellagou et la dépression d'Ez-Ziriz. Il est également important de mentionner que les terrains les plus anciens identifiés dans cette région sont les faciès triasiques, qui se forment généralement par le biais du diapirisme.

L'histoire géologique des formations mésozoïques de cette zone commence avec le Crétacé supérieur, en incluant les formations de la crétacée inférieure et moyenne. Ces dernières sont suivies par le Quaternaire. (CHERGUIA et al 2023)

XI-3-1/ Le Quaternaire :

Les dépôts quaternaires illustrés par des sédiments colluvio-alluvionnaires se forment à l'extrémité des zones de relief en créant des cônes de déjection, grâce à des éboulis gravitationnels sur les terrains irréguliers et en dessous des escarpements et corniches comme le Kef El Ahmeur. Il est également important de noter la présence des dépôts alluvionnaires de l'Oued Mellagou et de ses principaux affluents qui couvrent les formations crétacées localisées dans la vallée de cet Oued Mellagou. *.(CHERGUIA et al 2023)*

XI-3-2/ Tertiaire**- Eocène inférieure**

Qui débute sur le M. strichtien supérieur avec des marnes presque noires et transite vers un calcaire marneux de couleur gris bleuâtre et fin. *.(HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)*

- Eocène moyenne

-Oligocène inférieure comportant des argiles et des silices de couleur rougeâtre.

-Oligocène moyen et supérieur des remblais ou des dépôts en éventail rougeâtre avec une granulation allant du bloc à l'argileux, de l'argile et du gypse dans les zones déprimées. On les trouve près de l'embouchure de l'Oued Azreg. *.(HASSAD 2021)*

- Miocène (mi)

La plupart des grès (Chélia) sont présents sous forme de roche ; on y trouve également partiellement des marnes, des conglomérats de biomicrite et de biomicroparité. *.(HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)*

XI-3-3/ Le Crétacé

Tout le territoire de la commune de Bouhmama, qui est constitué de divers terrains, date de la période du Crétacé. Donc, la majorité des affleurements secondaires examinés dans la commune s'étend du Crétacé inférieur au Crétacé supérieur, présentant une grande diversité de faciès allant des marnes aux calcaires, en incluant les marron-calcaires et les grès. *.(HASSAD 2021) et (CHERGUIA ; ARGOUB ; CHERRABEN 2023)*

- Le Crétacé supérieur

Ce groupe se compose de marnes, avec quelques strates de marron-calcaire à la base et au sommet. Cette formation se manifeste dans la région en dépression située entre les Djebels Tebak et Kanouf. C'est la section qui assure la liaison entre l'Oued Mellagou. *.(HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)*

-Campanien, Santanien et Coniacien (c8a, c7)

On note la présence de marnes bleuâtres, noires et quelques éléments calcaires, ainsi que de marnes beige à ocre. Situé dans la section méridionale du sous-bassin et la synclinale de l'Oued Azreg.

- Le Crétacé moyen**-Le Turonien**

Cette formation se compose d'une succession de marnes grises et de calcaire zoogénique nodulaire d'une épaisseur de 150 mètres, avec à sa base quelques mètres de marroncalcaires blanchâtres en fines plaques à fissures noirâtres bitumineuses. Elle constitue plus de la moitié de la surface du territoire de la commune. *.(HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)*

-Le Cénomaniens supérieur

L'étage supérieur est composé de calcaires formant une barre avec des fissures en écaille, et au sommet, un niveau de nodules de pyrite constitue un point de; (CHERRABEN et al 2023)

-Le Cénomaniens moyen

Il s'agit d'une puissante formation de 650 mètres composée de marnes grises et micrites grisâtres, contenant des tests fins de lamellibranches. (HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)

-Le Cénomaniens inférieur

On parle ici des marnes grises à biomicrites argileuses grises qui présentent des traces de glauconies et d'ammonites, et possèdent une épaisseur de 100 mètres.

La formation cénomaniens apparaît à la surface entre les Djebels Tafrennt et Taourirt à l'ouest, et Kef El Ahmeur et Djebel Taafist à l'est. (HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)

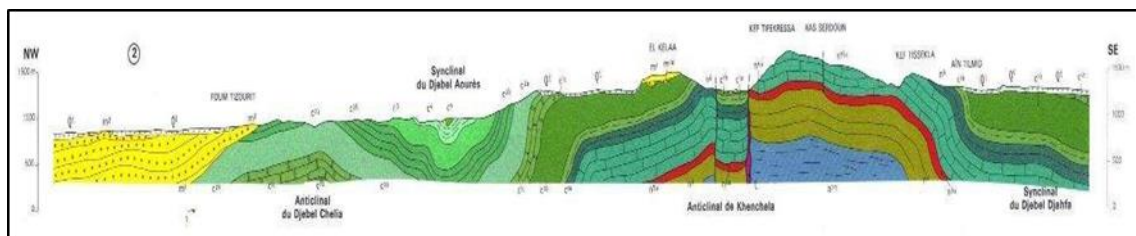


Figure N° I- 16 : coupe géologique 2 Sud-Est, Nord-Ouest dans la région de Khenchela (203 carte géologique de Khenchela

- Le Crétacé inférieur**-L'Albien**

Cette formation émerge sur le flanc Sud et Sud-Est du Chélia, juste en dessous des terrains aptiens. Elle forme constamment une ceinture continue autour du Djebel Chélia, au-dessus de l'Aptien. Disposant d'une épaisseur de 160 mètres. Elle se compose principalement d'une succession de grès et de marnes grises, de dolomies et d'argiles.

-L'Aptien

Cette formation s'étend sur le flanc Sud et Sud-Est du Chélia, juste en dessous des terrains barrémiens. Elle se compose principalement de bas en haut de :

- Calcaires marneux.
- Des flocons blancs.
- Des marnes de couleur grise.

Cet étage se caractérise par des calcaires hautement minéralisés qui présentent une épaisseur totale de 330 mètres.

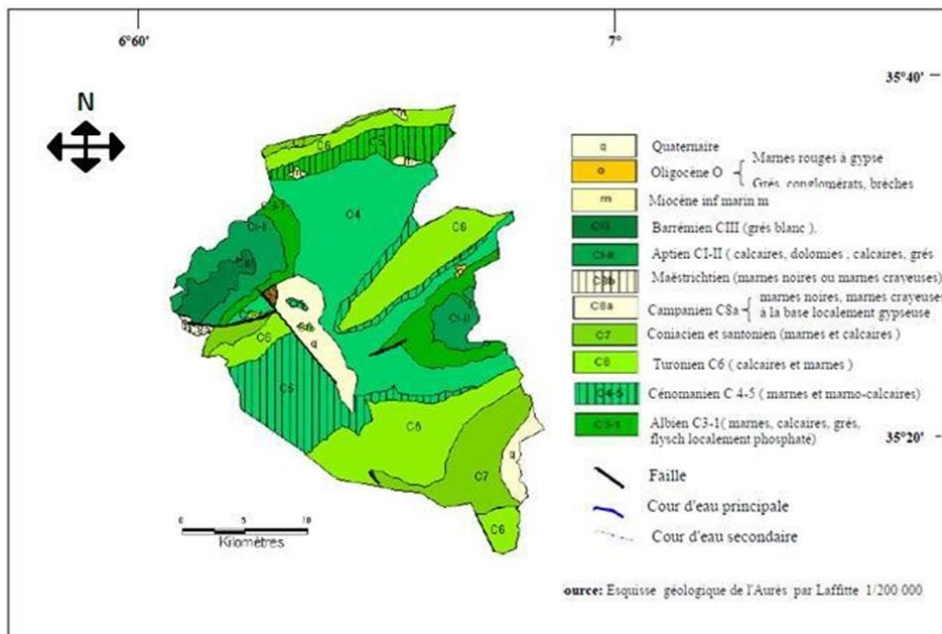
-Le Barrémien

Il se manifeste au Sud et au Sud-Ouest du flanc du Djebel Chélia sur une étendue approximative de 11 kilomètres. Il est borné au-dessus par la ligne de crête qui sépare

Timchtaouine du nord-ouest de l'endroit appelé ferme Moussa El Ayat, en traversant Tala Bergés. Essentiellement, sa lithologie est formée de matériaux détritiques (calcaires gréseux gris, conglomérat, marnes vertes ou rouges). (HASSAD 2021) et (CHERGUIA et al 2023)

XI-4/ Les Failles :

On les situe à Oued Mellagou, dans la région de Djaarir ainsi que sur le versant sud-est du Djebel Chélia.



Esquisse géologique de l'Aurès par Laffitte 1/200 000

Figure N° I- 17 : la carte géologique de bassin versant d'Oued Mellagou.

XI-5/ Les mouvements tectoniques dans la région d'étude :

Le mouvement caractéristique du plissement des vastes ensembles dans cette région reflète celui qui a marqué l'ensemble des régions atlasiques.

Malgré la complexité de certaines configurations et des complications orographiques causées par l'inversion topographique, le mouvement ondulatoire général se caractérise à la fois par sa simplicité et par l'importance des masses en jeu.

En ce qui concerne la tectonique de cette zone, elle se distingue par sa conformité au modèle de déformation cassante qui prévaut dans tout le domaine atlasique, et par son orientation stable suivant la tendance générale de ce domaine atlasique, à savoir du NE au SW. Cependant, on note la présence de failles transverses suivant le sens NW-SE. On observe cela dans le cas de la faille qui marque la limite orientale du Djebel Ichemoul (à l'est d'Arris) ainsi que celle de Théniet Ressa.

La commune de Bouhmama abrite également une faille qui s'étend du nord-ouest au sud-est, partiellement suivie par l'Oued Mellagou, un affluent d'El Abiod-El Arabe. Il convient également de noter que l'anticlinal du Djebel Chélia, dont la voûte est observable à l'est, est marqué par des fractures orientées NW-SE qui sont probablement associées à d'anciens mouvements de coulissement alpins. (CHERGUIA et al 2023)

XI-6/ La perméabilité :

La répartition des écoulements de surface est influencée par les différentes formations géologiques présentes dans les bassins versants. Effectivement, un bassin constitué de matériaux hautement perméables et doté d'une végétation continue aura généralement une densité de drainage réduite, garantissant ainsi une meilleure absorption des eaux de surface. De plus, un bassin constitué de roches non étanches mais tendres et érodables, telles que des marnes ou des argiles, doté d'une végétation modérée, possède généralement une forte densité de drainage qui favorise le ruissellement des eaux de surface au détriment de l'infiltration.

Le sous bassin est majoritairement constitué de formations perméables à semi-perméables qui couvrent presque l'ensemble de la surface du bassin, facilitant ainsi l'infiltration des eaux superficielles.

Cependant, les formations perméables se réfèrent principalement aux alluvions quaternaires, en particulier les marnes et grès du miocène qui sont visibles à la surface de la plaine de Mellagou.

Tableau N° I- 08 : Les propriétés des matériaux de bassin versant en termes de perméabilité.

Formation géologique	Formation lithologique	La perméabilité
Campanien	Marnes noires.	Faible.
Maestrichtien	Marnes crayeuses.	Faible.
Oligocène	Marnes rouges à gypse.	Faible.
Coniacien	Marnes et calcaires.	Semi-perméable.
Quaternaire	Alluvion ancienne et récente	Perméable.
Cénomaniens	Marno-calcaire.	Semi-perméable.
Turonien	Calcaires et marnes.	Imperméable.
Miocène	Calcaire, grés.	Imperméable.
Albien	Calcaire massif	Imperméable.
Aptien	Dolomie.	Imperméable.
Barrémien	Grés.	Semi-perméable.

(Belhadj et al., 2017)

XII/ Conclusion :

La région d'étude est caractérisée par trois grandes unités topographiques à savoir, la zone de montagneuse, les piémonts et la zone de plaine.

La géologie de la commune de Bouhmama se caractérise, essentiellement, par la Prédominance des terrains secondaires (crétacé supérieur, moyen et inférieur) avec des faciès très variés allant des marnes aux calcaires en passant par les marnocalcaires et les grés, les terrains quaternaires ne sont présents que dans la vallée de l'Oued Mellagou.

Après avoir étudié les différentes composantes du milieu physique de bassin versant de Oued Mellagou ; il ressort que la zone d'étude offre des caractéristiques spécifiques et particulière à la région montagneuse. Ce sont les paramètres qui conditionnent la bonne exploitation et la réussite aménagement, donc il faut les prendre en considération ; soit pour l'exploitation soit pour l'aménagement.

On peut conclure les principales caractéristiques des composantes du milieu physique de bassin versant d'Oued Mellagou par :

Les caractéristiques du bassin versant prouvent que le bassin versant est allongé, les pentes sont décroissantes de l'amont vers l'aval, elle varie entre (0 – 2 %) et (0-4%), (4-8%) avec majorité de (8-16%) et (>16%), ceci provoque une accélération d'écoulement surtout durant des crues ce qui traduit par un risque majeur c'est l'érosion hydrique.

On remarque aussi que la lithologie est variée (marne – calcaire – Alluvion ancienne et récente) donc ces formations présente perméabilité élevé.

La végétation dans la zone d'étude se devise en deux parties majeurs couverture naturelle (cèdre, chaîne vert, pin d'Alep, alpha) et couverture végétale anthropique (arboriculture, céréale ...) le pourcentage de taux de recouvrement 61.3% de la surface totale du bassin, dont la majorité de cette couvert végétale tend vers la dégradation.

A decorative border of seven black graduation caps with gold tassels is arranged around the top and left sides of a large black rectangular frame.

Chapitre II

Hydro-climatologie



I- Introduction

L'Algérie connaît un climat de transition. Il passe du type méditerranéen au nord à celui désertique dans le Sahara. En raison de son positionnement géographique et bioclimatologie dans les zones arides et semi-arides, le nord de l'Algérie fait face à des conditions hydro-climatiques difficiles. Ces conditions se distinguent par des précipitations inégales qui varient considérablement d'une année à l'autre, ainsi qu'une grande irrégularité saisonnière et interannuelle des flux d'eau.

La compréhension du devenir des précipitations repose en partie sur la climatologie. Elle s'appuie sur l'analyse des données et des paramètres climatiques collectés sur une période spécifique (30 ans), ce qui permet d'évaluer les divers éléments du bilan hydrique. Ce dernier est essentiel pour comprendre le fonctionnement d'un système hydraulique de surface, ce qui nécessite la maîtrise des paramètres suivants : (les précipitations, la température, l'évapotranspiration), qui influencent ce bilan.

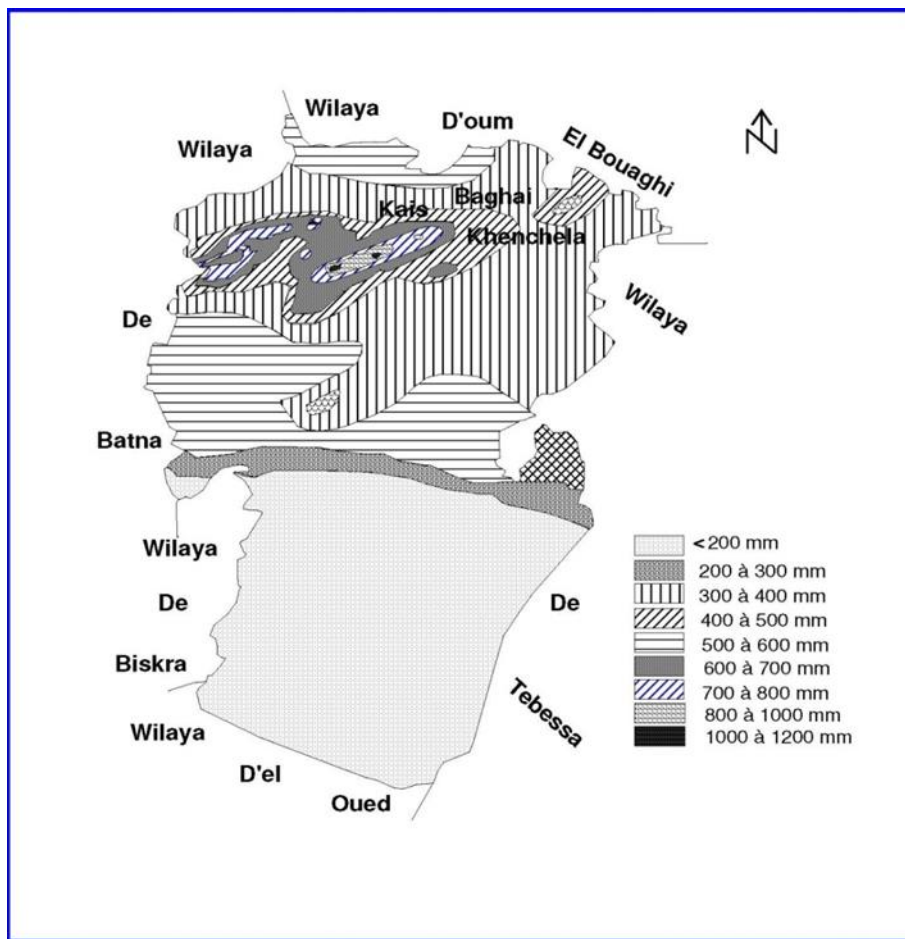


Figure N°II-01 : Carte de la pluviométrie de la wilaya de Khenchela (ANAT 1992).

II- Climatologie :

L'évaluation des facteurs du bilan a été réalisée en s'appuyant sur les données de la station météorologique d'El Hamma, administrée par l'Office national de météorologie, qui couvre la période d'observation de 1994 à 20. Cette station se trouve aux coordonnées suivantes :

Tableau N° II-01 : Les coordonnées de station météorologique :

Coordonnées Stations	Latitude	Longitude	Altitude	Période d'observation
D'ElHamma	7°05'E	35°28'N	928.5 m	1994-2024

III- Les facteurs climatiques :

III- 1 Les précipitations :

Les précipitations jouent un rôle prépondérant dans la détermination de la sécheresse globale du climat.

L'origine des pluies en Algérie est plutôt orographique. En effet, les précipitations varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagne et de l'exposition. De ce fait, les versants Nord et Nord-Ouest reçoivent plus de précipitations que les autres expositions. Ainsi les quantités de pluies augmentent de bas en haut, selon un gradient pluviométrique altitudinal.

On appelle précipitations les eaux qui tombent sur la surface terrestre, qu'elles soient en phase liquide (bruine, pluie, averse), en phase solide (neige, grésil, grêle) ou déposées (rosée, gel, givre...).

Peu importe le type de précipitation, on quantifie la quantité d'eau qui s'est abattue sur une période déterminée. On le quantifie habituellement soit en millimètres (mm), soit en litres pour chaque mètre carré (l/m²). 1 litre d'eau par mètre carré correspond à 1 mm de précipitations.

L'intensité de la pluie correspond à la quantité d'eau tombée par unité de temps (souvent exprimée en mm/h).

III- 1-1 - Précipitations moyennes mensuelles :

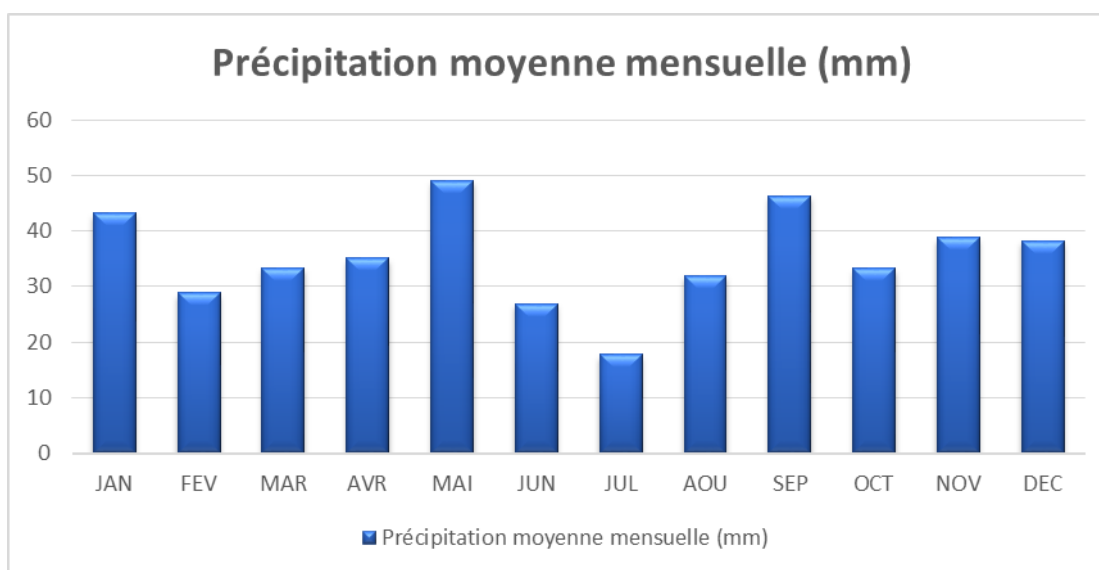


Figure N° II- 02 : Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelles (1997-2024).

Interprétation :

Le graphique montre la moyenne mensuelle des précipitations à la station d'El Hamma, où l'on remarque que la quantité de précipitations en septembre est élevée, estimée à 56,59 mm, tandis que la plus faible est observée au mois de juillet, estimée à 15,46 mm.

On peut également dire que le mois de septembre se caractérise par une saison humide et fraîche, tandis que le mois de juillet est une saison chaude et sèche.

III- 1-2- Précipitation moyenne annuelle :

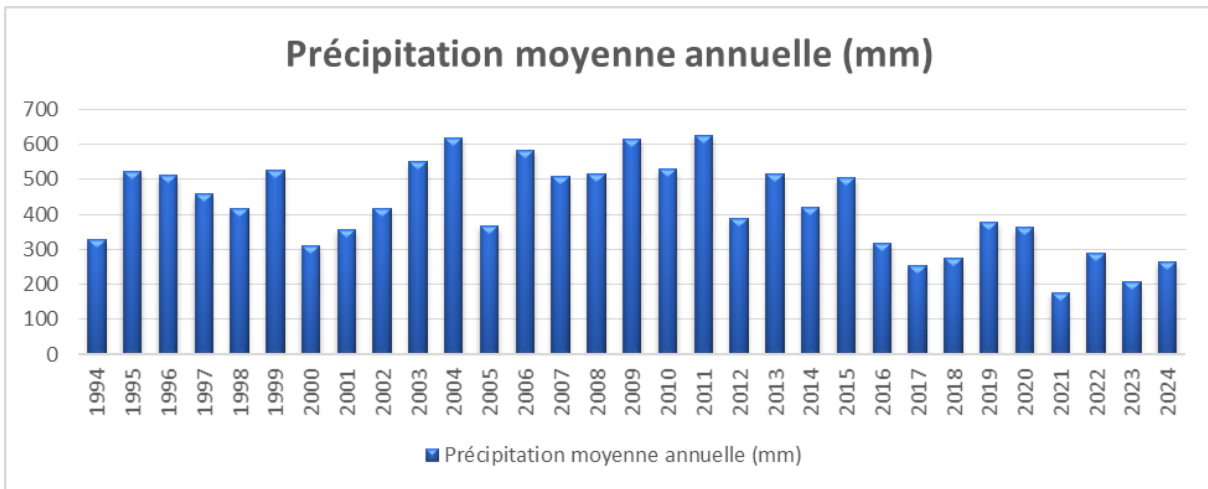


Figure N°II-03 : Histogramme de variation des précipitations moyennes annuelles (1997-2024).

Interprétation :

Le graphique montre la moyenne annuelle des précipitations à la station d'El Hamma, où l'on remarque que l'année caractérisée par une forte humidité est 2004, où la moyenne annuelle pour cette année est de 618,6 mm, tandis que l'année la plus sèche est 2021, où la moyenne annuelle pour cette année est de 169,8 mm.

III- 1-3- Diagramme pluviométrique:

Le diagramme Ombrothermique offre la possibilité d'évaluer les caractéristiques climatiques d'une région, notamment en termes de précipitations et de températures sur une période spécifique, tout en délimitant également les phases sèches et humides.

D'après Gaussen, une période de sécheresse est définie comme une période où les précipitations totales sont inférieures ou égales au double de la température : Si $P \leq 2T$, alors il y a une période de sécheresse.

Une période humide est définie comme une période où les précipitations totales correspondent au double de la température :

Avec : $P=2T$

P : précipitations moyenne mensuelle en (mm).

T : température moyenne mensuelle en (C°).

Le diagramme de Gaussen propose une illustration plus tangible du climat tout au long de l'année.

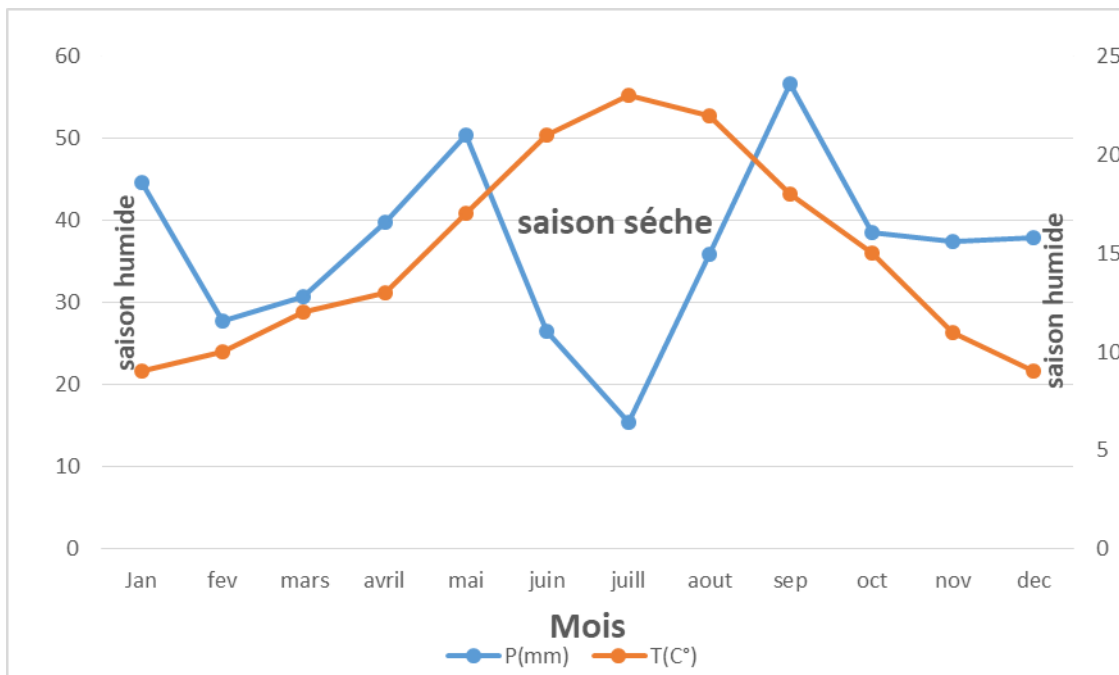


Figure N° II-04: Diagramme Ombrothermique de Gausсен.

