



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tébessi –Tébessa-

Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

**THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT (LMD)

Option: Hydrogéologie

Combinaison des apports géophysique et  
hydrogéochimique pour caractériser l'hydrodynamique  
des eaux souterraines d'une nappe en zone semi-aride  
Cas de l'aquifère de Téli djène

par

**Amel HIBI**

**DIRECTEURS DE THÈSE**

**Layachi GOUAIDIA- Professeur. U. Tébessa-Algérie**

**Omar GUUEFAIFIA-Maître de Conférences A. U. Tébessa- Algérie**

**Devant Le Jury Composé De**

<b>BAALI Fethi</b>	<b>Pr. Université Larbi tebessi- Tébessa</b>	<b>Président</b>
<b>GOUAIDIA Layachi</b>	<b>Pr. Université Larbi tebessi- Tébessa</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>GUEFAIFIA Omar</b>	<b>MCA. Université Larbi tebessi- Tébessa</b>	<b>Co-Directeur de thèse</b>
<b>DEFAFLIA Nabil</b>	<b>Pr. Université Larbi tebessi- Tébessa</b>	<b>Examineur</b>
<b>GRIEB Lassad</b>	<b>Pr. Université de Guelma- Guelma</b>	<b>Examineur</b>
<b>HOUHA Belgacem</b>	<b>Pr. Université de Khenchela- Khenchela</b>	<b>Examineur</b>
<b>DRIAS Tarek</b>	<b>Pr. Université de Batna 2- Batna</b>	<b>Examineur</b>

**Mars 2023**

## Résumé

Pour évaluer le potentiel des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene, et fournir un support théorique pour la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques, une approche multidisciplinaire a été adoptée combinant à la fois des méthodes de télédétection, d'hydrogéophysique et d'hydrochimie. La géochimie et les techniques des statistiques multivariées ont été utilisées pour délimiter le modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère alluvial Mio-Plio-Quaternaire de la zone d'étude, en plus de définir les principaux facteurs qui affectent l'hydrochimie à l'échelle d'une plaine et de reconstruire l'origine des eaux souterraines et leurs mécanismes de recharge. Une automatisation du bilan hydrique moyennant la plateforme Google Earth Engine et le langage de programmation PYTHON. Une réinterprétation des données géophysiques et des mesures de sondage électrique vertical (VES) ont été appliquées et calibrées avec les données de forage pour cartographier les structures profondes qui peuvent contrôler la présence d'eau souterraine et d'identifier le contexte géologique et hydrogéologique. Les facteurs hydrodynamiques qui affectent la recharge ont été obtenus de la littérature et des mesures de résistivité effectuées sur terrain. Des cartes thématiques ont été superposées en utilisant le langage de programmation python dans l'environnement SIG pour calculer la porosité, la perméabilité et la transmissivité de la nappe alluviale. L'étude révèle qu'un aquifère alluvial d'une épaisseur allant jusqu'à 60m, s'étendant le long de l'Oued Telidjene et la plaine, est déposé en discordance sur des terrains crétacé contenant des horizons aquifères d'épaisseur variable et de résistivités électriques différentes (10-150.Ωm), dessinant une structure anticlinale avec une lithostratigraphie interrompue par une série de failles et de dômes d'âge aptien et triasique. La partie sud-ouest du bassin a une capacité de recharge et de stockage élevée à modérée, sa couverture alluviale est directement alimentée par des précipitations et des calcaires fracturés déposés dans un synclinal affleurant sur les bords Sud-ouest, formant une aquifère bicouche alluviale et carbonaté. Cette étude a conclu qu'une approche intégrée impliquant une technologie récente, efficace et peu coûteuse, telle que l'hydrochimie, la télédétection et la méthode géophysique conventionnelle, peuvent être utilisées avec succès pour identifier les caractéristiques hydrodynamiques et le potentiel en eau souterraine dans la zone d'étude.

**Keywords:** Hydrogeology- hydrochimie- géophysique-SIG-semi aride-Telidjene.

## **Abstract**

To assess the groundwater potential in the Telidjene basin, and to provide theoretical support for the spatial distribution of hydrodynamic parameters, a multidisciplinary approach was adopted combining remote sensing, hydrogeophysical and hydrochemical methods. Geochemistry and multivariate statistical techniques were used to delineate the conceptual hydrogeological model of the Mio-Plio-Quaternary alluvial aquifer in the study area, in addition to defining the main factors affecting hydrochemistry at the scale of a plain and reconstructing the origin of groundwater and its recharge mechanisms. Re-interpretation of geophysical data and vertical electrical sounding (VES) measurements were applied and calibrated with borehole data to map deep structures that may control the presence of groundwater and to identify the geological and hydrogeological context. Hydrodynamic factors affecting recharge were obtained from literature and field resistivity measurements. Thematic maps were overlaid using the Model Builder visual programming tool in the GIS environment to calculate the porosity, permeability and transmissivity of the alluvial aquifer. The study reveals that an alluvial aquifer up to 60m thick, extending along the Oued Telijene and the plain, is deposited unconformably over Cretaceous terrain containing aquifer horizons of varying thickness and different electrical resistivities (10-150.Ωm), drawing an anticlinal structure with lithostratigraphy interrupted by a series of faults and domes of Aptian and Triassic age. The southwestern portion of the basin has high to moderate recharge and storage capacity, its alluvial cover is directly fed by precipitation and fractured limestone deposited in a syncline outcropping at the edges, forming an alluvial and carbonate bilayer aquifer. This study concluded that an integrated approach involving recent, efficient, and inexpensive technology, such as hydrochemistry, remote sensing, and conventional geophysical method, can be successfully used to identify the hydrodynamic characteristics and groundwater potential in the study area.

**Key words :** Hydrogeology- hydrochimie- geophysique-SIG-semi aride-Telidjene

## الخلاصة

لتقييم إمكانات المياه الجوفية في حوض تليجان ، ولتوفير الدعم النظري للتوزيع المكاني للخصائص الهيدروديناميكية ، تم اعتماد متعدد التخصصات يجمع بين طرق الاستشعار عن بعد والطرق الهيدروجيوفيزيائية والطرق الهيدروكيميائية. تم استخدام تقنيات الجيوكيمياء والإحصاء متعدد المتغيرات لتحديد النموذج الهيدروجيولوجي المفاهيمي لطبقة المياه الجوفية الغربية Mio-Plio-Quaternary في منطقة الدراسة ، بالإضافة إلى تحديد العوامل الرئيسية التي تؤثر على الكيمياء المائية على نطاق سهل وإعادة بناء أصل المياه الجوفية و آليات إعادة الشحن. تم تطبيق إعادة تفسير البيانات الجيوفيزيائية وقياسات السبر الكهربائي العمودي (VES) ومعايرتها باستخدام بيانات الآبار لرسم خرائط للهياكل العميقة التي قد تتحكم في وجود المياه الجوفية ولتحديد السياق الجيولوجي والهيدروجيولوجي. تم الحصول على العوامل الهيدروديناميكية التي تؤثر على التغذية من الأدبيات وقياسات المقاومة الميدانية. تم تراكب الخرائط الموضوعية باستخدام أداة البرمجة المرئية Model Builder في بيئة GIS لحساب المسامية والنفاذية والنفاذية لطبقة المياه الجوفية. تكشف الدراسة أن طبقة المياه الجوفية الغربية التي يصل سمكها إلى 60 مترًا ، والتي تمتد على طول وادي تلين والسهول ، تتسرب بشكل غير متوافق فوق التضاريس الطباشيرية التي تحتوي على آفاق خزان جوفي متفاوتة السماكة ومقاومات كهربائية مختلفة (10-150 ميكرومتر) ، مما يرسم هيكلًا مضافًا للخط. تنقطع الطباعة الحجرية بسلسلة من عيوب وفتحات العصر الألبتي والترياسي. يتمتع الجزء الجنوبي الغربي من الحوض بقدرة عالية إلى معتدلة على إعادة الشحن والتخزين ، ويتم تغذية الغطاء الغربي مباشرة عن طريق الترسيب والحجر الجيري المكسور المترسب في نتوء متزامن عند الحواف ، مما يؤدي إلى تكوين طبقة مياه جوفية طينية و كربونية ثنائية الطبقة. خلصت هذه الدراسة إلى أن النهج المتكامل الذي يتضمن تقنية حديثة وفعالة وغير مكلفة ، مثل الكيمياء المائية والاستشعار عن بعد والطريقة الجيوفيزيائية التقليدية ، يمكن استخدامها بنجاح لتحديد الخصائص الهيدروديناميكية وإمكانات المياه الجوفية في منطقة الدراسة.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجيولوجيا- الجيوكيمياء- الجيوفيزياء- نظم المعلومات الجغرافية- الشبه جافة- تليجان



## Remerciements

Les remerciements sont généralement les derniers mots écrits dans le manuscrit du doctorat. C'est l'occasion pour moi de me souvenir des différentes étapes de ce travail et des personnes qui m'ont soutenue pendant ces 6 années.

Ce projet a été une aventure scientifique d'une richesse inouïe qui m'a permis de découvrir un domaine qui me paraissait mystérieux qui est le codage, et de rencontrer des personnes passionnantes dans le domaine de la programmation et la géomatique qui ont beaucoup rajouté à ma première passion pour l'eau et le sol.

Tout d'abord, je tiens à remercier le Professeur **GOUAIDIA Layachi**, mon directeur de thèse, qui s'est investie dans l'élaboration et la réalisation de ce projet qui m'a proposé de rejoindre cette aventure. Merci également au **Docteur GUEFAIFIA Omar**, mon co-directeur de thèse. Je tiens à définir leur soutien et leur accompagnement par les mots suivants : créativité, encouragement, rigueur scientifique et enthousiasme sans fin !

Je tiens également à remercier les membres du jury et du comité scientifique de cette thèse : Professeur **BAALI Fethi**, Professeur **HOUHA Belgacem**, Professeur **GHERIEB Lassaad** et le Professeur **DRIAS Tarek**.

J'exprime également ma gratitude à mon frère **M. HIBI Mohammed Ryadh** qui a soutenu le volet terrain de ce projet dans toutes ses étapes et à ma sœur Madame **AIT BACHIR née HIBI SAMIA** pour avoir révisé le chapitre Géologie en plusieurs phases bien que toujours débordée, également à mon beau-frère le Professeur **Youcef AIT BACHIR** qui m'a guidé le long de ce parcours afin de vaincre les méandres administratifs.

Ce doctorat a également été une période enrichissante pour apprendre de nouvelles compétences notamment en matière d'automatisation des informations et leur traitement, mes remerciements vont en particulier vers le Docteur **Mohammed Islem BOUACHA** pour ses encouragements et sa passion pour la géomatique très contagieuse, pour le professeur **KECHICHED Rabah** qui a répondu avec patience à toutes mes questions concernant la géostatistique ainsi que vers **M.MENACEUR Nadjem Eddine** qui m'a appris les bases de la programmation.

Je tiens tout particulièrement à remercier le Professeur **BAALI Fethi**, le Professeur **FEHDI Chemssedine** et le Professeur **DRIAS Tarek** pour leurs encouragements et leurs conseils toujours très pertinents notamment pendant les phases les plus abruptes de ce parcours.

Un grand merci à mon collègue **Dr. NEKKOUB ABDELAZIZ**, pour les nombreux conseils que j'ai reçus.

Merci en particulier au **Docteur AOUN Mounira** ainsi qu'à son Mari mon **frère M.HIBI Toufik** pour l'aide et le soutien agréablement apportée et éprouvée.

A Mon cher frère et mon ancien camarade de classe le **Dr HIBI Mohammed Ali** qui attend avec impatience ma soutenance, qui était et est toujours pour moi une vraie source d'inspiration pour sa façon de faire les choses différemment des autres, pour sa polyvalence, pour son savoir immense et sa tentation continue de changer le monde, je tiens à le remercier grandement pour son soutien et remercie Dieu et la vie qui m'ont donnée d'être sa sœur.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide financière de mon frère adoré **HIBI Amine**, et ma "maman", **la fondatrice de tout ce que je suis et que sans elle, ce travail n'aurait pas vu le jour**, qu'ils trouvent dans ces quelques mots l'expression de mon profond amour, gratitude et reconnaissance.

Je ne terminerai pas mes remerciements sans remercier mon très cher époux **HICHAM** qui a ces traces dans toute étape de ce travail, ainsi que mes deux filles **Mountaha** et **Hala** d'avoir compris les impératifs de cette thèse et pour avoir beaucoup souffert pendant une longue période, je leur en suis grandement reconnaissante.

## SOMMAIRE

I. CHAPITRE: CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	18
Situation géographique.....	19
Caractéristiques générales de la zone d'étude :.....	19
La couverture végétale et plan d'occupation du sol .....	20
PÉDOLOGIE.....	22
Aperçu géomorphologique(fig. 3):.....	23
Cadre climatique et hydrologique : .....	24
1. Climat :.....	24
2. Précipitation et Température : .....	24
3. L'évaporation : .....	24
Cractéristiques morphométriques du bassin.....	24
4. Réseau hydrographique : .....	29
Activités économique.....	30
References .....	31
II. CHAPITRE : APERÇU GEOLOGIQUE.....	32
Aspects structuraux de l'Atlas Saharien.....	33
les plissement .....	34
Les fossés d'effondrement.....	35
Les diapirs .....	35
LES PRINCIPALES PHASES TECTONIQUES .....	37
a) LES PHASES EO-ALPINE .....	38
b) LES PHASES ALPINES:.....	39
c) LES PHASES RECENTES:.....	40
Evolution paleogeographique:.....	40
STRATIGRAPHIE.....	41
5. Quaternaire .....	41
6. PLIOCENE.....	41
7. MIOCENE.....	42
8. EOCENE .....	42
Eocene superiure : .....	42
Eocene moyen .....	42
Eocene inferieur .....	42
9. PALEOCENE.....	42

Thanetien.....	42
Montien.....	42
10.    CRETACE.....	42
(1)    Maestrichien.....	42
(2)    Companien.....	42
(3)    Emscherien.....	43
(4)    Turonien.....	43
(5)    Cenomanien.....	43
(6)    Albo-aptien.....	43
(7)    1.3.6. TRIAS : .....	44
GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT .....	44
1.    Structure du bassin de Telidjene.....	45
.....	46
Bassin versant de Téli djene et tectonique .....	48
Résultat de l'analyse linéamentaire.....	48
REFERENCES.....	51
III.    CHAPITRE CLIMATOLOGIE .....	55
Introduction :.....	56
Présentation de GOOGLE EARTH ENGINE.....	57
Catalogue de données.....	57
Choix des données de la région d'étude.....	59
Application de l'outil de calcul sur la région d'étude .....	60
Extraction des données.....	61
Résultat de l'exécution du script .....	65
Précipitation (P) (mm).....	65
La température.....	65
Le ruissellement .....	66
l'évapotranspiration (ET) (mm) .....	66
Réserve facilement utilisable (RFU) (mm) .....	67
Caractéristiques climatiques de la région et de la région .....	68
Indice d'aridité annuel de E. De MARTONNE .....	69
Indice d'aridité mensuelle .....	69
Indice d'aridité de la FAO.....	69
Calcul de l'infiltration .....	69
Calcul du bilan hydrique pour la station de contrôle de Tébessa .....	70
1.    Les températures.....	70
2.    Le vent.....	71

3. L'évaporation .....	71
4. Pluie.....	72
5. Les phénomènes climatiques accidentels .....	72
Les orages.....	72
La neige .....	72
La grêle.....	72
La gelée .....	73
Les brouillards.....	73
Le sirocco .....	73
1. Calcul de l'évapotranspiration :.....	74
Introduction .....	74
Calcul de L'ETP selon la méthode de Turc.....	75
(1) Formule de Blaney-Criddle (1950).....	76
BILAN HYDRIQUE (station de tebessa) .....	81
ETUDE DES APPORTS LIQUIDE.....	82
Comparaison des données extraite de l'imagerie satellitaire aux données du bassin de Tébessa .....	83
<b>IV. CHAPITRE : CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES</b>	
86	
Introduction .....	87
Les principaux paramètres physico-chimiques .....	89
1. Les paramètres physiques.....	89
La température de l'eau .....	89
Le pH de l'eau .....	90
La conductivité électrique (CE).....	91
2. Les paramètres chimiques .....	92
Les cations.....	92
(1) Le calcium $Ca^{2+}$ .....	92
(2) Le magnésium $Mg^{2+}$ .....	93
(3) Le sodium $Na^{+}$ .....	93
(4) Le potassium $K^{+}$ .....	94
Les anions.....	95
(1) Les bicarbonates $HCO_3^{-}$ .....	95
(2) Les sulfates $SO_4^{2-}$ .....	96
(3) Les chlorures $Cl^{-}$ .....	97
(4) Les nitrates $NO_3^{-}$ .....	98
Faciès chimique des eaux .....	99
Analyse statistique des données physico-chimiques .....	100
1. Analyse factorielle.....	100

Classification ascendante hiérarchique.....	102
Interaction eau-roche.....	103
Indices de saturations .....	104
Variation de l'indice de saturation .....	104
Diagramme d'équilibre.....	105
Conclusion.....	107
V. CHAPITRE .....	110
Apport de la géophysique dans l'identification de la structure et la géométrie de l'aquifère .....	110
INTRODUCTION.....	111
1. GRVAVIMETRIE.....	112
1. Corrections gravimétriques .....	113
2. Isostasie et correction isostatique .....	114
3. Anomalie de Bouguer.....	115
4. Choix de la densité .....	116
Méthode Nettleton (1939) .....	116
Méthode des Triplets .....	116
Méthode de Parasnis (1985).....	116
5. Origine des données .....	117
6. Méthodologie de traitement.....	117
Prolongement vers le haut et séparation régionale résiduelle.....	117
Analyse spectrale.....	118
Dérivées horizontale et verticale .....	119
7. Analyses et interprétations des résultats des traitements gravimétriques .....	119
2. La méthode électrique .....	125
1. Inventaire des forages et des puits.....	125
8. Interprétation .....	127
Piezometrie.....	130
Comparaison des cartes piézométriques pour la période 1991- 2018 .....	131
Géométrie et structure des aquifères : .....	131
1. Aquifères. ....	131
(1) <b>L'aquifère du Plio-Quaternaire</b> .....	132
(2) <b>L'aquifère bicouche de la région de Bir Said III</b> .....	132
(3) <b>L'aquifère Turonien</b> .....	132
(4) <b>Aquifère du Cénomanién</b> .....	132
(5) <b>Aquifère Albo-Aptien</b> .....	132
VI. CHAPITRE .....	136
Apport de la géophysique dans caractérisation hydrodynamique de l'aquifère alluvionnaire .....	136

Automatisation des paramètres hydrodynamiques en utilisant ArcGis et Python.....	136
INTRODUCTION.....	137
1. Automatisation des cartes des paramètres hydrodynamiques par des scripts Python et l'environnement arcGIS .....	138
(1) Résistivité du terrain.....	139
(2) Résistivité de l'eau .....	139
(3) Conductivité de l'eau.....	139
(4) Le facteur F lié à la lithologie .....	139
(5) La porosité.....	139
(6) La perméabilité.....	139
(7) La transmissivité.....	139
1. Théorie de la méthode électrique .....	139
Principe de la méthode électrique à courant continu.....	139
Résistivité.....	140
Paramètres influençant la résistivité.....	141
Loi d'Archie .....	142
Saturation.....	142
2. Caractéristiques générales d'un milieu poreux.....	143
Porosité.....	143
Perméabilité.....	144
Transmissivité .....	145
Méthodologie.....	146
Paramètres de caractérisation d'un aquifère avec le sondage électrique.....	146
3. Relation entre la résistivité électrique et la perméabilité.....	146
4. Estimation des paramètres de circulation à partir de la résistivité.....	148
Loi d'Archie et équation de Kozeny .....	148
5. Données géo-électriques.....	150
6. Traitement et analyse des données .....	150
7. Détermination des paramètres de circulation de l'aquifère .....	151
1. Loi d'Archie et équation de Kozeny .....	151
2. Calcul de la porosité.....	151
3. Calcul de la perméabilité K et de la transmissivité T.....	151
4. Scripts de prétraitements et algorithmes de calcul.....	152
Figure 67. Carte de résistivité.....	154
5. Interprétation .....	159

## Liste des figures

Figure 1	Carte de situation de la zone d'étude.....	20
Figure 2.a	Carte d'occupation des sols établie via la plateforme cloud Google Earth Engine (année 2020).....	21
Figure 3	Carte topographique de la zone.....	23
Figure 4	Modele Numérique du terrain du bassin de Téli djene.....	25
Figure 6.	Courbe hypsométrique .....	27
Figure 7	Carte des pentes .....	28
Figure 8	Carte de densité de drainage.....	29
Figure 9	Carte du réseau hydrographique .....	30
Figure 10	Cadre structural africain et ibérique de la chaîne tello-rifaine (d'après Wildi,1983). .....	33
Figure 11.	Schéma structural de l'autochtone des confins algéro-tunisiens (d'après Vila, 1980).....	34
Figure 12.	carte structural simplifié du Sud Est Constantinois (Kheidri.L.H, 2001) .....	36
Figure 13.	Localisation des principaux affleurements du Trias des confins algéro-tunisien et du distinction du deux domaine des « glacier du sel et du domaine des vrais .....	37
Figure 14.	Les deux modèles de mise en place des matériaux triasiques au cours de l'Albien (Perthuisot et al 1998). A : modèle du « glacier du sel » propose par J.M.Vila et al. (1994) .....	38
Figure 15.	Schéma structural du bassin de Téli djene .....	43
Figure 16.	Extrait de carte géologique de la zone d'étude (A.HIBI et al).....	44
Figure 17.	Extrait de carte géologique de la zone d'étude (A.HIBI et al).....	46
Figure 18.	Coupe géologique scshématique sur l'axe de l'anticlinal (A.HIBI et al 2021).....	47
<b>Figure 19.</b>	(a) Carte des linéaments extraite de la carte géologique ; (b) carte des linéaments extraite à l'aide de GEOMATICA ; (c) carte des linéaments extraite à l'aide de la fonction hill-shade de QGIS ; (d) carte complète des linéaments du bassin de Telidjene (A.HIBI et al 2021) .....	49
<b>Figure 20.</b>	(a) carte de la densité des linéaments ; (b) Diagramme de rosace .....	50
Figure 21.	L'environnement de développement interactif Earth Engine .....	59
Figure 22.	Code JavaScript pour l'impression du graphique des valeurs moyennes mensuelles de l'écoulement de surface en millimètres .....	60
Figure 23.	(a)(b). Exemple des représentations graphiques des données des précipitations et l'évaporation générés par le service Cloud Google Earth Engine.....	61
Figure 25.	Variation de la pluviométrie dans le bassin de Téli djene pour la période (1981) - (2021). Source source GEE.....	65
Figure 26.	Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales dedans le bassin de Téli djene (source GEE) .....	65
Figure 27	.Variation du ruissellement dans le bassin de Téli djene (source GEE) .....	66
Figure 28.	Variation de 'évapotranspiration réelle dans le bassin de Téli djene(source GEE) .....	67
Figure 29.	Variation de RFU dans le bassin de Téli djene (source GEE) .....	68
Figure 30.	Diagrame Ombrothermique de « GAUSSEN ET BAGNOULS» (source GEE) .....	68
Figure 32.	variation de l'infiltration durant la période 1981 à 2020 calculé par GEE .....	70
Figure 31.	Evolution mensuelle des différents composants du Bilan hydrique .....	82
Figure 33.	Localisation des points d'eau.....	88
Figure 34.	Variabilité spatiale de la température des eaux souterraines dans la zone d'étude (novembre 2018).....	89
Figure 35.	Variabilité du pH des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018) .....	91