Interprétation :

Ce graphique montre deux périodes distinctes :

- Saison chaude et sèche s'étendant de début juin à fin août
- Saison humide et froide s'étendant de début janvier à fin mai et également de début septembre à fin décembre

III- 1-4- Coefficient pluviométrique (Cp) :

Le coefficient pluviométrique correspond à l'évolution interannuelle des précipitations et permet de différencier les années excédentaires et les années déficitaires :

- Une année excédentaire (AE) si : Cp > 1.
- Une année déficitaire (AD) si : Cp < 1.
- Une année = La moyenne si : Cp = 1.

Ce paramètre est en relation proportionnelle avec la pluviométrie (Fig. 11), Il est calculé par le rapport de la pluviométrie de l'année considérée sur la pluviométrie moyenne annuelle observée à une station donnée. Mathématiquement, il se traduit par l'équation :

$$Cp = \frac{P}{P_{moy}}$$

III- 2 - Les températures :

Dans l'estimation hydrologique, la température joue un rôle crucial dans l'évolution du déficit d'écoulement. Ce paramètre est essentiel pour la climatologie en raison de son effet évaporatoire sur les surfaces humides, et il est également fondamental pour le bon déroulement du cycle hydrologique. L'examen des températures repose sur les observations réalisées à la station suivante : la station d'el Hamma.

III- 2-1- Températures moyennes mensuelles :

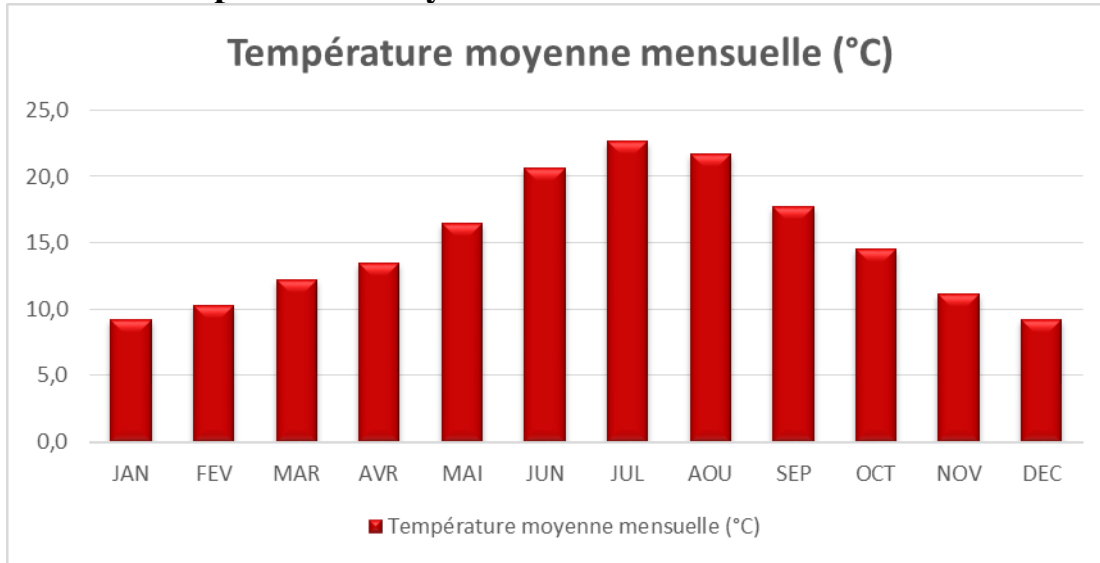


Figure N° II-05 : Histogramme de variation des Température moyennes mensuelles (1997-2024).

Interprétation :

Le graphique montre la température moyenne mensuelle à la station d'El Hamma, où l'on remarque que la température est élevée en juillet, estimée à 23,46°C, et basse en janvier, estimée à 9,52°C. On peut dire que le mois de janvier est caractérisé par une saison humide et froide, tandis que le mois de juillet est une saison chaude et sèche.

III- 2-2- Température moyenne annuelle :

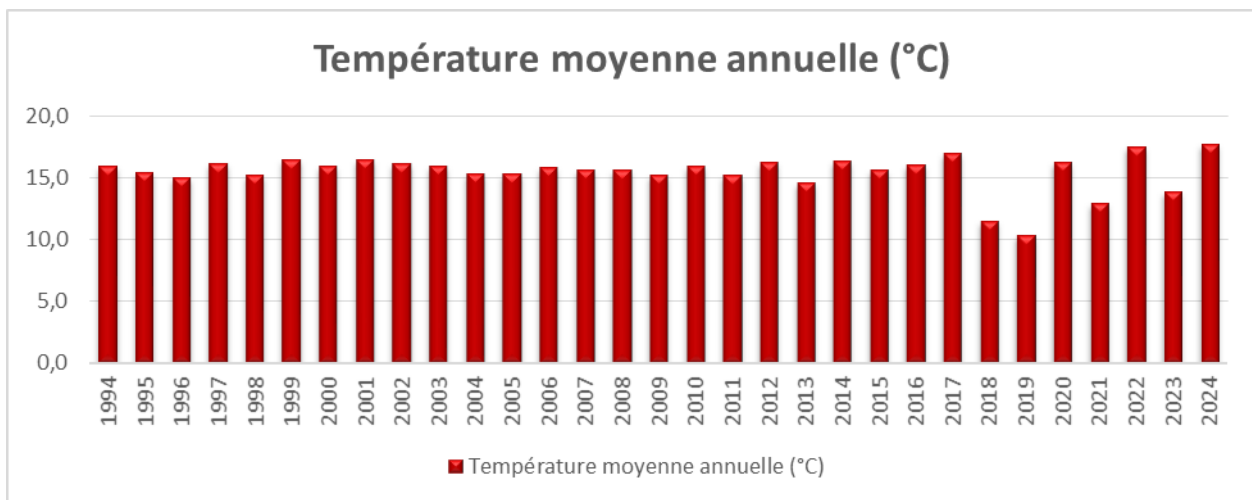


Figure N° II-06 : Histogramme de variation des Températures moyennes annuelles (1997-2024).

Interprétation :

Le graphique montre la température annuelle moyenne à la station d'Al Hamma, où l'on remarque que la température maximale en 2022 est estimée à 176,53°C, tandis que la température minimale en 2017 est estimée à 7,59°C.

IV- Le régime pluviométrique saisonnier :

Tableau N° II- 02 : Le régime pluviométrique saisonnier pour une période de 30 ans (1994-2024).

station	/	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Total	Type
El-HAMMA	P (mm)	132.52	110.18	120.93	77.97	441.6	APHE
	%	30.02	24.95	27.38	17.65	100	APHE

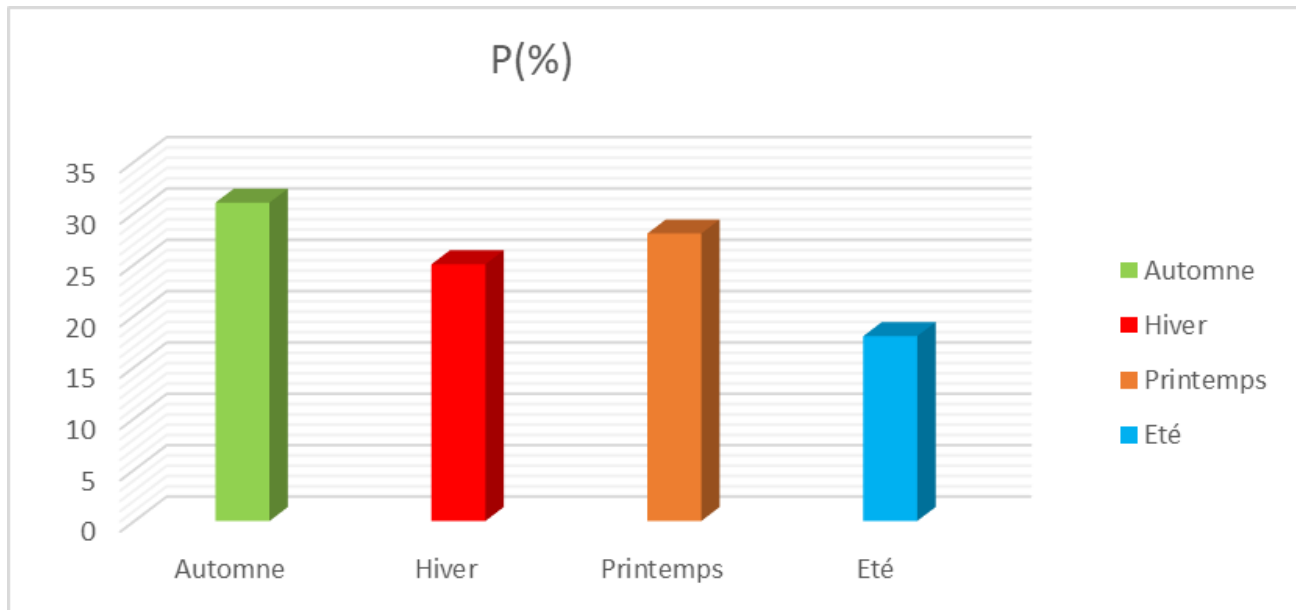


Figure N° II-07 : le régime pluviométrique saisonnier pour une période de 30 ans (1994-2024)

Interprétation :

Le graphique représente pluviométrique saisonnier pour une période de 30 ans (1994-2024).

On remarquons :

- En **Automne** la valeur de « P » à (132.52 mm) (30.02%)
- En **Hiver** la valeur de « P » à (110.18mm) (24.95%)
- En **Printemps** la valeur de « P » à (120.93mm) (27.38 %)
- En **Eté** la valeur de « P » à (77.97mm) (17.65%)

V- Indice de sécheresse de DEMARTONNE :

Emmanuel De Martonne a suggéré une formule climatique en 1925 qui permet de calculer ce qu'on appelle l'indice d'aridité (Ia). Ce paramètre est déterminé par la température (T en °C) et les précipitations (P en mm), et sert à identifier le genre de climat qui définit la zone étudiée.

On obtient cet indice grâce à la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10}$$

Où :

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C

Application :

Pour notre station d'El Hamma : P = 438.6 mm et T = 15.47°C

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

$$I = \frac{(438.6)}{(15.47+10)} \quad I = \frac{438.6}{25.47} \quad I = 17.22$$

Station	Coefficient(I)
Mellagou	17.22

En se basant sur les a formulé la

valeurs de (I), De Martonne classification ci-après :

I < 5 : climat hyperaride ;

5 < I < 7,5 : climat désertique ;

7,5 < I < 10 : climat steppique ;

10 < I < 20 : climat semi-aride ;

20 < I < 30 : climat tempéré ;

30 < I < 55 : climat humide.

Interprétation :

Le calcul de l'indice d'E.de Martonne indique de la zone d'étude appartient à un climat semi- aride caractérisé par une saison humide froide et une saison sèche chaude.

VI- Indice d'aridité mensuel :

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{12 \times P}{T^{\circ} + 10}$$

Où :

I : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm

T° : Température moyenne mensuelle en °C

Tableau N° II-03 : Indices d'aridité mensuels (I) (Source : station météorologique de Khencela).

Mois	Indice	Etage bioclimatique
JAN	27.39	climat tempéré
FEV	16.02	climat semi-aride
MAR	16.30	climat semi-aride
AVR	19.91	climat semi-aride
MAI	22.35	climat tempéré
JUN	10.16	climat semi-aride

JUL	5.54	climat désertique
AOU	13.28	climat semi-aride
SEP	23.97	climat tempéré
OCT	18.46	climat semi-aride
NOV	20.80	climat tempéré
DEC	23.24	climat tempéré

VII- Indice de Paul Moral :

Les données de l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui se base également sur les précipitations annuelles (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C, confirment les résultats précédents. Cet indice indique que : si $IM < 1$, le climat est sec et si $IM > 1$, le climat est humide.

$$IM = \frac{P}{(T^2 - 10T + 200)}$$

Application :

$$IM = \frac{P}{(T^2 - 10T + 200)} \quad IM = \frac{(438.6)}{(15.47)^2 - 10(15.47) + 200} \quad IM = \frac{(438.6)}{(284.62)}$$

Ce qui donne :

IM = 1.54

Station	Coefficient(IM)
Mellagou	1.54

VIII - ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION :

VIII -1- Introduction :

L'évaporation est le processus par lequel l'eau se change en vapeur. On désigne sous le terme d'évapotranspiration l'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration. Cette dernière représente un élément crucial du cycle hydrologique. L'exactitude de cette estimation est cruciale pour le calcul du bilan hydrique, la planification de l'irrigation, la gestion des ressources en eau et aussi pour la conception des infrastructures d'aménagement. L'évaluation de ce paramètre a été effectuée en utilisant la formule de G.W. Thornthwaite.

VIII- 2- Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

On emploie des techniques fondées sur des paramètres climatiques pour évaluer l'évapotranspiration potentielle. Toutefois, la décision est essentiellement fondée sur le genre de données climatiques disponibles et sur le type de climat qui prévaut dans la région. Nous employons la formule empirique suivante :

VIII-2-1- -Formule de Thornthwaite :

En 1948, l'agronome américain G.W. Thornthwaite a suggéré une formule pour évaluer l'évapotranspiration potentielle en se basant uniquement sur la température mensuelle. L'expansion de cette expression conduit à la formule suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \times K$$

Où :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm

I : somme des indices thermiques mensuels i ; $i = (T/5)1.514$

T : température moyenne mensuelle du mois considéré en °C

a : Coefficient calculé par la formule suivante: $\alpha = 1.6 \left(\frac{i}{100} \right) + 0.5$

K : Coefficient de correction, qui dépend de la latitude.

VIII -3- Evapotranspiration réelle (ETR) :

VIII-3-1- Formule de TURC :

L'évapotranspiration réelle fait référence à la quantité d'eau qui est effectivement évaporée. Cette quantité correspond à la vapeur d'eau relativement libérée dans l'atmosphère par les sols et la végétation. On peut suggérer des approches :

- La méthode de Turc.
- La méthode de Thornthwaite.
- La méthode de M. Coutagne

Nous avons opté pour la technique TURC dans le but de définir l'évapotranspiration réelle (ETR).

VIII-3-2- Formule de TURC :

C'est la technique la plus couramment utilisée, prenant en considération les précipitations et les moyennes annuelles de température.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

ETR : évapotranspiration réelles (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : $300+25T+0.05T^3$ où

T : est la température moyenne annuelle en C°

*Application numérique : $L = 300 + (25)(15.47) + (0.05)(15.47)^3$

L = 871.86

$$ETR = \frac{438.6}{\sqrt{0.9 + \frac{(438.6)^2}{(871.86)^2}}}$$

ETR = 408.45

Tableau N° II-04 : ETR selon Turc à la station Des Bouhmama (1994-2024)

Station	P (mm)	T (C°)	L	ETR (mm/an)
Bouhmama	369.83	15.70	871.86	408.45

VIII -3-3- Formule de M. Coutagne :

Qui est écrit comme suit :

$$ETR = P - \lambda P^2$$

$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)0.33$

P : précipitation moyenne annuelle en (m).

L'utilisation de cette formule dépend de la relation suivante :

$$1/8\lambda \leq 1/2\lambda$$

Soit : ETR =

IX- Le bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite :

L'équilibre hydrique est défini pour un endroit et une durée spécifiques en mettant en parallèle les entrées et les sorties d'eau à cet emplacement et durant cette période. Il prend également en considération la formation de réserves et les retraits qui pourraient être effectués sur ces dernières par la suite. Les précipitations assurent l'approvisionnement en eau.

Les pertes sont principalement attribuées à l'évapotranspiration, c'est-à-dire la combinaison de l'évaporation et de la transpiration des plantes.

Ces deux mesures sont quantifiées en volume d'eau par mètre carré, mais elles se traduisent généralement en termes de hauteurs d'eau, l'unité la plus couramment utilisée étant le millimètre. Étant donné que ces deux valeurs sont physiquement homogènes, il est possible de les comparer en déterminant soit leur différence (précipitations moins évaporation), soit leur quotient (précipitations divisé par évaporation).

Il est manifestement positif lorsque la différence est positive ou que le quotient dépasse un.

On sélectionne l'une ou l'autre expression en fonction des commodités ou de diverses autres considérations. Le flux à partir d'une surface donnée sera pris en compte dans les pertes.

L'infiltration est perçue comme une conservation de l'eau sous forme de nappes souterraines ou d'eau capillaire dans le sol. Les réserves sont immédiatement formées par les précipitations solides.

Leur durée peut varier, saisonnière pour les tapis neigeux, saisonnière et annuelle pour les glaciers, et même pluri-séculaire pour les calottes polaires ou d'importantes étendues de très haute altitude.

L'évaluation de l'ETR basée sur l'ETP et la quantité d'eau disponible (pluie + RFU) peut être réalisée soit par la préparation d'un bilan, soit par l'utilisation de formules empiriques spécifiques. On peut déterminer ce paramètre selon G. Thornthwaite en respectant les conditions suivantes :

1- Si : $P > ETP \rightarrow ETR = ETP \rightarrow RFU = P - ETP$.

2- Si : $P = ETP \rightarrow$ Les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU $\rightarrow [RFU = 0]$.

3- Si : $P < ETP \rightarrow$ il y aura épuisement des réserves, dans ce cas on aura un déficit du bilan $(ETP - ETR)$, ou encore $(ETP - P)$ qui représentera la quantité d'eau qu'il faudra ajouter à l'ETR pour atteindre l'ETP,

L'application de la technique de Thornthwaite pour l'année moyenne a produit les résultats présentés dans les tableaux ci-après.

Tableau N° II-05 : Bilan hydrologique moyen (1994-2024) de la plaine de MELLAGOU, par la méthode de Thornthwaite

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	total
P(mm)	46.37	33.33	38.89	38.30	43.20	28.87	33.35	35.19	49.15	26.89	17.79	32.03	423.37
T(°C)	18.32	15.04	11.57	9.54	9.52	10.72	12.63	13.94	17.09	21.34	23.46	22.47	185.77
I	7.14	5.29	3.56	2.65	2.65	3.17	4.06	4.72	6.42	8.99	10.38	9.72	
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP(mm)	78.75	47.81	26.22	18.36	18.95	24.16	39.74	50.63	84.05	116.23	134.62	116.47	744.98
P-ETP (mm)	-32.38	-14.47	12.67	19.94	24.26	4.71	-6.39	-15.44	-34.91	-89.34	-116.83	-84.44	
RFU (mm)	0.00	0.00	0.00	6.97	31.23	35.94	29.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	103.68
ETR (mm)	46.37	33.33	27.65	15.16	18.95	24.16	39.74	35.19	49.15	19.81	10.16	32.03	351.69
EX (mm)	0.00	0.00	0.00	3.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.14
DA (mm)	5.36	5.40	28.53	55.56	74.87	13.74	7.83	5.67	5.06	0.48	0.10	0.81	203.95

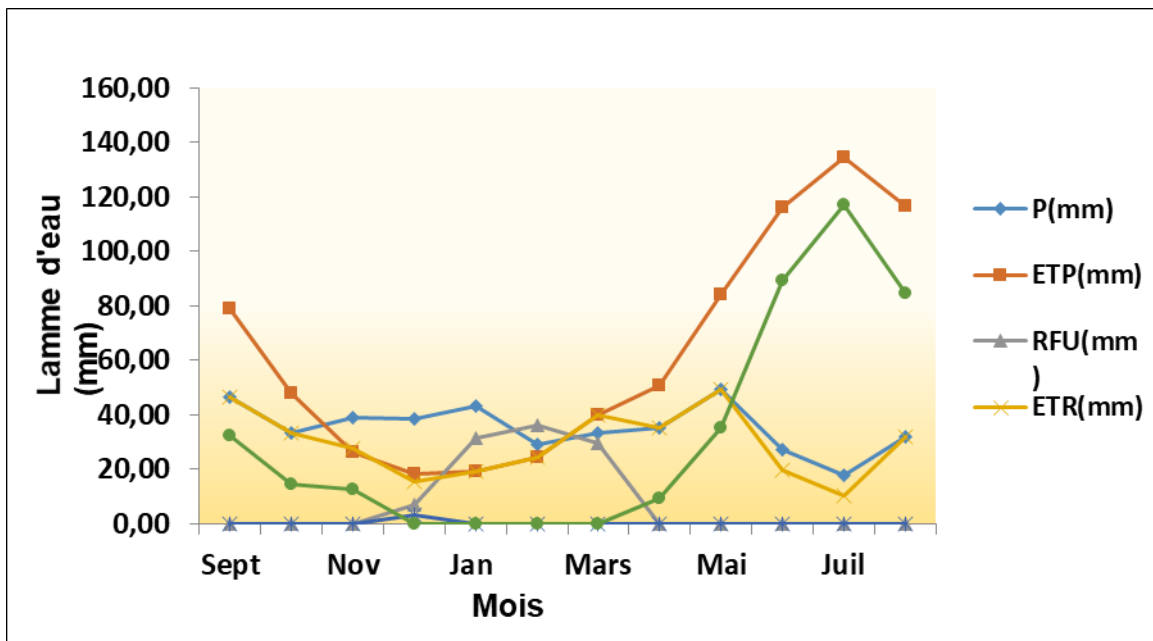


Figure N° II-08 : Le Diagramme Pluvio-thermique (1994-2024) dans la région de la plain Mellagou

IX-1- Interprétation du bilan hydrologique :

• **La première** est déficitaire où l'ETP est importante à partir de mois de Mai jusqu'au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 134.62 mm au mois de juillet, dans cette période les sols sont secs et leur niveau de la réserve hydrique est nul, rendant la nécessité de l'irrigation.

• **La deuxième période** est humide qui commence à partir du mois de septembre où les précipitations couvrent les besoins de l'évapotranspiration potentielle et permettent la reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de Janvier et Avril. Toute la pluie non retenue par la couche superficielle du sol, s'infiltrer et rejoint la zone saturée. Au-delà de cette période, la réserve commence à diminuer jusqu'à l'épuisement du stock.

Le bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des précipitations entre les différents composants de ce bilan, à savoir : l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration

Le bilan est établi selon la formule suivante : $P = ETR + R + I$

Où :

P : La précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : L'évapotranspiration réelle en (mm).

R : Le ruissellement en (mm).

I : L'infiltration en (mm).

IX-2- Ruissellement superficiel et l'infiltration :

On estime à partir de la formule Tixeront-Berkaloff qui s'énonce comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

L'infiltration se définit comme le mouvement de l'eau à travers la surface du sol et est quantifiée par la formule ci-dessous :

$$I = P - (ETR + R)$$

Tableau N° II- 06 : Pourcentage et volume de précipitation et ruissellement et infiltration

Précipitation (P)		Evapotranspiration réelle (ETR)		Ruissellement (R)		Infiltration (I)	
(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
423.37	100.00	351.69	95.14	45.60	10.96	26.08	6.56

X - Les principaux facteurs de l'évapotranspiration :

Les facteurs qui conditionnent l'évapotranspiration sont nombreux et mal connus ; on citera quelques-uns, à savoir :

X- 1- Les facteurs physiques :

- la température de l'air
- la vitesse et turbulence du vent
- le degré d'insolation
- la pression atmosphérique

X- 2- Les facteurs géographiques :

- l'état de la surface évaporant du sol
- l'humidité relative de l'air

X-3- Les facteurs biologiques :

- les espèces végétales
- la profondeur des racines

XI - Conclusion :

Le climat de cette région est un climat méditerranéen semi-aride, avec deux saisons distinctes : une saison des pluies fraîche, de décembre à mai, et une saison sèche et chaude, de juin à août. Les précipitations sont assez rares, voire inexistantes en été, et diminuent jusqu'à devenir modérées en hiver. Les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 615,3 mm, ce qui correspond à l'évaporation réelle (ER). Cette dernière reflète, d'une part, le manque de réserves facilement utilisables (RFU) tout au long de l'année et, d'autre part, le déficit agricole (DEF) pendant 06 mois.

A decorative border of black graduation caps with gold tassels is arranged around the top and left sides of a large black rectangular frame.

Chapitre III :

Hydrogéologie



I- Introduction :

Une nappe phréatique ou aquifère est une masse d'eau saturée par un terrain dont les différentes parties sont continuellement reliées entre elles, de près ou de loin, par des pores, des fissures ou des canaux, et est appelée cours d'eau interstitiel, cours d'eau fracturé ou cours d'eau en réseau, selon que les roches qui le contiennent sont poreuses interstitielles ou poreuses fracturées.

Le terrain dans lequel circule l'eau est appelé aquifère ou complément d'aquifère ; le terrain imperméable est celui qui est moins perméable que l'aquifère et qui limite la nappe phréatique par une perméabilité relative.