Figure 36. Variabilité Variabilité de la conductivité des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018) .....	91
<b>Figure 42.</b> Variabilité des teneurs en sulfates des eaux souterraines dans le bassin de Télijdene.....	97
Figure 46.. Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique .....	103
Figure 47. Diagramme de cond. Vs SO <sub>4</sub> —.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 48. Diagramme de cond. Vs HCO— .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 49. Diagrammes de : (a) Na <sup>+</sup> vs Cl <sup>-</sup> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 50. Figure 1. – Modèle de Pratt (Dubois et Diamant, 2001) .....	115
Figure 51. Figure 1. – Modèle d'Airy où E représente l'épaisseur de la croûte .....	115
Figure 52. Carte d'anomalies de Bouguer ; (b) Spectre de puissance associé à la Bouguer .....	121
Figure 53. (a) Carte résiduelle de Bouguer ; (b) Spectre de puissance associé à la résiduelle .....	122
Figure 54. Carte de dérivée verticale de la résiduelle de Bouguer .....	122
Figure 55. Carte analytique de la dérivée verticale. (1) Zone d'étude ; (2) Zone de contraste pouvant correspondre aux zones de failles ; (3) Axes de compression ; (4) Couloirs d'anomalies négatives correspondant aux épontes du pli ; (5) Axe du pli.....	123
Figure 56. Modèle structural interprétatif (1 : Zone d'étude ; 2 : Les épontes de l'anticlinal ; 3 : Zone de compression ; 4 : Axe du pli ; 5 : Fracture le long de l'axe du pli représentant les zones idéales pour des investigations hydrogéologiques .....	124
Figure 57. Carte d'implantation des sondage électriques verticaux .....	125
Figure 58. Carte d'implantation des sondages électriques verticaux .....	127
Figure 59. Coupe géo-électrique réinterprété sur le Profil DG (modifié) .....	128
Figure 60. Coupe verticale des résistivité apparente sur le profil H.....	129
Figure 61. Coupe géo-électrique établies selon le profil H .....	129
Figure 62. (a) Carte des contours piézométriques du bassin versant basée sur les mesures de 78 puits. Modifié à partir de Charef et al. (1991) ; (b) Carte des contours piézométriques du bassin versant basée sur les mesures de 26 puits (2018) .....	131
<b>Figure 63.</b> Schéma du dispositif de Schlumberger .....	139
Figure 64. . Résistivité de formations géologiques (Chapellier, D., MARI, J.L., 1998).....	141
Figure 65. Dispositif avec écoulement latéral. ....	145
Figure 66. granulométrie et perméabilité (Chapellier, D., MARI, J.L., 1998).....	145
Figure 67. Plan de position des SEV .....	150
Figure 68. Carte piézométrique de la région .....	150
Figure 69. carte de porosité .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 70. Carte de perméabilité du bassin de Télijdene .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Liste des Tableaux

Tableau 1	Cractéristiques morphométriques du bassin de Télijdjene .....	26
Tableau 2	Paramètres du relief .....	27
Tableau 3.	moyenne des températures mensuelles de la station de Tébessa .....	71
Tableau 4.	la moyenne mensuelle de la vitesse du vent « station de Tébessa 1984-1998 ».....	71
Tableau 5.	la moyenne mensuelle de l'évapotranspiration.....	71
Tableau 6.	pluie moyenne mensuelle .....	72
Tableau 7.	fréquence mensuelle des orages .....	72
Tableau 8.	fréquence mensuelle de neige a la station de Tébessa. ....	72
Tableau 9.	fréquence mensuelle de grêle à la station de Tébessa.....	73
Tableau 10.	Fréquence mensuelle de gelée à la station de Tébessa .....	73
Tableau 11.	fréquence mensuelle de brouillards à la station de Tébessa .....	73
Tableau 12.	Données climatique de la station de Tébessa (ANRH) et du Bulletin FAO N° 56 .....	78
Tableau 13.	L'Evapotranspiration Selon la Méthode TURC.....	79
Tableau 14.	L'Evapotranspiration Selon la Méthode Blanney-Criddle.....	79
Tableau 15.	L'Evapotranspiration Selon la Méthode Blanney-Criddle.....	79
Tableau 16.	Comparaison entre les différentes méthodes .....	79
Tableau 17.	Fraction d'Eau Facilement Utilisable (RFU) .....	80
Tableau 18.	Variation mensuelle du bilan hydrique, RU =100 % capacité au champ .....	81
Tableau 19.	Variation mensuelle du bilan hydrique, RU =RFU .....	81
Tableau 20.	Variation mensuelle du bilan hydrique, RU =0.....	81
Tableau 21.	Tableau Récapitulative des Apports Moyens Annuels.....	83
Tableau 22.	Statistqie descriptive des parametres physiques .....	92
Tableau 23.	Variabilité du calcium Ca <sup>++</sup> des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018) .....	92
Tableau 24.	Staistqie descriptive des cations .....	95
Tableau 25.	Staistique descriptive des canions .....	99
Tableau 26.	Liaison variables-facteurs.....	101
Tableau 27.	Facteurs des échantillons d'eau.....	102
Tableau 28.	Indice de stauration des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene.....	105
Tableau 29.	Matrice de corrélation de Pearson .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 30.	Coefficient de détermination .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 31.	Inventaire des puits et forages dans le bassin de Télijdjene .....	126
Tableau 32.	Porosité totale et efficace de divers sédiments (Chapellie r, D., MARI, J.L., 1998).....	143

## **Introduction**

Les présents travaux de recherche s'intéressent à l'application des méthodes multidisciplinaires en zone semi-aride et ils sont focalisés sur les aspects hydrogéologiques tels que l'identification des paramètres hydrodynamiques. Néanmoins, les résultats de cette thèse pourront être généralisés et appliqués à d'autres régions en particulier celles qui manquent de données climatiques et de chroniques de mesures des paramètres hydrogéologiques. De nombreux travaux de recherche ont été effectués afin de synthétiser les méthodes d'évaluation de ressources en eau de vue hydrodynamique et hydrogéochimique. Ces approches méthodologiques fondées sur l'analyse des paramètres hydrodynamiques des nappes aquifères ont établi les démarches qu'on doit suivre pour la compréhension du fonctionnement des aquifères et l'évaluation de ses ressources en eau. Néanmoins, ces approches ne sont pas applicables aux régions souffrant de manques de données voire absence totale, tel que les chroniques piézométriques, les essais de pompage ainsi que les données climatiques et dont l'exploitation et le traitement des données disponibles ne fournissent pas assez d'informations pour localiser les zones les plus favorables à l'implantation des forages pour subvenir aux besoins locaux en eau.

### **Problématique :**

Au cours des dernières décennies, le développement économique et social des municipalités du district de Télijdjene, qui comprend la zone d'étude, a généré une demande en eau forte et croissante. De plus, les activités agricoles intenses ont exercé une pression sur les différentes ressources en eau. Cette surexploitation, en plus des aléas climatiques (climat semi-aride), a entraîné une baisse importante des niveaux piézométriques des aquifères du Maastrichtien et de l'Eocène. L'exploration d'autres ressources est nécessaire, et les aquifères du bassin de Teliidjene constituent des ressources potentielles et méritent de faire l'objet d'une étude plus détaillée et approfondie. Ainsi, une bonne connaissance des caractéristiques des aquifères de ce bassin est nécessaire pour mieux les exploiter et les préserver de la contamination. Les infrastructures, réalisées par la Direction des Ressources en Eau depuis le début des années 1980, ont été insuffisantes pour répondre aux besoins en eau potable et en irrigation de la région étudiée. Ainsi, l'absence d'études hydrogéologiques pour examiner les données géoélectriques existantes a entraîné de nombreux problèmes dans la mise en œuvre de ces infrastructures. Des études antérieures menées sur le bassin adjacent de Cheria (Baali, 2007) et l'aquifère de "Meskiana" (Gouaidia, 2008), un "anticlinal" avec une structure hydraulique similaire à celle du bassin étudié ; ont rapporté l'influence de la structure géologique sur les conditions de recharge des aquifères et de stockage des eaux souterraines. Baali, dans sa thèse sur la zone de Cheria située

à 10 km, estime que la pluviométrie moyenne est de 200 mm/an, ainsi toutes les recherches menées dans le même contexte semi-aride révèlent que, sauf en milieu karstique, l'infiltration est minime ou négligeable, ne constituant qu'un appoint. Dans ce contexte climatique sec, il est nécessaire de comprendre et d'améliorer les connaissances concernant les conditions des processus de recharge et de stockage et de définir l'influence des facteurs qui les contrôlent, à savoir les caractéristiques morphométriques, hydrodynamiques, hydrogéochimiques et la structure hydrogéologique des aquifères du bassin.

### **Les objectifs**

Les principaux objectifs de cette étude sont d'évaluer la ressource en eau et d'améliorer la connaissance du système aquifère dans le bassin de Telidjene en utilisant une nouvelle approche efficace, rapide et à faible coût pour aider les autorités locales dans la prise de décision et la planification du développement pour mettre en œuvre un développement méthodologique pour améliorer les connaissances (contexte climatique, géométrie des aquifères, paramètres hydrodynamiques, recharge) sur le système aquifère dans le bassin de Télijdjene, avec de nouveaux outils, en vue de l'installation d'ouvrages de captage d'eau potable.

Les objectifs spécifiques consistent à :

- 1) cartographier les caractéristiques morphométriques du bassin versant au moyen d'images satellitaires ;
- 2) reconstituer la structuration lithologique à travers les coupes des forages déjà disponibles ;
- 3) affiner la reconstitution lithologique par une cartographie de terrain et une caractérisation des horizons en profondeur par des mesures géophysiques ;
- 4) Faire une étude climatologique en utilisant les outils de télédétection et de programmation informatique et élaborer un modèle automatisé et reproductibles.
- 5) faire une étude de la différenciation hydrochimique et la qualité des eaux du bassin versant ;
- 6) déterminer les propriétés hydrauliques des aquifères en utilisant les données de résistivité et l'élaboration d'une application dans l'environnement SIG et Python.

Le croisement de l'ensemble des réponses permettra de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale en particulier et le système aquifère en général. La connaissance de la géométrie, des propriétés hydrodynamiques du système aquifère et la distribution spatiotemporelle des potentiels constituent les éléments clés pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de ces hydrosystèmes et la détermination de leurs modalités d'exploitation, de gestion et de protection durable.

## **Organisation du mémoire**

Le plan de cette étude comporte six parties:

- 1) Une première partie, cadre général où il est retracé les différentes caractéristiques physico géographiques, géologique et climatique de la zone d'étude.
  - 2) Une deuxième partie, consacrée à l'étude du contexte climatique de la région d'étude utilisant différents outils et méthodes.
  - 3) Une troisième partie porte sur la détermination du contexte géologique et la structure du système aquifère en associant les informations existantes dans la littérature et ceux recueillis du terrain.
  - 4) La quatrième partie consacré à un traitement des données hydrochimiques par les outils de géochimie et de la statistique multivariée afin de définir des principaux facteurs régissant l'hydrochimie
  - 5) la cinquième partie porte sur l'identification de la géométrie des aquifères en utilisant l'interprétation des données géo-électriques, de forages, et de gravimétrie.
  - 6) La sixième partie a porté sur la détermination de la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques issus du traitement des données de résistivité électrique travers un modèle bâtie par un outil de programmation visuelle exporté vers un code Python dans l'environnement SIG.
- Enfin, nous donnerons en dernière partie la conclusion et des perspectives.

# **I. CHAPITRE**

## **CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE**

## **1. Situation géographique**

Cette étude se concentre sur le bassin de Telidjene, qui est géographiquement situé à l'extrémité est de l'Atlas saharien, avec une superficie de 547 km<sup>2</sup>. Administrativement, il appartient à la commune de Telidjene, située à environ 70 km au sud-ouest du chef lieu de la wilaya de Tébessa (Fig. 1).

La région est localisée sur la carte topographique de Telidjene et sur la carte de Cheria au 1/50.000, une partie de la feuille de Bir Sbeikia.

La région est caractérisée par un climat semi-aride avec un hiver relativement froid et pluvieux et un été très chaud et sec.

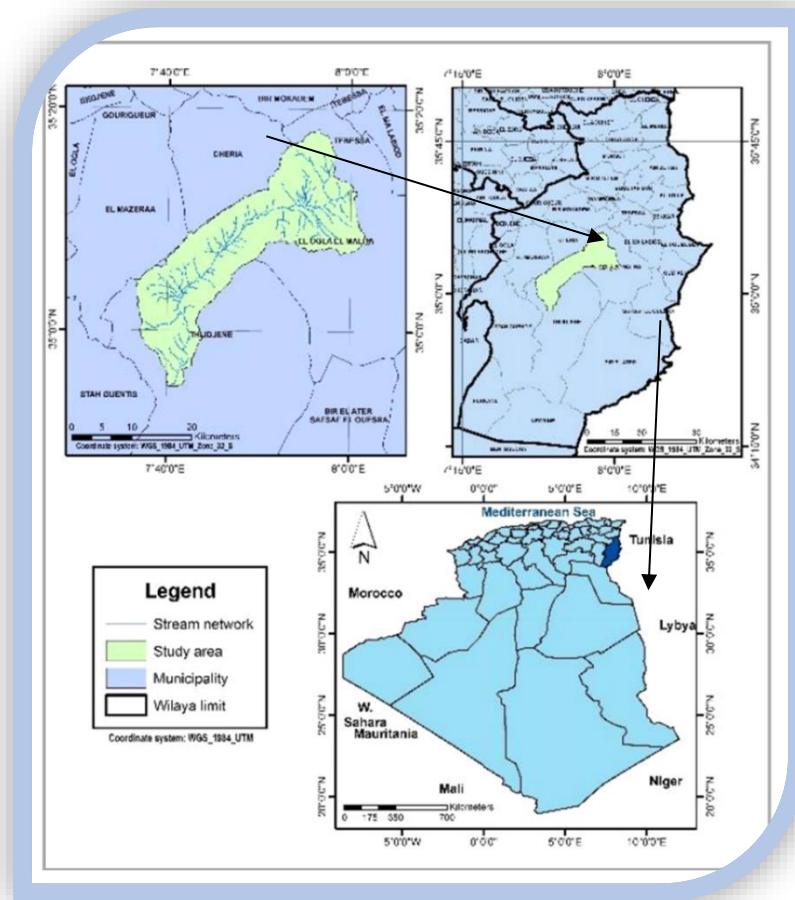
## **2. Caractéristiques générales de la zone d'étude**

La région de Télidjene est située dans le nord des Monts des Némentchas, elle se compose de deux régions naturelles bien distinctes :

- a- Au nord, les reliefs s'organisent autour d'un crêt anticlinal localement dédoublé orienté Sud-Ouest –Nord-Est, qui se ferme au sud-ouest par les Djebel Dehar et Arhrour el Kifène.

La vaste plaine de Télidjene limité par ce crêt est drainée vers le sud par l'Oued Télidjene est accidenté par deux monts dérivés, à l'ouest le Hamimet Meskhouta surtout constitué de formations triasiques ET à l'est Hamimat Souda formés de calcaires aptiens.

- b- Au sud, il s'agit d'une région de plateaux de calcaires fracturés subtabulaires présentant le paysage typiquement dénudé des Nementcha.



**Figure 1** Carte de situation de la zone d'étude

### 3. La couverture végétale et plan d'occupation du sol

La carte d'occupation des sols (Fig. 2.a) a été dérivée de la plateforme cloud GEE (2020), tandis que la carte (Fig.2.b) a été obtenue par la numérisation de la carte d'occupation des sols de Tébessa éditée par l'Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID, 2011).

La carte originale (Fig.2.b) comporte 8 classes : forêts, routes, oued, bâti, cultures sèches, cultures non irriguées, cultures maraîchères, culture oculaire irriguée, sol nu zone avec sol rocheux, et pâturages. Plusieurs études ont montré que les changements dans l'utilisation des terres influencent fortement la recharge des eaux souterraines (Roose, 1973 ; Owuor et al., 2016 ; Pettorelli N et al, 2011) .

En dehors des zones où règne les cultures extensives où règne la culture du blé, ( plaine de Ain Télijdjene et fonds limoneux des plateaux méridionaux), c'est le paysage de la steppe d'alfa. Sauf quelques peupliers aux rares sources et le long des oueds, les arbres sont rarissimes et limités à quelques frênes et genévriers dans les secteurs les plus escarpés ou au fond des oueds montagnards.



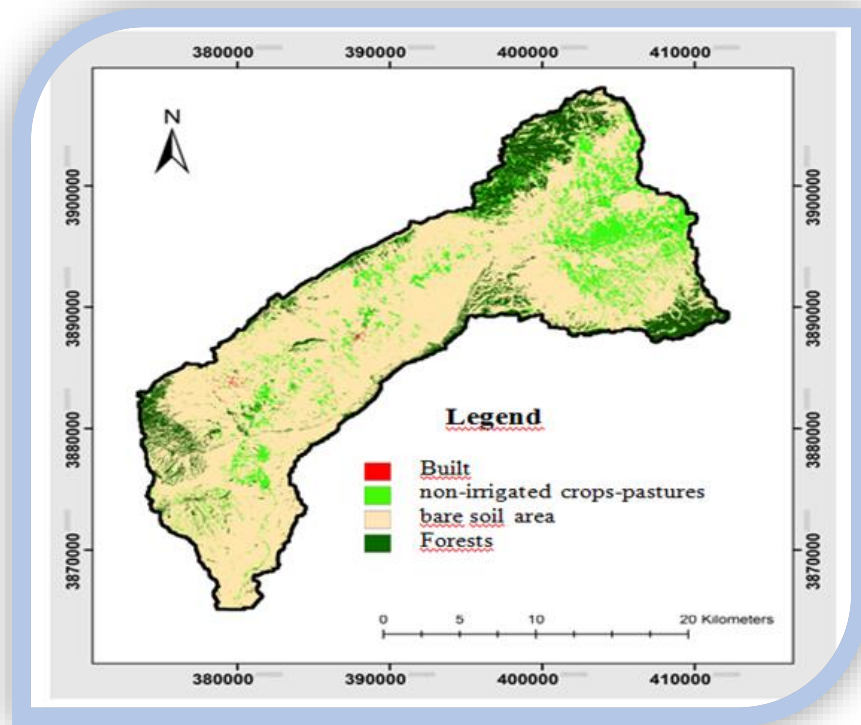


Figure 2.a Carte d'occupation des sols établie via la plateforme cloud Google Earth Engine (année 2020)

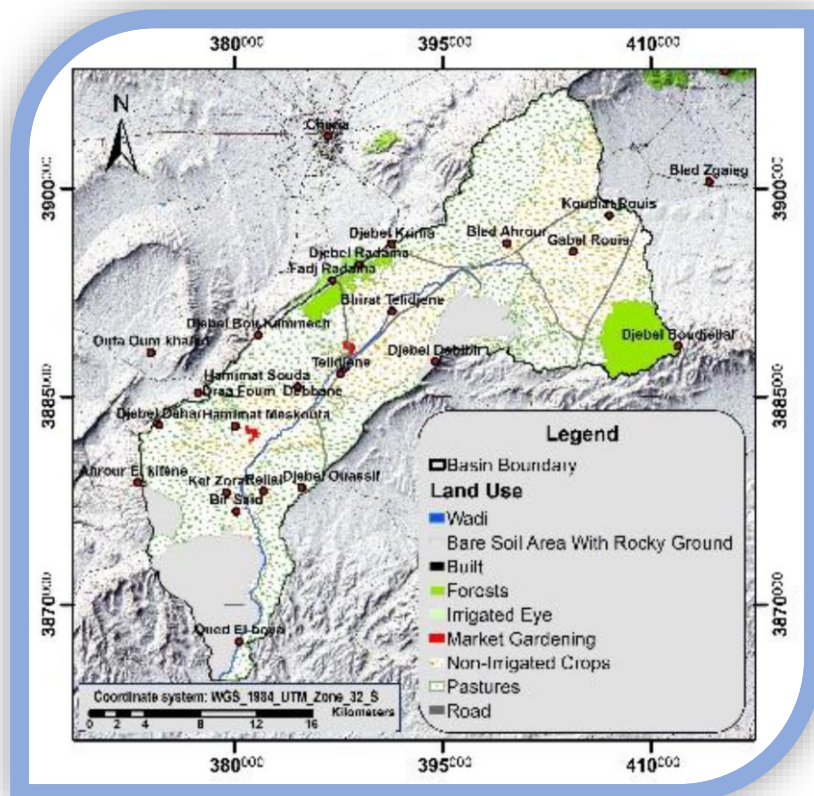


Figure 2.b Carte d'occupation selon INSID 2011modifiée

#### 4. PÉDOLOGIE

La nature du sol et l'épaisseur des horizons sont étroitement liées à la nature de la végétation et au type de roche mère, selon (J.H.DURANT, 1954), trois types de sol dominant dans le bassin :

- Une roche mère représentant des affleurements géologiques calcaires non évolués ; ces roches ne peuvent être perméables que par fissuration.
- Sols calcaiques peu épais, plus ou moins riches en calcaire, à complexe absorbant saturé surtout par du calcium, très pauvres en sels solubles et pouvant contenir des doses appréciables de matières organiques. Les matériaux qui les constituent sont façonnés par le vent et reposent le plus souvent sur des calcaires ou des gypses pulvérulents.

Ces sols présentent une variante à complexe absorbant relativement riche en magnésium.

- Sols calcaires qui ne présentent qu'un seul horizon différencié riche en calcaire, Ces sols une texture légère et sont donc perméables, cette perméabilité varie en fonction de la variabilité de la variété humifère. Leur végétation est variable, elle peut être herbacée ou forestière.

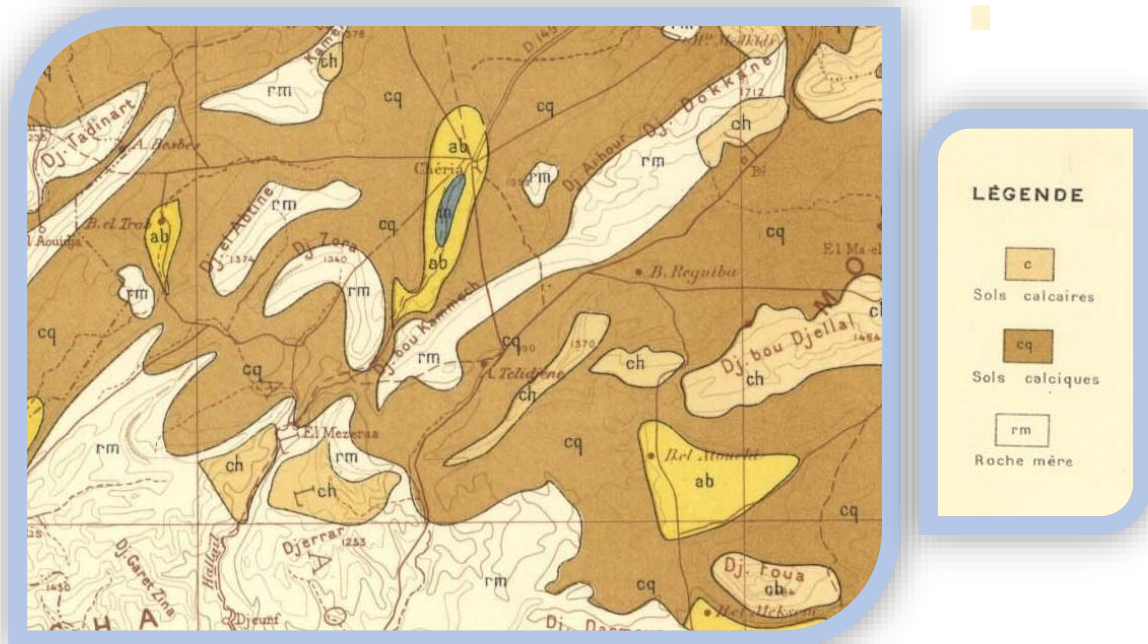


Figure 3. Carte du sol de la région de Télijdjene

## 5. Aperçu géomorphologique

La plaine de Télijdjene correspond à un dôme de calcaires maestrichtiens dont le cœur a été dégagé par l'érosion jusqu'au niveau du turonien, sa limite naturelle est de forme elliptique entouré par des massifs maestrichtiens; Djebel Dbibir 1378 m, Djebel el Bib, Fedj (el Mazaa, el Aatrous, Esseersser) à l'Est, par Djebel Dhehar, Dj Boukemeche 1378m, Dj Zerharata et Djebel RADAMA à l'Ouest, Au Nord par Djebel KRIMA 1329M, et Koudiat el AHROUR 1197m, tandis qu'au sud, la plaine est limitée par les massifs de Araour el Kifene 1310 et Djebel Oussif.

Ces massifs sont entaillés par de nombreux cols, en particulier au Sud-Ouest (FEDJ EN NEHAL).

Une colline marque le centre de la plaine de Télijdjene (Djebel HAMIMAT SOUDA), elle est constituée par des affleurements albo-aptiens. Des reliefs accentués apparaissent également au sud-ouest, correspondent à des affleurements de uronen et du trias.

La partie sud de la plaine est drainée par l'oued de Télijdjene qui s'écoule vers l'exutoir bassin versant par le col de TENIET REAILIA.