L'imperméabilité peut consister en des roches imperméables (Meinzer, 1923), c'est-à-dire des roches à forte porosité, qui contiennent donc une grande quantité d'eau, comme l'argile, ou des aquifères à porosité presque nulle, comme le granit (H. Schiller, 1962). Schiller, 1962)

L'objectif de ce travail est de comprendre l'impact des changements climatiques dans le temps et des changements lithologiques dans l'espace sur le comportement hydrodynamique de l'aquifère double quaternaire de l'oued Mellagou

Les relevés piézométriques et la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité et transmissivité) fournissent des informations sur les caractéristiques de l'écoulement et le comportement de l'aquifère.

II - GEOMETRIE DE L'AQUIFERE :

L'exploration géophysique effectuée par la Compagnie Générale de Géophysique dans la plaine de Mellagou en 1976 a abouti à la création de diverses cartes et coupes géoélectriques qui ont mis en lumière :

Les divers niveaux de résistivité, notamment les couches résistantes superficielles ou profondes qui pourraient avoir une pertinence aquifère.

Les zones de conduites qui n'ont pas d'intérêt aquifère sont généralement constituées de marnes, d'argiles ou d'eaux plus ou moins salées.

Les discontinuités électriques correspondant à des ruptures, à de fortes pentes ou à des variations de faciès.

Pour déterminer la géométrie des aquifères, une combinaison de plusieurs techniques est nécessaire, comme l'exploration électrique, les forages mécaniques et l'établissement de coupes hydrogéologiques. Ces méthodes permettent d'inférer les dimensions et la nature lithologique des nappes, ce qui favorise une exploitation optimale des aquifères et contribue à une gestion efficace des ressources en eau. Dans cette perspective, pour réaliser cet objectif, nous tenterons d'établir un lien entre les données géologiques et géophysiques.

III- Type de nappe :

La détermination du type de nappe nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques lithologiques des formations qui définissent d'un côté, et de leurs limites géométriques de l'autre. Par conséquent, l'analyse des sections de plusieurs forages et sondages hydrogéologiques réalisés à différents endroits de la plaine a permis d'identifier deux couches aquifères superposées de haut en bas :

III-1- La nappe du plio-quaternaire :

Identifiée par les composantes lithologiques ci-après : graviers et argiles, graviers calcaires, galets.

Cette nappe présente une vaste étendue horizontale, car les formations du plioquaternaire couvrent la totalité de la plaine. Cette nappe a une puissance qui fluctue entre 100 et 10 mètres.

Dans les régions d'érosion, le substrat de cette couche est constitué de marnes du

Maestrichtien inférieur ou du Campanien. En revanche, dans les zones non érodées, cette couche est superposée directement sur la couche des calcaires.

III-2- La nappe des calcaires du Maestrichtien supérieur :

Comme son appellation le suggère, cette nappe se trouve dans les calcaires du Maestrichtien supérieur. On ne peut pas définir avec précision son épaisseur, étant donné que tous les forages qu'il utilise sont défectueux (leur profondeur ne dépasse pas 250 mètres).

IV- Etudes piézométriques :

IV-1- Introduction :

Le niveau piézométrique des nappes est fixé par les propriétés de leur circulation dans les conditions naturelles de dépôt des eaux souterraines, et il est influencé par divers éléments :

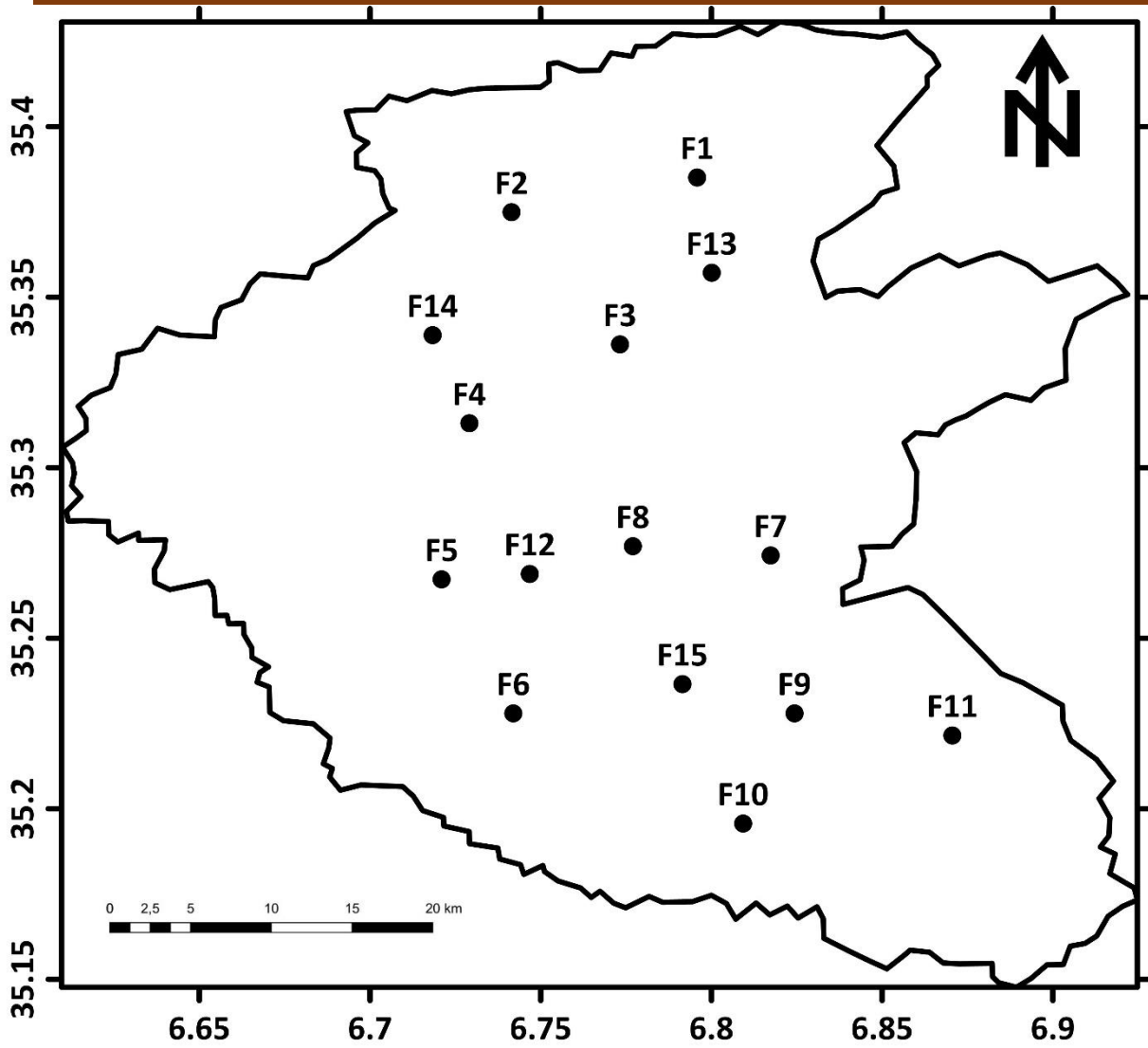
- Les conditions régionales imposent des contraintes géomorphologiques et structurales.
- La hauteur et la pression piézométrique.
- La nature de la nappe et son profil dépressif.
- Les propriétés de la couche aquifère : lithologie (capacité de perméabilité). Section et substrat.
- Les conditions d'approvisionnement en eau et d'évacuation de l'eau.

Les cartes isopièzes offrent donc la possibilité de : - Déterminer la profondeur de la surface piézométrique.

- De dessiner les trajectoires de courant, d'établir le sens de l'écoulement et identifier les zones d'approvisionnement.
- D'établir le gradient hydraulique.

IV-2- Inventaire des points d'eaux :

L'inventaire des points d'eaux de la plaine de Mellagou à été réalisée par la compagnie (avril 2025) environ 15 forage ont été inventoriés les anciens forages utilisés actuellement pour l'irrigation et l'A.E.P.



Légende

- Carte d'inventaire

Figure N° III-01 : Inventaire de points d'eau de la région de Mellagou Avril
2025

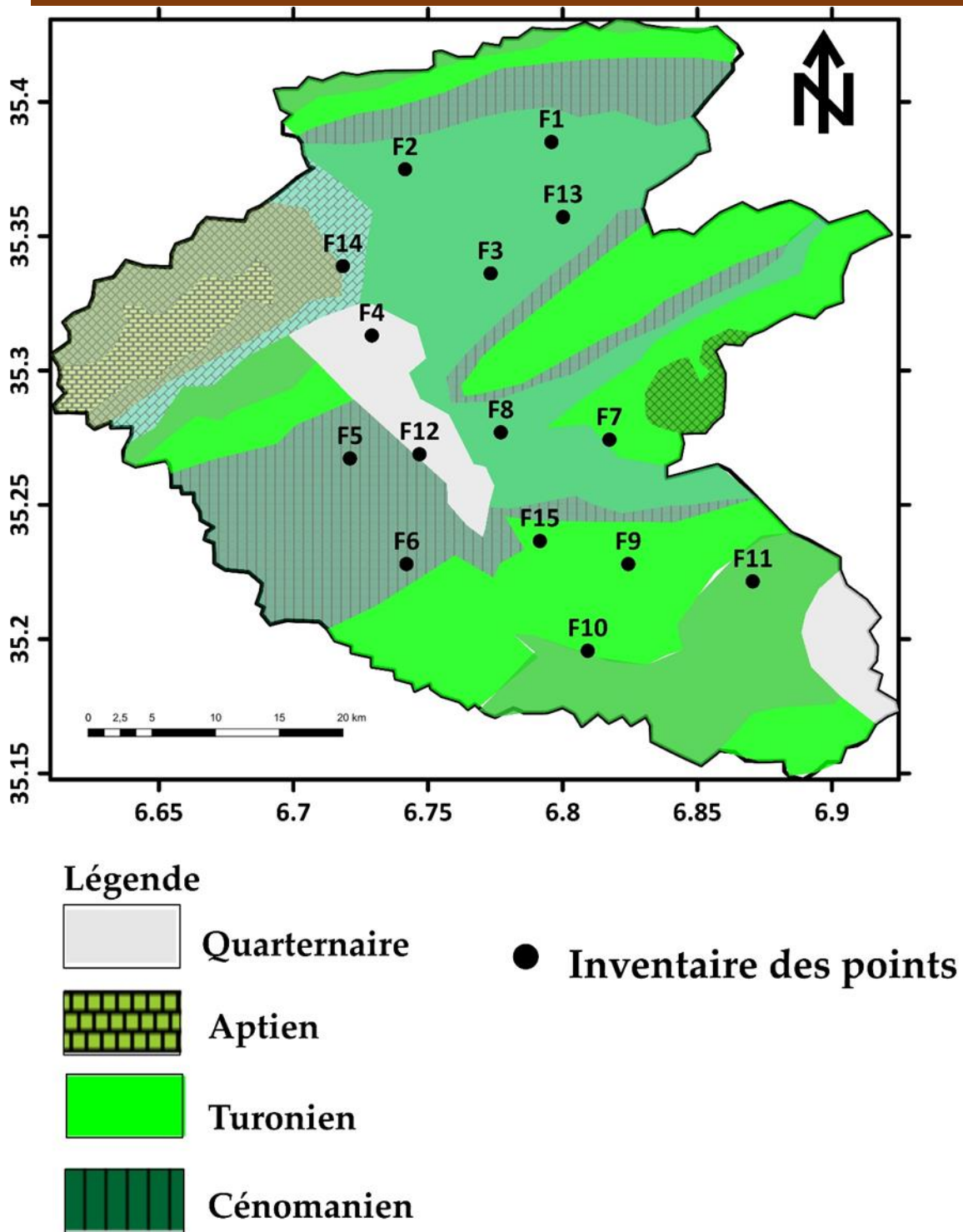


Figure N°III-02 : Inventaire de points d'eau de la région de Mellagou Avril
2025

V- Piézométrie :

Notre étude piézométrique intéresse les formations alluviales s'est étendue de part et d'autre de la plaine de Mellagou

Figure(03) présente la carte des niveaux d'eau d'avril 2025. Le niveau d'eau varie de plus de 1000 à moins de 840 m AMSL. La direction de l'écoulement des eaux souterraines se fait depuis les zones de recharge situées dans les montagnes de l'est et du sud-est. La mauvaise répartition des puits empêche de comprendre le rôle des chaînes de montagnes au sud, où les altitudes dépassent 2200 m AMSL. Les niveaux d'eau sont perturbés par l'exploitation, indiquant de possibles zones d'inversion de flux entre les eaux souterraines et les eaux saumâtres de la Sebka.

La carte des niveaux d'eau de la figure se réfère à avril 2025 et montre une baisse générale du niveau de l'eau, peut-être liée à une exploitation intensive pendant l'été dans le centre de la plaine de Mellagou.

Il semble que l'agriculture force le drainage des eaux souterraines de la chaîne de montagnes et du lac.

V-1- Carte piézométrique des hautes eaux avril 2025 :

L'analyse de ces cartes piézométriques montre de grandes similitudes. met en évidence les directions principales d'écoulement et les zones d'alimentation qui se situent :

- Principalement au Sud, à partir du versant Nord du massif de l'Aurès.

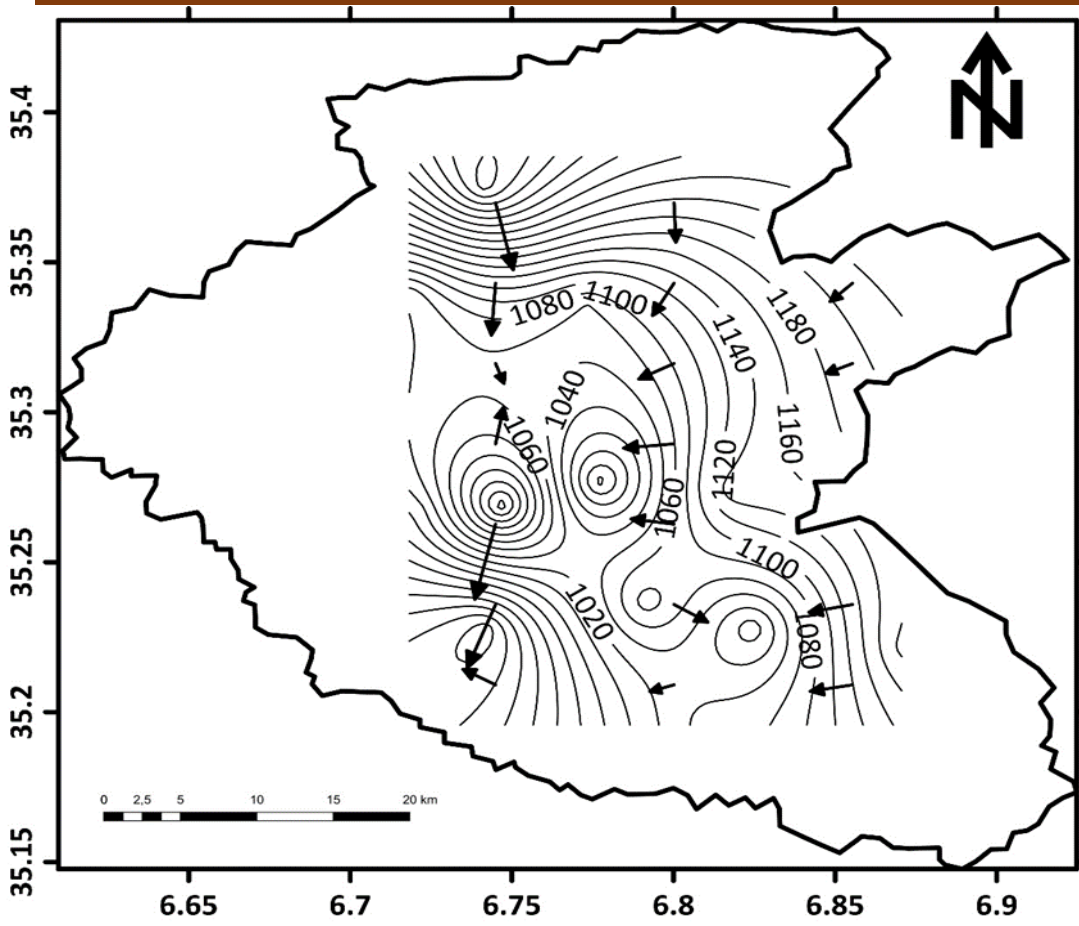
Les formations de calcaire et de grès, situées au sud et au sud-ouest du bassin, participent indirectement à la réapprovisionnement de la nappe phréatique grâce à un écoulement latéral et souterrain des eaux dévalant les élévations limitrophes. La fourniture de nourriture par le Djebel Fedjoudj au nord est largement diminuée en raison de l'inclinaison des strates géologiques.

Les affleurements de calcaire et de grès présents dans le bassin contribuent de manière indirecte à la recharge de la nappe grâce à un écoulement latéral et souterrain des eaux qui descendent les flancs des massifs bordiers. L'approvisionnement est nettement plus restreint en raison de l'inclinaison des strates géologiques.

Il est important de souligner que les Oueds ont un impact significatif sur l'alimentation de la nappe phréatique. Un important bassin versant traverse quasiment toute la plaine en diagonale, ce qui a conduit à une déformation significative des hydrohypes.

L'agriculture intensive et les pompes effrénées sont responsables de la mise en place de zones de dépressions visibles au centre du bassin

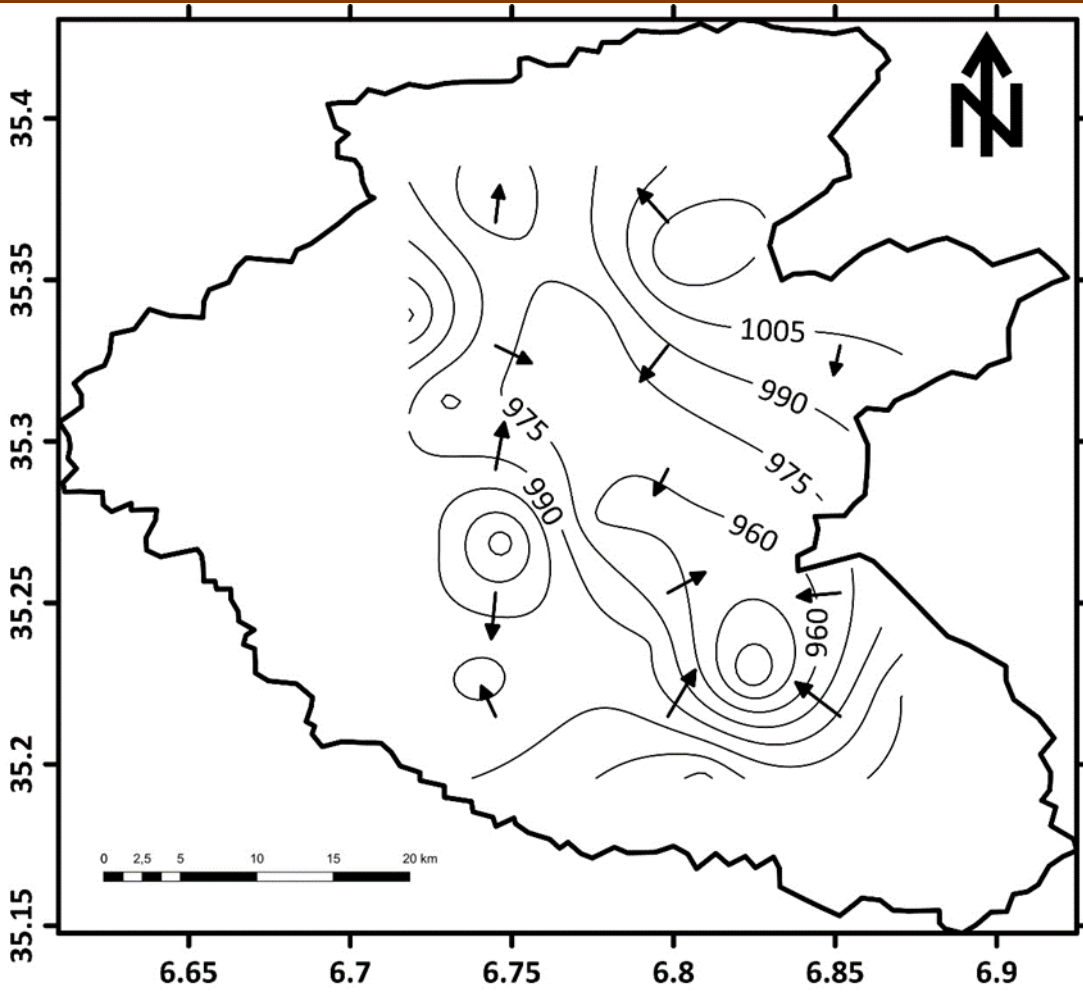
Les eaux souterraines s'écoulent depuis les reliefs vers la Sebka, selon un axe de drainage



Légende

 Courbes Piézométriques 2005

Figure N° III-03 : Carte piézométrique 2005



Légende


 Courbes Piézométriques 2005

Figure N° III-04 : Carte piézométrique 2005

Objectif des cartes piézométriques :

Les cartes piézométriques permettent de représenter les lignes d'égale hauteur piézométrique (exprimées en mètres), ce qui offre une visualisation précise du niveau de la nappe phréatique à différentes périodes. Ces courbes sont essentielles pour déterminer le sens d'écoulement de l'eau souterraine, qui se fait perpendiculairement aux courbes, en direction des altitudes les plus faibles. Par ailleurs, elles permettent d'identifier les zones de recharge, souvent caractérisées par des dômes piézométriques, ainsi que les zones de vidange ou de pompage, reconnaissables par la présence de cônes de dépression.

Analyse comparative des cartes de 2005 et 2025 :

En 2005, les hauteurs piézométriques variaient entre 1020 et 1180 mètres. La carte de cette année-là montre plusieurs dômes piézométriques, notamment vers les coordonnées 35.25°N / 6.7°E et 35.3°N / 6.72°E, ce qui reflète des zones de recharge naturelles, peu soumises à l'exploitation. Les courbes très resserrées traduisent des gradients hydrauliques importants, indiquant un écoulement rapide des eaux souterraines, orienté de façon centrifuge depuis les hauteurs vers les marges de la plaine. Cette situation témoigne d'un système aquifère en équilibre relatif, avec une recharge active.

En 2025, la situation s'est nettement dégradée. Les hauteurs piézométriques ont chuté entre 960 et 1005 mètres. Les anciens dômes ont presque totalement disparu, remplacés par des cônes de dépression marqués, notamment dans les secteurs sud-est et central de la plaine. L'espacement plus large entre les courbes traduit un affaiblissement du gradient hydraulique, impliquant un écoulement plus lent. Si le flux reste dirigé vers les points bas, il est nettement moins dynamique, reflétant l'impact d'une surexploitation croissante.

Interprétation hydrogéologique :

L'évolution des niveaux piézométriques entre 2005 et 2025 montre une baisse alarmante, atteignant localement plus de 150 mètres. Cette diminution résulte d'une vidange progressive et soutenue de la nappe du Plio-Quaternaire. Trois facteurs principaux peuvent expliquer cette situation : un pompage intensif à des fins agricoles, industrielles ou domestiques ; une recharge naturelle insuffisante due à la baisse des précipitations et à l'imperméabilisation des sols ; ainsi qu'une absence de gestion intégrée ou de régulation des prélèvements.

Les cartes semblent principalement refléter le comportement de la nappe superficielle du Plio-Quaternaire, plus facilement accessible et donc plus exploitée que la nappe profonde des calcaires du Maestrichtien. Les zones de recharge observées en 2005 correspondaient à des structures géologiques perméables, constituées de graviers et de galets. En 2025, la forte dépression de la nappe superficielle suggère un risque de connexion accrue avec la nappe profonde, notamment si aucune couche imperméable ne sépare efficacement les deux systèmes.

Le comportement hydrodynamique a lui aussi évolué. En 2005, la recharge naturelle était active, le pompage modéré, les dômes piézométriques bien présents, les cônes de dépression

peu marqués, et le gradient hydraulique fort. En 2025, on observe une recharge fortement réduite, un pompage excessif, la disparition des dômes, l'accentuation des cônes de dépression et un écoulement affaibli. Ces changements accroissent les risques d'assèchement des puits peu profonds, de baisse de la productivité agricole et domestique, d'intrusion d'eaux salines dans les zones conductrices, ainsi que de fragilisation de la nappe profonde par dépressurisation

Recommandations hydrogéologiques :

Face à cette dégradation progressive des ressources en eau souterraine, il est impératif d'agir selon plusieurs axes. Tout d'abord, il convient de renforcer le réseau de surveillance piézométrique à l'aide de systèmes automatisés pour un suivi en temps réel. Ensuite, une cartographie plus précise de la nappe profonde des calcaires du Maestrichtien est nécessaire afin d'évaluer son potentiel d'exploitation. Il est également crucial de réduire les pompages non contrôlés en instaurant des quotas adaptés à la recharge réelle de la nappe. Parallèlement, des actions doivent être menées pour améliorer la recharge artificielle, par exemple via des bassins de rétention ou des techniques d'infiltration contrôlée. Enfin, la mise en place d'un modèle numérique hydrodynamique de la plaine permettrait de simuler les scénarios futurs et de piloter durablement la gestion de cette ressource stratégique.

VI- Caractéristiques hydrodynamiques des nappes :

VI- 1- Définitions :

- **Perméabilité :**

Mesurée par le coefficient de perméabilité « K » qui est défini par la loi de Darcy. Il représente la quantité de fluide traversant une unité de section perpendiculaire à la direction d'écoulement sous un gradient égal à l'unité. Elle a la dimension d'une vitesse et s'exprime en « m/s ».