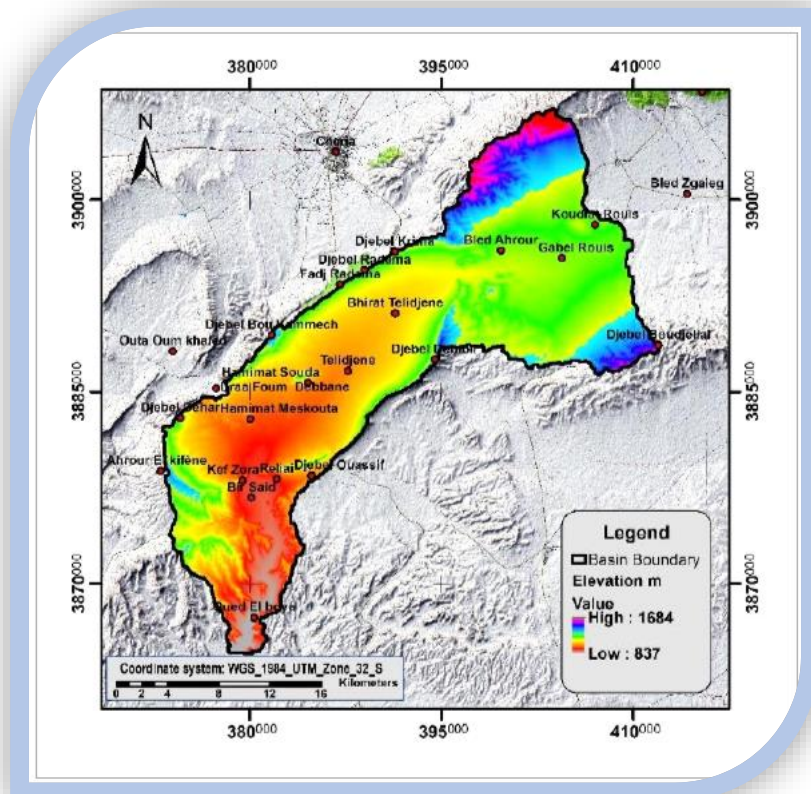


Figure 3 Carte topographique de la zone

## **6. Cadre climatique et hydrologique :**

### **1. Climat :**

Caractérisé par l'alternance de deux saisons, l'une chaude et sèche, l'autre froide et humide, le climat de la région de Télijdjene est marqué par une faible moyenne pluviométrie, inférieure à 300 mm. La neige peut se manifester sur les sommets entre les mois de Novembre à Mars, bien qu'il ne soit pas contrôlé par des mesures, l'enneigement est estimé à 5-10 jours par an. A noter que de très violents orages peuvent donner des quantités importantes d'eau durant les mois de Juin, septembre et Octobre.

### **Précipitation et Température :**

La pluviométrie est une composante essentielle du cycle hydrologique. En hydrogéologie, et en particulier pour les nappes phréatiques, elle conditionne l'alimentation et représente le premier facteur de recharge, quant à la température, elle représente deuxième facteur qui conditionne entre autre l'évaluation du déficit d'écoulement et, par conséquent le bilan hydrologique, En se basant sur les données et informations émanées de la station du bassin de Cherea adjacent à celui de Télijdjene, La pluviométrie moyenne annuelle calculée sur une période de 23 ans est de l'ordre de 236 mm, tandis qu'en raison de l'absence totale de station thermique à Cheria, on a considéré les températures de la station de Tébéssa située sur les mêmes latitudes bioclimatiques que la zone d'étude.

Les températures moyennes annuelles, minimales et maximales relevées sur un période de 23 ans à la station de Tébéssa sont respectivement de 15.26, 8.54 et 21.86 °C. Les minima et maxima absolus sont de 1.46 et 33.73°C.

### **L'évaporation :**

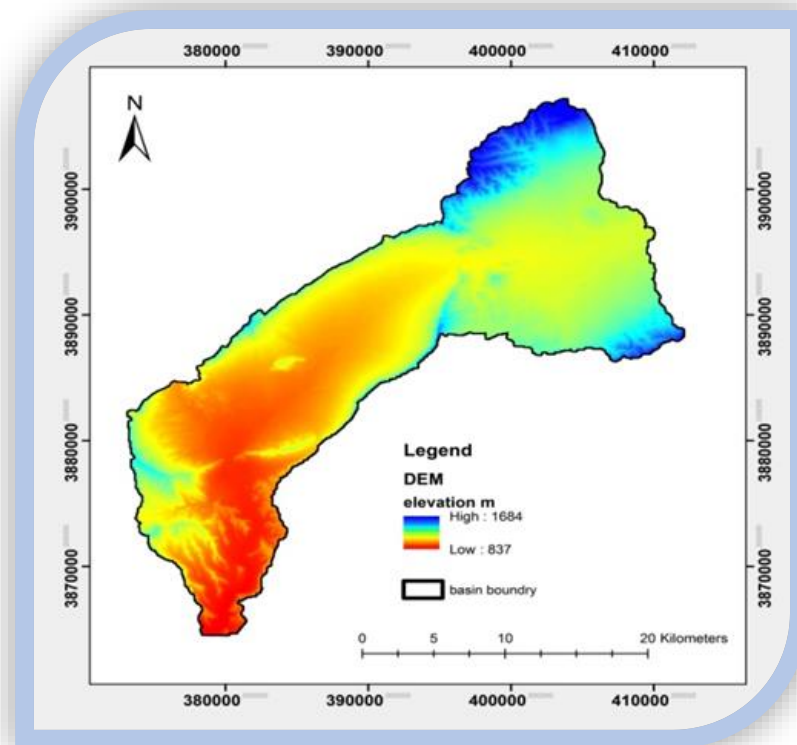
Cette dernière est fonction des facteurs physiques et biologiques (l'humidité, la température, l'insolation, la vitesse du vent, la pression atmosphérique .....etc.)

L'ETP correspond à l'évapotranspiration d'une surface couverte par une végétation à son stade de développement maximal et qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatique «Roche 1953 ».

### **2. Caractéristiques morphométriques du bassin**

Pour caractériser l'environnement physique du bassin versant de l'Oued Télijdjene, nous avons calculé les différents paramètres et des indices morphométriques et leur influence sur l'écoulement des eaux superficiels (Narmatha et al) en utilisant une carte MNT issue

d'images SRTM résolution 30m (fig.01), la carte et la courbe hypsométrique (fig.05-fig.06) issues du traitement de celle-ci.



**Figure 4** Modèle Numérique du terrain du bassin de Télijdjene

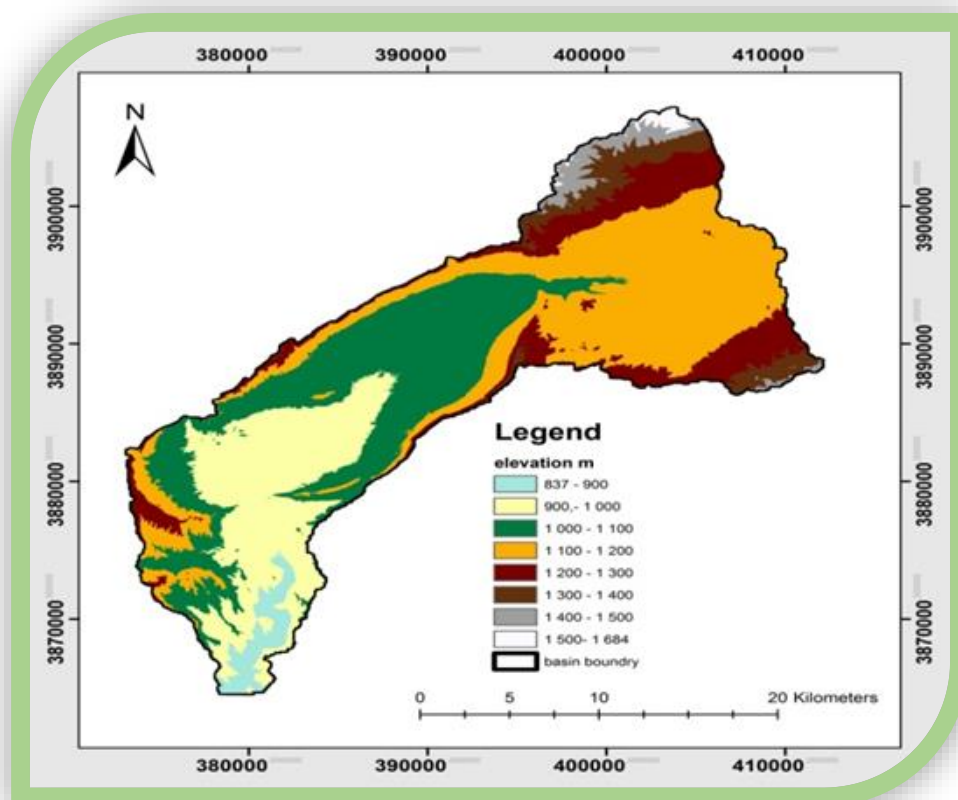
Le bassin de Télijdjene couvre une superficie de 574 km<sup>2</sup> avec un périmètre de 190 km. Le rectangle équivalent à une longueur et une largeur respectives de 88,84 et 6,16 Km, le coefficient de Gravélus égal à 2.27 donc supérieur à 1 ce qui explique la forme allongée du bassin.

Le relief (Figure 5) est caractérisé par une différence d'altitude de 811 m comprise entre le point le plus haut (1648 m) et l'exutoire (837 m) du bassin de Télijdjene (fig.3). Cette différence influe sur la vitesse de ruissellement et sur la densité de drainage. (Tableau 2)

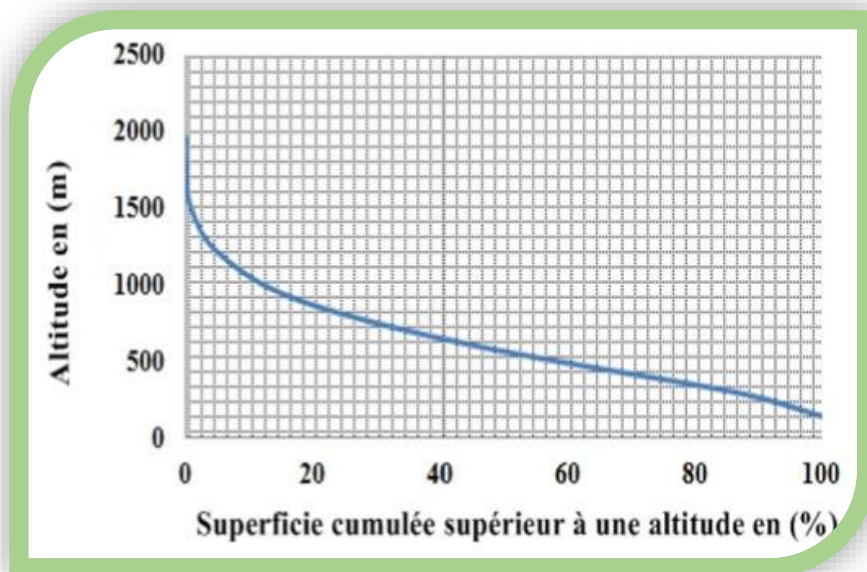


**Tableau 1** Caractéristiques géométriques du bassin de Télidjene

Paramètre	Formule	valeur	Observation
Superficie Km <sup>2</sup>	S	547	
Périmètre Km	p	190	
L'indice de compacité de gravelus	$KC = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	2,27	Forme allongée, bassin mal drainé
Longueur rectangle équivalent Km	$L = \frac{KC\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \left( \frac{1.12}{KC} \right)^2 \right]$	88,84	Longueur 14 fois plus grande que la largeur
Largeur rectangle équivalent Km	$L = \frac{KC\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \left( \frac{1.12}{KC} \right)^2 \right]$	6,16	
Facteur de forme	$L^2/S$	=	
Indice de conformité	$S/L$		
Coefficient de compacité	$L/l$		



**Figure 5** Carte hypsométriques

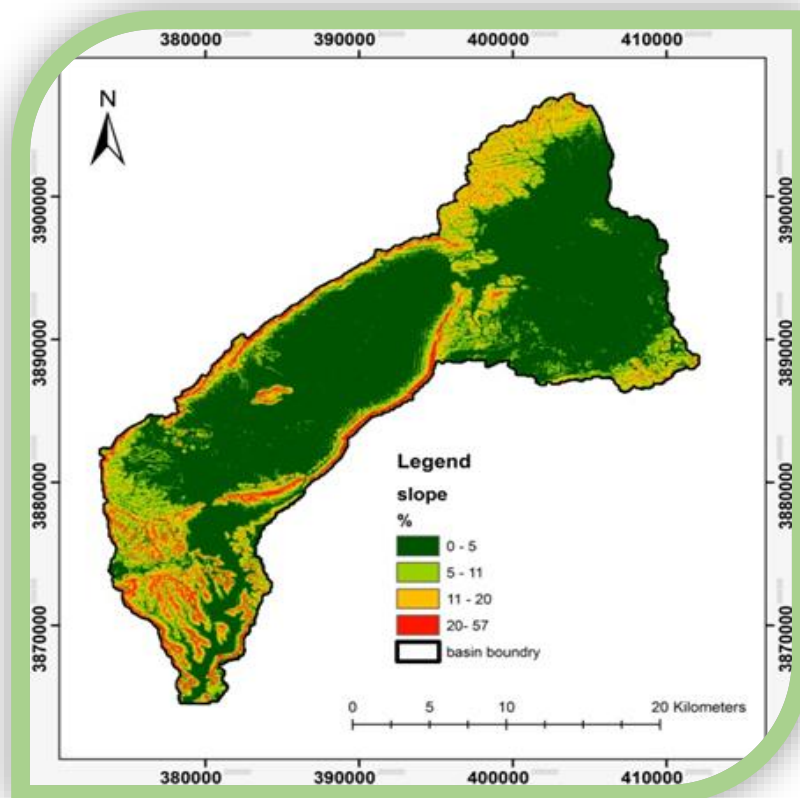


**Figure 5** Courbe hypsométrique

**Tableau 2** Paramètres du relief

Paramètre	valeur	Observation
Altitude moyenne m	1116,67	Dénivelé importante, variation facteurs climatiques.
Altitude maximale m	1648,00	
Altitude minimale m	837,00	
Altitude de fréquence 95%	943,75	
Altitude de fréquence 50%	1108,91	
Altitude de fréquence 05%	1400,00	
Pente moyenne %	9,13	Faible, rare risque d'érosion, risque d'inondation freq.
Indice de pente globale m/Km	5,14	Relief très fort

Concernant les pentes, elles sont subdivisées en quatre classes : • Classe 1:  $0\% \leq \text{Pente} \leq 5\%$  ; • Classe 2:  $5\% \leq \text{Pente} \leq 11\%$  ; • Classe 3:  $11\% \leq \text{Pente} \leq 20\%$  ; • Classe 4:  $\text{Pente} > 20\%$ ,

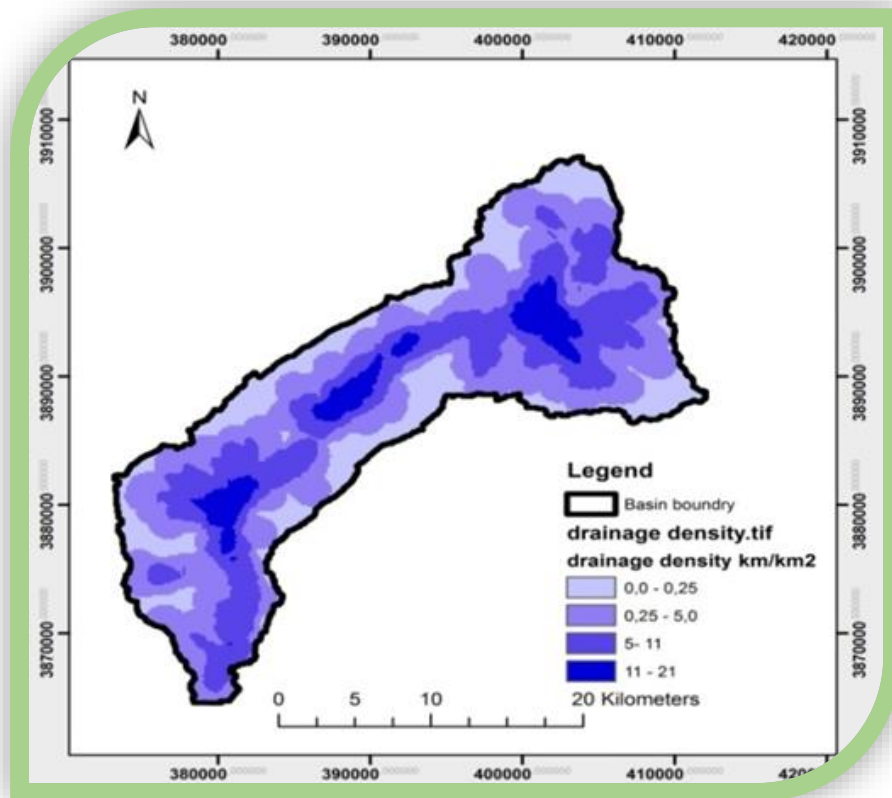


**Figure 6** Carte des pentes

La densité de drainage peut être classée de faible à forte témoigne la présence d'un risque d'érosion hydrique et d'inondations au niveau le plus bas (Horton, 1945). Les paramètres morpho métriques permettent de faire les conclusions suivantes :

- forme allongée du bassin qui ralentie la réponse hydrologique (M.Roche, 1963)
- des altitudes qui décroissent vers le sud-ouest, la zone nord est la plus arrosée (DOUGUEDROIT& SAINTIGNON,1984)
- pente moyenne faible impliquant une faible vitesse et une faible érosion du relief (ROOSE 1977, 1984)



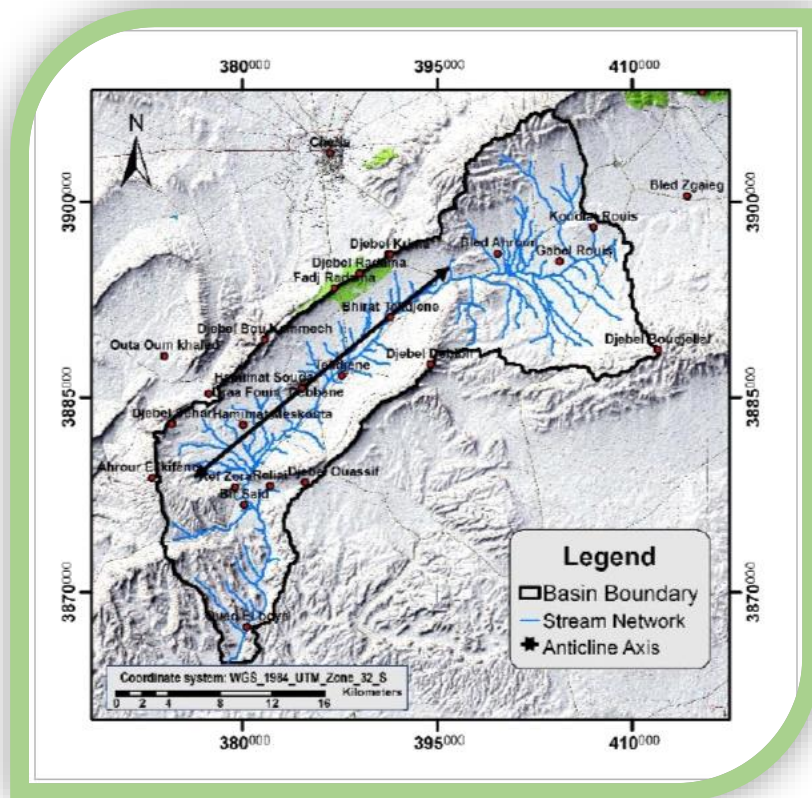


**Figure 7** Carte de densité de drainage

**Réseau hydrographique :**

Les eaux de surfaces du bassin de Télijdjene sont drainées par oued Télijdjene, La plus part de ces cours d’eaux sont caractérisés par un écoulement temporaire lié aux pluies irrégulières de la région (fig.4).

Le réseau hydrographique est peu développé lié à un climat semi-aride résultat d’un rythme de précipitation relativement modérée ( Hauchart, 2001), il est représenté avec des petits cours d’eau temporaires aux larges vallées bien élaborées. La longueur du talweg principal est de 94km



**Figure 8** Carte du réseau hydrographique

### Activités économique

La région de Télijdjene est classée en « Zone de la steppe et de l’Atlas saharien », elle est caractérisée par la faiblesse des densités de peuplement, la modeste production agricole végétale, l’absence d’activité industrielle, des infrastructures routières assez sommaires, la faiblesse de l’urbanisation et la rareté des agglomérations, quelques exploitations minières’’ extraction de « tout-venant » en sont les principales richesses.

Le développement de la zone reste freiné par l’insuffisance des infrastructures de liaisons. Bien que la zone est caractérisée par ses terres agricoles, aucune politique de promotion de cette dernière n’est instauré (mis à part quelques cas isolées d’agriculteurs adhérents aux programmes de soutien agricole qui ne pourra avoir effet sur l’économie local), notamment la mobilisation des ressources en eau nécessaire pour l’irrigation comme la réalisation des forages, des barrages d’eau et des retenues collinaires. La région un potentiel touristique important en l’occurrence le patrimoine romain qui demeure dégradé et inexploité (BOUBIR, 2017 ; DPAT TEBESSA , 2016).

## REFERENCES

**BOUBIR, H. M. (2017).** UNE STRATEGIE PARTICIPATIVE DE DEVELOPPEMENT LOCAL. LE CAS DU TERRITOIRE DE TEBESSA EN ALGERIE.

**DIRECTION DE LA PLANIFICATION ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE DE TEBESSA (DPAT) (2016).** ANNUAIRE STATISTIQUE, TEBESSA

**DOUGUEDROIT, A., & DE SAINTIGNON, M. F. (1984).** LES GRADIENTS DE TEMPERATURES ET DE PRECIPITATIONS EN MONTAGNE. REVUE DE GEOGRAPHIE ALPINE, 72(2), 225-240.

**DURANT, J.H., (1954).** NOTICE EXPLICATIVE DE LA CARTE DES SOL DE L'ALGERIE

**HAUCHARD, E., 2001.** DE LA DYNAMIQUE NON LINEAIRE A LA DYNAMIQUE DU RELIEF EN GEOMORPHOLOGIE – APPLICATION AUX BASSINS VERSANTS DE LA MARGE NORD-OCCIDENTALE DU BASSIN DE PARIS. THESE DE DOCTORAT. UNIVERSITE DE ROUEN. 3 VOLUME 2001, 730 P.

**HORTON, R. E. (1945).** EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS: HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. BULLETIN OF GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 56(3), 275-370.

**NARMATHA T., JEYASEELAN A., MAHALINGAM S., NATCHIMUTHU S. (2013).** MORPHOMETRIC ANALYSIS OF UPPER PART OF PAMBAR WATERSHED, PONNAIYAR RIVER BASIN, TAMIL NADU, INDIA USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. J. ACAD. INDUS. RES; 1(11): 726-729

**PETTORELLI, N., RYAN, S., MUELLER, T., BUNNEFELD, N., JĘDRZEJEWSKA, B., LIMA, M., & KAUSRUD, K. (2011).** THE NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI): UNFORESEEN SUCCESSES IN ANIMAL ECOLOGY. CLIMATE RESEARCH, 46(1), 15-27.

**ROCHE, M. (1963).** HYDROLOGIE DE SURFACE (No. 551.49 R6). STRAHLER (1957),

**ROOSE É. (1977).** ÉROSION ET RUISSELLEMENT EN AFRIQUE DE L'OUEST. VINGT ANNEES DE MESURES EN PARCELLES EXPERIMENTALES. ÉDIT. ORSTOM, PARIS, COLLECTION TRAVAUX ET DOCUMENTS, N° 78, 108 P.

**ROOSE É. (1984).** CAUSES ET FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE SOUS CLIMAT TROPICAL : CONSEQUENCES POUR LES METHODES ANTIEROSIVES. MACHINISME ET AGRICULTURE TROPICALE, VOL. 87, P. 4-18. ;

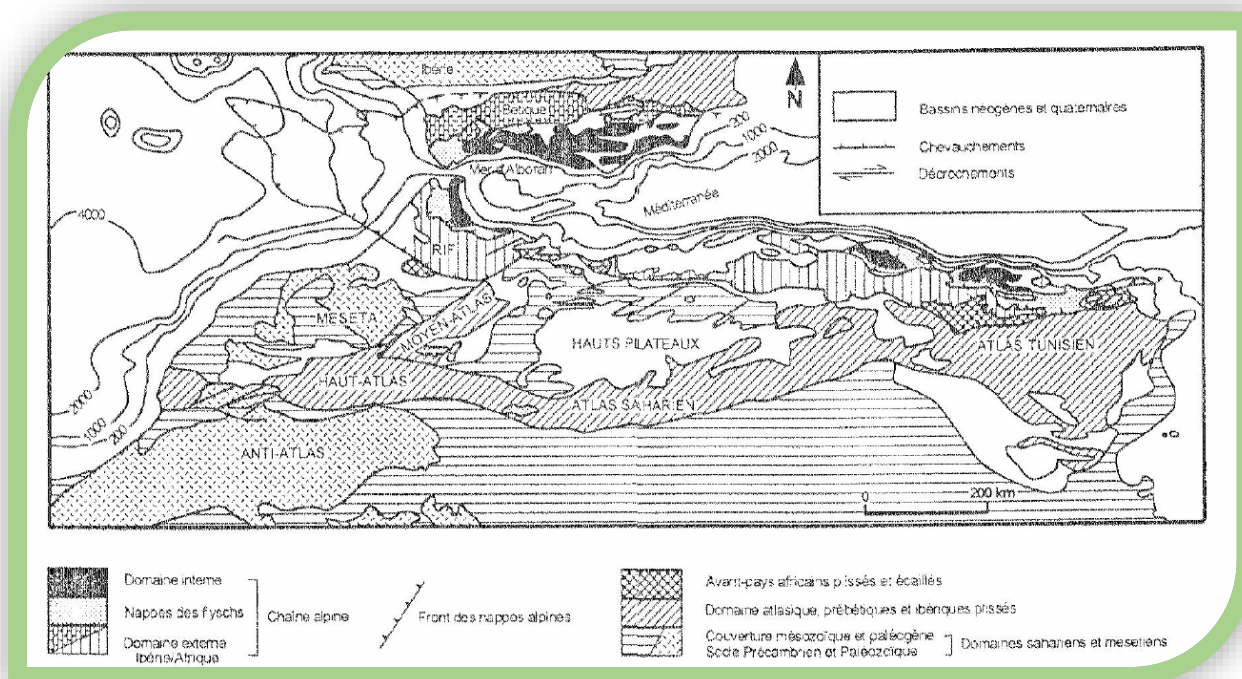
## **II. CHAPITRE**

# **APERÇU GEOLOGIQUE**

Le cadre géologique de la région a été établi sur la base des études géologiques antérieures. Dans cette vaste région, la géologie est à la fois complexe et diverse sur tous les plans (structures, stratigraphie, faciès...).

La chaîne alpine d'Algérie du Nord fait partie de la chaîne des Maghrébides (Durant Delga, 1950) qui s'étale de Gibraltar jusqu'à la Sicile en passant par le Maroc, l'Algérie et la Tunisie (**Fig.10**). Elle se présente sous forme d'anneaux concentriques, très aplatis, allongés d'Ouest en Est, sur 2000Km. Cette chaîne résulte de la structuration du bassin maghrébin et de ses marges. Ce dernier, se situait entre les marges continentales africaines et européennes Bouillin , (1986). Les structures constituant la chaîne des Maghrébides sont à vergence sud et sont issues de trois domaines paléogéographiques principaux :

- Le domaine interne
- Le domaine des Flyschs
- Le domaine externe



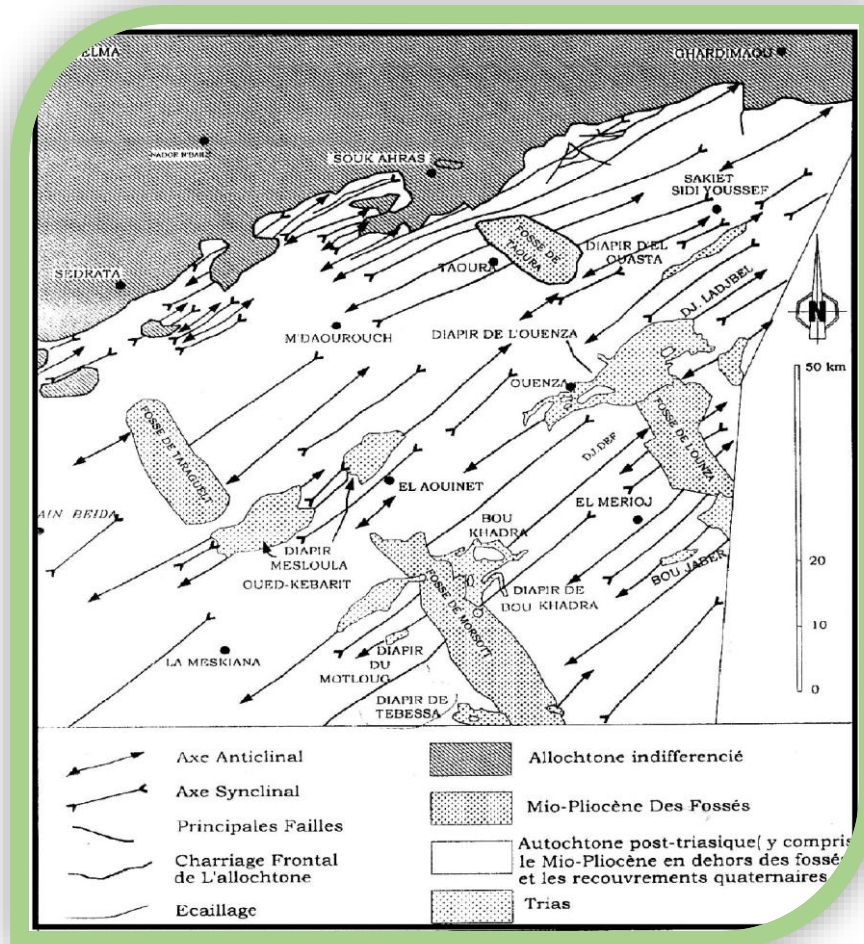
**Figure 9** Cadre structural africain et ibérique de la chaîne tello-rifaine (d'après Wildi, 1983).

### Aspects structuraux de l'Atlas Saharien

L'examen de l'esquisse tectonique de J.M.Vila, 1980 (**fig. 11**) révèle les traits particuliers de l'Atlas saharien oriental. En effet, on constate :



- Alternances d'anticlinaux et synclinaux de direction atlasique (NE-SW)
- Orientation NW-SE des fossés d'effondrement
- Corps triasique orientés selon une direction atlasique.



**Figure 10.** Schéma structural de l'autochtone des confins algéro-tunisiens (d'après Vila, 1980)

### les plissement

En Algérie orientale, la phase majeure a été considérée comme étant comprise entre l'Eocène et le Miocène (Dubourdiou et Durozoy, 1950 ; Dubourdiou, 1956 ; Blès, 1969 ; Blès et Fleury, 1970 ; Vila, 1980 ; Kazi-Tani, 1986). Il en résulte un plissement de direction (NE-SW) dit direction atlasique. Ils correspondent aux anticlinaux de l'Ouenza, Boukhadra , Essouabaa, Boujaber (Dubourdiou;1952) et aux vastes structures synclinales ( Dyr,Dra esnouber,Belelfif...).

Les anticlinaux sont souvent percés dans leurs charnières par du Trias, et leur ossature est constituée par des formations récifales d'age Albo-aptien (Masse et Chikhi-Aouimeur, 1992 ; Perthuisot et Rouvier, 1992 ; Aoudjahane et al,1992,1994). Ils présentent des fermetures

périclinales à chaque extrémité et sont interrompus par des accidents orthogonaux qui bordent les fossés d'effondrement (fig.12). (Bouzenoune,1993)

### **Les fossés d'effondrement**

Ils caractérisent la partie orientale de l'Atlas Saharien et sont orientés NW-SE à E-W. Leur orientation est orthogonale par rapport à la direction de plissement. Ces fossés se suivent sur plusieurs kilomètres. Ils sont limités par des accidents majeurs ayant joués en failles normales (Bouzenoune,1993). Cette structure est considérée comme résultant d'une phase tectonique distensive post-Miocène ( Dubourdiou ,1956; David,1956; Castany,1951; Kazi-Tani,1986).

Cette dernière, donne naissance aussi aux bassins subsidents (Kowalski et Hamimed,2000). Ces fosses sont comblées par de puissants dépôts du Plio-Quaternaire atteignant jusque 170m dans le fossé de Tébessa-Morssott (Dubourdiou et al ,1950).

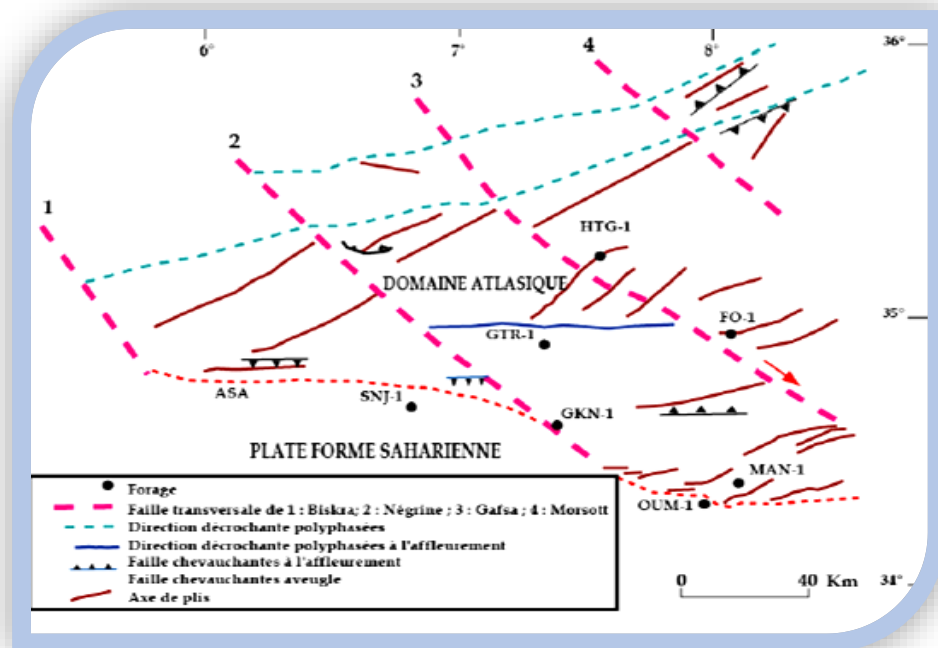
### **Les diapirs**

Dans la partie orientale de l'Afrique du nord (Atlas Tunisien en Tunisie, monts de Mellégue aux confins algéro-tunisien) existe la zone de diapirs de 80 Km de largeur de direction NE-SW.

Les " percements diapiriques" sont liés principalement aux phases distensives albo-aptienne, tertiaire et quaternaire (Dubourdiou,1956 ; Thibieroz et Madre,1976 ; Rouvier et al,1985 Othmanine,1987 ; Perthuisot et al,1987 ; Audjehane et al,1992 ; Bouzenoune,1993 ; Bouzenoune et al,1995 ; Kowalski et Hamimed,2000). Les manifestation halocinitiques et /ou diapiriques ont été enregistrés à diffèrent périodes (Fig.11):

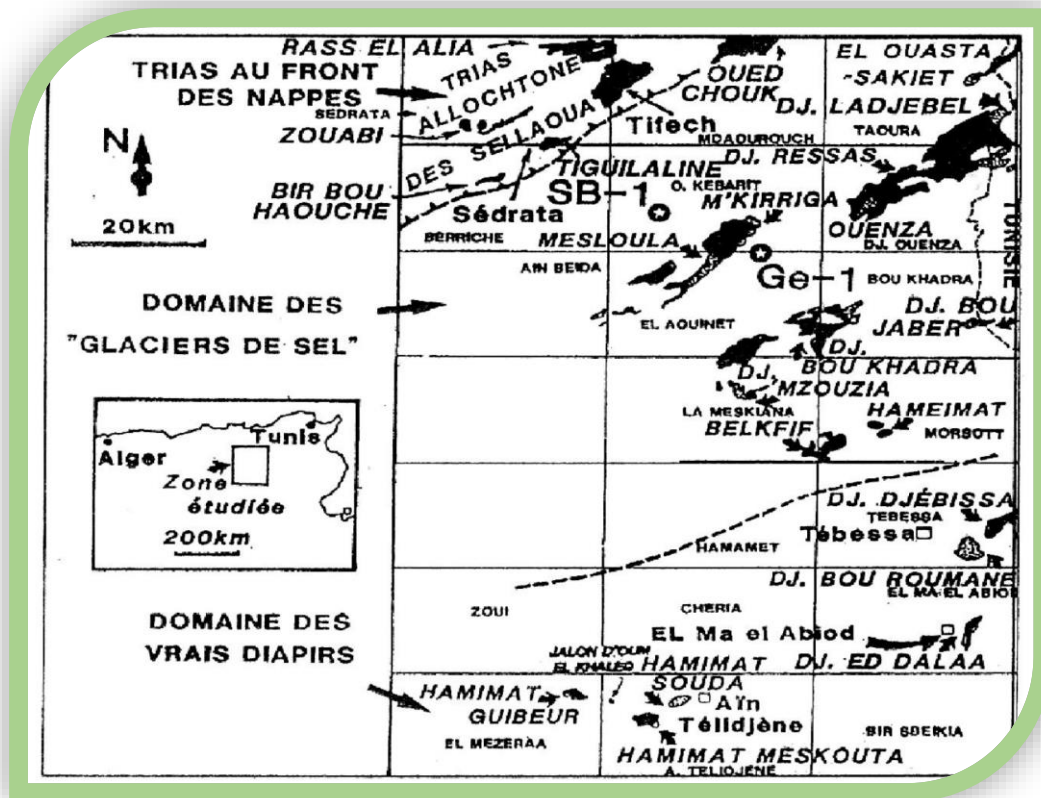
- ✚ La plus ancienne manifestation halocinitique est enregistrée pendant l'Aptien.Elle est enregistrée par la présence de galets triasiques remaniés dans les calcaires aptiens signalés à l'Ouenza par Dubourdiou (1956), puis par Thibiéroz et al. (1976),et à Mesloula par Dubourdiou (1959), Masse et al. (1982) et Boukhadra par Nédjari et al., (1984) et enfin à M'Zouzia par Othmanine (1987).
- ✚ La deuxième manifestation est signalée au Vraconien. Elle a été enregistrée à la base des calcaires Vraconiens reposant directement sur le Trias par l'intermédiaire d'un niveau conglomératique remaniant des galets de dolomies triasique, à l'Ouenza par : Thebieroz et al., (1976), Masse et al., (1982), à Sata par Bolze, (1954) ; Smati (1986)...
- ✚ Une troisième manifestation est signalée au Cénomaniens au Djebel Lorbeus par V. Perthuisot, (1978) et à Belkfif Othmanine (1987).

- ✚ La quatrième manifestation a été relevée au Sénonien par Lessard, (1955), Camoins et al., (1990), où des galets triasiques ont été trouvés remaniés dans les calcaires sénoniens de Khenchela.
- ✚ Au Miocène à Boukhadra( Thibiéroz et al, 1976) et à Mesloulou du ( Dubourdieu , 1956, 1959) ont retrouvés des galets triasiques remaniés dans les sédiments du Miocène.
- ✚ La dernière manifestation a été relevée au Villafranchien par Othmanine (1987) au Sud de Belkfif..Ces pointements triasiques sont considérés comme diapir par certains auteurs comme Dubourdieu ,1956 et 1959 ; Thibieroz et al., 1976 ; Bouzenoune ,1993 ; et Bouzenoune et al., 1995).
- ✚ Selon Vila , "la zone des diapirs" est subdivisée en:
  - un domaine à "vrais diapir" situé au sud de Tébessa pour lequel des interprétation classiques " ne sont pas contestées (Fig 13).
  - un domaine de "glacier de sel", situé Au Nord de Tébessa incluant en gros les structures des monts du Mellègue (Vila,1993,1994,1995,1996,2001 ;Vila et Charrière,1993 ;Vila et al,1996). Ce domaine est interprété par la superposition du matériau triasique sur la série crétacé en polarité normale. Il est considéré comme stratigraphique du fait de sa disposition en lame limitée à la base et au sommet par" un contact normal inférieur et supérieur" souligné par des conglomérats à éléments de Trias (fig. 13)



**Figure 11.** Carte structurale simplifié du Sud Est Constantinois (Kheidri.L.H, 2001)



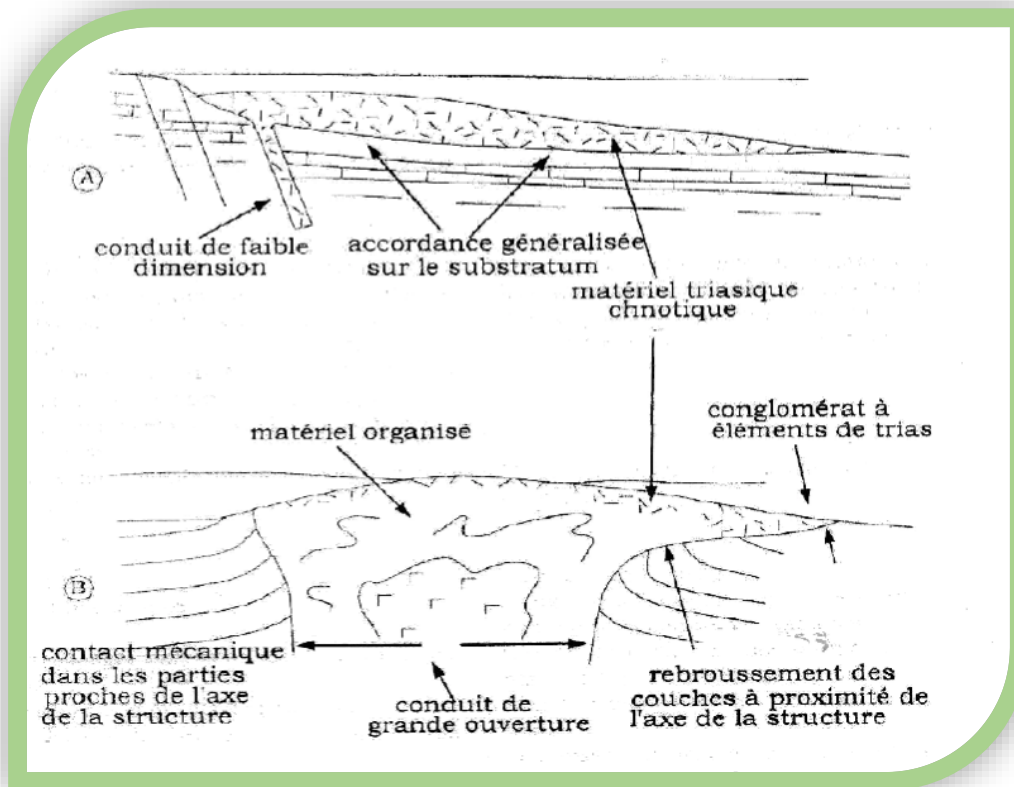


**Figure 12.** Localisation des principaux affleurements du Trias des confins algéro-tunisien et du distinction du deux domaine des « glacier du sel et du domaine des vrais diapirs Vila (1994).

### LES PRINCIPALES PHASES TECTONIQUES

La structure actuelle de l'Atlas Saharien Oriental en plis coffrés de direction NE-SW devenant E-W à l'approche de l'Accident Sud Atlasique (monts de Négrine) ainsi que la fracturation de direction NNE-SSW, NW-SE, NE-SW, E-W et N-S est le résultat d'une phase majeure compressive atlasique qui a affecté cette région à l'Eocène, d'Ouest en Est.

Cependant, d'autres phases orogéniques sont identifiées, elles sont antérieures ou postérieures à cette dernière.



**Figure 13.** Les deux modèles de mise en place des matériaux triasiques au cours de l'Albien (Perthuisot et al 1998). A : modèle du « glacier du sel » proposé par J.M.Vila et al. (1994)  
 B : modèle du diapir extravasé proposé par Perthuisot et al. (1998)

La structuration de la chaîne alpine résulte de l'effet cumulatif de plusieurs événements tectoniques. En Afrique du nord, les Maghrébides sont rattachés à la fermeture du sillon des flyschs, dont le contenu est largement charrié au-dessus des zones externes au cours des phases tectoniques tertiaires. Leur répartition est due à la succession des phases tectoniques suivantes :

**a) LES PHASES EO-ALPINE**

**Le Trias**

Il correspond à une phase distensive, accompagnée d'un volcanisme basique contemporaine à une sédimentation argilo-gypseuse dominante (Bureau, 1970, Guiraud, 1973).

**Le Jurassique :**

Le Jurassique correspond à une phase distensive qui provoque une subsidence différentielle.

Celle-ci se poursuit jusqu'au Crétacé inférieure avec une structuration générale E-W caractérisant les bassins maghrébins ( Deleau, 1938 ; Durozoy, 1960 ; Voûte, 1967 ; Kazi-Tani, 1986). Cette phase crée un bassin marin ouvert dans le haut Atlas Saharien (W.Wildi, 1983), et attestée surtout par des discordances angulaire marquant la base du Crétacé inférieur (Savornin,1904 ; Durand-Delga, 1949).

### **Le Crétacé :**

Au cours du Crétacé inférieur, aucune phase tectonique importante n'a été décrite en Afrique.

On peut dire que durant cette époque, il a eu une stabilisation ou bien un arrêt du coulissage senestre E-W de l'Afrique dès l'Aptien supérieur (110 Ma), ( Wildi, 1983).

A l'Aptien supérieur, le Vraconien et le Cénomaniens inférieur sont signalés par une période en extension dans le sens NE-SW ( Chihi;1984, Chihi et al ;1984) et se traduit par des failles normales synsédimentaires. Ces failles formeraient les ébauches des futurs fossés d'effondrement ou graben qui vont s'ouvrir au Tertiaire.

Au Cénomaniens, la région a été affectée par une second épisode correspond à une Compression qui se manifeste par des décrochements traduisant un raccourcissement NE-SW.

Une troisième épisode, caractérisée par le retour au stade d'extension NE-SW d'âge Turonien inférieur à moyen qui développe des failles normales. (Kazi-Tani,1986) signale une phase Emshérienne reconnue dans l'Atlas Saharien où elle édifie des plis NW-SE.

### **b) LES PHASES ALPINES:**

#### **A l'Eocène :**

C'est la phase compressive atlasique (Guiraud, 1973), fini lutétienne ( Durand-Delga, 1969, Raoult, 1974), priabonienne ( Vila, 1980). Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire ayant débuté dès le Trias supérieur, et dont l'organisation n'a pas été perturbée malgré des manifestations tectoniques locales enregistrées avant le Cénomaniens, ( Aris., 1994).

Elle édifie les plis de direction NE-SW à ENE-WSW. En effet à l'Est du Kouif du Miocène

inférieur repose en discordance sur des calcaires éocènes et des marnes du Paléocène (Blés et Fleury,1969). Ce plissement serait responsable de l'émersion de la région à l'Eocène moyen (Othmanine,1987).

A l'Oligo- Miocène, Correspond une phase distensive postérieure au déformations fini-eocènes et antérieure à celle du Miocène inférieur. Elle est responsable de la création de grabens au Nord des Aurès (Kazi-Tani,1986).

Au Miocène inférieur, une phase compressive est connue dans le Tell septentrional où elle est caractérisée par structures E-W dans l'Atlas Saharien .Elle est interprétée comme une déformation décrochante NNW-SSE (Othmanine,1987).Cette phase correspond à la phase majeure Tortonienne en Tunisie septentrionale.

**c) LES PHASES RECENTES:**

C'est des phases distensives. Les failles bordières des fossés ont provoqué le redressement des couches Plio –Villafranchienne sur la bordure NE du Dj .Belkif (Blés et Fleury,1969) avec des décrochement de direction NE-SW et NW-SE dans les environs de Sellaoua ( oûte,1967) Des études récentes autour du fossé de kassérine ont montré une évolution tectonique où existerat une phase compressive au Plio-Villafranchien qui a réactivée les structures de la phase Atlasique.

Le Quaternaire est caractérisé présente par une phase décrochante distensive (Chihi ,1984 ; Philip et al, 1986). Dans les monts de Nememcha, la direction atlasique(NE-SW), est bien soulignée par des plis anticlinaux et synclinaux cylindriques, d'ampleur décakilométrique

**Evolution paleogeographique:**

C'est avec les affleurements de Trias que commença l'évolution paléogéographique des monts du Nememcha. Au cours de cette période s'est déposée une puissante série de dépôts salifères et argilo-gypsifères dans les bassins lagunaires et lacustres (Chevenine et al, 1989) surmontée par une légère transgression au Trias moyen dont les traces sont conservées en intercalation de calcaires noirs stratifiés (Dubourdiou, 1956).

Les dépôts jurassiques sont absents qui prend leur interprétation en question. Le Crétacé inférieur est marqué par une sédimentation néritique d'une mer peu profonde régressive jusqu'à l'Aptien inférieur. Elle est représentée par des dolomies fines à Huîtres ; au-dessus les dépôts alternants : dolomies, dolomie-calcaires , grés et argiles.

L'Aptien supérieur est marqué par une transgression marine. Elle est caractérisée par des dépôts de mer peu profonde, une sédimentation carbonatée de type plate-forme avec une subsidence plus importante au Nord qu'au Sud ( Dubourdiou ;1956) à la quelle succède une phase régressive

Dès l'Albien moyen une nouvelle transgression marine se manifestant par une réapparition des faciès terrigènes calcaro-argileux et par l'enfoncement de la plate-forme (Burollet ;1956) durant la fin de l'Albien et le début du Cénomaniens avec l'arrivée d'une mer épinéritique. Le Turonien régressif est caractérisé par une sédimentation de plate-forme de type récifal d'une mer agitée.

Le Crétacé supérieur (Sénonien) est marqué par une transgression, la mer s'étend vers le Sud tout en restant très néritique et s'approfondit vers le Nord où il se forme de puissantes séries marneuses avec des intercalations calcaires.

La fin du Crétacé au Maestrichtien les mouvements orogéniques provoquent la formation de l'Atlas Saharien (Othmanine ,1987).

A partir de l'Eocène, des épisodes d'émersion suivis de période d'érosion ont affecté des surfaces de plus en plus importantes jusqu' à la fin de la transgression du Miocène marin (Perthuisot et al, 1999).Cet dernier est marqué par des dépôts carbonatés peu profonds reposant en discordance sur les terrains du Crétacé.