- **Transmissivité :**

Notée « T », elle est égale au produit du coefficient de perméabilité « K » par l'épaisseur de la couche aquifère « b ». Elle s'exprime en m²/s. Elle régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur « L » d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique « i ». Elle évalue la fonction conduite de l'aquifère. C'est aussi le pouvoir d'un aquifère de transmettre l'eau.

- **Coefficient d'emménagement :**

Noté « S », sans dimension, est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface de l'aquifère (m²), à la variation de la charge hydraulique « h » correspondante. Dans un aquifère captif, ce paramètre est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et du milieu aquifère ainsi qu'à la puissance de la couche aquifère. Dans un aquifère libre, il est équivalent en pratique à la porosité efficace.

VII- Conclusion :

L'étude hydrogéologique de la plaine de Mellagou basée sur la description géologique de la région fait sur des observations de surface des différents faciès et sur les informations fournis par les forages hydrauliques a mis en évidence l'existence de trois structures d'importance hydrogéologique.

Les 15 forages réalisés permettent de tirer un certain nombre de conclusions, dont les plus importantes sont :

L'aquifère principal, alluvial, est contenu dans le remplissage quaternaire avec des nappes individualisées en un système hydrogéologique multicouches

La nappe phréatique est contenue dans des intercalations argilo sableuse et dans des sables et graviers. La nappe profonde est constituée de conglomérats de graviers et graviers sableux d'une transmissivité et la perméabilité



Chapitre IV :
GEOCHIMIE DES EAUX
SOUTERRAINES



I – Introduction :

Chaque analyse hydrochimique aide à identifier la provenance et les degrés de pollution des eaux souterraines.

L'objectif de l'analyse est de déchiffrer la composition chimique et la provenance des éléments.

En avril 2025, notre étude de terrain a impliqué le prélèvement d'échantillons provenant de 15 puits situés dans la région de Mellagou ; Les analyses ont eu lieu dans le laboratoire de l'Université Cheikh Larbi Tébéssi de Tébessa. Voici les paramètres qui ont été examinés :

- Caractéristiques physiques : (pH, conductivité, température).

- Variables chimiques : Éléments clés.

*Cations : Calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), potassium (K^+) et sodium (Na^+) ; *Anions : Sulfate (SO_4^{2-}), chlorure (Cl^-).

II - Mécanismes de la salinisation :

La salinisation figure parmi les causes majeures de la détérioration de la qualité de l'eau à l'échelle mondiale. Ce phénomène omniprésent pose de sérieux problèmes dans les zones arides et semi-arides, où l'eau douce est disponible en quantités très restreintes.

L'accumulation de sels dans les sols ou les eaux. Processus durant lequel l'eau souterraine ou la solution du sol subit une minéralisation sous l'effet de processus physiques tels que l'évaporation, exacerbée par un drainage interne défaillant, et la dissolution de minéraux. La salinisation des eaux fait référence à une hausse de la salinité dans les eaux douces de surface et souterraines.

La détérioration de la qualité de l'eau peut rendre cette ressource non potable pour l'homme, inutilisable pour des fins industrielles et avoir un impact sur l'agriculture locale, notamment sur les cours d'eau.

III - Cycle de l'eau et minéralisation :

Le cycle hydrologique fait référence à l'ensemble des processus que subit l'eau, depuis sa forme de vapeur atmosphérique, en passant par ses états liquide ou solide sous forme de précipitations, jusqu'à son écoulement sur ou dans le sol vers la mer, et finalement son retour à la vapeur d'eau atmosphérique via l'évaporation et la transpiration.

Durant ce processus, l'eau développe sa minéralisation par interaction avec divers réservoirs géologiques, biologiques et atmosphériques, à quoi s'ajoutent les effets des actions humaines sur la qualité de l'eau.

IV - Discrimination de l'origine de la salinité :

La composition chimique des eaux provenant des puits et des sources est principalement déterminée lors de leur passage à travers le sol et de leur séjour dans la nappe phréatique.

Lorsque l'eau entre en contact avec l'encaissant, elle prend une charge minérale propre aux roches qu'elle traverse. Les éléments présents en solution fournissent des informations sur le type d'aquifère traversé. L'objectif principal de cette recherche est de mieux définir la qualité des eaux souterraines dans la plaine de Mellagou et d'étudier ses variations géographiques, afin d'apporter des éléments de réponse sur l'origine de l'impact de l'arboriculture fruitière sur la pollution des eaux phréatiques dans la région d'Oued Mellagou (Bouhamama).

L'objectif de la chimie de l'eau est d'analyser les caractéristiques chimiques de l'eau, la potabilité de celle-ci et son adéquation à l'irrigation, ainsi que la contamination des eaux souterraines. Elle offre aussi la possibilité de tracer l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'évaluer leur provenance en les associant à la géologie.

Presque toutes les sources d'eau de l'aquifère sont dédiées à la fourniture d'eau potable et à l'irrigation des champs agricoles. L'eau doit respecter certaines normes, dont les critères diffèrent selon son usage.

Il s'agit d'une étude et d'une interprétation des données issues des analyses physico-chimiques de différents échantillons (15 échantillons en période eau avril 2025) dans la zone d'étude. Les paramètres physiques mesurés sont le pH, TDS, T°, la minéralisation et la conductivité. Les paramètres chimiques consistent en les cations (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ et Ca²⁺.) et les anions (HCO₃⁻, SO₄⁻, Cl⁻).

La véracité des analyses chimiques a été validée grâce à la balance ionique (bi), définie par la formule de G. Castany, 1962, qui est illustrée comme suit : $bi = \frac{[\text{Total des anions} - \text{Total des cations}]}{[\text{Total des anions} + \text{Total des cations}]} \times 100\%$.

Pour nos interprétations, les analyses où le bi dépasse 6% ne seront pas prioritaires.

V - Matériel et méthodes :

• Les campagnes d'acquisition de données :

La première enquête visant à évaluer le niveau d'eau a eu lieu en avril 2025 sur un ensemble de 15 puits (emplacement indiqué en figure). Le même jour, un prélèvement d'eau pour une première analyse (éléments principaux) a été réalisé dans 15 points en vue d'une étude géochimique plus exhaustive.

Les puits pris en compte sont majoritairement forés, présentant une profondeur moyenne de 250 mètres sous la surface du sol. Les puits emploient la technologie des puits tubulaires peu profonds, associée à de petites pompes motorisées ; bien qu'aucune donnée ne soit disponible concernant la profondeur des tubes atteinte,

Un grand nombre des fiches techniques des puits montrent une série de niveaux saturés, ce qui indique que les prélèvements d'eau souterraine réalisés par pompage pourraient provenir de plusieurs niveaux aquifères, fournissant ainsi des données potentiellement « mixtes » en termes de qualité.

Dans le cadre de cette étude, la campagne s'est déroulée en avril 2025, avec pour objectif la mise à jour des données hydrochimiques, la prise de mesures de terrain et d'échantillons d'eau pour l'analyse des ions majeurs, et l'échantillonnage de l'eau de source

• Autres données utilisées dans ce travail :

Nous avons également utilisé un ensemble de données obtenues auprès de la station météorologique de l'état de Khenchela et, à cet effet, des analyses de 15 points d'eau seront effectuées au laboratoire hydrogéologique de l'Université de Tébessa.

VI- Origine et validation des données hydrochimique :

• Qualité des mesures et des prélèvements :

Les échantillons d'eau souterraine des deux études de prélèvement ont été collectés suite à une purge du puits d'au moins 20 minutes. Par la suite, le pH, la température et la conductivité électrique (CE) ont été déterminés sur le terrain pour chaque échantillon, grâce à l'emploi du kit analyseur mobile (Hanna HI 9812-5). Les échantillons ont été maintenus à une température de 4°C. L'alcalinité a été quantifiée durant la journée au Laboratoire de l'environnement sédimentaire et des ressources minérales et hydriques de l'Est algérien, qui se trouve à l'Université de Tébessa (Algérie).

Les échantillons recueillis en avril 2025 ont été examinés au laboratoire de Tébessa pour une première caractérisation relative à la composition en ions principaux. Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃, K⁺, Na⁺, SO₄, NO₃⁻



realme Shot on realme C31
2025/04/28 08:06



Figure IV-01: Détermination du sodium et potassium



Figure N°IV-02: Détermination de calcium et magnésium



Figure N°IV-03 : détermination de sulfates et Nitrate

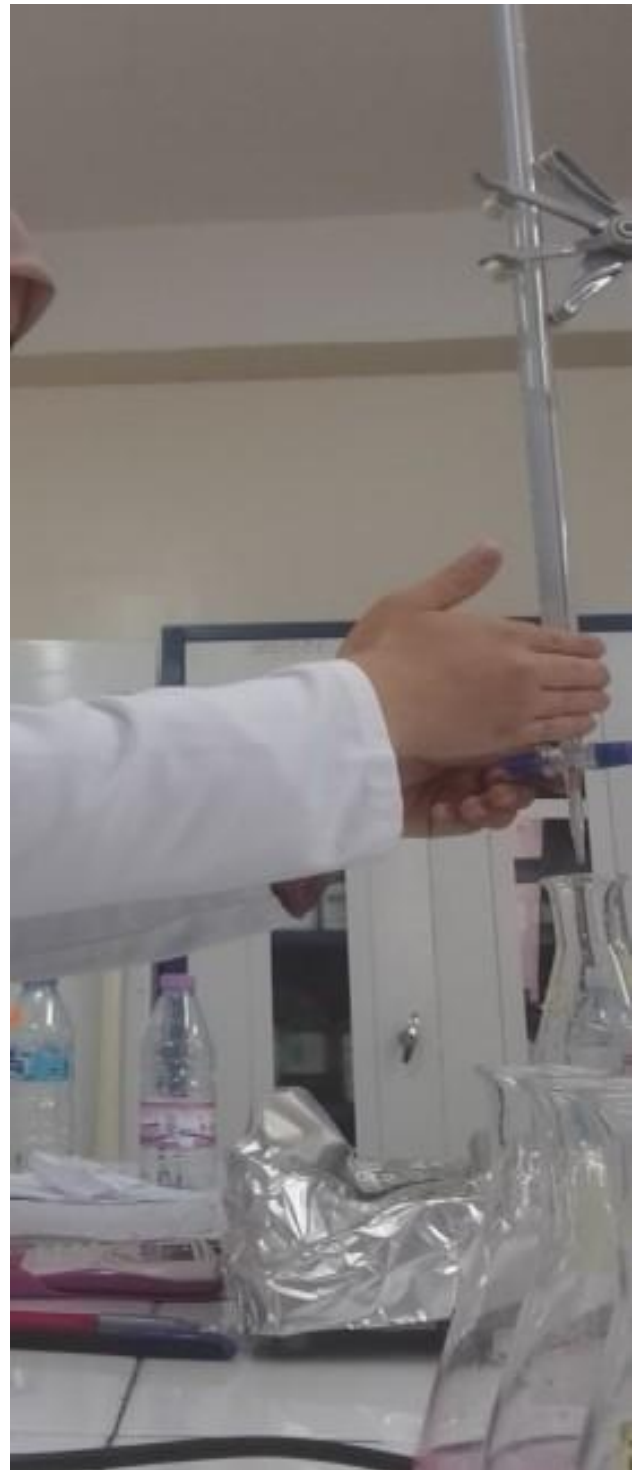


Figure N°IV-04 : détermination des chlorures

VII- Études des paramètres physico-chimiques :

- **La cartographie chimique :**

Dans notre recherche, nous avons principalement cartographié des éléments majeurs tels que le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺), le sodium (Na⁺), le potassium (K⁺), l'hydrogénocarbonate (HCO₃⁻), le sulfate (SO₄⁻), le chlorure (Cl⁻), le nitrate (NO₃⁻) ainsi que l'alcalinité totale et l'alcalinité carbonatée. Globalement, la cartographie chimique de tous les éléments analysés dans cette recherche met en évidence la zone d'étude, ce qui nous aidera à identifier les origines de la pollution aquatique.

VIII- Étude des paramètres physiques :

- **Conductivité électrique :**

La capacité de conduction électrique La conductivité est le contraire de la résistance, évaluée dans des conditions déterminées entre les faces opposées d'un cube unité (de dimensions précises) rempli d'une solution aqueuse. On se réfère souvent à cette mesure comme étant la « conductivité électrique » pour évaluer la qualité de l'eau, et elle peut servir d'indicateur quantifiant la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon.

L'évaluation de la minéralisation générale d'une eau, qui est due à la conductivité globale générée par les ions présents, se fait par la mesure de sa conductivité électrique [$\mu\text{S}/\text{cm}$ à une température standard]. La minéralisation totale (mg/L) d'une eau peut être approximativement déterminée en multipliant sa conductivité électrique [$\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C] par A, A étant généralement compris entre 0,55 et 0,75 pour la majorité des eaux souterraines naturelles (Freeze et Cherry, 1979 ; Matthes, 1972). La conductivité est influencée par la température et doit toujours être ajustée en fonction d'une température de référence. La norme internationale fixe la température à 25°C, bien que certains auteurs continuent d'appliquer une correction à 20°C.

$$CE_{25} = CE_{Tmes} = \frac{1}{(1 - 0.022)(25 - Tmes)}$$

Tmes : Température de mesure (°C) ;

CE 25 : Conductivité électrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) corrigée à 25°C

Elle offre une évaluation approximative de la minéralisation. Les catégories de risque ont été établies.

- 1- risque faibleCE \leq 0,25
- 2- risque moyen.....0,25 \leq CE \leq 0,75
- 3- risque élevé..... 0,75 \leq CE \leq 2,25
- 4- risque très élevé.....CE \geq 2,25

La zone d'étude est caractérisée par une forte conductivité F13 (CE=1859 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et une faible conductivité F9 (CE=656 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

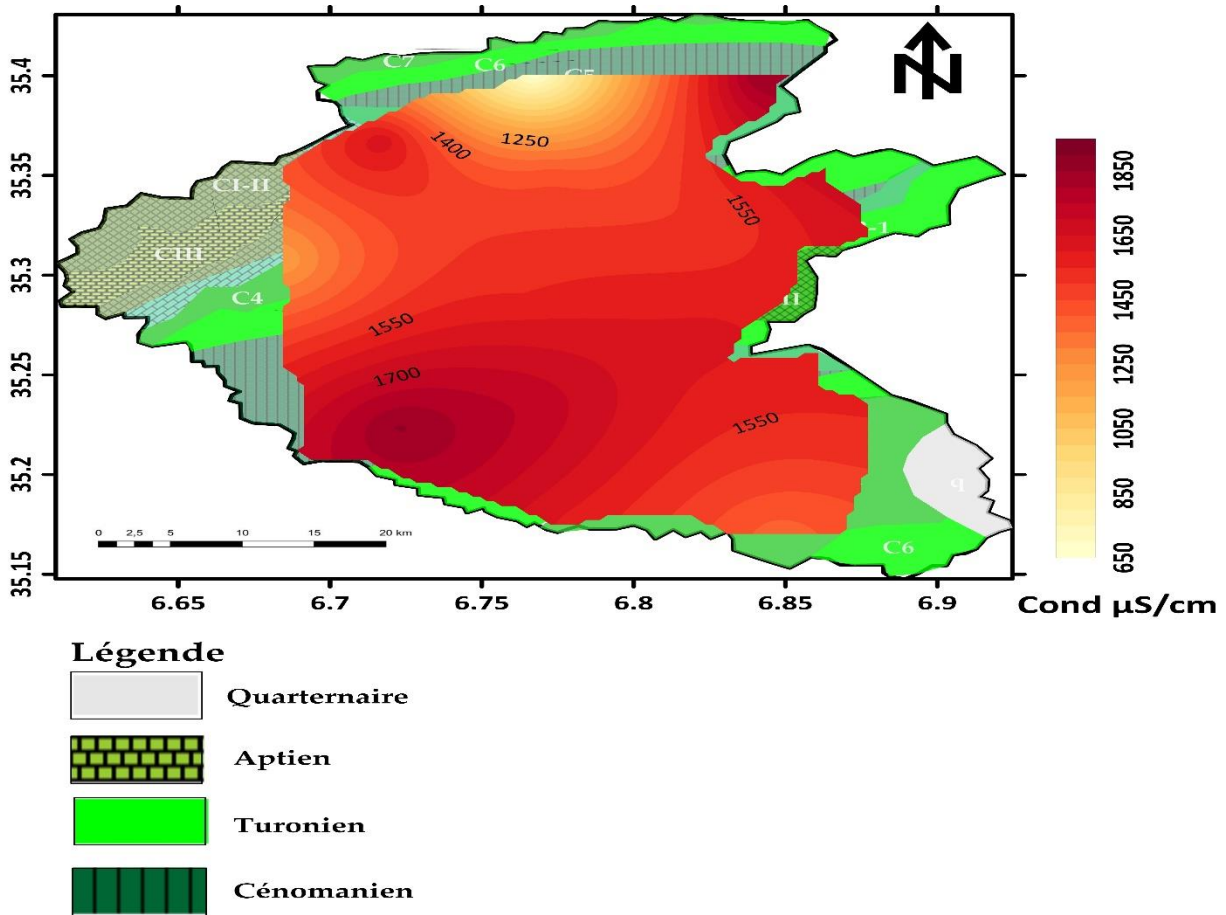


Figure N°IV-05 : carte iso-teneurs de la conductivité

• **Le potentiel d'hydrogène (pH) :**

Le Potentiel Hydrogène (PH) représente un indice qui définit le caractère acide ou basique d'une eau. Une eau est considérée comme acide lorsque son pH se situe en dessous de 7, et comme basique lorsqu'il dépasse 7. On considère qu'une eau est neutre lorsqu'elle a un pH de 7. Le pH de l'eau naturelle est influencé par sa provenance et les caractéristiques des sols qu'elle traverse.

Un pH en dessous de 7 peut entraîner une corrosion des conduites métalliques. Au-delà de 8, l'efficacité du processus de désinfection au chlore peut être réduite et pourrait entraîner la formation de dépôts incrustants dans les systèmes de distribution, donc :

* Peu importe la pureté de l'eau, elle est toujours conductrice. Cette capacité de conduction provient de la très légère dissociation de l'eau en ions H^+ et OH^- .

Dans la zone d'étude, le pH relevé aux emplacements de prélèvement fluctue entre 6.88 et 7.53 pour ce qui est des puits.

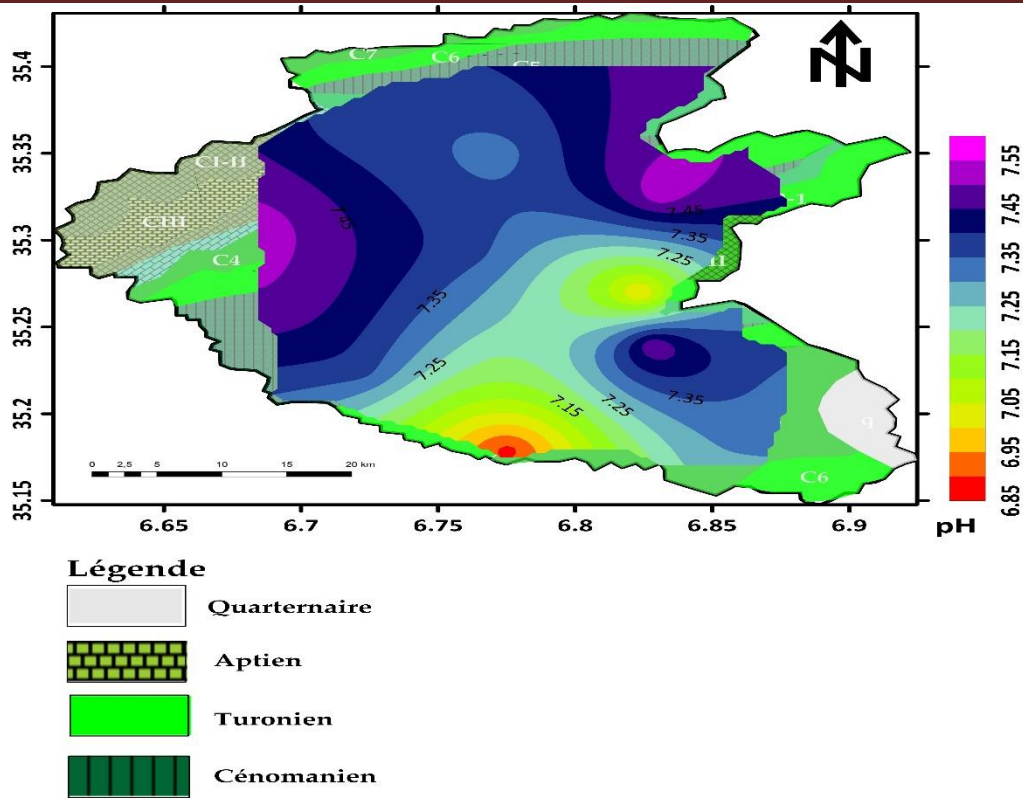
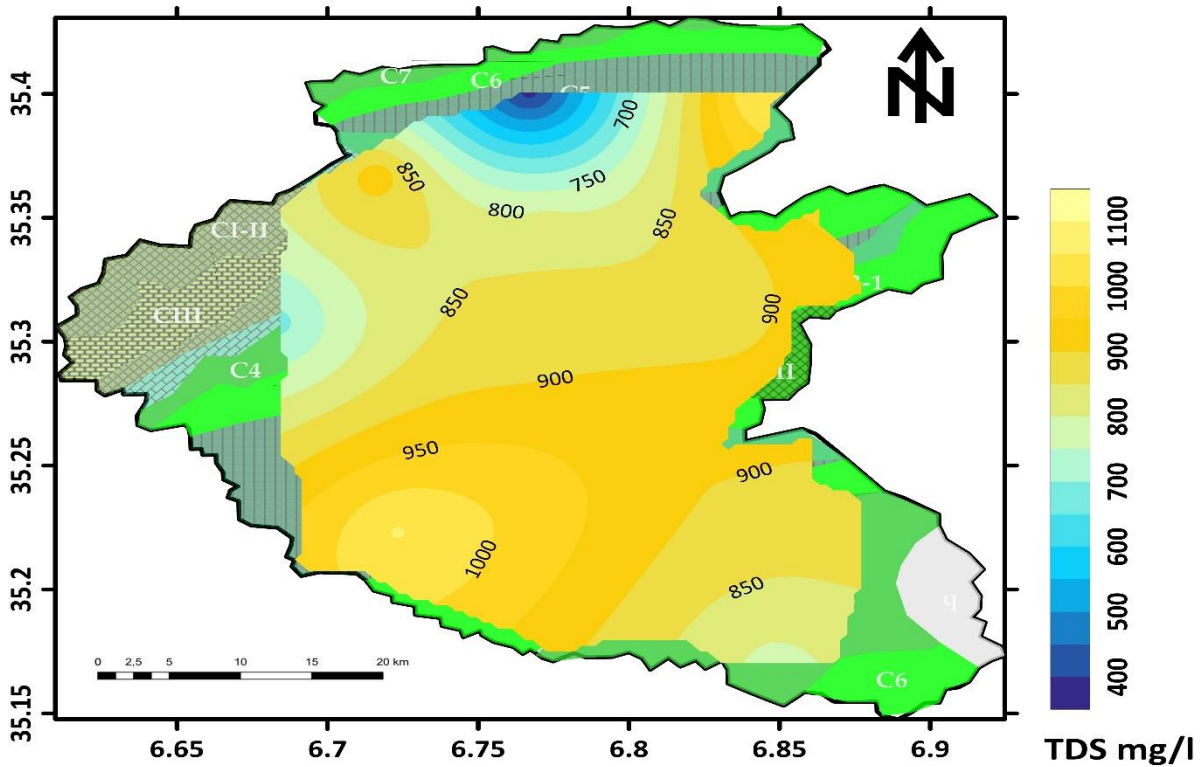


Figure N°IV-06 : carte iso-teneurs du potentiel hydrogène

Résidu sec (RS) :

L'expression « Solides Dissous Totaux (TDS) » désigne la mesure du contenu combiné, à l'état moléculaire, ionisé ou sous forme de micro-granules en suspension, de tous les matériaux inorganiques et organiques présents dans un liquide. On utilise souvent l'unité de mesure ppm (parties par million) pour indiquer les concentrations en TDS. Le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, les bicarbonates, les chlorures et les sulfates constituent les principales sels inorganiques qui composent la TDS, accompagnés de quantités infimes de matière organique qui se dissout dans l'eau. La concentration en TDS représente la somme totale de tous les composés filtrables présents dans l'eau qui peuvent être quantifiés par analyse gravimétrique.

Où l'on observe que TDS à F14 est élevé et estimé par 1056 mg/l et faible F10 et estimé par 373 mg/l.



Légende





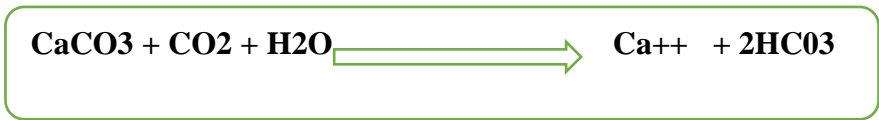
-  Quaternaire
-  Aptien
-  Turonien
-  Cénomaniien

Figure N°IV-07 : carte iso-teneurs du résidu à sec

IX- Les éléments majeurs :

- **Calcium Ca⁺⁺ :**

Les ions de calcium présents dans l'eau sont issus de la dissolution des roches carbonatées et gypseuses. Dans le cas des roches carbonatées, la présence de calcium découle de la dissolution des formations (CaCO₃) due à l'action chimique des eaux en présence du dioxyde de carbone (CO₂)²



Les concentrations en ions calcium varient de 87,2 mg/litre (F6) à 10 mg/litre (F9). Ces valeurs sont relativement faibles, car les eaux souterraines ne sont pas fortement minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées sur les marges. Des niveaux élevés apparaissent dans les puits (F6=87.2mg/litre), (F7=82.4mg/litre),(F15=80mg/litre) et sont supposés être dus à la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃) et aux dépôts par évaporation.