Les formations quaternaires occupent une importante aire géographique. Elles sont représentées par des faciès continentaux (Othmanine 1987).

## **STRATIGRAPHIE**

### **Quaternaire**

Il est représenté par un remplissage alluvionnaire hétérogène, formé par des cailloutis fluviaux avec épaisseur entre 0 et plus de 170m ,ces formations alluviales sont par fois encroûtées de tuf de calcaire en surface .

Aux oueds des éboulements et des cônes de déjection sont très visible ,ou on observe des traces des écoulements avec de formation du gravier et de galet déposée d'une façon ordinaire

### **PLIOCENE**

Absence totale dans la région ( lacune géologique) sous l'action de l'érosion et la tectonique qui frappent la région au début de

## MIOCENE

Ces niveaux portent de la formation détritique de grès, de sable d'origine non marin au nord de la région

## EOCENE

**Eocene supérieure** : lacune géologique

**Eocene moyen** ( lutitien) : matérialisé par des calcaires durs avec intercalation de marnes

**Eocene inférieur** (yprésien)

des calcaires marneux et des calcaires à silex, de couleur beige, des filons de calcite, caractérisé par la présence de lumachelle, et de couche mince ( traces, dents ) de phosphate

## PALEOCENE

### Thanétien

Des formations lumachelliques calcaires et marnes, affleurants au Sud, et sur les bordures des anticlinaux de Telidjene

Des marnes blanches et peu jaunâtres altérées point de vue à patine et cassure avec intercalation de calcaire et on voit un peu des coprolithes phosphatés.

### Montien

Des calcaires gris fossilisés avec altération à la surface, cette formation est poreuse, de fissures remplies d'argile avec encroûtement de calcite.

### 1- Danien

Des marnes jaunes verdâtres reposées sur du calcaire blanc grisâtre pelliculaire d'épaisseur de 0,3M environ, semblable au crétacé, fissurés verticalement, présentent de l'oxyde de fer, et devenant plus compacte.

## CRETACE

### (1) Maestrichien

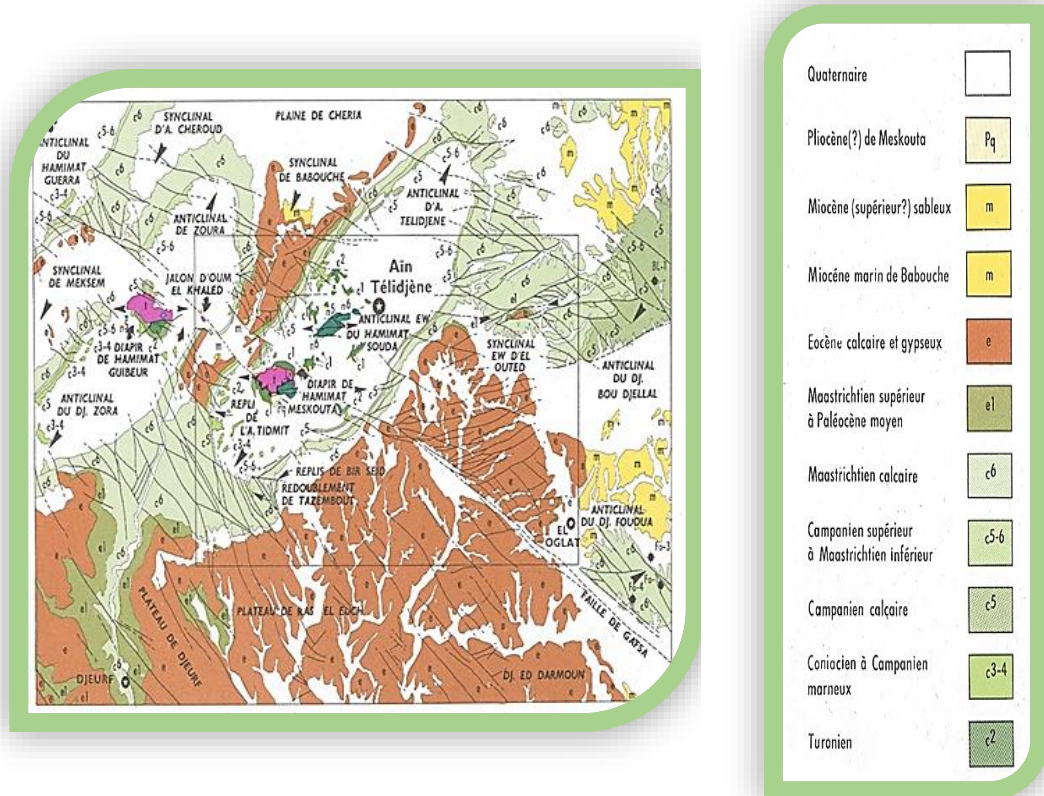
Des marno-calcaires et des marnes sombres, en haut des marnes grises et plus haut par des calcaires à silex, ces calcaires forment les limites du bassin étudié.

### (2) Companien

Des calcaires massifs d'épaisseur varie entre 30 et 50M, ces calcaires ont le couleur jaunâtre ou blanche, ressemblant à la craie, son affleurement n'est pas marqué bien en bordures.

### (3) Emscherien

Des dépôts marneux ,avec une épaisseur de 400M trouve surtout à la partie Sud Ouest de notre région d'étude.



**Figure 14.** Schéma structural du bassin de Télijdjene

### (4) Turonien

Des calcaires argileux en plaquettes a Draa foug debbane ,avec une épaisseur de 600 a 700M , qui affleure surtout au flanc gauche de la partie centrale de l'anticline et au près de diapir de Draa foug debbane.

### (5) Cenomanien

Il est représenté par une alternance de calcaire et de marne grise , contenant de la calcite fibreuse avec une épaisseur de 500 à 600m qui affleure au nord de diapir de trias.

### (6) Albo-aptien

L'aptien est constitué par des calcaires dolomitiques brichiques et par des grés fin , à ciment calcaire-argileux ,avec de présence de barithe et sedirite cristallisée



L'albien apparait au centre du bassin ( hammimat souda) par des formations marneuses avec intercalation de calcaire

(7) 1.3.6. TRIAS :

Ces dernier est caractérisent par des formations calcaires et des formation argilo-gréseuses de couleur brune foncées à rouge, des marnes à gypse et des formations salifères à la partie sud ouest du bassin.

### GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

Pour comprendre la géologie du bassin versant, celui-ci a été divisé selon l'aspect morphostructural en trois secteurs (Fig. 16).

Le secteur I constitue une plaine bordée par une armature montagneux formé par les djebels Doukkane et Boudjellal. Boudjellal, d'où les affleurements rocheux perturbent parfois la couverture Mio-Plio-Quaternair, en particulier le Gabel Rouis. .

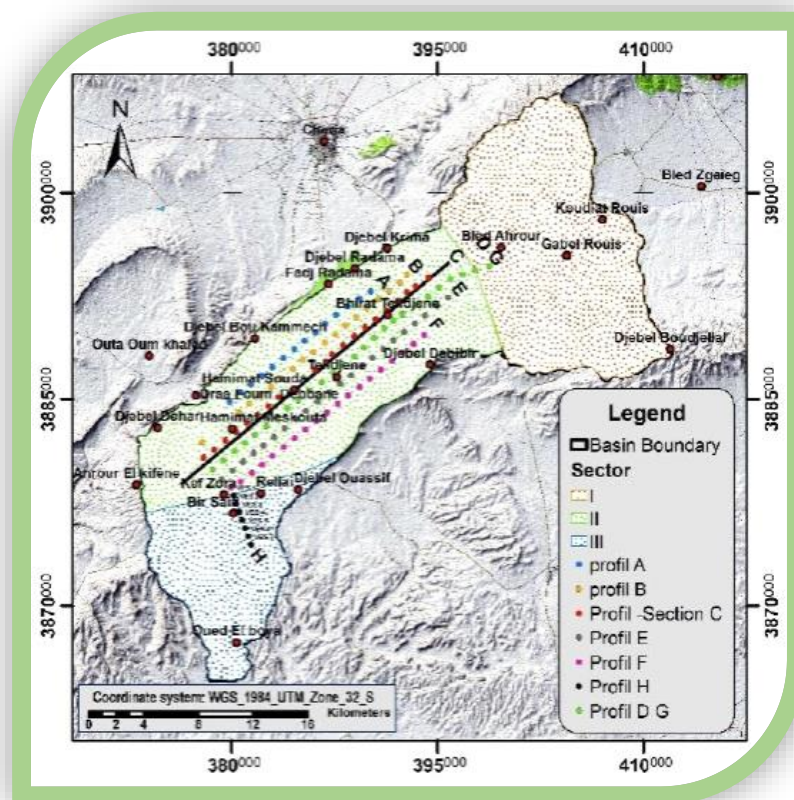


Figure 15. Extrait de carte géologique de la zone d'étude (A.HIBI et al)



Le secteur II est la région du dôme érodé où les reliefs s'organisent autour d'une crête anticlinale anticlinale, localement dédoublée, qui est fermée au nord-est par le Djebel Boudjelal et Djebel Doukkane, et au sud-ouest par le Djebel Dehar et Ahrour el Kifène.

La vaste plaine d'Ain Telidjene limitée par cette crête et drainée au sud par l'oued Telidjene et est accidentée par deux montagnes dérivées : à l'ouest, le Hamimat-Meskouta principalement constituée de formations triasiques, et à l'est l'Hamimat Souda formé de calcaire aptien.

Dans ce compartiment, l'érosion a été la plus forte et la quasi-totalité du Maastrichtien et du Campanien ont été érodés et n'apparaissent que sur les sommets. Le secteur III est une zone de plateaux calcaires fracturés subtabulaires, avec le paysage dénudé typique de la Nememcha (Vila, 1994b), qui s'ouvre vers le nord à partir de la périphérie de Reliai Reliai et Kef Zora, où le calcaire plonge de 50° à 30° vers le centre du bassin et se referme au sud.

### **1. Structure du bassin de Telidjene.**

Une section géoélectrique (CGG, 1976, pl. 5, profil C) qui passe par l'axe de l'anticlinal et de l'axe de Hamim. de l'anticlinal et de l'éperon Hamimat Souda, réalisée sur le profil électrique C (Fig. 4), totalisant 20 sondages électriques verticaux électriques en AB 2000 a été réinterprétée. Des coupes lithologiques provenant de différentes sources (Tableau 1) ont été utilisés pour calibrer les horizons superficiels, tandis que les forages pétroliers DDN-101 et Bdj-2 ont été utilisés pour corrélérer les formations plus profondes mises en évidence par l'étude géophysique de la CGG.

La coupe géologique (Fig. 18) et la carte géologique (Fig.17) montre que la structure anticlinale est occupée par des formations d'âge variable. est occupée par des formations dont l'âge varie du Maastrichtien au Trias (formation la plus ancienne), qui est en contact anormal avec des formations géologiques plus récente .

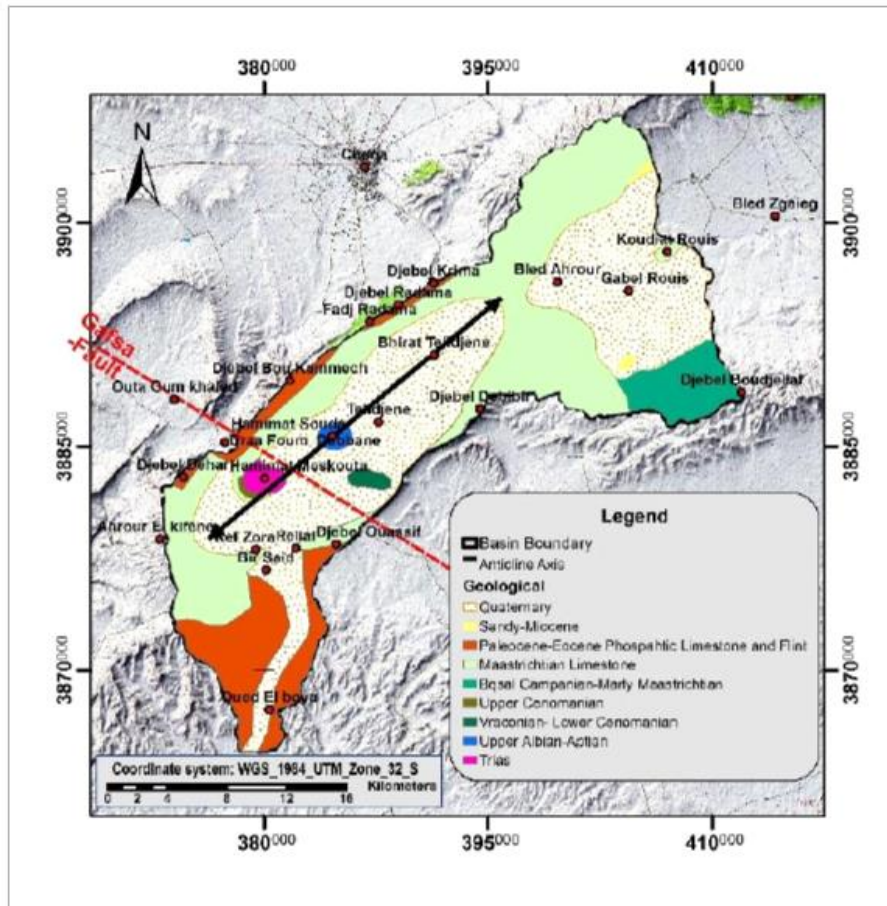


Figure 16. Extrait de carte géologique de la zone d'étude (A.HIBI et al)

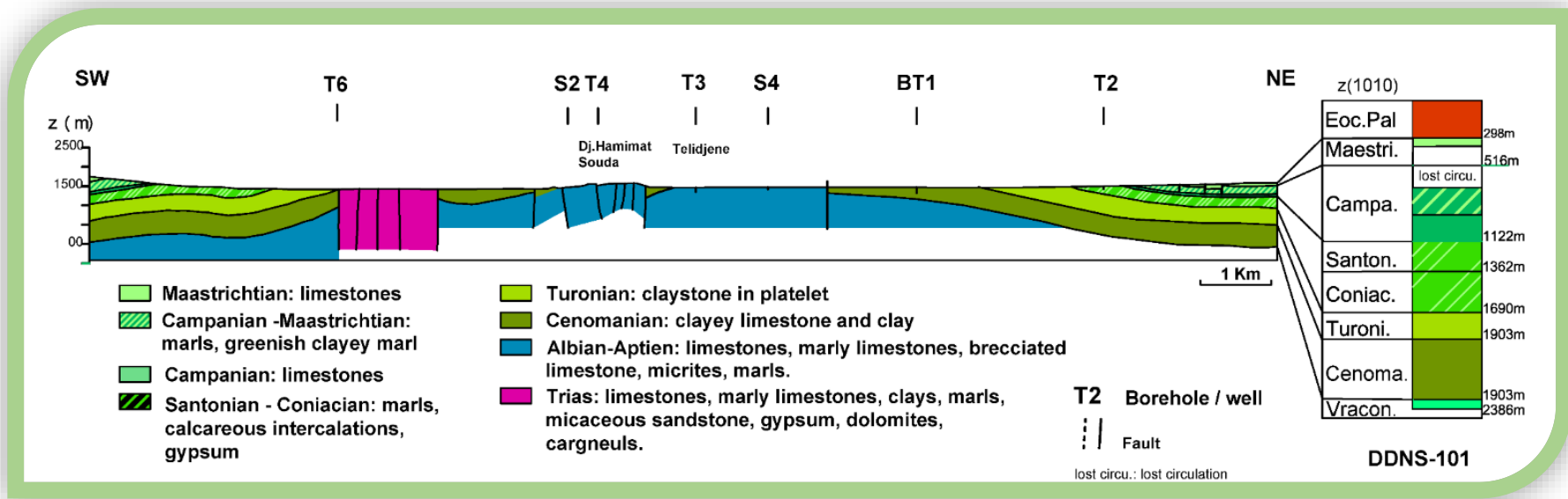


Figure 17. Coupe géologique scshématique sur l'axe de l'anticlinal (A.HIBI et al 2021)

les formations du bassin de Télijdjene bassin sont composées d'intercalations de marnes et de calcaires interrompus par le dôme de Hamimat Souda matérialisé par la formation de l'âge Aptien.

L'Albien est la formation la plus épaisse ; elle est visible en surface à la hauteur d'un point contigu à Hamimat Souda et sur le versant sud de Hamimat Meskhouta.

### **Bassin versant de Télijdjene et tectonique**

Pour comprendre la tectonique dans le bassin versant de Télijdjene et sa relation avec la géologie locale, une extraction des linéaments a été faite . l'extraction a été réalisée à la fois par une extraction semi-automatique et l'extraction automatique des linéaments, et leur identification a été réalisée en trois étapes.

Tout d'abord, les failles ont été numérisées à l'aide de QGIS sur une carte géologique (Fig. 19a), et l'extraction automatique a été réalisée en utilisant le programme PCI GEOMATICA à travers son module 'line' (Fig. 19b). Enfin, les linéaments ont été extraits semi-automatiquement en utilisant l'interprétation visuelle et la fonction Hill-shade du logiciel QGIS des images générées à partir du SRTM DEM (Fig. 19c).

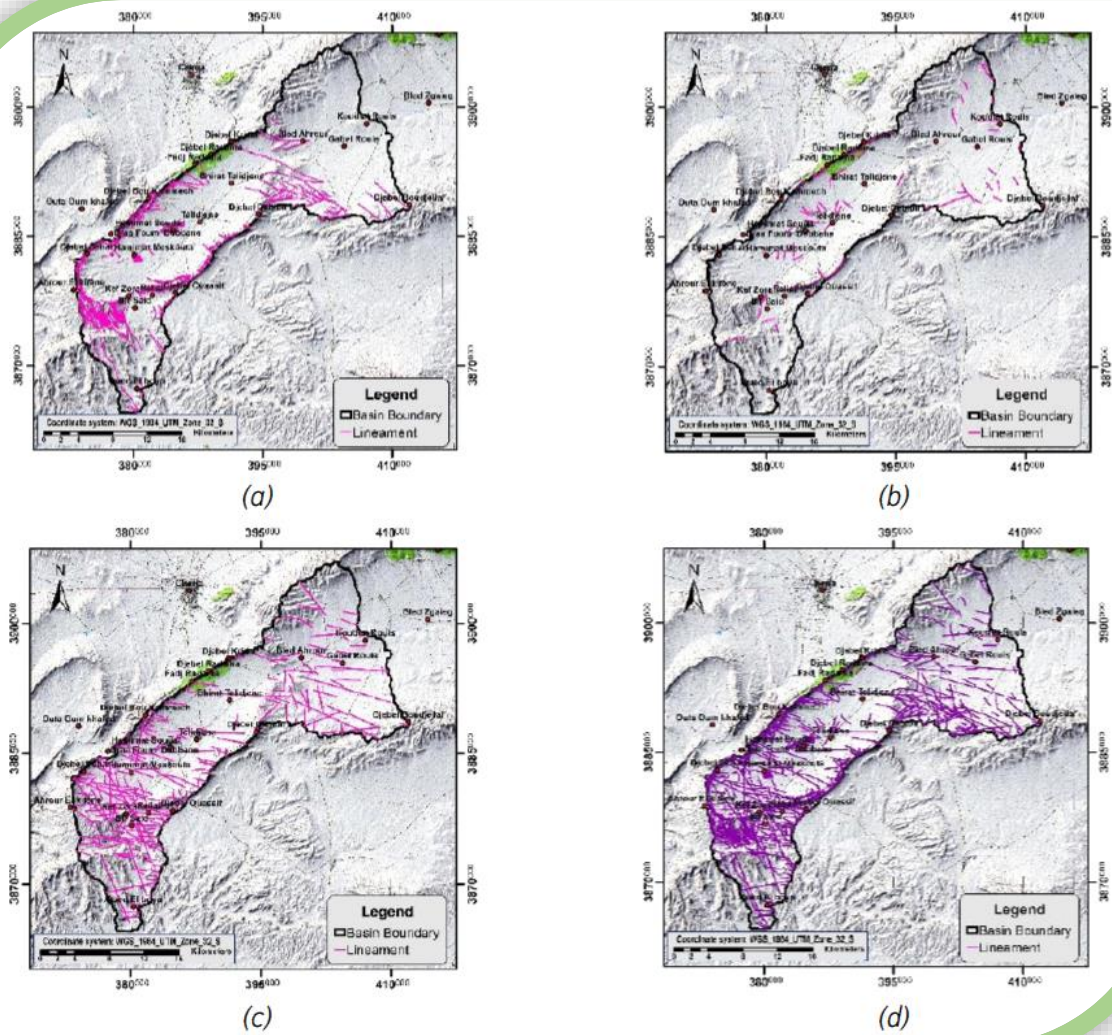
Les éléments artificiels, tels que les routes et autres structures linéaires, ont été exclus de l'interprétation des linéaments. Les linéaments extraits ont été superposés sur l'image satellite pour vérification, et certains de ces linéaments ont été confirmés sur le terrain.

Enfin, les logiciels QGIS et Rockworks ont été utilisés pour fusionner les 3 cartes de linéaments extraites à partir des différentes méthodes en une seule carte globale (Fig. 19d); et pour extraire les paramètres statistiques des linéaments (nombre et longueurs) pour réaliser le diagramme de rosace par une fraction angulaire de 10°.

#### **Résultat de l'analyse linéamentaire**

Les résultats des analyses sont présentés sous la carte de linéaments (fig. 19d), d'une densité de linéaments et d'un diagramme de rosace indiquant les directions majeures des linéaments (fig. 20 b). La carte des linéaments montre une distribution hétérogène des linéaments (Fig. 20a).

Comme le montre la (Fig. 20b), les principales familles directionnelles prédominantes sont respectivement "NW-SE" et "E-W". La famille "NW-SE" est marquée dans toute la région et est subparallèle aux accidents majeurs du fossé Tébessa-Morsott , suivie par



**Figure 18.** (a) Carte des linéaments extraite de la carte géologique ; (b) carte des linéaments extraite à l'aide de GEOMATICA ; (c) carte des linéaments extraite à l'aide de la fonction hillshade de QGIS ; (d) carte complète des linéaments du bassin de Telidjene (A.HIBI et al 2021)

la direction "E-W", qui est prédominante principalement dans la partie sud-ouest du bassin versant. Cette dernière provient de deux autres ensembles de linéaments, mais dans une moindre mesure que les deux premières directions, avec une orientation "NE-SO" et "NNO-SSE" et une orientation "NNW-SSE" à N-S

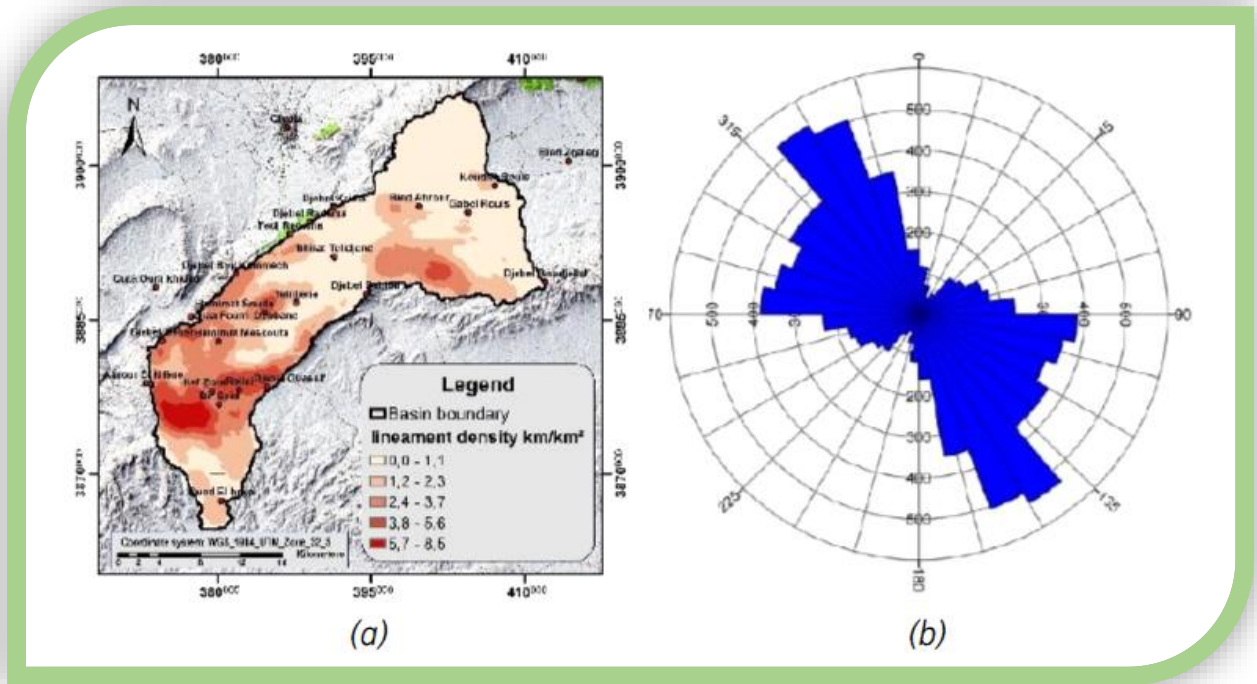


Figure 19. (a) carte de la densité des linéaments ; (b) Diagramme de rosace



## REFERENCES

- AOUJJEHANE, M. BOUZENOUNE, A. ROUVIER, H. & THIBIEROZ, J. (1992).** HALCINESE ET DISPOSITIFS D'EXTRUSIONS DU TRIAS DANS L'ATLAS SAHARIEN ORIENTAL (NE ALGERIEN). GEOL. MEDIER, MARSEILLEISE, XIX, PP.273-287.
- ARIS Y., (1994).** ETUDE TECTONIQUE ET MICRO TECTONIQUE DES SERIES JURASSIQUES A PLIO-QUATERNAIRES DU CONSTANTINOIS CENTRAL (ALGERIE NORD ORIENTALE) CARACTERISATION DES DIFFERENTES PHASES DE DEFORMATIONS. DOCTORAT D'UNIVERSITE, NANCY I, 215P.
- BLES, J.L (1969).** CONTRIBUTION A L'ETUDE DES DEFORMATIONS CASSANTES DE LA FEUILLE DE MORSOTT (SE CANSTANTINOIS-ALGERIE). LES MICROFRACTURATIONS ET LEURS RELATIONS AVEC LES FAILLES ET LES PLIS. PUBL DU SERV GEOL DE L'ALGERIE, (SERIE N°11), BULL N°39, P 7-17.
- BLES, J.L. & FLEURY (1970).** CARTE GEOLOGIQUE 1/50000 MORSOTT ET NOTICE EXPLICATIVE. PUBL, SERV, GEOL. ALGERIE.
- BOLZE, (1954),** ASCENSION ET PERCEE DES DIAPIRS AU CRETACE MOYEN DANS LES MONTS DE TEBOURSOUK (TUNISIE SEPTENTRIONALE). C.R. SOC. GEOL. FRANCE 1954, 139-141.
- BUREAU D., (1970).** PRINCIPAUX TRAITS DE LA STRUCTURE DES MONTS DE BELEZMA (ALGERIE). BULL. SOC. GEOL. FRANCE. (7). T. XII. N°2. PP.210-213.
- BOUILLIN J P., (1986).** LE BASSIN MAGHREBIN UNE ANCIENNE LIMITE ENTRE L'EUROPE ET L'AFRIQUE A L'OUEST DES ALPES. BULL. SOC. GEOL. FR., (8), T. II, N° 4, PP. 547-558.
- BOUZENOUNE A., (1993).** MINERALISATIONS PERIDIAPIRIQUES DEL'APTIEN CALCAIRE: LES CARBONATES DE FER DU GISEMENT HEMATITIQUE DE L'OUENZA (ALGERIE ORIENTALE). DOC, UNIV PIERRE ET MARIE CURIE, PARIS VII, 207P.
- BOUZENOUNE, A., ROUVIER, H. & THIBIEROZ, J. (1995).** TRIAS DE L'OUENZA, CONTEXTE DIAPIRIQUE, ZONATION MINERALOGIQUE ET CONSEQUENCES METALLOGENIQUES. BULL, SERV, GEOL. ALGERIE N°1. P 3-24.
- BUROLLET F., (1956).** CONTRIBUTION A L'ETUDE STRATIGRAPHIQUE DE LA TUNISIE CENTRALE. ANN. MINES GEOL. (TUNIS)P18.
- CAMOIN, G., MAURIN, A.F, PERTHUISOT, V. ET J.M. ROCHY, (1990).** RELATION DIAPIRS –RECIFS: L'EXEMPLE DU SENONIEN DE LA REGION DE KHENCHELA (ALGERIE CENTRAL ORIENTALE). BULL. SOC. GEOL. FRANCE. (8)VI.5.831-841.
- CASTANY, J., (1951).** ETUDE GEOLOGIQUE DE L'ATLAS TUNISIEN ORIENTALE. ANNALES MINES GEOL, TUNIS, N°8, VOL, 2.
- CHIHIL, L., DLALA M. & BENAYED, N. (1984).** MANIFESTATIONS TECTONIQUES SYNSEDIMENTAIRES ET POLYPHASEES D'AGECRETACE MOYEN DANS L'ATLAS TUNISIEN CENTRAL (REGION DE KASSERINE). C.R. ACAD. SCI. (PARIS) 298/II, 4, 141-146.
- CHIHIL L (1984).** ETUDE TECTONIQUE ET MICROTTECTONIQUE DU GRABEN DE KASSERINE (TUNISIE CENTRALE) ET DES STRUCTURES VOISINES. J.SELLOUM ET J.MAARGABA. THESE 3EMECYCLE. GEOL STRUCT. PARIS II (1984).
- DELEAU P., (1938).** ETUDE GEOLOGIQUE DES REGIONS DE JEMMAPES «HAMMAM MESKOUTINE» ET DU COL DES OLIVIERS. IBID (2). N°14. T.1. 55P. ALGER

**DUBOURDIEU,G.ET DUROZOY (1950).** OBSERVATION TECTONIQUE DANS LES ENVIRONS DE TEBESSA ET DE L'OUENZA (ALGERIE) BULL .SERV. GEOL.FRANCE 5EME SERIE, 1, XX.P, 257,266.

**DUBOURDIEU,G.(1956).** ETUDE GEOLOGIQUE DE LA REGION DE L'OUENZA (CONFINS ALGERO-TUNISIENS). THESE DES SCIENCES, PARIS, PUBL SERV DE LA CARTE GEOL, ALGERIE, BULL N°10 VOL, 1, P 659.

**DUBOURDIEU,G.(1959).** ESQUISSE GEOLOGIQUE DU DJEBEL MESLOULA (ALGERIE ORIENTALE),BULL.N°21,162P.

**DURAND-DELGA M. 1950.** LE CHEVAUCHEMENT BORDIER DE PETITE KABYLIE (ALGERIE). COMPTES RENDUS DE L'ACADEMIE DES SCIENCES, PARIS, 1950, T. 231, P. 1522-1524

**DURAND-DELGA, M.(1949).** MISE AU POINT SUR LA STRUCTURE DU NE DE LA BERBERIE. PUBL SEV. CARTE GEOL. ALGERIE, NOUV. SERI, N°39, P 89-131, FIG.9.

**DURAND-DELGA, M.(1969).** OBSERVATIONS A LA NOTE DE J.M.VILLA & MAGNE.J, BULL. SOC . GEOL. FRANCE (7), T XI. P. 81. PARIS.

**DUROZOY G., (1960).** ETUDE GEOLOGIQUE DE LA REGION CHATEAUDUN DU RHUMEL.PUBL. DU SERV. DE LA CARTE GEOL.DE L'ALGERIE. N°LE SERIE. BULL. N°22.

**ENERGOPROJECT-ENHYD (2002).** ETUDE DE LA PETITE ET MOYENNE HYDRAULIQUE AGRICOLE DE L'ALGERIE DU NORD (STUDY OF THE SMALL AND MEDIUM AGRICULTURAL HYDRAULICS OF NORTHERN ALGERIA), MISSION 1- DOSSIER 2- SECTEUR 4

**GUIRAUD R. (1973).** EVOLUTION POST-TRIASIQUE DE L'AVANT-PAYS DE LA CHAINE ALPINE EN ALGERIE, D'APRES L'ETUDE DU BASSIN DU HODNA ET DES REGIONS VOISINES. THESE SCIENCES, NICE, RONEOT, P 270, FIG.114, XII PL.H.T.

**HIBI, A., GOUAIDIA, L., & GUEFAIFIA, O. (2021).** INVESTIGATION OF GROUNDWATER POTENTIAL USING REMOTE SENSING AND HYDRO-GEOPHYSICAL TECHNIQUES: A CASE STUDY OF THE TELIDJENE BASIN (EASTERN ALGERIA). ENVIRONMENTAL RESEARCH, ENGINEERING AND MANAGEMENT, 77(4), 99-121.

**KIEKEN, M. (1962).** ESQUISSE TECTONIQUE DE L'ALGERIE DU NORD .PRESENTATION DE LA CARTE TECTONIQUE AU 100.000EME .PUB . CARTE .GEOL. ALGERIE. N° SERIE .BUL.N° 3 .

**LESSARD(1955).** FACIES BECHIQUES DANS LE CRETACE SUPERIEUR ET AGEDES PREMIERES MANIFESTATIONS DIAPIRIQUES DU TRIAS PRES DE KHENCHELA (CONSTANTINOIS)-PUP. SERV.CARTE GEOL.ALGERIE ALGER,5,PP.379-390.

**MASSE J.P. & CHIKHI-AOUMEUR F.(1982).** LA PLAT-FORME CARBONATEE DE L'OUENZA (SUD CONSTANTINOIS, ALGERIE). ORGANISATION ET DYNAMIQUE DURANT L'APTIEN SUPERIEUR. GEOL. MEDITER, MARSEILLE, VOL, IX, N°3, P 259-267.

**ROUVIER H .ET AL.(1985):** DEPOSITS AND SALT BEAGING DIAPIRS IN SOUTHERN EUROPE .AND NORTH AFRICAN –ECON .GEOL .,VOL 30.N°3 .PP.666 .687.

**OTHMANINE A.(1987).** LES MINERALISATIONS EN FLUORINE, BARYTINE, PB, ZN ET FER SIDERITIQUE AUTOUR DU FOSSE DE TEBESSA-MORSOTT (ALGERIE). RELATION ENTRE PALEO GEOGRAPHIE APTIENNE, DIAPIRISME, STRUCTURE ET METALLOGENIE. THESE DE 3EMECYCLE, UNIV, PIERRE ET MARIE CURIE, PARIS VI FR, 221P.

**KOWALSKI W.M & HAMIMED M.(2000).** DIAPIRISME POLYPHASE OU GLACIER DE SEL ALPIN? DILEMME DU MATERIEL TRIASIQUE DES CONFINS ALGERO-TUNISIENS. BULL. SERV. GEOL DE L'ALGERIE. VOL,11, N°1, P 29-60, (2000).



**SMATI A.(1986).** LES GISEMENTS DE Pb, BA ET FE DU DJ SELATA (TUNISIE DU CENTRE NORD) MINERALISATION EPIGENETIQUE DANS LE CRETACE NERITIQUE DE LA BORDURE D'UN DIAPIRS DE TRIAS. GISEMENT DE SIDI-AMOUR, BEN-SALEM ET DE SLATA FER. THESE DE 3EMECYCLE, UNIV DE PARIS VI, FRANCE, P 250.

**PERTHUISOT V. (1978).** DYNAMIQUE ET PETROGENESE DES EXTRUSIONS TRIASIQUES EN TUNISIE SEPTENTRIONALE. THESE DOC.SCI., UNIV. PARIS.

**PERTHUISOTV., HATIRA N., ROUVIER H.,& STEINBERG.M (1987).** CONCENTRATION METALLIQUE (Pb-Zn) SOUS UN SURPLOMB DIAPIRIQUE: EXEMPLE DU J. BOUKHIL (TUNISIE SEPTENTRIONALE). BULL. SOC. GEOL. FR. III, 6, P.1153-1160.

**PERTHUISOT V.& ROUVIER.H (1992).** LES DIAPIRS DU MAGHREB CENTRAL ET ORIENTAL: DES APPAREILS VARIES, RESULTAT D'UNE EVOLUTION STRUCTURALE ET PETROGENETIQUE COMPLEXE: BULL. SOC. GEOL. FR, VOL,163, P 751-760.

**PERTHUISOTV., BOUZENOUNE A., HATIRA N., HENRY B., LAATAR E., MENSOUR A., ROUVIER H., SMATI A., & THIBIEROZ J.(1998).** LES DIAPIRS DU MAGHREB ORIENTAL : PARTDES DEFORMATIONS ALPINES ET DES STRUCTURES INITIALES CRETACEES ET EOCENESDANS LES FORMES ACTUELLES. BULL. SOC. GEOL DE FRANCE, T,170, N°1, P 57-65, FIG.8

**SAVORNIN J.(1904).** REMARQUE SUR UNE IMPORTANTE LIGNE ARCHITECTONIQUE AU SUD DU TELL ALGERO-CONSTANTINOIS. C.R. 41° CONG. ASS. FR. AVANC. SC. NIMES 1912, 2° PARTIE, P 344-345.

**RAOULT J F.,(1974).** GEOLOGIE DU CENTRE DE LA CHAINE NUMIDIQUE (NORD -CONSTANTINOIS, ALGERIE). MÉM. SOC. GÉOL. FR., N.S., T. LIII, N°121, 164 P., 62 FIG., 11 PL.H.T.

**PHILIP J., , MASSE J., P. & BESSAIS,H, .(1 986):**-PHENOMENES SEDIMENTAIRESAU PASSAGE PLATE-FORME CARBONATEE –BASSINDANS L'ALBIEN SUPERIEUR -CENOMANIEN BASAL DE TUNISIE CENTRALE. 8TH I.A.S. REG. MEET. SÉDIMENTOL. (TUNIS).

**VILAJ.M.& CHARRIERE.A (1993).**DECOUVERTE D'ALBIEN CALCAIRE ET DU TRIAS RESEDIMENTE AU DJ. BOUDJABER (PARTIE OUEST ALGERIE): CORRELATION AVEC LES FORAGES ET CONSEQUENCES SUR L'ORGANISATION DU CRETACE INFERIEUR DES CONFIN ALGERO-TUNISIENS .COMPTE RENDUS DE L'ACADEMIE DES SCIENCES .PARIS T 316.SERIE II.P243-249

**VILA, J. M. (1994).** MISE AU POINT ET DONNEES NOUVELLES SUR LES TERRAINS TRIASIQUES DES CONFIN ALGERO-TUNISIENS : TRIAS ALLOCHTONE « GLACIER DE SEL » SOUS-MARIN ET VRAIS. MEMOIRE DU SERVICE. GEOLOGIQUE DE DE L'ALGERIE 7, 105-152.

**VILLA J.M., BEN YUCEF M.,CHIKHAOUI,CHARRIERE A.GHANMI M.KAMOUN F.,PEYBERNES B.SAADI J.SOUQUET P.ET ZERBOUT M.(1994).**DECOUVERTE EN TUNISIE AU SW DU KEF, DE MATERIEL TRIASIQUE INTER STRATIFIE DANS L'ALBIEN:EXTENSION DU DOMAINE A "GLASIER DE SEL" SOUS-MARINS DES CONFIN ALGERO-TUNISIEN C,R ACAD.SCI.PARIS,T,318,SER,II,N°12,1661-1667.

**VILA, J.M (1995).** PREMIERE ETUDE DE SURFACE D'UN GRAND «GLACIER DE SEL» SOUS-MARIN: L'EST DE LA STRUCTURE OUEENZA-DJ MERIDEF (CONFIN ALGERO-TUNISIENS). PROPOSITION D'UN SCENARIO DE MISE EN PLACE ET COMPARAISONS. BULL. SOC. GEOL. FRANCE. T. 160. 402. P 149-167.

**VILA, J.M. (1996).** HALOCINESE DISTENSIVE ALBIENNE A( GLACIER DE SEL) SOUS MARIN ET PLISSEMENTS TERTIAIRES DU SECTEUR OUEENZA-LAJEBEL-MERIDEF.BULL.SERV.GEOL.ALGERIR,VOL 7N°1;PP.3-34.

**VILA, J.M.,BEN YUCEF.M, CHIKHAOUIE.M & GHANMIM.(1996).** DEUXIEME ETUDE DE SURFACE D'UN GRAND «GLACIER DE SEL» SOUS-MARIN ALBIEN (250KM2): LES MASSES TRIASIQUES DU

DIAPIR DE BEN GHASSEUR ET DE L'ANTICLINAL DE KEF (NW TUNISIEN). BULL. SOC. GEOL. FRANCE, T.167, N°2, P 235-246.

**VILA, J. M. (1997).** CARTE GEOLOGIQUE DE AÏN TELIDJENE FEUILLE N° 265 ECHELLE 1/50 000 (GEOLOGICAL MAP OF AÏN TELIDJENE SHEET N° 265 SCALE 1/50 000).

**VILA J.M.(1980).** LA CHAÎNE ALPINE D'ALGERIE ORIENTALE ET DES CONFINS ALGERO-TUNISIENS. THESE ES. SCI. NATURELLES, UNIV. P ET MCURIE, PARIS VI.

**VILA, J.M.(2001).** LES AVANTAGES D'UNE APPROCHE MULTI-SOURCES (BIOSTRATIGRAPHIE, SEDIMENTOLOGIE, FORAGES ; PROFILS SISMiques ET GRAVIMETRIE) POUR L'ETUDE DEL'HALOCINESE CRETACEE."GLACIERS DE SEL",TECTONIQUE EN RADEAU ET DOMES DE SEL'HALOTECTONIQUE TERTIAIRES (PLISSEMENT DES "GLACIERS DE SEL",GENESE DES DOMES DE SEL-PLIS) DES CONFINS ALGERO-TUNISIEN. BULL.SERV.GEO.ALGERIE,VOL.12,N°,129-167.

**VOUTE C., (1967).** ESSAI DE SYNTHÈSE DE L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DES ENVIRONS D'AIN FAKROUN, AÏN BABOUCHE ET DES REGIONS LIMITOPHES. PUBL. SERV. CARTE GÉOL. ALGÉRIE N°36, 2 TOMES, 3 FIG., 41 PL., 255 P.

**WILDI W.,(1983).** LA CHAÎNE TELLO-RIFAINE (ALGERIE, MAROC, TUNISIE: STRUCTURE, STRATIGRAPHIE ET EVOLUTION DU TRIAS AU MIOCENE. REV. GEOL.DYM ET GEOGR. PHYS. VOL,24. FASC.3. P 201-297.

**III. CHAPITRE**  
**CLIMATOLOGIE**

## **Introduction :**

Le climat de l'Algérie est largement influencé par la mer Méditerranée. La grande superficie de son territoire (2,3 M Km<sup>2</sup>), permet avoir divers types de climats et microclimats, allant du pluvial à l'aride (Sahara) en passant par le semi-aride.

Au nord de la région d'étude qui culmine à 1648 m, le climat est beaucoup plus pluvieux, sur le plan climatique, elle constitue une zone de transition entre plusieurs phénomènes climatiques, notamment, le passage du régime climatique méditerranéen au climat saharien caractérisé par des influences desséchantes qui règnent, pendant une partie de l'année, sur le Sahara septentrional.

La présente partie, consiste en l'étude des paramètres climatologiques nécessaires pour l'établissement du bilan hydrique ainsi que pour fonctionnement du système hydraulique, tenant compte des paramètres climatiques tels que la pluie, l'évapotranspiration, l'écoulement et l'infiltration qui constituent le cycle de eau.

Pour ce faire, et en absence d'une station météorologique terrestre dans le bassin de Télijdjene, le service Cloud Google Earth Engine (GEE) a été utilisé ; il s'agit d'un outil puissant pour la recherche environnementale ainsi son application pour résoudre les problèmes de recherches liés à l'absence des données, il a été aussi procédé à un calcul conventionnel utilisant la station de Tébessa comme station de contrôle afin de tester la fiabilité de cet outil automatique.

Ce travail, représente un nouvel outil basé sur le Web, disponible et est développé dans Google Earth Engine (GEE) qui pourra être exploités pour d'autres région ne disposant pas de stations terrestres et des mesures en temps réel et vise à acquérir les paramètres nécessaires d'une étude climatiques notamment les composantes d'un bilan hydrique.

L'outil utilise la composante terrestre haute résolution de la cinquième génération de l'European ReAnalysis (ERA5), c'est-à-dire ERA5-Land, post-traitement par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). L'application accède aux bandes associées aux variables hydrologiques d'ERA5- Land, afin d'estimer le bilan hydrique dans le bassin de Télijdjene, ainsi qu'elle demeure valable dans d'autres régions à l'échelle de bassins hydrographiques ou même régionale.

Par conséquent, les séries temporelles des principaux constituants du bilan hydrique, à savoir les précipitations, le ruissellement, l'évapotranspiration, l'humidité du sol et le stockage sont calculées au pas de temps mensuel.

Afin de tester la fiabilité de cet outil, une station de contrôle a été utilisée afin de mener un calcul classique moyennant des outils conventionnels tels que Excel, la station de Tébessa a été choisie pour la disponibilité des données avec des séries de mesures consistantes ainsi, la comparaison des données issues de la télédétection et le nouvel outil web, pourront être comparés aux valeurs caractéristiques de la région.

### **Présentation de GOOGLE EARTH ENGINE**

Le Cloud GIS offre des logiciels et du matériel puissant pour résoudre les tâches de surveillance et de recherche environnementales en mettant en œuvre des méthodes géoinformatiques : serveurs géographiques en accès libre avec génération de cartes électroniques et mise en œuvre d'algorithmes d'analyse multivariée.

Le Cloud GIS permet de recevoir des données en temps réel ou quasi réel et de les afficher directement sur le système de l'utilisateur. La plateforme Google Earth Engine (GEE 2022) est unique en son genre en tant que plateforme intégrée permettant de habiliter non seulement les professionnels de la télédétection, mais aussi un public beaucoup plus large qui n'a pas les capacités techniques requises pour utiliser les superordinateurs traditionnels ou les ressources informatiques en nuage à grande échelle (Gorelick et al., 2017)

GEE comprend un serveur d'applications interactif travaillant avec un catalogue de données ouvertes, un environnement de calcul sous la forme d'un éditeur de code (environnement de développement intégré (IDE) pour l'écriture et l'exécution de scripts), une API géospatiale (les bibliothèques clientes fournissent des wrappers Python et JavaScript pour les API Web dans l'architecture REST). (<https://earthengine.google.com/faq/>)

### **Catalogue de données**

Le catalogue de données contient un vaste référentiel de jeux de données géo-spatiales accessibles au public, y compris des images provenant d'une variété de systèmes satellitaires et aériens dans des variables environnementales, des prévisions météorologiques et climatiques, des cartes d'occupation des sols, des ensembles de données topographiques et socio-économiques.

Toutes ces données sont prétraitées dans un format prêt à l'emploi qui permet un accès efficace et élimine les erreurs de nombreux obstacles liés à la gestion des données. Les opérateurs sont implémentés dans un système de traitement parallèle qui distribue automatiquement les calculs, offrant ainsi des capacités d'analyse à haut débit.

Les utilisateurs accèdent à l'API par le biais d'une bibliothèque client léger ou d'un environnement de développement web interactif construit au-dessus de cette bibliothèque client. Interactif construit à partir de cette bibliothèque client.

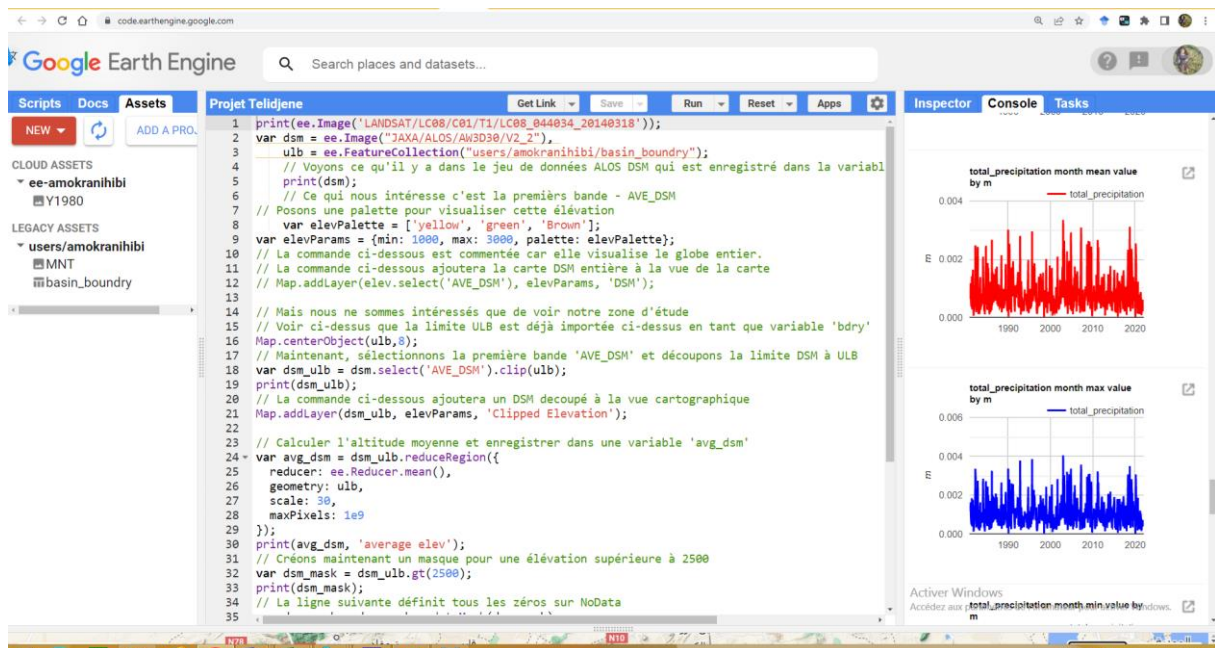
Les collections de données ont des descriptions et des exemples de codes JavaScript pour l'ouverture et le rendu des données dans GEE.