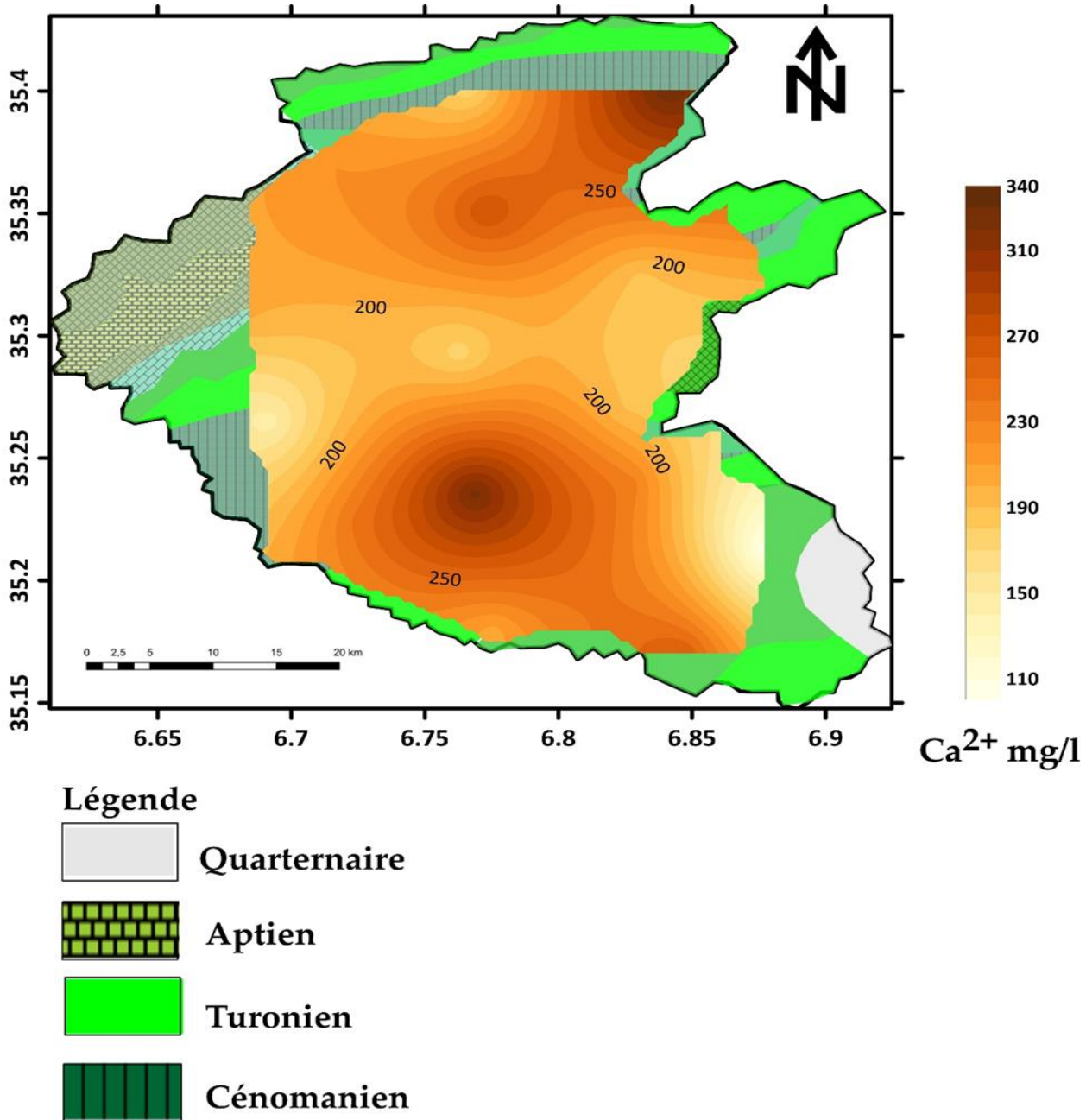
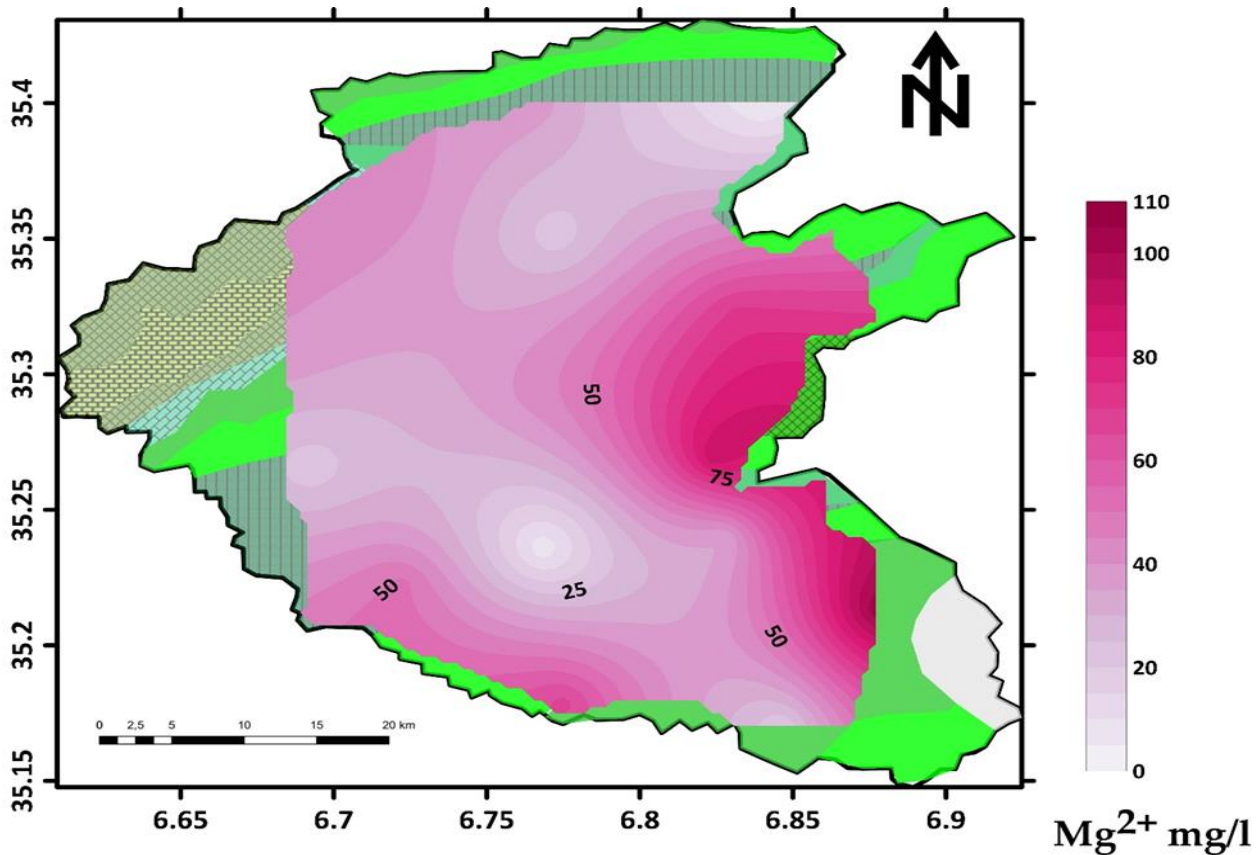


Figure N°IN-08 : carte iso-teneurs de calcium

- **Le Magnésium (Mg⁺⁺) :**

La présence de magnésium dans les eaux découle essentiellement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations dolomitiques, c'est-à-dire la dissolution des formations carbonatées qui contiennent une grande quantité de magnésium, ou bien grâce aux formations salifères qui sont riches en « MgSO₄ ». L'acide carbonique contenu dans l'eau intensifie la réaction chimique. (Vallès, 1985)

L'analyse de la carte (carte) indique que les concentrations en magnésium oscillent entre 48.24 mg/litre (F9) et 5.66mg/litre(F6). Il est issu de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (magnésium et dolomie).



Légende





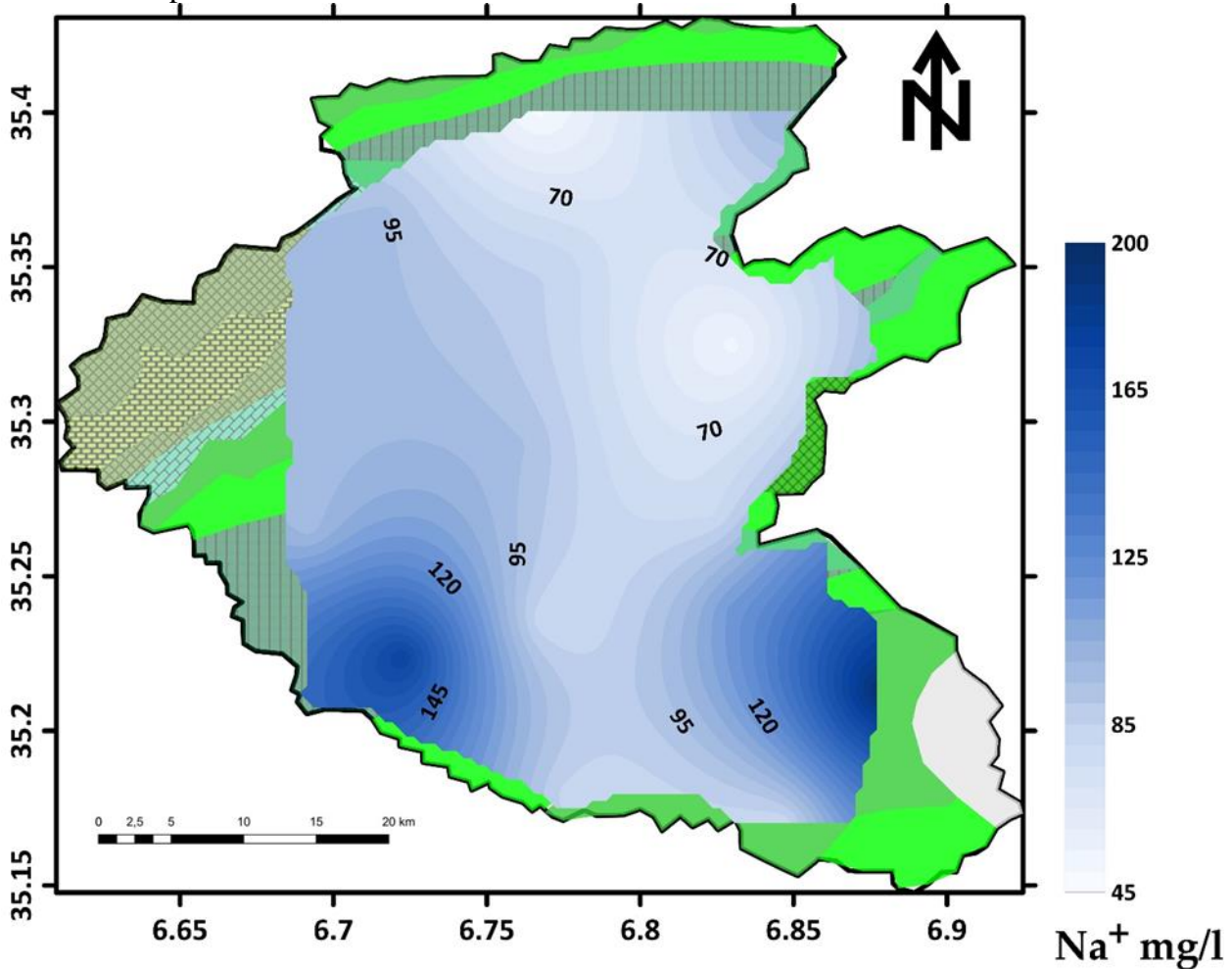
-  Quarternaire
-  Aptien
-  Turonien
-  Cénomaniens

Figure N°IV-09 : carte iso-teneurs de magnésium

- **Le Sodium Na^+ :**

Cet élément, extrêmement courant (environ 26g/kg de la croûte terrestre, soit environ 2.8%), ne se trouve jamais à l'état pur, mais toujours en association avec d'autres éléments chimiques (chlorures, sulfates, etc.). Le sel gemme (chlorure de sodium) est le minéral majeur qui contient du sodium. La présence quasi ubiquitous du sodium et la haute solubilité de ses sels rendent compte de sa présence dans un grand nombre d'eaux naturelles. Des concentrations exceptionnellement hautes peuvent résulter du lessivage ou de la percolation sur des sols salés, ainsi que de l'influence de la salinité marine. . Le potassium est un composant naturel des eaux, dont la concentration demeure généralement stable, ne dépassant habituellement pas 10 à 15 mg/l. Toutefois, dans certaines situations géologiques spécifiques, elle peut atteindre de 20 à 25 mg/l. Selon Hamad et al. (2017), le potassium est

issu de la décomposition directe des roches silicatées telles que les feldspaths, l'orthoclase, le microcline et le mica. Le potassium est principalement présent dans les feldspaths altérés, les particules de mica ou les minéraux argileux sous forme de cation intercalé dans les sédiments, comme l'illite, la vermiculite, le chlorite, le mica hydraté et la montmorillonite (Fehdi, 2008). Les concentrations sont élevées et la teneur en sodium observée à tous les points d'eau de la plaine varie de 150,2 mg/litre comme valeur minimale à 201,1 mg/litre comme valeur maximale au point d'eau.



Légende

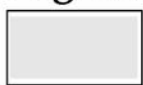



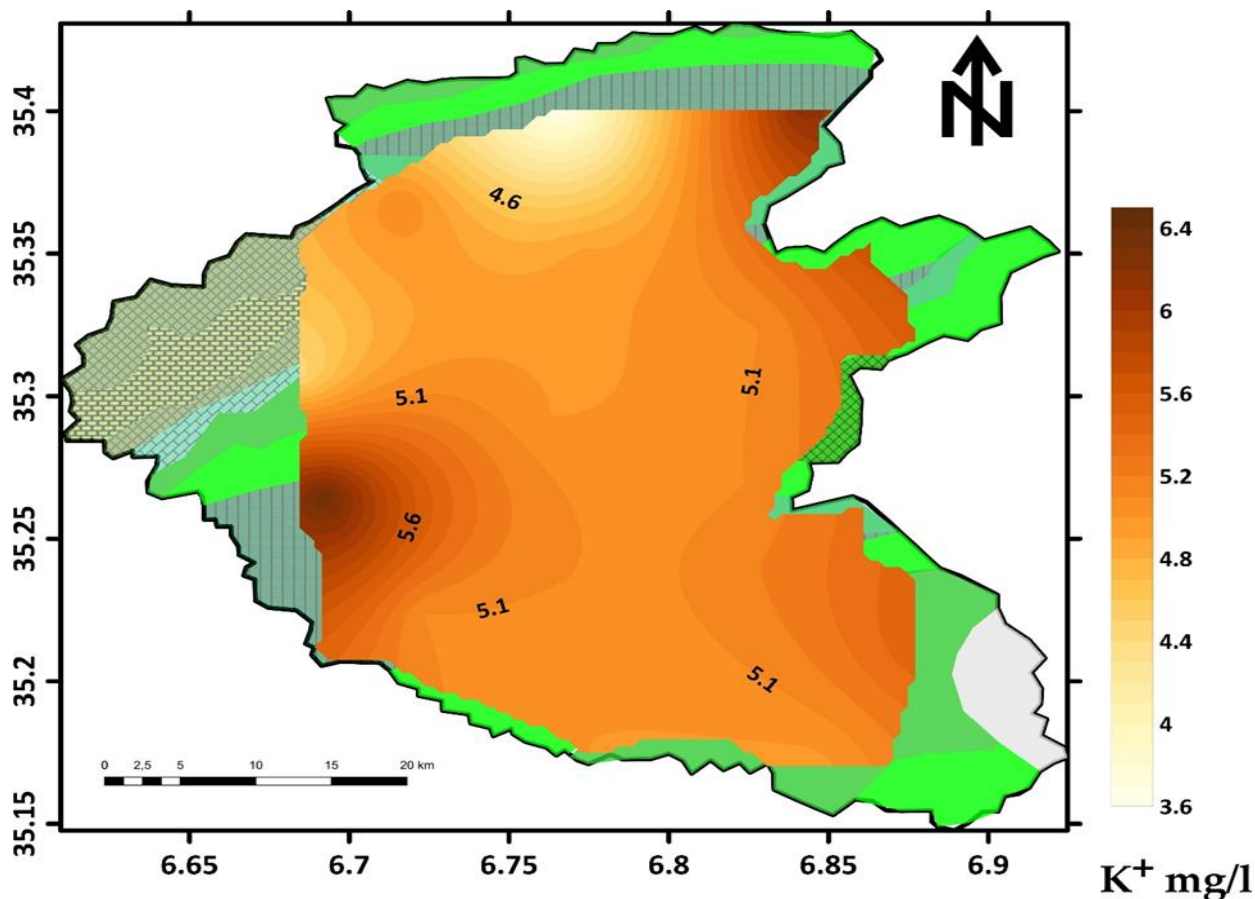
-  Quaternaire
-  Aptien
-  Turonien
-  Cénomanién

Figure N°IV-10 : carte iso-teneurs de sodium

• **Le potassium (K⁺) :**

Il s'agit du cation qui est le moins présent en termes d'abondance. Il peut être issu du lessivage des sols argileux suite à l'altération des Feldspaths et des Micas.

Nous constatons que la valeur du potassium dans la zone d'étude est élevée dans F4, estimée à 457,45 milligrammes par litre, et faible dans F10, estimée à 214,55 milligrammes par litre.



Légende





-  Quarternaire
-  Aptien
-  Turonien
-  Cénomaniens

Figure N°IV-11 : carte iso-teneurs de potassium

- **Bicarbonates (HCO₃⁻) :**

Selon la relation suivante, les ions bicarbonatés sont le produit de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le dioxyde de carbone :



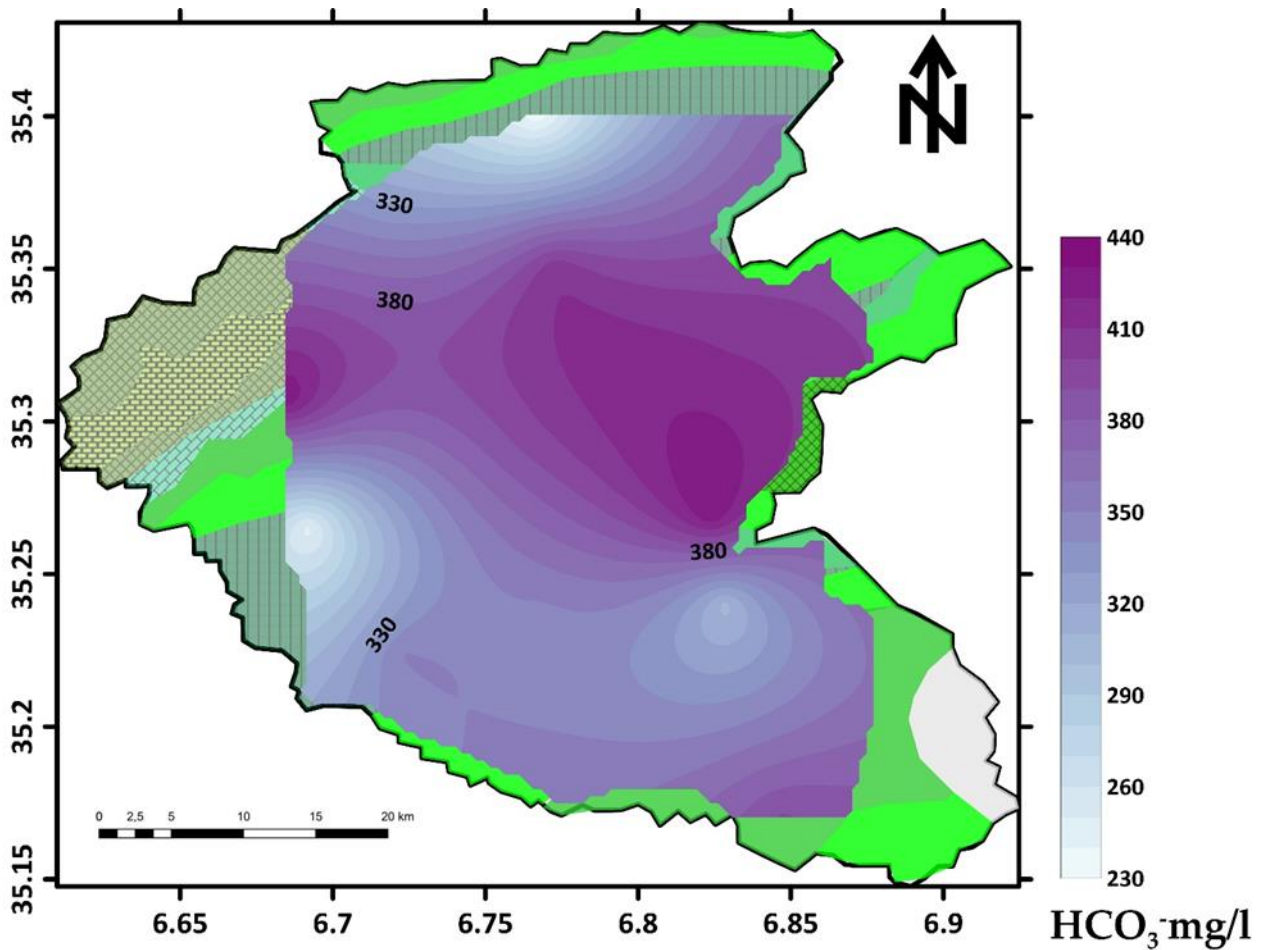
Avec :

X : désigne un élément chimique de la roche.

Autrement dit, la concentration en (HCO₃⁻) dans l'eau est déterminée par plusieurs facteurs physico-chimiques, à savoir :

- la température de l'eau.
- la concentration du (CO₂) dissous.
- la concentration de l'eau en sels ainsi que la nature lithologique des terrains traversés.

Les niveaux d'ions bicarbonatés présentent une variation allant de 231.8mg/l (F10) à 551.44 mg/l (F4), ce qui est dû à la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), soit la à la dissolution des formations gypseuses Ca Mg (CO₃)



Légende

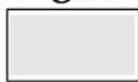



-  Quaternaire
-  Aptien
-  Turonien
-  Cénomaniens

Figure N°IV-12 : carte iso-teneurs de bicarbonates

• **Les chlorures (Cl⁻) :**

Les chlorures sont des éléments maintenus en solution. Ils ne subissent aucune interaction avec l'eau ou la roche et ne se dégradent pas en solution. Les sources comprennent :

- La dissolution des sols naturels et le lessivage des terrains salins ;

- L'usage d'engrais chimiques et de pesticides dans l'agriculture ;
- Les rejets issus des eaux usées domestiques et industrielles.

L'observation de la carte des chlorures (carte) montre que les teneurs varient entre 7.1mg/l(F10) et 177.8 mg/l(F8). Cette dernière teneur est mesurée au centre de la zone d'étude. Les argiles et les alluvions du dépôt de remplissage Mio-Plio-Quaternaire et les dépôts salifères, provenant de l'érosion des formations gypsifères de Djebel Tanout constituent l'origine de ces chlorures. Une deuxième origine serait attachée à l'activité anthropique liée à l'agriculture utilisant dans la région. (Gouiadia, 2008).

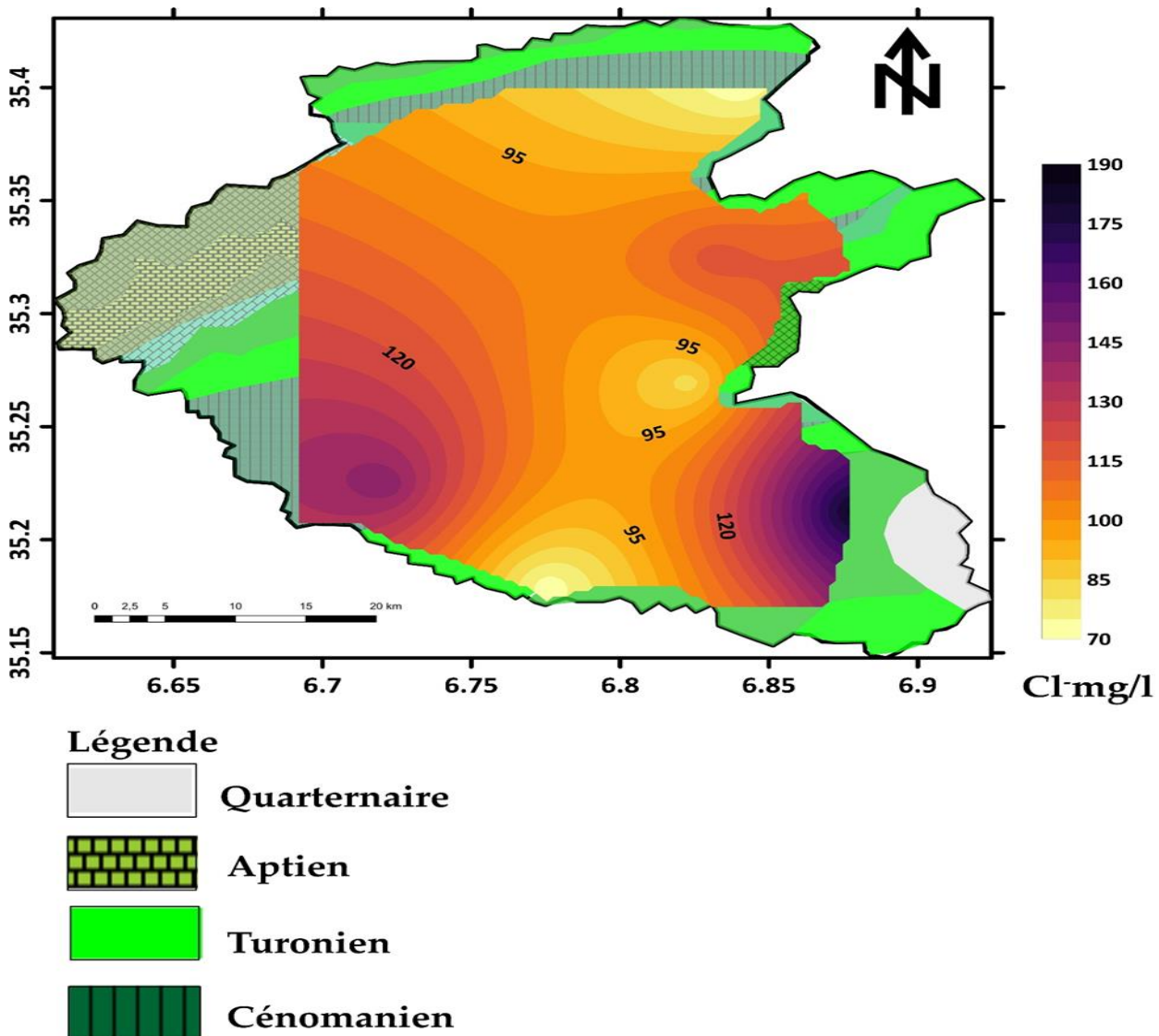


Figure N°IV-13 : carte iso-teneurs de chlorure

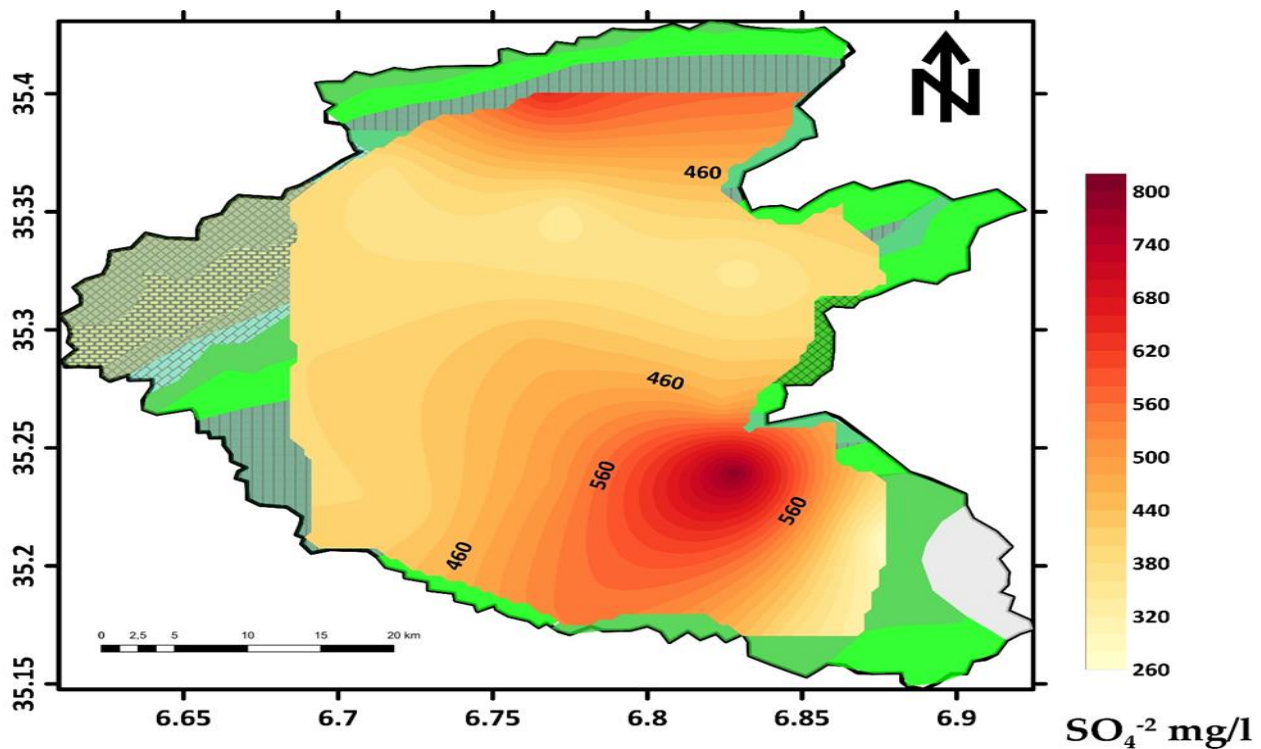
- Les sulfates (SO₄-2) :

Selon Rodier et al (1984), la teneur en sulfates des eaux naturelles dans les terrains pauvres en minéraux sulfatés est habituellement inférieure à 50 mg/l (équivalent à 1,04 méq/l). L'accroissement des sulfates peut essentiellement découler de la dissolution de minéraux évaporitiques, de l'oxydation du soufre contenu dans les roches sédimentaires et/ou de pollution liée à l'urbanisation, l'industrie et l'agriculture.

La carte représentant les teneurs des sulfates (carte), montre que les valeurs varient de 800mg/l(F13) à 275 mg/l(F9).

Les concentrations élevées sont attribuées, d'une part, à la dissolution des gypses présentes dans les marnes emschériennes, et d'autre part au lessivage des dépôts évaporitiques issus du Djebel Mdaouer.

Une autre source serait associée à l'activité humaine liée à l'agriculture qui utilise dans la région des produits chimiques contenant une forte concentration en sulfates. (Houha 2015)



Légende





-  **Quaternaire**
-  **Aptien**
-  **Turonien**
-  **Cénomaniens**

Figure N°IV-14 : carte iso-teneurs de sulfates

- **Les nitrates (NO₃):**

Les nitrates, qui constituent la variante la plus oxygénée de l'azote, sont extrêmement solubles. La présence de nitrates dans les eaux souterraines est associée à l'usage intensif d'engrais chimiques et organiques, une situation qui prévaut dans la plaine de Mellagou (voir la carte), où l'on note les concentrations les plus élevées en nitrates dans les zones fortement cultivées, marquées par l'expansion de l'agriculture irriguée.

La carte représentant les nitrates (carte), montre que les valeurs varient de 83.7mg/l(F2) à 1.9 mg/l(F15).

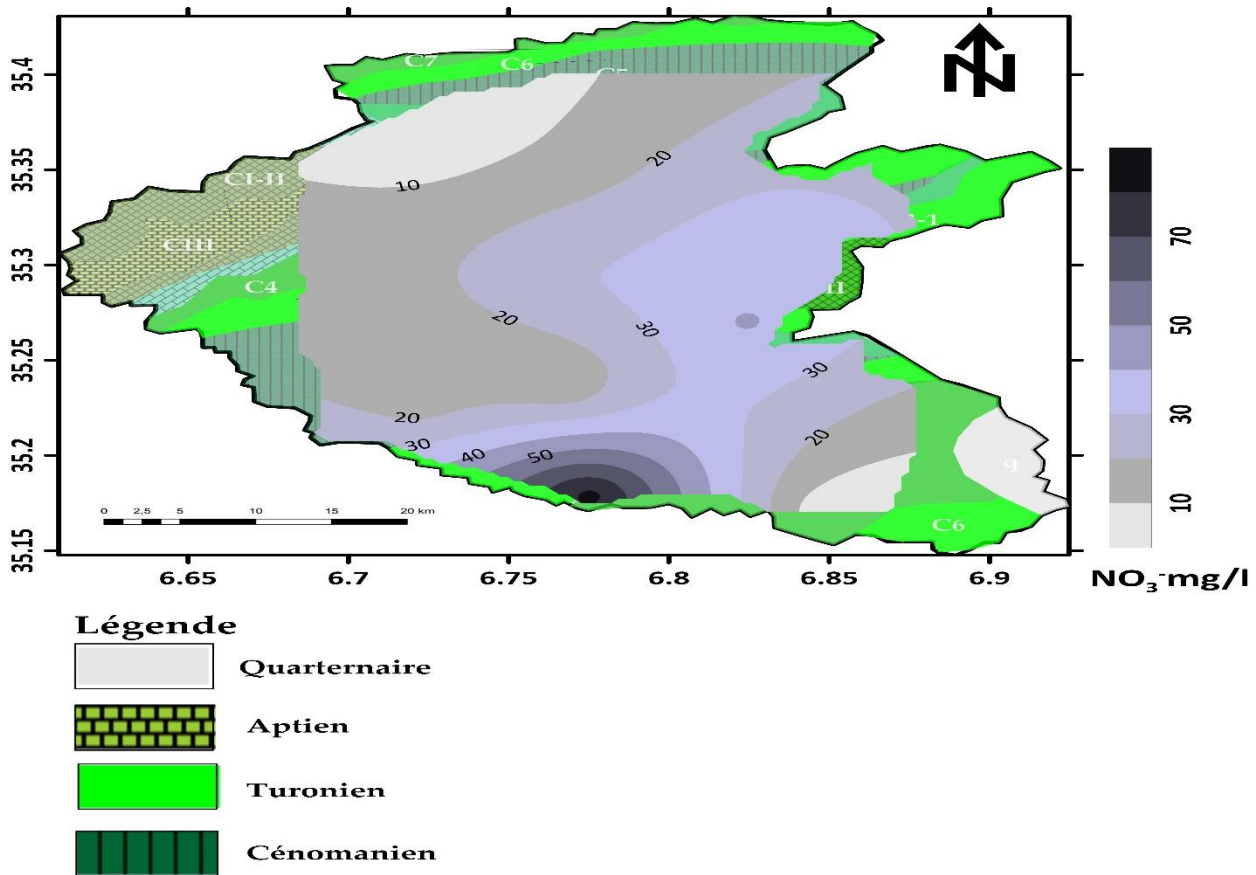


Figure N°IV-15 : carte iso-teneurs de Nitrates

X- Les faciès chimiques :

En hydrogéologie, il est courant d'utiliser les faciès hydrochimiques pour décrire la composition des eaux naturelles. L'usage de représentations graphiques a été motivé par la nécessité de faciliter le classement et la comparaison des eaux naturelles d'après les échantillons examinés. Ainsi, on fait appel à diverses représentations telles que le diagramme à coordonnées radiales, le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff et le diagramme de Piper. Dans ce travail, ce sont ces deux dernières visualisations qui ont été sélectionnées et mises en œuvre.

- **Diagramme de Piper :**

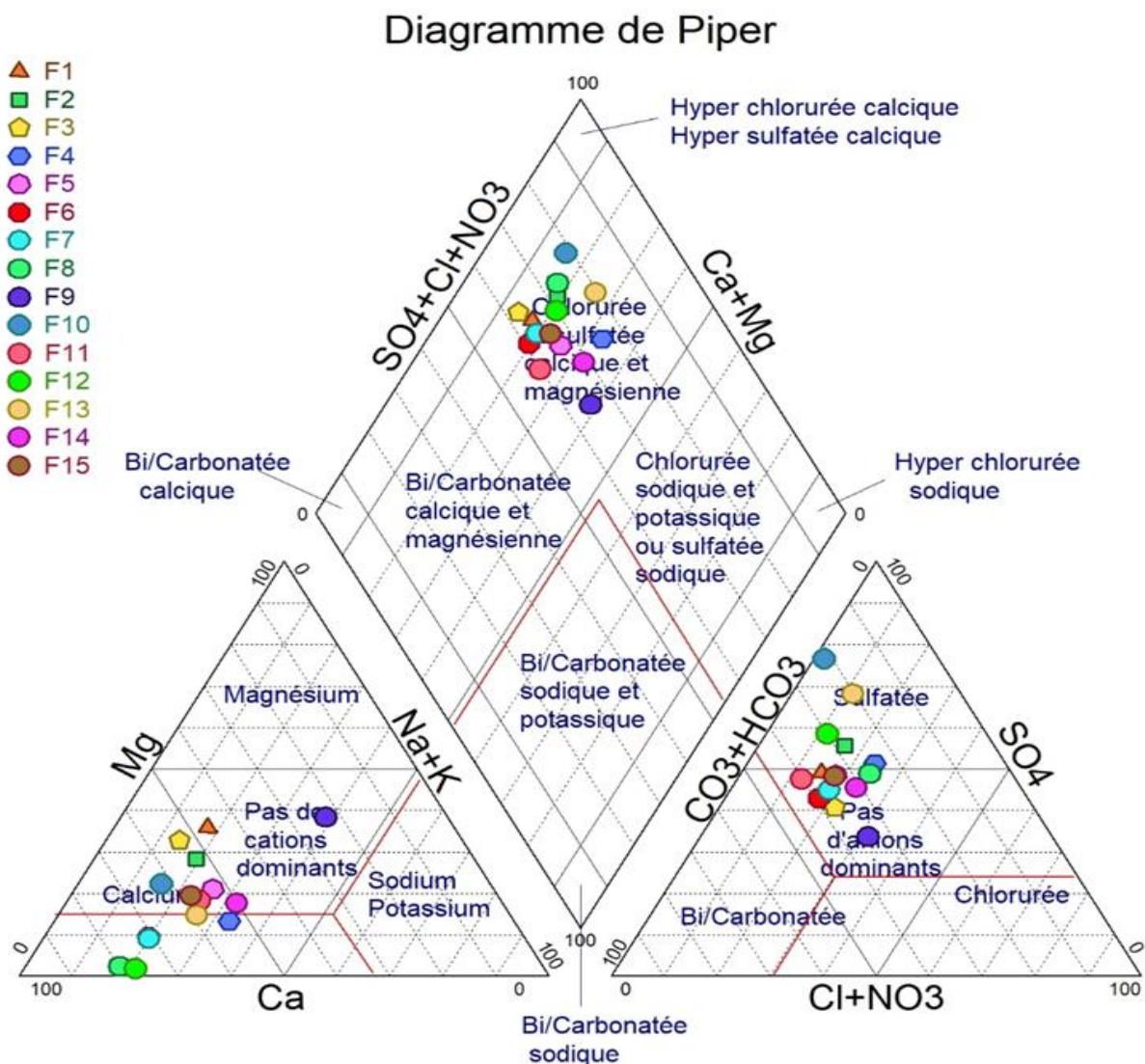


Figure N°IV-16 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de Mellagou

Interprétation par le diagramme de PIPER :

Le diagramme de Piper est un outil graphique qui offre une représentation quantitative et qualitative de la composition chimique des eaux. La méthode implique le positionnement des concentrations sur deux triangles équilatéraux (celui des anions et celui des cations), suivi de la projection des points symbolisant les échantillons dans un schéma en forme de losange. Ce dernier offre une représentation des compositions globales d'éléments majeurs ainsi que des faciès chimiques des eaux. L'illustration des données issues de l'analyse de l'eau sur le diagramme de Piper a rendu possible la distinction des faciès chimiques suivants.

Tableau N° IV-01 : Représentation de Piper des eaux souterraines de Mellagou (Mai 2025) :

Faciès chimiques	Chlorurée calcique	Chlorurée magnésienne	Sulfatée Sodique	Bicarbonatée Calcique
Nom De forage	F1 , F2 , F3 , F4 , F5 , F6 , F7 , F8 , F9 , F10 , F11 , F12 , F13 , F14 , F15	F1 , F2 , F3 , F4 , F5 , F6 , F7 , F8 , F9 , F10 , F11 , F12 , F13 , F14 , F15	/	/

- **Diagramme de Schoëller et Berkalov :**

Le diagramme de SchoëllerBerkalov illustre le profil chimique de diverses eaux. Chaque échantillon est illustré par une ligne fragmentée. Chaque élément chimique est représenté par une ligne verticale sur une échelle logarithmique. La ligne brisée est créée en joignant tous les points représentant les divers composants chimiques.

Un ensemble d'eau dont la minéralité varie, mais qui conserve des proportions identiques pour les éléments dissous, produira une série de lignes brisées qui seront parallèles les unes aux autres. Quand les lignes se rencontrent, un changement de faciès chimique est démontré.

(Gouiadia, 2008)

On peut donc observer le faciès chimique, à l'instar du diagramme de Piper, mais également la minéralisation de l'eau (son contenu en charge dissoute), ce qui est fort appréciable.

Cependant, observer le profil est plus difficile qu'avec le diagramme de Piper.

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (fig.17) présente les résultats des analyses chimiques, révélant que certaines eaux proviennent d'un même aquifère.

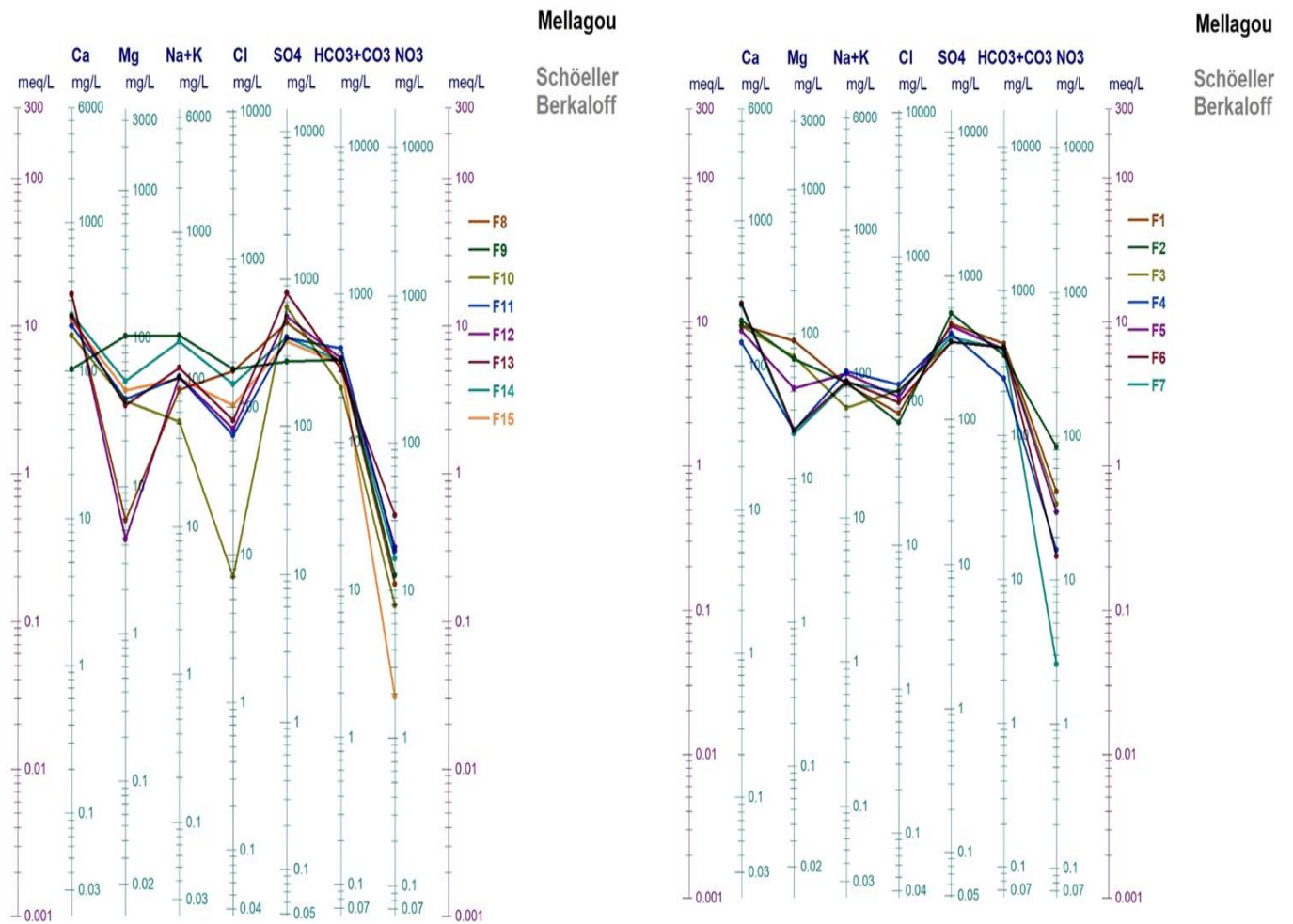


Figure N°IV-17 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff

- Diagramme de Wilcox :

Nous avons utilisé le diagramme de Wilcox pour classer les eaux d'irrigation. Ce diagramme se fonde sur les valeurs du rapport d'absorption du sodium (SAR) et de la conductivité électrique des ions présents dans l'eau. Le but était de visualiser les échantillons sur le graphique de Wilcox pour simplifier la caractérisation des eaux souterraines en ce qui concerne leur adéquation à l'irrigation.

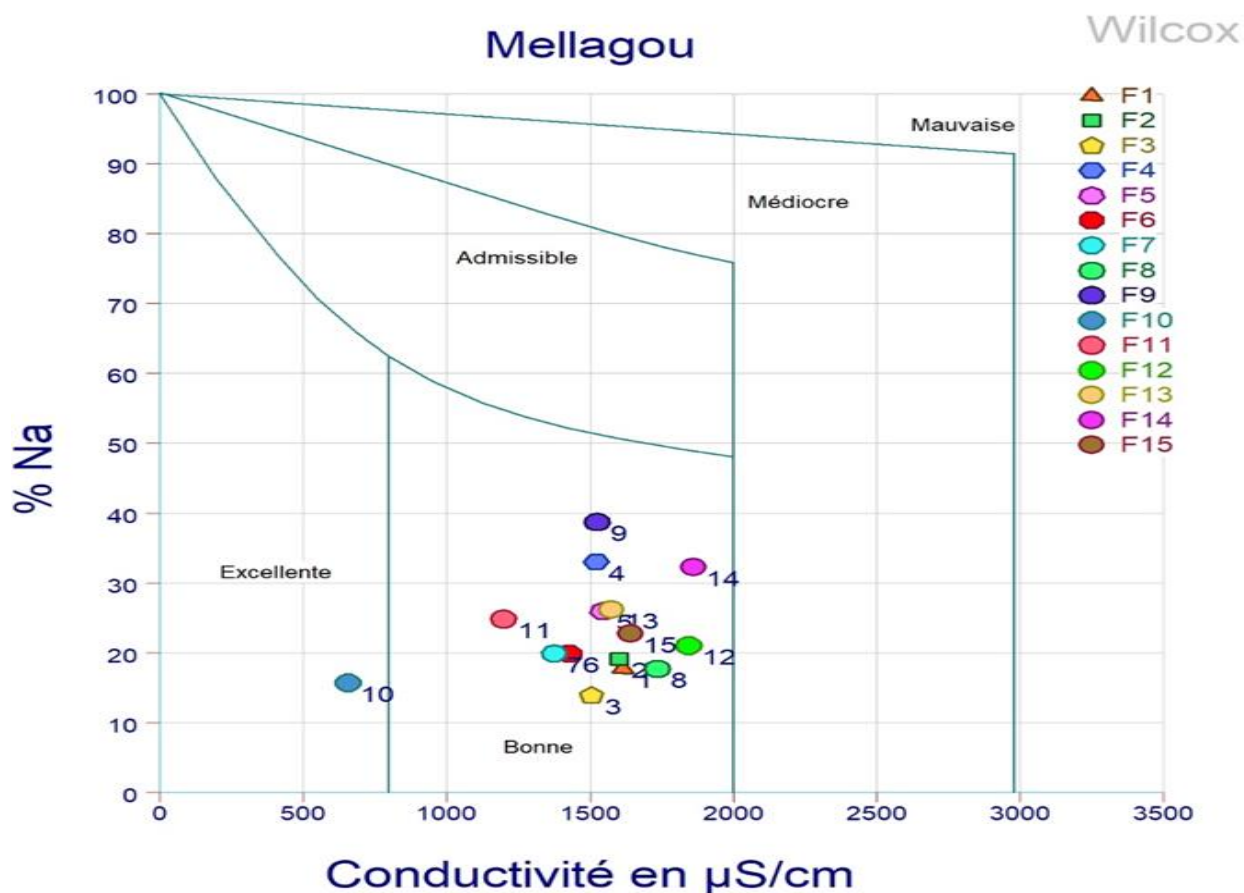


Figure N°IV-18 : classification des eaux par diagramme de Wilcox

Tableau N° IV-02 : Représentation de Wilcox des eaux souterraines de Mellagou (Mai 2025):

	Excellente	Bonne	Admissible	Médiocre	Mauvaise
Nom De forage	F10	F1 , F2 , F3 , F4 , F5 , F6 , F7 , F8 , F9 , , F11 , F12 , F13 , F14 , F15			

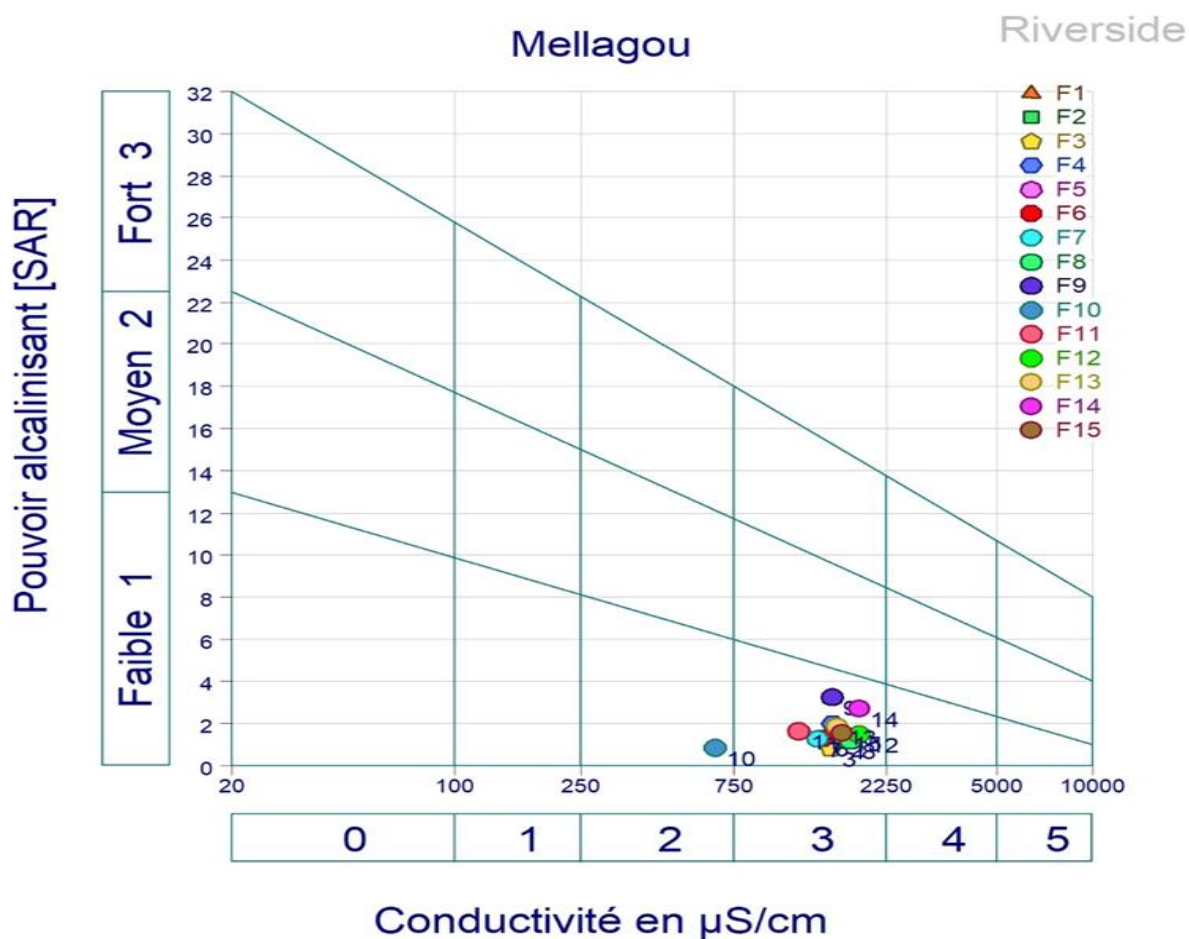


Figure N°IV-19 : Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de Mellagou (Riverside)

Tableau N° IV-03 : Représentation de Riverside des eaux souterraines de Mellagou (Mai 2025) :

	Faible - Moyen	Faible - Elevé	Moyen - Elveé
Nom De forage	F10		F1 , F2 , F3 , F5 , F6 , F7 , F8 , F9 ,, F11 , F12 , F13 , F14 ,F15

Interprétation :

C3S1 : Eau convenant à l’irrigation des cultures tolérantes au sel sur sol ayant une bonne perméabilité

C2S1 : Eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l’irrigation.