Les bibliothèques GEE sont des objets proxy pour les images (`ee.Image`), les collections (`ee.ImageCollection`, `ee.FeatureCollection`), et d'autres types de données : nombres (`ee.Number`), chaînes de caractères (`ee.String`), objets vectoriels avec géométrie (`ee.Geometry`), listes (`ee.List`). Images regroupées par source, destination, etc. sont combinées dans des collections d'images (`ImageCollection`), qui ont la fonctionnalité de sélectionner les données de la collection en les filtrant et en les triant selon des critères spatiaux, temporels ou autres. La bibliothèque API permet d'effectuer des opérations sur les images en utilisant l'algèbre matricielle et le support des fonctions d'ordre supérieur : `map ()` et `iterate ()`, qui permettent d'appliquer des fonctions arbitraires à des collections d'images.

La fonction (`reduce`) est utilisé pour calculer des statistiques sur des collections d'images, qui, par exemple, peuvent agréger des données en utilisant la méthode de la fenêtre glissante .

Les utilisateurs peuvent charger leurs propres données (de type raster et vectoriel) en utilisant la bibliothèque d'opérateurs fournie par l'API de Earth Engine. Les utilisateurs utilisent activement GEE pour travailler avec des données de télédétection (Jamali et al, 2019).

La figure 1 montre une fenêtre de travail, qui affiche une table des scripts de l'utilisateur, une partie du JavaScript pour la visualisation des données, une image dans une fenêtre de carte et un graphique des valeurs des paramètres dans la console.



**Figure 20.** L'environnement de développement interactif Earth Engine

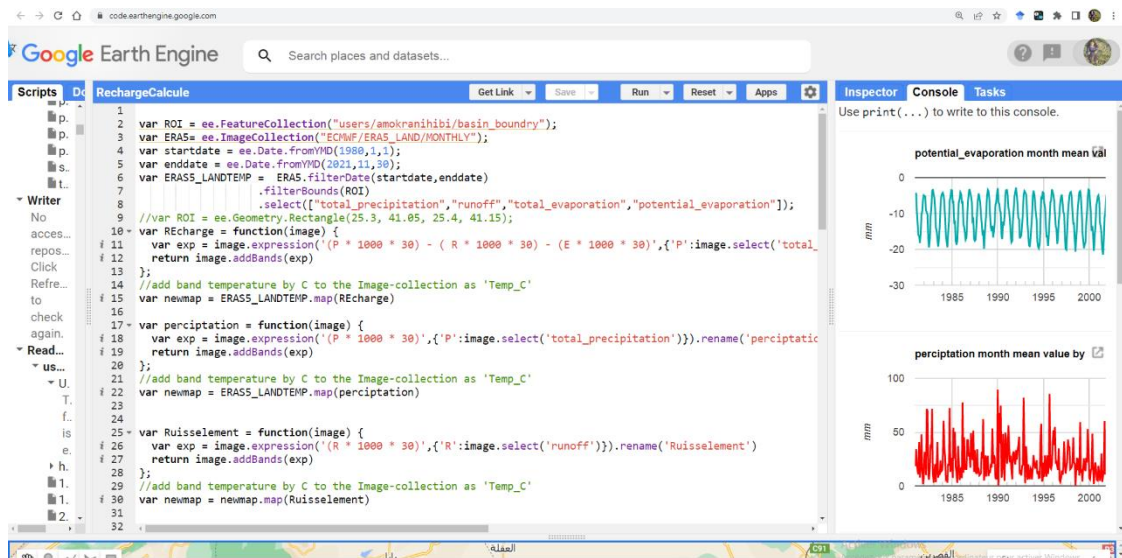
Ainsi, les utilisateurs disposent d'un ensemble d'outils d'analyse pour la visualisation et le traitement des données spatiales. Avec GEE, il est possible de créer une très large gamme d'analyses SIG.

### **Choix des données de la région d'étude**

Les composantes du bilan hydrique, c'est-à-dire les précipitations, le ruissellement, l'humidité du sol, l'évapotranspiration, font partie d'un total de 50 variables terrestres de l'ensemble de données ERA5-Land et constitue un produit de réanalyse global à haute résolution, c'est-à-dire 9 km, de la composante terrestre, produit de réanalyse global de la composante terrestre de l'ERA5, couvrant la période de janvier 1981 à aujourd'hui présent, avec une latence de 2 à 3 mois (Muñoz-Sabater, 2019 ; Muñoz-Sabater et al., 2021).

ERA5-Land est une combinaison de données de modèle et d'observations et vise à soutenir les études sur le changement climatique et diverses applications de ressources en eau et de la gestion des terres, grâce à la fourniture d'un ensemble de données cohérent décrivant les cycles d'eau et d'énergie sur les terres. ERA5-Land est fourni à un pas de temps horaire, mais des moyennes mensuelles sont également calculées et sont facilement disponibles. L'évaluation de l'ERA5-Land a été menée en utilisant des données au sol, un modèle global et des de référence dérivés de satellites et a démontré valeur ajoutée en ce qui concerne la

description du cycle hydrologique, ce qui confirme son applicabilité en tant que de données de pointe pour un large éventail d'applications terrestres (Muñoz-Sabater et al., 2021).



**Figure 21.** Code JavaScript pour l'impression du graphique des valeurs moyennes mensuelles de l'écoulement de surface en millimètres

Ainsi, pour chaque étape de l'analyse des données, un code JavaScript a été créé en utilisant les descripteurs de données GEE et d'autres outils auxiliaires. En changeant les noms des paramètres, les plages de temps, les palettes de visualisation des cartes, les équations des fonctions, etc. la visualisation des cartes, les équations dans les fonctions, les scripts ci-dessus peuvent être utilisés pour d'autres données.

Il est possible de sortir un graphique avec plusieurs valeurs, pour chaque polygone de la couche vectorielle, par exemple pour faciliter l'exportation au format csv (fig. 23).

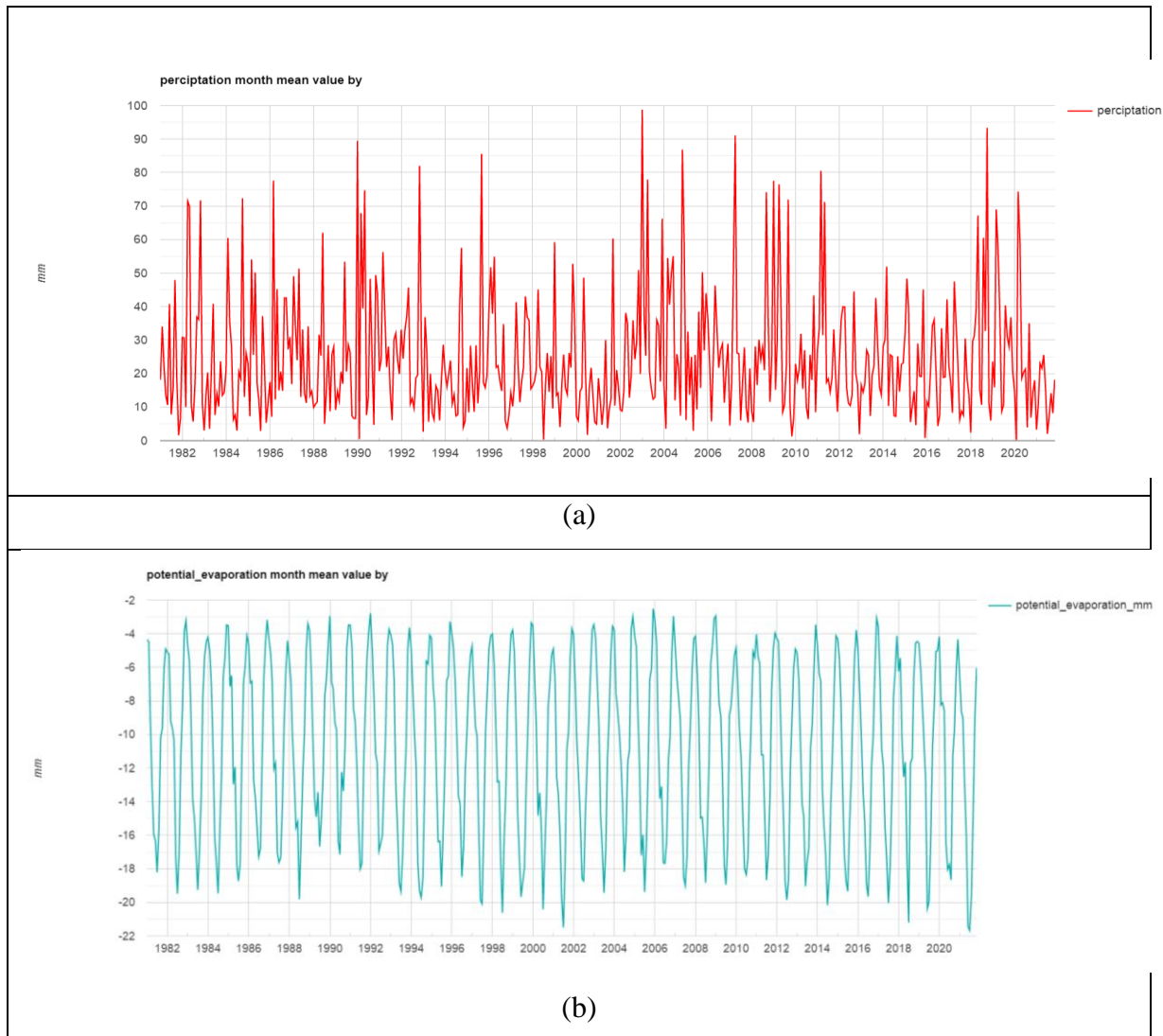
### Application de l'outil de calcul sur la région d'étude

L'outil de calcul du bilan hydrique a été appliqué sur la région d'étude pour le bassin de Téli Djene, pour la période allant de 1980 à 2021. Du point de vue hydrologique, les variables terrestres suivantes sont traitées au pas de temps mensuel ;

- a) Précipitation (P) (mm) qui représente l'eau liquide et gelée l'eau liquide et gelée accumulée, y compris la pluie et la neige qui tombe à la surface de la Terre,
- b) Le ruissellement (R) (mm) qui représente la quantité d'eau qui s'écoule soit en tant que surface ou sous la surface du sol en tant que ruissellement souterrain sous la surface du sol,
- c) l'évapotranspiration (ET) (mm) qui représente la quantité d'eau qui s'évapore de la surface de la terre et la quantité d'eau qui s'évapore du sol de la surface de la Terre et la quantité d'eau utilisée pour la végétation.



Les données extraites d'ERA5-Land , à savoir les précipitations (P) , l'évapotranspiration (ETP) et le ruissellement (R) ont été traité par le langage de programmation Javascript dans l'environnement de Google Earth Engine afin de calculer la valeur de l'infiltrations , par l'application de l'expression mathématique  $I = P - ET - R$  ou I représente la valeur de l'infiltration, P les précipitations, ET l'évapotranspiration et enfin R qui représente le ruissellement.



**Figure 22.** (a)(b). Exemple des représentations graphiques des données des précipitations et l'évaporation générés par le service Cloud Google Earth Engine.

### Extraction des données

Les composantes du bilan ainsi que les paramètres caractéristiques du climat de la région sont traitées au pas de temps mensuel pas de temps mensuel :

Le script correspondant comporte plusieurs filtres , un filtre pour la délimitation de la zones d'étude importé sur la plateforme GEE sous forme de fichier shp, un filtre « **date** » pour déterminer la série temporelle représentative allant de 1981 à 2021, Le filtre « **reduce** » pour l'agrégation des valeurs de la précipitation afin d'éviter un traitement dans l'environnement Excel pour extraire les paramètres statistiques ainsi minimiser la durée du traitement; en outre, une expression mathématique a été introduire afin de changer l'unité présente dans la base des données ERAS du m au mm (Figure 24).

Les informations sur la façon dont ces paramètres climatiques sont calculés sont données dans la documentation sur les processus physiques de l'IFS (<https://www.ecmwf.int/file/25544/download?token=dILQCwmd>) .

```

var ROI = ee.FeatureCollection("users/amokranihibi/basin_boundry");
var ERA5= ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY");
var startdate = ee.Date.fromYMD(1980,1,1);
var enddate = ee.Date.fromYMD(2021,11,30);
var ERAS5_LANDTEMP = ERA5.filterDate(startdate,enddate)
    .filterBounds(ROI)

.select(["total_precipitation","runoff","total_evaporation","potential_evaporation",'volumetric_soil_water_la
yer_1','volumetric_soil_water_layer_2','volumetric_soil_water_layer_3','volumetric_soil_water_layer_4']);
//var ROI = ee.Geometry.Rectangle(25.3, 41.05, 25.4, 41.15);
//la nouvelle percipitation
var precipitation = function(image) {
  var exp = image.expression('(P * 1000 * 30)', {'P':image.select('total_precipitation')}).rename('percipitation')
  return image.addBands(exp)
};
var newmap = ERAS5_LANDTEMP.map(precipitation)

//la nouvelle ruissellment
var Ruisselement = function(image) {
  var exp = image.expression('(R * 1000 * 30)', {'R':image.select('runoff')}).rename('Ruisselement')
  return image.addBands(exp)
};
var newmap = newmap.map(Ruisselement)

//la nouvelle evaporation
var evaporation = function(image) {
  var exp = image.expression('(E * 1000 * 30)', {'E':image.select('total_evaporation')}).rename('evaporation')
  return image.addBands(exp)
};
var newmap = newmap.map(evaporation)

//la calcul de Infiltration "I=P-R-E" dans band "recharge"
var Recharge = function(image) {
  var exp = image.expression('(P - R -
E)', {'P':image.select('percipitation'),'R':image.select('Ruisselement'),'E':image.select('evaporation')}).rename('
recharge')
  return image.addBands(exp)
};
var newmap = newmap.map(Recharge)
//la calcul de SM7
var SM7 = function(image) {
  var exp = image.expression('(SM *
1000)', {'SM':image.select('volumetric_soil_water_layer_1')}).rename('volumetric_soil_water_layer_1_mm')
  return image.addBands(exp)
};
var newmap = newmap.map(SM7)

//la calcule de SM28
var SM28 = function(image) {
  var exp = image.expression('(SM *
1000)', {'SM':image.select('volumetric_soil_water_layer_2')}).rename('volumetric_soil_water_layer_2_mm')
  return image.addBands(exp)
};
var newmap = newmap.map(SM28)

```

```

//les Graphs pour toutes les bandes
function chartpercipitation(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('percipitation'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000, 'system:time_start').setOptions({
  title: 'percipitation month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#ff0000']
});
print (TS2)}
function chartevaporation(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('evaporation'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000, 'system:time_start').setOptions({
  title: 'evaporation month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#ff0000']
});
print (TS2)}
function chartRuisselement(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('Ruisselement'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000, 'system:time_start').setOptions({
  title: 'Ruisselement month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#ff0000']
});
print (TS2)}
function chartRecharge(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('recharge'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000, 'system:time_start').setOptions({
  title: 'Infiltration month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#ff0000']
});
print (TS2)}
function chartPEvop(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('potential_evaporation_mm'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000,
'system:time_start').setOptions({
  title: 'potential_evaporation month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#00AAAA']
});
print (TS2)}
function chartSM7(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('volumetric_soil_water_layer_1_mm'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000,
'system:time_start').setOptions({
  title: 'SM7 month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#AAAA00']
});
print (TS2)}
function chartSM28(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('volumetric_soil_water_layer_2_mm'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000,
'system:time_start').setOptions({
  title: 'SM28 month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#AAAA00']
});
print (TS2)}
function chartSM100(img){
var TS2 = ui.Chart.image.series(newmap.select('volumetric_soil_water_layer_3_mm'), ROI, ee.Reducer.mean(), 10000,
'system:time_start').setOptions({
  title: 'SM100 month mean value by ',
  vAxis: {title: 'mm'},
  colors:['#AAAA00']
});
chartPEvop(newmap)
chartpercipitation(newmap)
chartevaporation(newmap)
chartRuisselement(newmap)
chartRecharge(newmap)
chartSM7(newmap)
chartSM28(newmap)
chartSM100(newmap)
chartSM289(newmap)

```

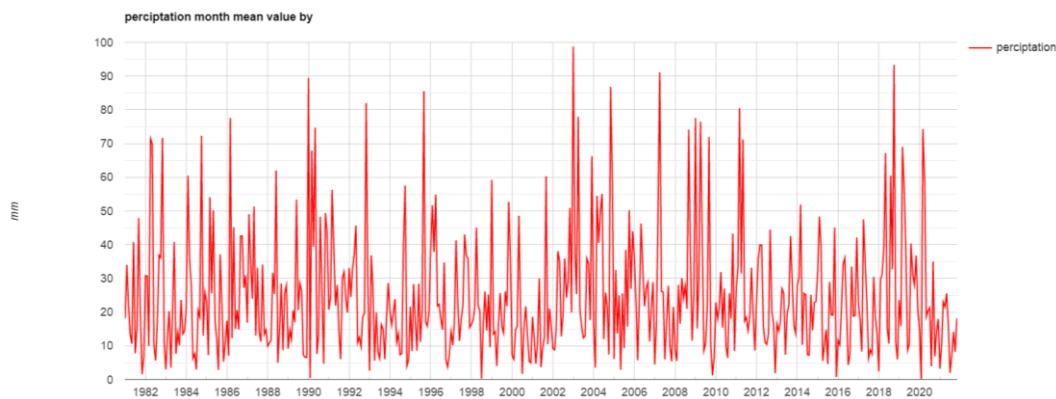
**Figure 24.** Code JavaScript exécuté pour l'extraction des données.

## Résultat de l'exécution du script

L'exécution du script a généré des graphes ainsi que des données sous format csv représentant les différents composants du bilan hydrique à savoir :

### Précipitation (P) (mm)

Elle représente l'eau liquide et gelée accumulée, y compris la pluie et la neige, qui tombe à la surface de la Terre ;



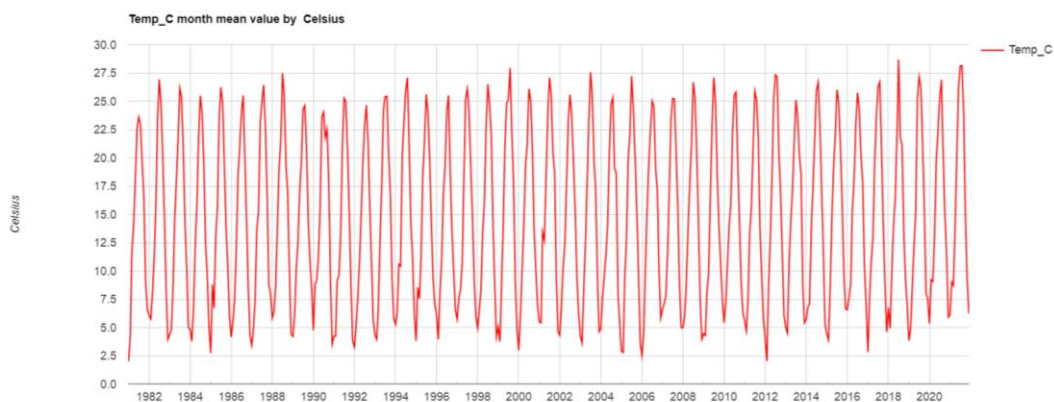
**moyenne 312 min 203,46 max 424**

**Figure 23.** Variation de la pluviométrie dans le bassin de Télijdjene pour la période (1981) - (2021).  
Source source GEE

L'analyse des données pluviométriques (Fig. 25) montre que le module pluviométrique moyen annuel est de l'ordre de 313 mm, L'année 2001 a été la moins pluvieuse avec 203 mm tandis que l'année 1990 est la plus arrosée (424 mm).

### La température

Ce paramètre est utilisé conjointement avec les précipitations, il présente les températures mensuelles minimales, au niveau du bassin de Télijdjene,



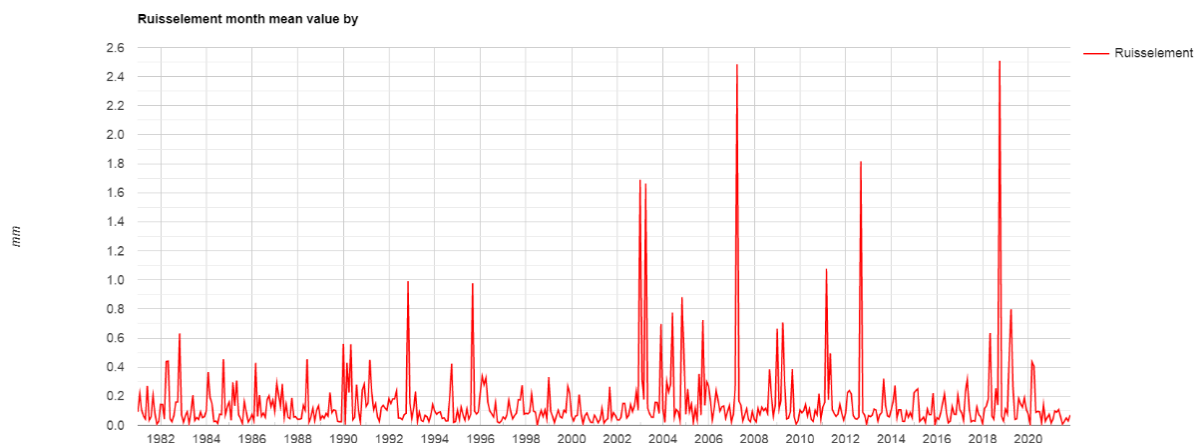
**moyenne 15C° min 2° max 29C°**

**Figure 24.** Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales dedans le bassin de Télijdjene (source GEE)

La figure 26 montre que la température moyenne est de 15°C. La température minimale Moyenne est de 2°C enregistrée au mois de Décembre alors que la température maximale est de 29°C, enregistrée au mois de Juillet

### **Le ruissellement**

(R) (mm) qui représente la quantité d'eau qui s'écoule soit en tant que surface ou sous la surface du sol, sous la forme d'un sous la surface du sol ;



**Figure 25 .Variation du ruissellement dans le bassin de Téli djene (source GEE)**

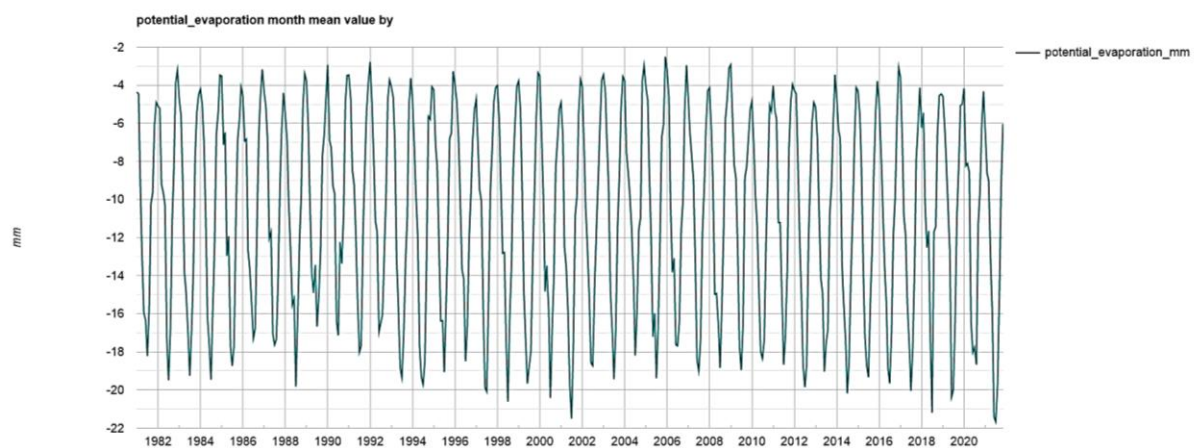
La figure 7 montre que la valeur moyenne du ruissellement est de 1.4 mm, la maximale 2.5 mm et une minimale de 0.002 mm.

### **L'évapotranspiration (ET) (mm)**

Elle représente la quantité d'eau qui s'évapore de la surface de la Terre et la quantité d'eau utilisée, L'évapotranspiration est définie, comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère. Elle représente une des composantes fondamentales du bilan hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrologique d'une région ou d'un bassin versant. Cependant, on distingue :

- l'évapotranspiration potentielle ETP, qui correspond à la quantité d'eau susceptible d'être Évaporée par une surface d'eau libre, par un couvert végétal.
- l'évapotranspiration réelle (ETR), qui correspond à la quantité d'eau effectivement (réellement) évaporée par le sol et transpirée par la végétation.