XI- Les rapports caractéristiques :

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimés en milliéquivalent. L’étude des variations de ces rapports donne de précieuses indications sur l’alimentation et la circulation des eaux souterraines, elle permet aussi de voir l’évolution des eaux d’un stade à un autre pendant leur trajet souterrain.

- **Interprétation par le diagramme de binaires (Corrélation inter-éléments).**

Graphique montre une relation plus claire entre le calcium et le sulfate (SO_4^{2-}). Les données sont davantage alignées avec la courbe de tendance, indiquant une augmentation conjointe des concentrations de ces deux ions. Cela peut refléter des processus géochimiques tels que la dissolution de minéraux contenant à la fois calcium et sulfate, notamment le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). La relation observée peut aussi être le résultat d’une origine commune liée à des apports naturels ou anthropiques dans les eaux analysées. Ce lien entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} suggère donc une interaction plus forte que celle observée avec le chlorure.

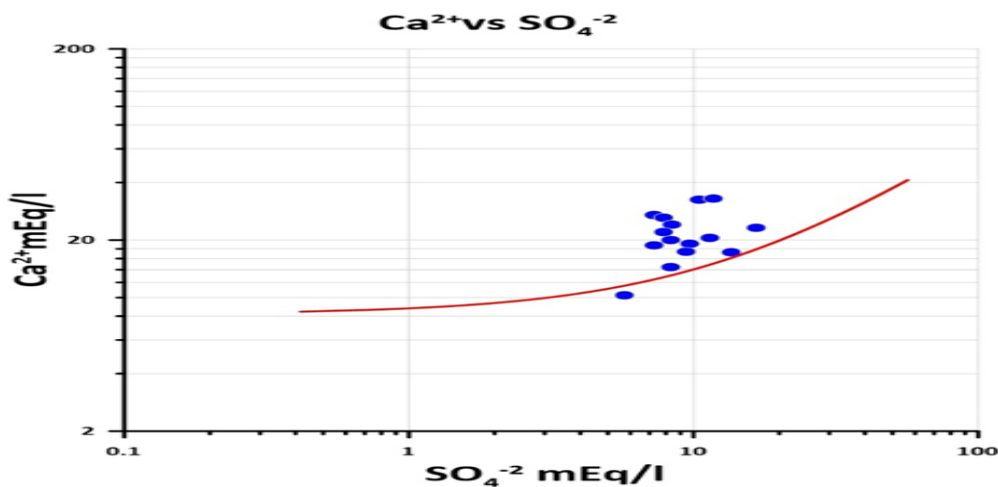


Figure N°IV-20 : corrélation des éléments chimiques en fonction de calcium

Les relations entre les ions majeurs présents dans les eaux naturelles révèlent des interactions chimiques, des origines géologiques ou anthropiques et des mécanismes de transport. Le premier graphique présente la relation entre le calcium (Ca^{2+}) et le chlorure (Cl^-). Les données montrent une distribution dense de points dans une zone étroite de concentrations relativement faibles en Cl^- , tandis que les concentrations de calcium varient plus largement. Une courbe de tendance exponentielle croissante est tracée, mais la majorité des données expérimentales ne la suivent pas rigoureusement. Cela suggère qu'il n'existe pas une forte corrélation directe entre Ca^{2+} et Cl^- dans les échantillons étudiés. Autrement dit, ces deux ions n'ont pas nécessairement une origine commune ni une évolution parallèle dans le système étudié.

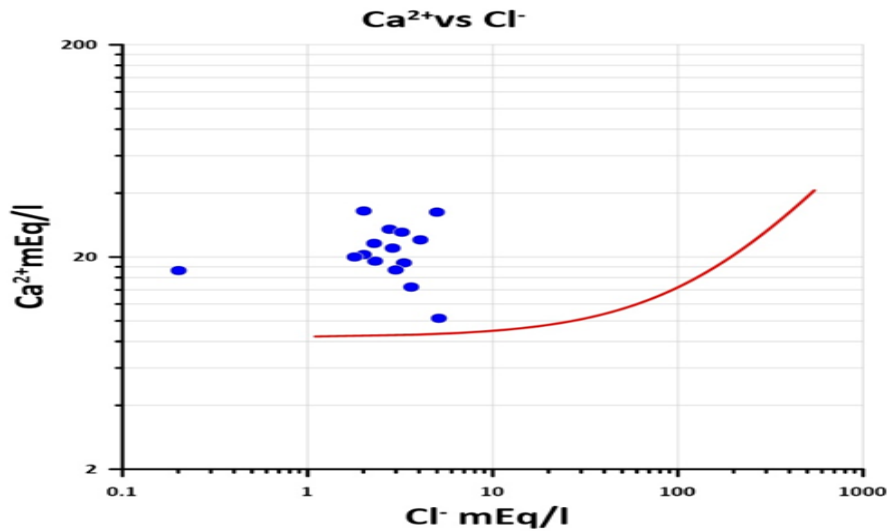


Figure N°IV-21 : corrélation des éléments chimiques en fonction de calcium

2

- **Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure :**

Ce graphique, qui représente le chlorure (Cl^-) en fonction du nitrate (NO_3^-), ne montre pas de tendance évidente. Les points sont dispersés sans suivre une direction ou une courbe identifiable. Cela signifie que les concentrations de Cl^- et NO_3^- ne varient pas de manière corrélée dans les échantillons analysés. Cette absence de relation claire pourrait être due au fait que ces ions proviennent de sources différentes : le chlorure pouvant provenir de processus géologiques ou de pollution saline, tandis que le nitrate est souvent lié à des activités agricoles ou domestiques. Leur comportement indépendant dans les données soutient cette hypothèse.

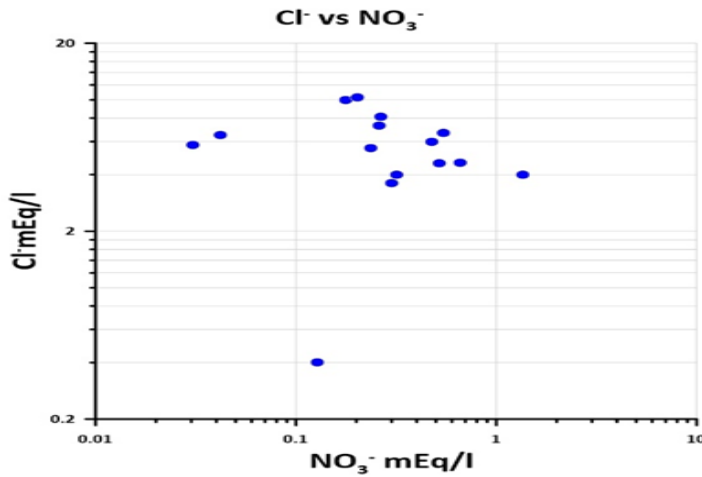


Figure N°IV-22 : Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure

Graphiques examinent la relation entre la conductivité électrique (Cond), un indicateur global de la concentration ionique totale en solution, et les ions Ca^{2+} et Cl^- séparément. Le graphique "Cond vs Ca^{2+} " révèle une tendance positive assez nette : à mesure que la conductivité augmente, la concentration en calcium augmente également. Cela montre que le calcium est un contributeur significatif à la conductivité dans les échantillons analysés, probablement en raison de sa forte présence et de sa nature bivalente qui influence la conductivité plus que les ions monovalents.

En ce qui concerne la relation entre la conductivité et le chlorure (graphique "Cond vs Cl^- "), une tendance croissante est aussi observée, mais elle est moins marquée que celle avec le calcium. Les points sont plus dispersés, suggérant que bien que le Cl^- contribue à la conductivité, son influence est plus variable et potentiellement moins dominante. Cela pourrait s'expliquer par une présence plus irrégulière du chlorure dans les sources d'eau ou par la concurrence d'autres ions plus influents sur la conductivité globale.

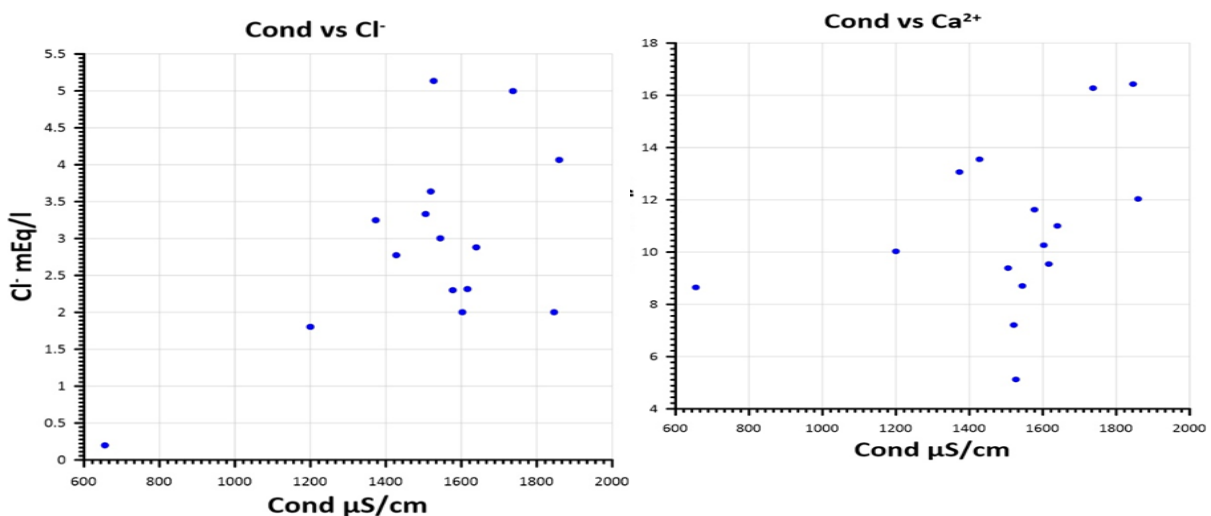


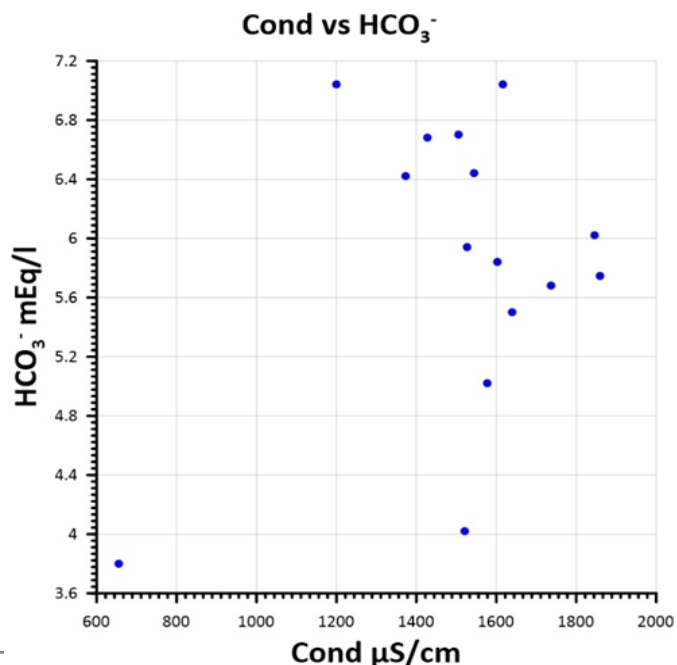
Figure N°IV-23 : Relations des éléments majeurs en fonction de la conductivité 1

les deux graphiques présentés illustrent les relations entre la conductivité électrique de l'eau (Cond, en $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les concentrations en deux ions majeurs : les bicarbonates (HCO_3^-) et le sodium (Na^+), exprimées en mEq/l. Ces représentations permettent une interprétation scientifique du comportement hydrogéochimique des eaux souterraines, notamment dans le contexte d'une région semi-aride nord-africaine.

Dans le premier graphique (Cond vs HCO_3^-), on observe une tendance globale à l'augmentation des concentrations en bicarbonates avec la conductivité électrique. Bien que cette relation ne soit pas parfaitement linéaire, une corrélation modérée est visible, surtout entre 1200 et 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cela suggère que les bicarbonates participent de manière significative à la minéralisation globale de l'eau souterraine. Dans les zones semi-arides du nord de l'Afrique, cette situation est typique des aquifères circulant dans des formations carbonatées ou marneuses, où la dissolution des minéraux tels que la calcite (CaCO_3) ou la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) enrichit l'eau en ions HCO_3^- . Ce processus est souvent intensifié par la présence de CO_2 issu de la matière organique ou de l'activité racinaire, favorisant la réaction avec les roches carbonatées. Par conséquent, la concentration en bicarbonates devient un indicateur indirect de la dynamique de recharge lente et du temps de résidence prolongé des eaux dans le système aquifère.

Le second graphique (Cond vs Na^+) montre une relation plus dispersée entre la conductivité et les concentrations en sodium. Bien que quelques points présentent des concentrations élevées en Na^+ à forte conductivité, la majorité des données n'affichent pas une tendance bien définie. Cela reflète probablement des sources variées de sodium dans la zone étudiée. Le sodium peut provenir de la dissolution de feldspaths sodiques, de sels évaporitiques (comme le halite – NaCl) ou être introduit par des activités anthropiques (engrais, eaux usées, intrusion saline en zones côtières). La variabilité des concentrations en Na^+ pour des niveaux de conductivité similaires suggère une influence locale ou ponctuelle de ces sources, contrairement au comportement plus homogène des bicarbonates.

D'un point de vue hydrogéologique, ces observations traduisent un système aquifère où la minéralisation globale de l'eau est principalement contrôlée par la géochimie carbonatée (via les HCO_3^-), avec une contribution secondaire et moins régulière du sodium. La conductivité électrique, utilisée comme proxy de la charge ionique totale, montre donc une corrélation plus fiable avec les processus naturels de dissolution que les apports anthropiques ou hétérogènes. Ces résultats confirment l'importance de coupler les mesures physico-chimiques à une analyse contextuelle des formations géologiques et de l'occupation des sols pour interpréter les caractéristiques et la qualité des eaux souterraines en milieu semi-aride.



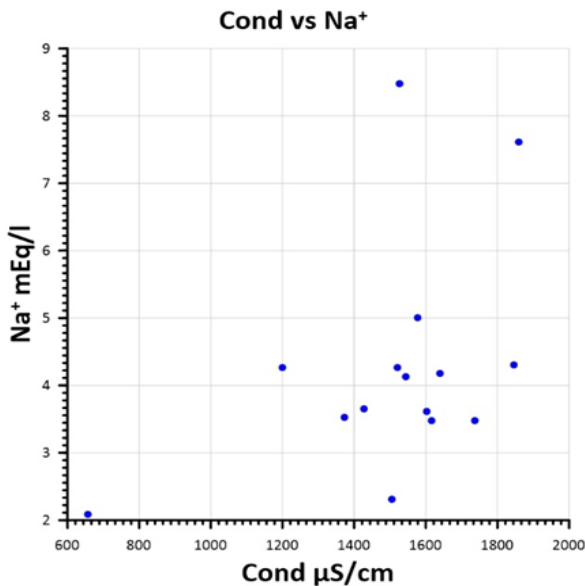


Figure N°IV-24 : Relations des éléments majeurs en fonction de la conductivité 2

Cette relation est essentielle pour comprendre les processus de minéralisation et les équilibres chimiques dominants dans les eaux souterraines, en particulier dans le contexte d'une région semi-aride du nord de l'Afrique.

Dans les milieux semi-arides, l'essentiel de la recharge des aquifères provient des rares épisodes pluvieux, et l'évaporation y est généralement très élevée. Ces conditions favorisent une lente percolation de l'eau à travers les formations géologiques, favorisant ainsi la dissolution progressive des minéraux présents. Les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} sont typiquement issus de la dissolution de roches carbonatées telles que la calcite (CaCO_3) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Le bicarbonate (HCO_3^-), quant à lui, est produit lors de la réaction de ces carbonates avec le dioxyde de carbone dissous dans l'eau, un processus naturel favorisé par la présence de matière organique ou d'activité microbienne dans le sol.

Le nuage de points observé dans le graphique montre une forte concentration de données dans une plage étroite, avec des valeurs de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ autour de 10–20 mEq/l et des bicarbonates autour de 12–16 mEq/l. Cette distribution resserrée témoigne d'un système aquifère relativement stable du point de vue chimique, où les processus de dissolution sont bien établis et atteignent un équilibre local. En revanche, la courbe rouge de tendance, qui suggère une décroissance du HCO_3^- à mesure que la concentration totale en cations divalents augmente, ne reflète pas fidèlement les données expérimentales. Cette divergence indique que, dans cette région, la relation entre bicarbonates et cations divalents ne suit pas une logique simple ou universelle, mais dépend d'un ensemble de facteurs locaux : nature lithologique, temps de résidence, présence de CO_2 , et potentiellement les échanges ioniques avec d'autres espèces en solution.

D'un point de vue hydrogéologique, cette situation suggère que le système étudié est principalement contrôlé par la dissolution des carbonates, mais que d'autres processus (comme l'échange ionique avec le sodium ou l'influence de l'évaporation) peuvent perturber la relation théorique attendue entre HCO_3^- et $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Ainsi, l'eau souterraine de cette région semi-aride semble évoluer dans un contexte fermé, où les apports externes sont faibles, et où les interactions eau-roche dominent la signature chimique des eaux.

Ce graphique met en évidence l'importance de considérer les conditions climatiques, les caractéristiques géologiques et les dynamiques de circulation souterraine pour interpréter correctement les relations ioniques dans les eaux d'un milieu semi-aride.

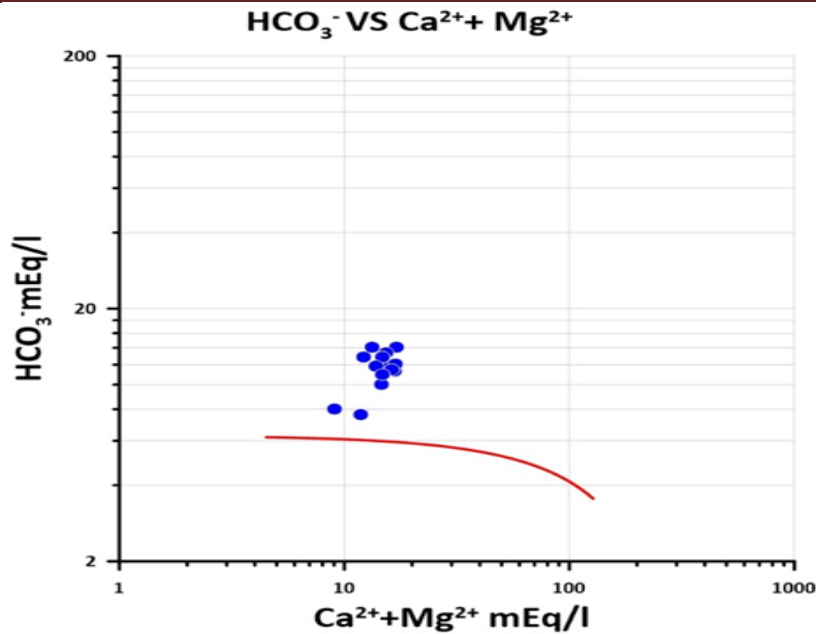


Figure N°IV-25 : corrélation des éléments chimiques en fonction de calcium

3

• **Relations des éléments majeurs en fonction du sodium :**

Ce type de représentation est couramment utilisé en hydrogéologie pour analyser les origines et les mécanismes de minéralisation des eaux souterraines, notamment dans les contextes arides et semi-arides du nord de l'Afrique. Ces régions sont caractérisées par une recharge irrégulière des aquifères, des taux d'évaporation élevés et une forte minéralisation des eaux, souvent influencée par les interactions eau-roche et les apports anthropiques.

La tendance générale représentée par la droite rouge indique une corrélation positive théorique entre le sodium et le chlorure, ce qui pourrait être le cas si les deux ions provenaient essentiellement de la dissolution du sel halite (NaCl), ou d'intrusions marines dans les zones côtières. Cependant, les données expérimentales (points bleus) montrent une dispersion modérée autour de cette tendance. Certains échantillons présentent un excès relatif de sodium par rapport au chlorure, ce qui suggère l'influence de processus géochimiques supplémentaires.

L'un des processus hydrogéochimiques possibles expliquant cet excès en sodium est l'échange ionique inverse, où le calcium ou le magnésium présents dans l'eau sont adsorbés sur les surfaces argileuses du sol ou de la roche, libérant du sodium dans la solution. Ce phénomène est fréquent dans les aquifères évolués, où l'eau a circulé suffisamment longtemps pour atteindre un équilibre avec la matrice géologique. D'autre part, les apports anthropiques (engrais sodiques, eaux usées) ou la concentration par évaporation peuvent aussi enrichir l'eau en Na^+ sans apport proportionnel de Cl^- .

Du point de vue hydrogéologique, ce graphique met donc en évidence un comportement complexe de l'eau souterraine : bien qu'une origine halite soit possible pour certains échantillons, d'autres montrent une signature chimique influencée par des processus d'échange ionique ou par une évolution plus avancée dans le système aquifère. Cette variabilité indique que les eaux étudiées ne sont pas issues d'un seul réservoir homogène, mais plutôt d'un ensemble d'écoulements ayant subi des influences géochimiques diverses,

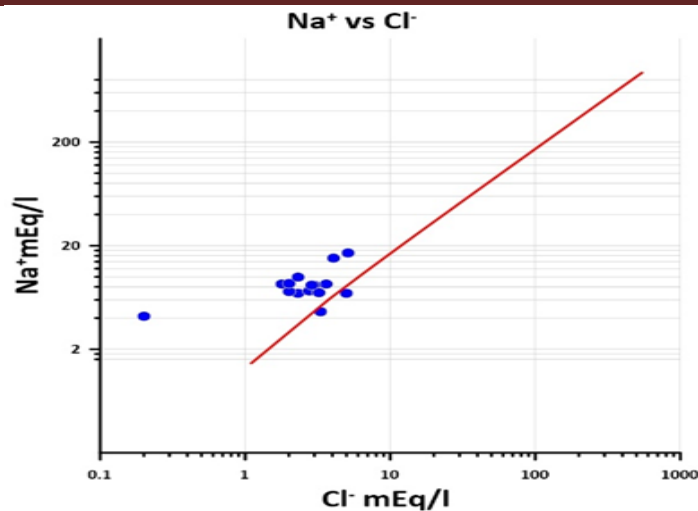


Figure N° IV-26 : Relations des éléments majeurs en fonction du sodium 1

cette représentation vise à évaluer la coévolution de ces ions dans les eaux souterraines, et à identifier les mécanismes géochimiques qui les gouvernent.

On observe ici une dissociation marquée entre la tendance théorique représentée par la courbe rouge croissante et la distribution réelle des données (points bleus). Les concentrations en sulfate varient modérément autour de 10 mEq/l, tandis que celles en sodium se maintiennent dans une fourchette relativement étroite entre environ 2 et 10 mEq/l. La faible dispersion verticale des points, malgré une variation du sulfate, indique qu'il n'existe pas de corrélation forte entre ces deux ions dans les échantillons analysés. Cette observation contraste avec la courbe de tendance qui suppose une relation de type exponentiel, potentiellement attendue si la dissolution de sels comme le thenardite (Na_2SO_4) ou le mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) était dominante.

D'un point de vue hydrogéologique, cette déconnexion entre Na^+ et SO_4^{2-} suggère que ces deux ions ont des sources ou des comportements indépendants dans l'aquifère étudié. Le sulfate peut être principalement issu de la dissolution de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), très fréquent dans les formations évaporitiques des régions arides et semi-arides, alors que le sodium provient probablement de l'échange ionique, de la désorption des argiles, ou de l'apport anthropique (engrais, eaux usées, ruissellement urbain). Cette indépendance relative est typique des milieux où les processus hydrochimiques sont complexes et multifactoriels, notamment lorsque les temps de résidence de l'eau dans l'aquifère sont longs, permettant à des réactions secondaires de modifier la composition initiale.

En somme, ce graphique met en évidence l'hétérogénéité des processus de minéralisation des eaux souterraines dans un contexte semi-aride. La dissociation entre Na^+ et SO_4^{2-} souligne l'importance d'une approche intégrée combinant analyse chimique, connaissance géologique et dynamique hydrogéologique pour interpréter les origines et les évolutions des eaux souterraines.

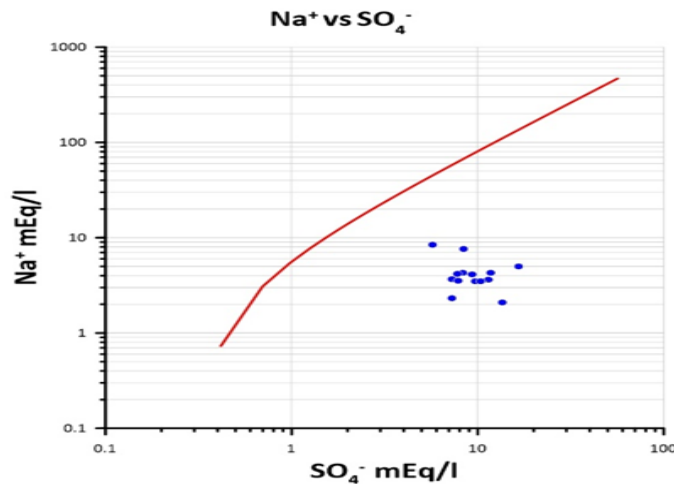


Figure N° IV-27 : Relations des éléments majeurs en fonction du sodium 2

- **Origine de la minéralisation :**

Le premier graphique, TDS vs Ca^{2+} , montre une tendance générale positive, bien qu'avec une dispersion notable. Cela suggère que le calcium joue un rôle important dans la charge ionique totale de l'eau. Cette relation est cohérente avec la présence fréquente de roches carbonatées (calcite, dolomite) dans la région, dont la dissolution alimente les eaux souterraines en calcium. Ce processus est favorisé par le long temps de résidence des eaux dans les aquifères et par les échanges ioniques avec la matrice rocheuse. Cependant, la dispersion des points indique que d'autres ions contribuent aussi significativement à la TDS, et que la relation n'est pas exclusivement contrôlée par le calcium.

Le second graphique, TDS vs HCO_3^- , met en évidence une corrélation partielle entre les bicarbonates et les solides dissous. Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches carbonatées en présence de CO_2 dissous, un processus fondamental dans les aquifères semi-arides. Ici encore, une certaine variabilité suggère que, même si les bicarbonates participent largement à la minéralisation, ils ne sont pas les seuls contributeurs. L'effet tampon du système carbonate/bicarbonate pourrait jouer un rôle dans la stabilisation de la chimie de l'eau à long terme.

Le troisième graphique, TDS vs Mg^{2+} , révèle une corrélation faible. Bien que le magnésium soit un ion important, en particulier dans les eaux circulant dans des formations dolomitiques, son influence sur la TDS semble moins marquée que celle du calcium ou des bicarbonates. Cela peut s'expliquer par une présence plus localisée de dolomie ou par des échanges ioniques limités affectant le magnésium.

Enfin, le graphique TDS vs NO_3^- montre une relation très faible entre les nitrates et la TDS, ce qui est attendu. Les nitrates, bien qu'importants d'un point de vue sanitaire et environnemental, sont souvent d'origine ponctuelle ou diffuse (liée aux activités agricoles ou domestiques). Leur présence n'a donc pas une influence significative sur la charge ionique totale, mais peut témoigner de contamination anthropique.

Dans l'ensemble, la TDS est principalement contrôlée par la minéralisation naturelle à travers la dissolution des carbonates (Ca^{2+} et HCO_3^-), typique des aquifères semi-arides. Le magnésium contribue de manière secondaire, tandis que les nitrates sont plus représentatifs d'apports exogènes liés aux activités humaines que de la géochimie naturelle du bassin. Ces résultats soulignent l'importance d'une approche intégrée, combinant l'analyse chimique et les connaissances géologiques, pour évaluer la qualité et l'origine des eaux souterraines dans les environnements à recharge limitée.

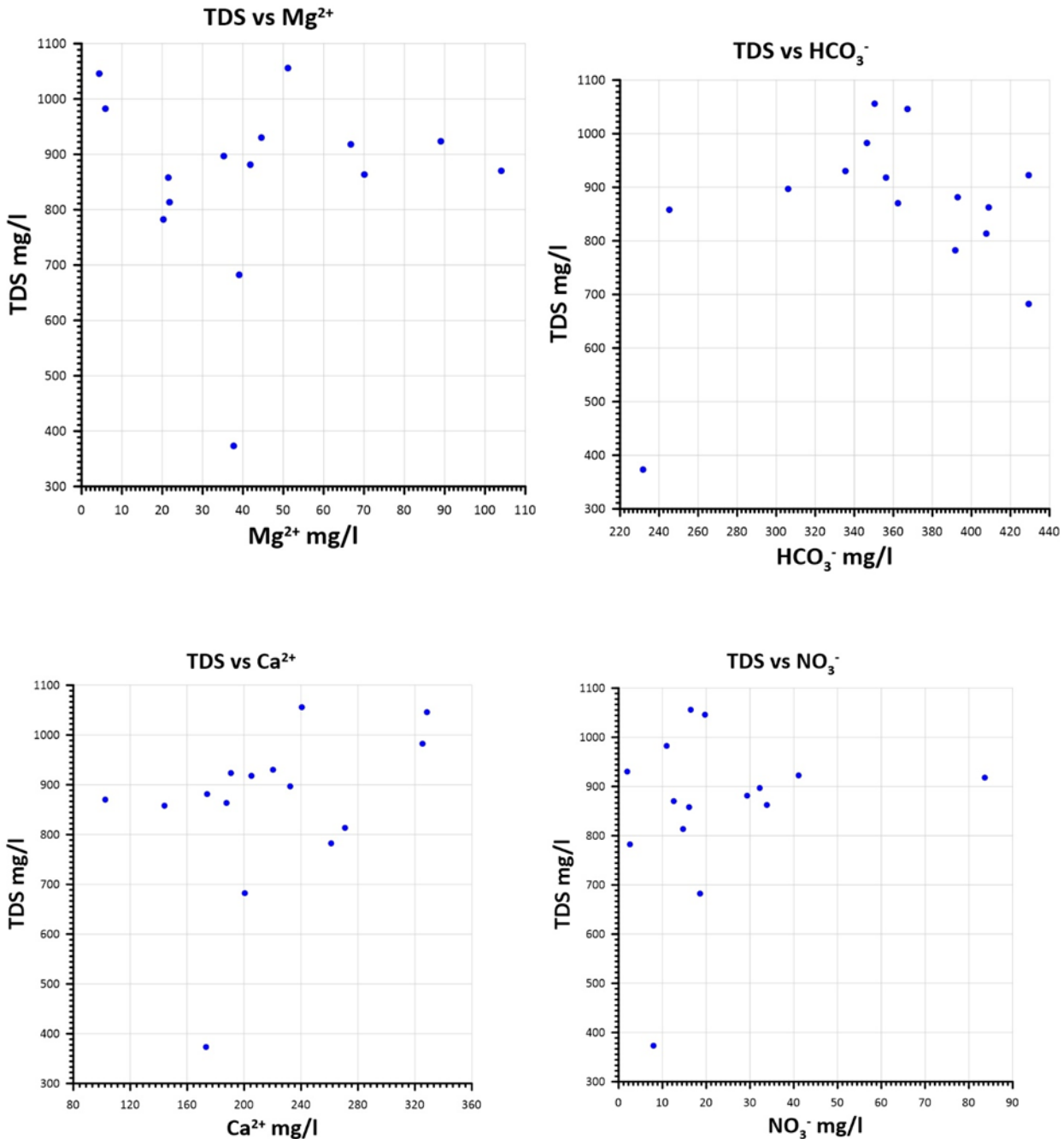


Figure N° IV-28 : corrélation des éléments chimiques avec TDS

XII- Indice de saturation (IS) :

La dissolution d'un minéral dans l'eau peut être décrite par un état d'équilibre : quand l'eau est en contact avec un minéral, la concentration de la solution augmente pour atteindre un maximum pour des conditions physico-chimiques données. On dit alors que la solution est

saturée en ce minéral. L'état de saturation est exprimé par l'indice de saturation ; il utilise l'équation définie par (Garrel et mackenzie, 1976) :

$$I_s = \log (K) - \log (PI)$$

Avec :

K la constante d'équilibre et PI le produit ionique.

Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976 ; Droubi et al, 1978). Trois cas sont possibles :

$I_s < 0$ signifie une sous-saturation d'une solution par rapport à un minéral (dissolution du minéral) ;

$I_s = 0$ indique un état de saturation ; l'eau est en équilibre avec le minéral $I_s > 0$ démontre une sursaturation, (Précipitation du minéral)

L'étude thermodynamique est réalisée à l'aide du logiciel Diagramme pour calculer l'indice de saturation (SI) de l'anhydrite, l'aragonite, la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite, qui sert à évaluer les processus géochimiques qui sont à l'origine de la minéralisation

Les indices de saturation sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral

afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices.

La connaissance des saturations des eaux vis-à-vis de certains minéraux permet de dire sous quelles formes chimiques certains éléments sont transportés dans les solutions.

L'utilisation de ces indices (précipitation/dissolution) est utile pour déterminer l'environnement géologique dans lequel percolent des eaux. Les IS sont définies par (Chapelle,1993)

Les résultats significatifs de tous les échantillons d'eau souterraine analysées (Fig.42), montrent que ces derniers sont saturés par rapport aux formations carbonatées, tels que : la calcite, la dolomite et l'aragonite et sous-saturés par rapport aux formations évaporitiques, à savoir : le gypse et l'anhydrite

L'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont en dissolution, ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations relativement élevées et explique la dominance du faciès chloruré calcique et chloruré sodique par dissolution de l'halite.

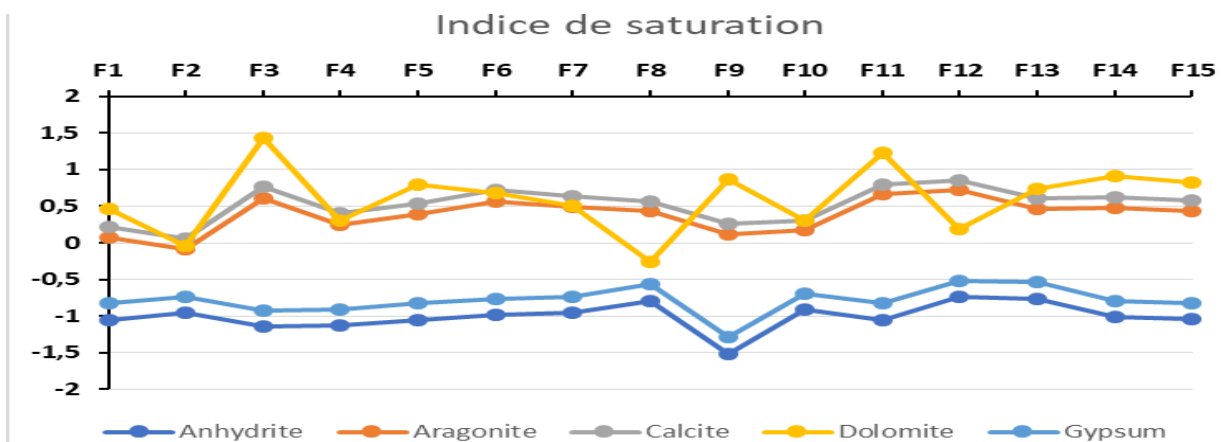


Figure N° IV-29 : Variation de l'indice de saturation des minéraux

L- Perspectives :

L'approche géochimique déployée ici pourrait être élargie à d'autres saisons (campagnes hivernales, post-irrigation) pour évaluer les variations temporelles de la qualité de l'eau. Une modélisation numérique du transport des solutés pourrait aussi compléter l'interprétation hydrogéologique.

À plus long terme, il serait pertinent d'intégrer des analyses isotopiques et des traceurs environnementaux pour préciser l'origine des apports en eau et la durée de résidence dans les aquifères. Enfin, l'impact potentiel du changement climatique sur la recharge des nappes dans cette région semi-aride mérite d'être anticipé, notamment via des scénarios de gestion durable.

La contamination des eaux souterraines par les **chlorures de potassium** (KCl) et **sulfates de potassium** (K_2SO_4), due à leur usage intensif comme engrais agricoles, soulève des enjeux environnementaux et agricoles majeurs dans les zones de forte activité maraîchère ou arboricole. Ces sels, très solubles, s'infiltrent facilement dans les sols en l'absence d'un système de drainage adapté, entraînant une accumulation dans la nappe phréatique.

À moyen terme, il est impératif de **mettre en place un système de surveillance agro-hydrochimique régulier**, en intégrant les concentrations en K^+ , Cl^- et SO_4^{2-} dans les réseaux de suivi de la qualité de l'eau. La **cartographie des zones agricoles à risque élevé** permettrait d'orienter les pratiques vers des solutions durables : choix d'engrais alternatifs à plus faible mobilité, ou fertilisation raisonnée.

Sur le plan scientifique, il serait pertinent d'entreprendre des **essais expérimentaux en lysimètre ou en champ**, pour quantifier les vitesses de percolation des ions issus de ces engrais dans différents types de sols locaux. Par ailleurs, une **modélisation couplée du transfert d'engrais et de l'écoulement souterrain**, intégrée à un SIG, pourrait fournir un outil décisionnel pour anticiper les zones sensibles.

Enfin, au regard du contexte semi-aride et de la rareté de la ressource, **une politique d'éducation et d'incitation auprès des agriculteurs** à limiter ou optimiser l'usage des engrais potassiques devient une nécessité. La gestion intégrée de l'eau et des intrants agricoles permettra d'assurer une qualité pérenne des eaux souterraines, ressource vitale pour l'agriculture locale.

C- Conclusion :

L'étude hydrogéochimique a montré que l'évolution du faciès chimique des eaux se fait d'abord puis le pôle chlorurée calcique et magnésienne vers un faciès de type hyper chlorurée sodique. Ces faciès chimiques sont déterminés par l'interaction eau-roches, la dissolution et les précipitations minérales, à travers les échanges cationiques tout au long de l'écoulement de l'eau vers son exutoire. L'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels et fertilisants dans les périmètres irrigués est un processus secondaire de minéralisation des eaux du bassin de Mellagou

A decorative border of seven black graduation caps with gold tassels, arranged around the top and left sides of a large black rectangular frame.

Conclusion générale:



Conclusion générale

Conclusion générale :

La vallée d'Oued Mellagou, qui se trouve au Nord-Est de l'Algérie, est intégrée dans le vaste bassin versant du Chott Melghir. La plaine de Mellagou se trouve à 30 kilomètres au sud-ouest du chef-lieu de la Wilaya de Khenchela, à 15 kilomètres au sud-ouest de Kais et à 50 kilomètres au sud-est de la Wilaya de Batna.

Bouhmama se distingue par trois principales unités topographiques, à savoir la région montagneuse, les piémonts et la zone plaine. L'examen géologique de la zone révèle la présence d'une strate géologique dominée par des terrains secondaires (Crétacé supérieur, moyen et inférieur), présentant une grande diversité de faciès allant des marnes aux calcaires, sans oublier les marno-calcaires et les grès. Notez que les sols quaternaires ne se trouvent que dans la vallée d'Oued Mellagou.

Cette région présente un climat méditerranéen, semi-aride, caractérisé par deux saisons distinctes : l'une, humide et fraîche, qui s'étend de novembre à mars, et l'autre, sèche et chaude, qui couvre la période d'avril à octobre. En été, les précipitations sont plutôt rares, voire inexistantes, alors qu'elles sont faibles à modérées en hiver. Environ 103.68 mm est la moyenne annuelle qui correspond à l'évapotranspiration réelle (ETR). D'un côté, cela indique l'absence d'une réserve facilement exploitable (RFU) tout au long de l'année, et de l'autre côté, le déficit agricole (DEF) sur une période de 6 mois.

L'analyse hydrogéochimique a révélé que le changement du profil chimique des eaux se produit depuis un faciès caractérisé par la présence de chlorures de calcium et de magnésium vers un profil hyperchloruré dominé par le sodium. Ces types de faciès chimiques sont définis par l'interaction entre l'eau et les roches, le processus de dissolution et de précipitation minérale, via les échanges d'ions cationiques tout au long du parcours de l'eau vers son point de décharge. Le processus secondaire de minéralisation des eaux du bassin de Mellagou se manifeste par l'infiltration des eaux d'irrigation, riches en sels et en fertilisants, dans les zones irriguées.

Conclusion générale

Recommandations :

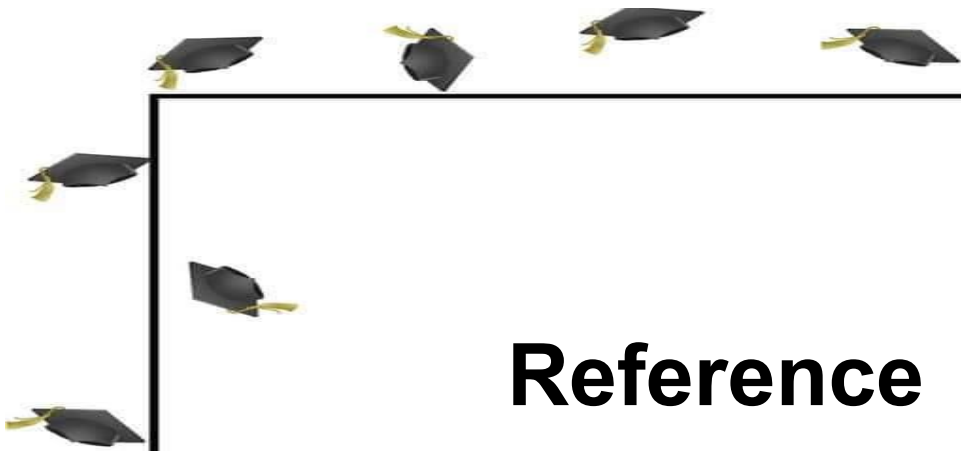
- ❖ La perception des communautés concernant l'importance de ce patrimoine et la nécessité de sa préservation.
- ❖ Une gestion adéquate des ressources en eau.

- ❖ Exploration de nouvelles techniques d'irrigation ou de drainage pour minimiser le gaspillage en eau.

- ❖ Afin de garantir une utilisation pérenne des eaux souterraines, il est nécessaire de mettre en place des retenues dans les collines et des réservoirs pour l'eau de pluie.

- ❖ Établir un réseau de suivi et de contrôle de la qualité de l'eau.

Reference



Références

Reference

- HASSAD, S. (2021). *Caractérisation Géochimique Et Isotopique Des Eaux Souterraines Du Palteau De Mellagou Bouhmama. Khenchela-Algérie* (Doctoral dissertation, Abbes Laghrour University-Khenchela).
- **A.N.R.H:** Agence Nationale des Ressources Hydriques de Constantine
- **Anonyme (2012) :** Les auteures : bureau d'études pluridisciplinaire d'assistance et conscients, révision du plan directeur d'aménagement et d'urbanisation de la commune de Bouhmama 1ere phase août 2012.
- **Belkoum.N, Houha.B (2017) :** Hydrochemistry and isotopic geochemistry contribution to the characterization of the aquifers of the upper Plains of Algeria, case of the basin of Chemora, oriental Algeria. *Journal of Materials and Environmental Sciences* 2017, 8(9), pp. 3262-3268
- **D.H.W.K:** direction d'hydraulique de la wilaya de Khenchela, service des statistiques Mai 2012
- **DPAT :** Direction de planification et d'aménagement des territoires Avril, 2012 service des statistique monographique de la wilaya de Khenchela
- **ANDI (2013) :** Agence Nationale de Développement de l'Investissement 2013
- **Guiraud. R (1973) :** Evolution post-triasique de l'avant- pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Doctorat, Univ. Nice.
- **Houha.B (1996) :** Qualité des eaux de khenchela, étude hydro-chimique, mémoire de magistère, Univ D'Annaba
- **Houha.B (2007) :** Etude du fonctionnement hydrogéochimique et salin d'un bassin semiaride. Remila-khenchela. Doctorate thesis, university of Annaba, Algeria.
- **Laffitte. R (1939) :** Etude géologique de l'Aurès. Thèse, Paris, Bull Serv. CarteGéol. Algérie
- **Vila.J.M (1977) :** Carte géologique de l'Algérie et notices explicatives.
- **Station Météorologique de EL Hamma Wilaya de Khenchela** (donnés climatiques de la (1994-2042).

Références

- **Bouali. H, Berkane.W (2015) :** Contribution à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine de Mellagou, (Bouhmama N-W Khenchela) diplôme de master, Ecologie et l'environnement, khenchela.
- **Belkoum.N, Houha.B (2017) :** Hydrochemistry and isotopic geochemistry contribution to the characterization of the aquifers of the upper Plains of Algeria, case of the basin of Chemora, oriental Algeria. *Journal of Materials and Environmental Sciences* 2017, 8(9), pp. 3262-3268
- **Recensement Générale de la Population et de l'Habitat 2008.**
 - Svärd, P. (2008). Access and democratisation of information: the documentation of war atrocities by the Liberian Truth and Reconciliation Commission. *Comma*, 2008(1), 123-134.
 - Eskenazi, B., Fenster, L., Hudes, M., Wyrobek, A. J., Katz, D. F., Gerson, J., & Rempel, D. M. (1991). A study of the effect of perchloroethylene exposure on the reproductive outcomes of wives of dry-cleaning workers. *American journal of industrial medicine*, 20(5), 593-600.
 - Balestrieri, E., & Rapuano, S. (2007). Defining DAC performance in the frequency domain. *Measurement*, 40(5), 463-472.
- **Direction de planification statistique 2010.**
 - Belkoum, N., & Houha, B., 2017. *Hydrochemistry and isotopic geochemistry contribution to the characterization of the aquifers of the upper Plains of Algeria, case of the basin of Chemora, oriental Algeria*. *Journal of Materials and Environmental Sciences* 2017, 8 (9). 3262-3268.
 - Belhadj, R., & Boutoutaou, D., 2017. *Characterization of groundwater in arid zones (case of Ouargla basin)*, *Energy Procedia*, 119 (2017) 556-564
 - Carrard, N., Foster, T., & Willetts, J., 2019. *Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns*, *Water* 11(8) (2019) article 1605; <https://doi.org/10.3390/w11081605>.
 - Gaagai.A (2009) : Etude hydrologique et hydrochimique du Bassin versant du barrage de Babar sur Oued El Arabe région Est de l'Algérie. Mémoire Magister,
 - Belkoum, N., Houha, B., Rahal, O., 2020. Isotopic geochemistry utilization in the determination of the origin recharge rian upper plains lgeA of the water springs of the
 - Rahal, O., Gouaidia, L., Fidelibus, M.D., Marchina, C., Natali, C., Bianchini, G., 2021. Hydrogeological and geochemical characterization of groundwater in the F'Kirina plain (eastern Algeria). *Appl. Geochemistry* 130, 104983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104983>
 - Vallès, J. M. (1991). Political Science in Spain, 1960-1990: the unfinished history of its coming of age. *European Journal of Political Research*, 20(3-4), 431-444.
 - Fehdi, C., 2008. Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifere Morsott-El Aouinet (NE ALGERIEN). These Dr. Univ. Annaba, Algérie
 - CASTANY, G. (1967): *Traité pratique des eaux souterraines*, Ed. Dunod, 551 p.

Références

- CASTANY, G. (1968): Prospection et exploitation des eaux souterraines, Ed. Dunod, 683 p.
- CASTANY, G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. Dunod, 263 p.
- Houha, B., 2007. ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE ET SALIN D'UN BASSIN SEMI-ARIDE. REMILA-KHENCHELA.
- BOUAICHA FOUED 2009 etude geophysique et hydrogeologique dans la region de khenchela, cas de kheirane et taouziert,
-
- LES SITES INTERNET CONSULTES :**
 - <http://fr.wikipedia.org>
 - <http://www.Aureschaouia.free.fr>
 - <http://www.articque.com>
 - <http://www.CGM.com>
 - <http://www.cig.ensmp.fr>
 - <http://www.eleves.ens.fr>
 - <http://www.hydrogéologie.com>
 - <http://www.Scholar.google.com>
 - <http://www.u-picardie.fr>
 - <http://www.ifen.fr>
 - <http://www.cuniv-khenchela.edu.dz>
 - [http:// fr.wikipedia.org/wiki/Khenchela](http://fr.wikipedia.org/wiki/Khenchela). <http://photos.linternaute.com/paysville/.../khenchela>