Les valeurs des deux paramètres ont été extraites de la plateforme GEE, leurs variation est présenté sur les deux graphiques suivant figure 8 et figure 9.



**Figure 26.** Variation de ‘évapotranspiration réelle dans le bassin de Télijdjene(source GEE)

L’analyse du graphe de la figure 9 et montrent que la valeur moyenne interannuelle de l’ETP durant la période 1981-2011 est de 12 mm environ. Cependant, la valeur maximale de l’ETP est révélée au mois de Juin 2021 21mm, alors que le minimum est enregistré en période de Janvier 2005 évalué à 2.5 mm.

Les valeurs de l’ETP croissent de 1086 à 1265 mm avec l’augmentation de la température et la baisse remarquable des précipitations annuelles.

L’ETP sera utilisé à la fois au calcul du bilan hydrique et dans la comparaison de l’évolution du niveau de la nappe étudiée des deux campagnes piézométriques 1991-2018.

#### **Réserve facilement utilisable (RFU) (mm)**

Elle correspond à la quantité d’eau stockée dans la couche supérieure du sol qui est un paramètre essentiel pour le secteur agricole mais aussi pour les services de pompiers) Les changements de stockage (SC) (mm) qui représentent les changements dans la quantité d’eau stockée dans les couches supérieures du sol jusqu’à 289 cm.

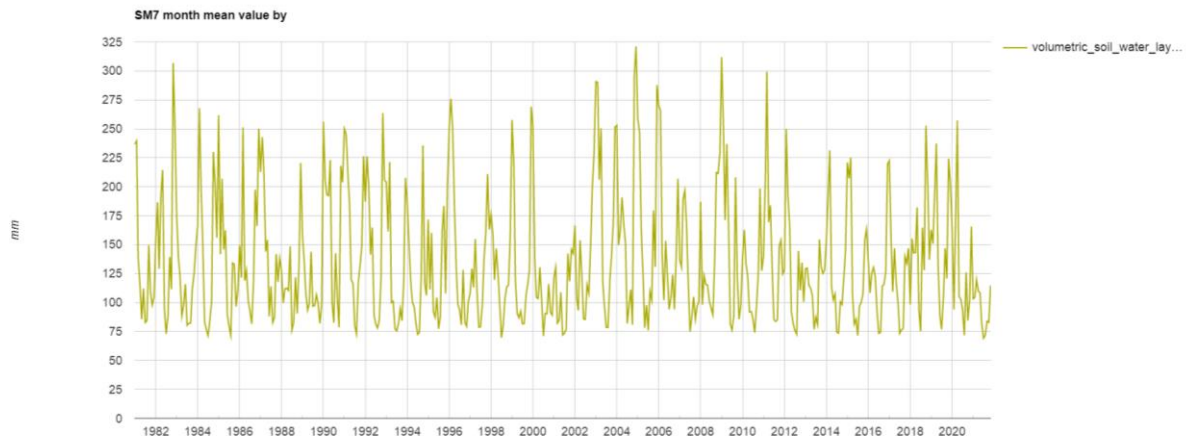


Figure 27. Variation de RFU dans le bassin de Téli djene (source GEE)

### Caractéristiques climatiques de la région et de la région

Différentes formules et diagrammes permettent d'identifier Le climat, et se dernier joue un rôle important dans le bilan hydrique.

On identifie le climat de la région de Téli djene par différentes formules et diagrammes.

#### 1- Diagramme Omrothermique de GAUSSEN ET BAGNOULS :

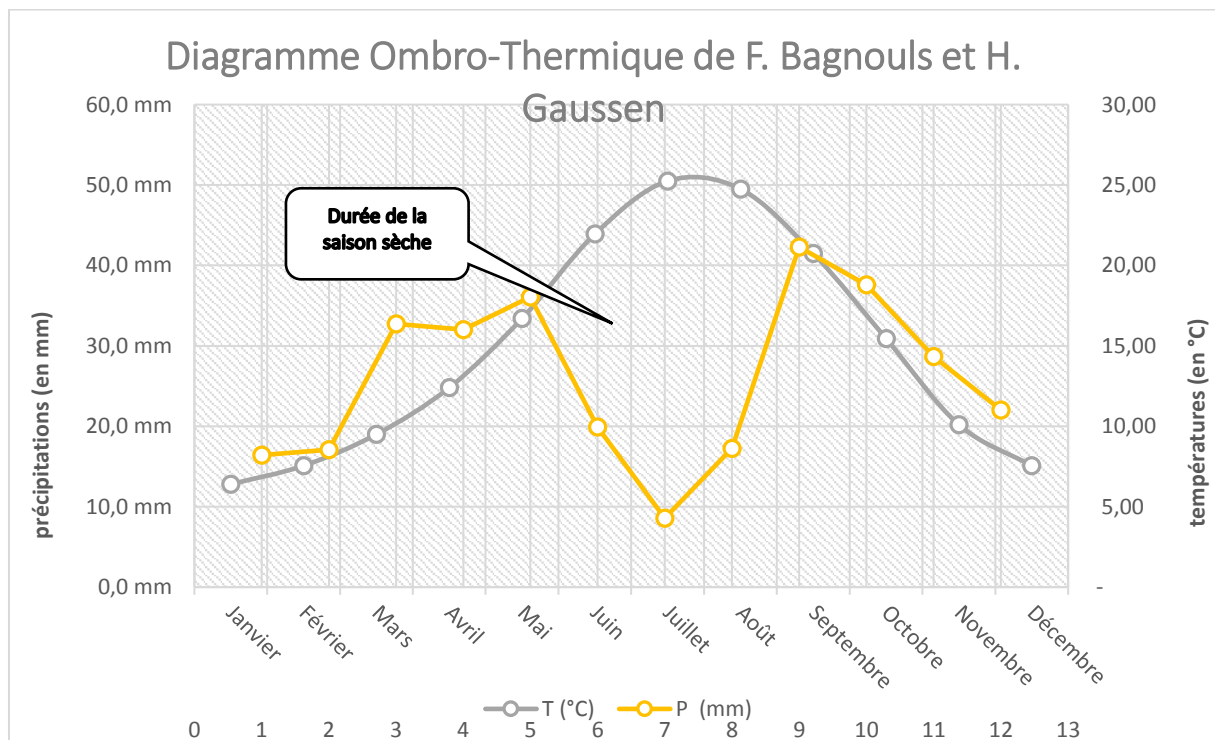


Figure 28. Diagramme Ombrothermique de « GAUSSEN ET BAGNOULS » (source GEE)

D'après le la courbe pluviométrique de « GAUSSEN ET BAGNOULS », dans les mois de juillet et aout sont les mois sec, parce que  $P < 2T^{\circ}\text{C}$



### Indice d'aridité annuel de E. De MARTONNE

P= précipitation annuelle (mm).

T=température annuelle °C.

Le climat est semi-humide

$$I = \frac{P}{T+10} = 312/(15+10)= 12.48$$

Pour cette valeur le climat est semi-aride

Valeur de I	Type de Climat
0 - 5	Hyper aride
5 - 10	Aride
10 - 20	Semi-aride
20 - 30	Semi-humide
30 - 40	Humide
40 - 55	Hyper Humide

### Indice d'aridité mensuelle

P= précipitation mensuelle (mm).

T=température mensuelle °C.

$$I = \frac{12p}{T + 10}$$

Indice d'aridité	13,62	13,01	20,88	16,89	15,82	7,34	2,87	5,89	16,63	17,65	17,61	16,86
------------------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	-------	-------	-------	-------

### Indice d'aridité de la FAO

I = P/ETP =0.45

I= 0.45 donc zone semi-aride ou sahelien

Climat	Indice de FAO
Hyper aride	P/ETP < 0,03
Aride ou désertique	0,03 < P/ETP < 0, 2
Semi-aride ou sahélien	0,2 < P/ETP < 0,5
Sub-humide	0,5 < P/ETP < 0,75

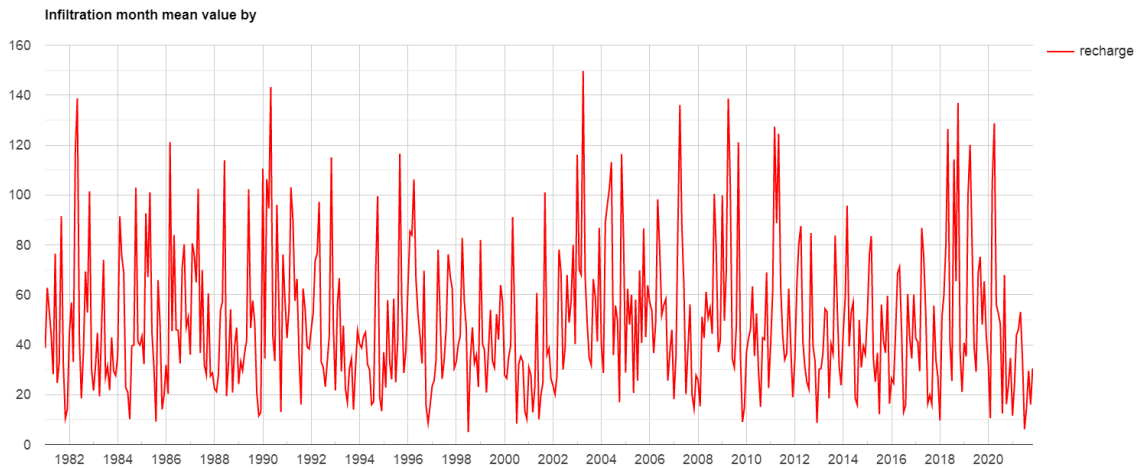
### Calcul de l'infiltration

L'infiltration a été calculée moyennant un code (figure 10) qui introduit l'expression mathématique

( I = P – ET – R) de la valeur de l'infiltration sur les 3 bandes déjà extraites dans GEE représentant les valeurs des précipitation, de l'ET ainsi que le ruissellement. Une nouvelle bande comportant les valeur de ruissellement a été crée et disponible sur la plateforme GEE (figure 11) .

```
//la calcul de Infiltration "I=P-R-E" dans band "recharge"
var Recharge = fonction(image) {
var exp = image.expression('(P - R - E)',{ 'P':image.select('percipitation'),'R':image.select('Ruisselement'),'E':image.select('evaporation')}).rename('recharge')
return image.addBands(exp)
```

**Figure 31.** code JavaScript du calcul de la valeur de l'infiltration (GEE)



**Figure 292.** variation de l'infiltration durant la période 1981 à 2020 calculé par GEE

La figure montre que la valeur maximale de l'infiltration est enregistrée en 2003 estimé à 150mm, la moyenne inter-annuelle est de 22mm avec une minimale enregistré en 2021 de 6mm. Ces

### Calcul du bilan hydrique pour la station de contrôle de Tébessa

Afin de valider les résultats de calcul des paramètres climatiques ainsi que les composantes du bilan hydrique, une étude classique a été menée sur la région de Tébessa. Ce choix de station fond sur la disponibilité de la plus longue série de mesures ce qui la rendre plus représentative aux caractéristiques générale de la région.

Les données de cette station ont été recueillies auprès de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH). Les caractéristiques de la station sont portées dans le tableau suivant :

Station	Code	Coordonnées			Durée d'observation
		Longitude	Latitude	Altitude	
TEBESSA	12-03-01	8° 13' E	35° 48' N	812.6 m	112

Les résultats seront présentés en forme de tableaux pour tous les paramètres requis.

#### 1. Les températures

La température est un paramètre important qui se caractérise par la somme d'énergie qui est en relation avec la croissance des plantes et par le seuil de températures minima et maxima influençant directement la phase de développement végétal.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy. Ans
T C°	6.40	7.55	9.50	12.40	16.70	21.95	25.25	24.75	20.75	15.45	10.10	7.55	14.86
T <sub>min</sub> C°	0.70	1.90	2.90	5.60	9.50	13.50	16.00	16.30	13.20	8.70	4.20	1.70	7.85
T <sub>max</sub> C°	12.10	13.20	16.10	19.20	23.90	30.40	34.50	33.20	28.30	22.20	16.00	13.40	21.88
T <sub>M-T<sub>m</sub></sub> C°	11.40	11.30	13.20	13.60	14.40	16.90	18.50	16.90	15.10	13.50	11.80	11.70	14.03

**Tableau 3. moyenne des températures mensuelles de la station de Tébessa**

Avec :

T C° : température moyenne mensuelle en degré Celsius

T<sub>min</sub> C° : température moyenne mensuelle minimale en degré Celsius

T<sub>max</sub> C° : température moyenne mensuelle maximale en degré Celsius

T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub> : altitude thermique

## 2. Le vent

Dans la région les vents dominants sont de direction Sud-ouest. L'intensité maximale à la station de Tébessa est observée durant les mois d'automne. La vitesse moyenne annuelle des vents est plutôt modérée avec une valeur voisinant 2.6 m/s.

Le tableau suivant donne la moyenne mensuelle de la force du vent en m/s.

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A	Année
V (m/s)	1.8	1.9	1.9	2.8	2.0	2.3	2.1	2.1	2.1	2.0	2.1	1.7	2.60
N <sup>br</sup> de jour du vent	3	3	5	6	6	7	6	7	5	4	6	5	63

**Tableau 4. la moyenne mensuelle de la vitesse du vent « station de Tébessa 1984-1998 »**

## 3. L'évaporation

Le tableau suivant résume les moyennes de l'évapotranspiration au niveau de la station de Tébessa.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Evapotranspiration (mm)	33	47	87	131	174	213	241	213	151	92	49	32	1463
Evapotranspiration (%)	2.3	3.2	6.0	9.0	11.9	14.6	16.5	14.6	10.3	6.3	3.3	2.2	100

**Tableau 5. la moyenne mensuelle de l'évapotranspiration**

#### 4. Pluie

Les pluies moyennes mensuelles représentées dans le tableau suivant traduisent clairement les variations saisonnières et leur distribution à l'échelle annuelle. On remarque l'existence d'une saison sèche qui correspond aux mois de juillet à Août, avec des pluies moyennes mensuelles inférieures 5%, les autres mois sont relativement humides

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A
P (mm)	38,46	32,20	29,46	27,26	29,15	23,99	36,81	34,06	34,43	25,87	12,29	18,82
P (%)	11,22	9,39	8,60	7,95	8,50	7,00	10,74	9,93	10,04	7,55	3,59	5,49

**Tableau 6. Pluie moyenne mensuelle**

Pour l'estimation de la pluie moyenne annuelle sur la zone d'étude. Nous avons utilisé les données de la station de Tébessa, qui représente une série de données étalées sur 100 ans.

La moyenne de pluie annuelle serait donc de 342.49 mm pour la station de Tébessa.

#### 5. Les phénomènes climatiques accidentels

##### Les orages

Les orages sont observés dans la région en particulier durant la période estivale ; violents, ils provoquent avec l'action éolienne des dégâts importants sur les cultures en place.

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A	Année
Station Tébessa	5.7	2.2	0.4	0.1	0.1	0.1	1.1	2.1	3.6	4.4	2.9	5.7	28.4

**Tableau 7. Fréquence mensuelle des orages**

##### La neige

Il neige en moyenne 4.5 jour/an dans la région de Tébessa. Les chutes importantes sont surtout enregistrées sur les hauteurs que sur les plaines.

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A	Année
Station Tébessa	0.0	0.1	0.1	1	1.7	1.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5

**Tableau 8. Fréquence mensuelle de neige a la station de Tébessa.**

##### La grêle

La grêle qui provoque en général des dégâts sur la production végétale est très peu ré pondue dans la région d'étude

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A	Année
Station Tébessa	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	1.3

**Tableau 9.** Fréquence mensuelle de grêle à la station de Tébessa

#### La gelée

La gelée s'observe à partir du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois d'Avril avec un maximum de huit jours aux mois de Décembre et Janvier.

La pratique de la culture sous serre est actuellement le meilleur moyen pour protéger les cultures primeurs contre la gelée.

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A	Année
Station Tébessa	0.0	0.1	1.9	7.4	7.5	5.1	4.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	26.6

**Tableau 10.** Fréquence mensuelle de gelée à la station de Tébessa

#### Les brouillards

Le nombre de jours de brouillards est de « 2.2 », relevé à la station de Tébessa est négligeable et ne peut influencer d'une manière appréciable la durée totale d'ensoleillement.

Mois	S	O	N	D	J	V	M	A	M	J	J	A	Année
Station Tébessa	0.1	0.4	0.5	0.4	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	2.2

**Tableau 11.** Fréquence mensuelle de brouillards à la station de Tébessa

#### Le sirocco

La durée pendant laquelle souffle le sirocco est très variable. Il est en général de direction Sud-ouest et Sud-est. Il est très fréquent au niveau de la zone d'études et entraîne une augmentation d'évapotranspiration.

Sur la base de l'étude du climat nous pouvons conclure que la zone d'étude se caractérise par :

- Un climat semi-aride
- Une période de gelée relativement longue
- Un nombre de jour de sirocco élevé

Calcul des Pluies efficaces

## Détermination des pluies efficaces

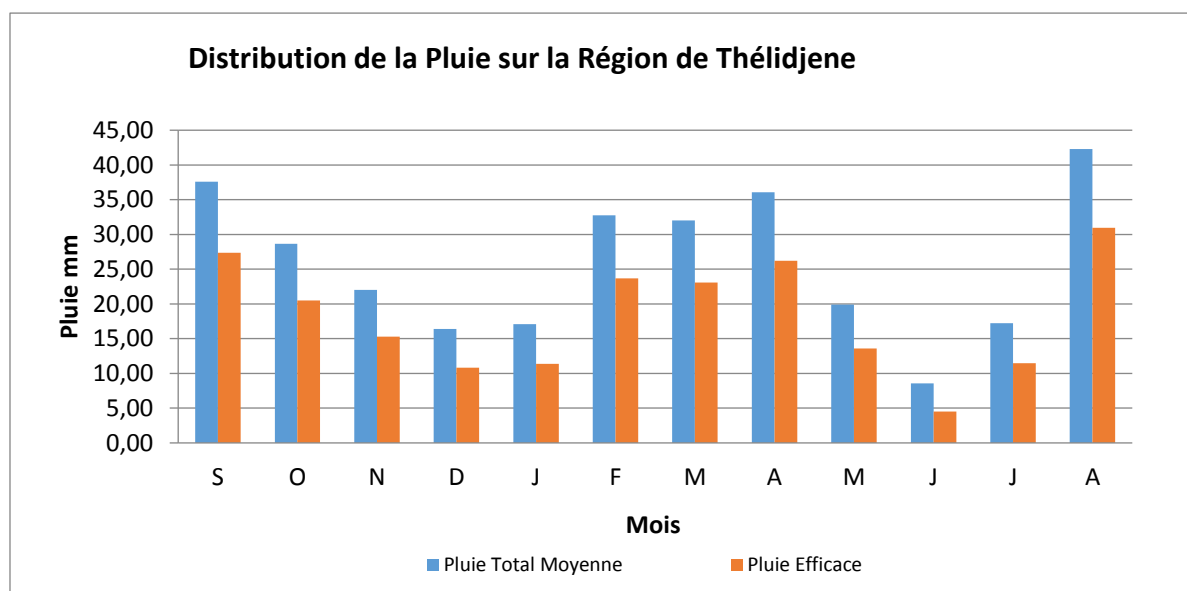
Désignation	Méthode de Calcul	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
<b>Pluie Mensuelle Moyenne (mm)</b>		37,58	28,67	22,02	16,41	17,09	32,75	32,00	36,07	19,91	8,58	17,24	42,28	310,60
<b>Pluie Efficace, mm</b>	FAO N°56	19,42	13,63	9,31	5,67	6,11	16,29	15,80	18,45	7,94	0,58	6,20	22,48	
	USDA	35,32	27,35	21,24	15,98	16,62	31,04	30,36	33,99	19,27	8,46	16,76	39,42	
	Coefficient Moyen	73%	71%	69%	66%	67%	72%	72%	73%	68%	53%	67%	73%	0,69
	<b>Pluie efficace (mm)</b>	27,37	20,49	15,28	10,82	11,37	23,66	23,08	26,22	13,61	4,52	11,48	30,95	218,86

### (Méthode FAO N° 56)

- 1- Pluie Effective =  $0.6 * \text{Pluie Total} - 10$  (Pluie total < 70 mm)
- 2- Pluie Effective =  $0.8 * \text{Pluie Total} - 24$  (Pluie total > 70 mm)

### Méthode USDA (Soil Conservation Services USA):

- 1- Pluie Effective =  $\text{Pluie Total} / 125 * (125 - 0.2 * \text{Pluie Total})$  (Pluie total < 250 mm)
- 2- Pluie Effective =  $125 + 0.1 * \text{Pluie Total}$  (Pluie total > 125 mm)



## 1. Calcul de l'évapotranspiration :

### Introduction

L'estimation des besoins en eau des plantes suivant l'espèce, est liée à de nombreux facteurs climatiques (pluviométrie, températures, hygrométrie etc...),

C'est pourquoi on fait appel à la notion de l'évapotranspiration qui met en relation ces facteurs.

On désigne par l'évapotranspiration la somme des quantités d'eau utilisée par les Plantes: (eau de constitution, eau de végétation et celle évaporée par la surface du soi), on peut l'évaluer à l'unité de surface. En pratique, il est plus simple d'exprimer l'évapotranspiration en

hauteur d'eau en (mm). Mais la notion de l'évapotranspiration est-elle même assez mal définie car les quantités évaporées et transpirées dépendent dans une certaine mesure des taux d'humidité préexistants dans le sol.

Ainsi. Pour définir un critère plus précis. On introduit l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui correspond à la double hypothèse du maintien du taux d'humidité du sol à la valeur très voisine de sa capacité de rétention et d'un développement végétatif optimum.

Plusieurs méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentiel (ETP) ont été proposées, on peut distinguer,

- ✓ Des méthodes résultantes d'ajustement statistique : Blaney-Criddle. Thornwaithe et Turc.
- ✓ Des méthodes résultantes d'une analyse de l'évapotranspiration potentiel (ETP) en tant que processus énergétique : Penman. Bouchet, Broche et Gerber.

Chacune d'entrés elle n'est bien adaptée qu'à un contexte limité, qu'elle soit spécifique d'une zone climatique donnée, qu'elle mette en jeu des données climatiques, non disponibles.

En fait L'ETR d'une culture dépend d'abord du climat mais aussi de la culture elle-même et des conditions de la croissance. On est donc amené à définir un coefficient cultural  $K_c$  permettant le calcul de l'ETR d'une culture donnée à partir de la référence climatique -que constitue l'ETP.

$$ETR = K_c \cdot ETP$$

Le coefficient cultural spécifique d'une culture, donnée prend des valeurs différentes selon le stade végétatif de la culture il est défini par expérimentation. Nous présentons ci-dessous trois méthodes de calcul de L'ETP.

#### **Calcul de L'ETP selon la méthode de Turc**

L'expression de la formule est la suivante :

$$ETP_{mm/mois} = C \cdot K (I_g + 50) \left( \frac{t}{t + 50} \right)$$

Avec ;

C : facteur correctif fonctions de l'humidité relative de l'air.

C = 1 ; Si l'humidité relative de l'air < 50%

$C = 1 + \frac{50-hr}{70}$  ; Si l'humidité relative de l'air > 50%

$K = 0.40$  coefficient adopté pour tous les mois considérés sauf pour le mois de Février ou il égale à 0.37

$K = 0.31$  pour une période décadaire

$t$  : température moyenne mensuelle

$I_g$  : radiation solaire globale du mois considéré (calories/cm<sup>2</sup>/j)

$$I_g = I_{ga} \left( 0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

$I_{ga}$  : radiation maximale qui dépend de la latitude. (calories/cm<sup>2</sup>/j)

$H$  : durée mensuelle du jour qui dépend de la latitude

$h$  : durée de l'insolation effective du mois.

$\frac{h}{H} = 1 - \frac{n}{10}$  : Insolation relative. En heures

$n$  : nébulosité exprimé on OKTAS ou en dixièmes.

(1) Formule de Blaney-Criddle (1950)

$$ETP = 0.254 K (1.8 t + 32)P$$

$t$  : températures moyennes mensuelles (C°)

$P$  : Pourcentage de la durée d'éclairement pour chaque mois de l'année en fonction de la latitude.

$$K = K_c \cdot K_t$$

$K_c$  = coefficient cultural

$K_t$  = coefficient climatique

$$K_t = 0,0173 (1.8t + 32) - 0.314$$

#### a. Formule de Penman :

Pour notre cas on a employé la formule de Penman modifiée a été publiée par la F.A.O en (1977).

$$ETP_{mm/j} = C(W \cdot R_n + (1 - W) \cdot F(u) \cdot F(ea - ed))$$

Avec ;

$W \cdot R_n$ : Paramètre Rayonnement

$(1 - W) \cdot F(u) \cdot F(ea - ed)$  : Paramètre aérodynamique

$W$  : facteur de pondération lié à la température

$R_n$  : représente le rayonnement net en évaporation équivalente (mm/j)

$F(u)$  : fonction liée au vent



(ea-ed) : différence entre la tension de vapeur saturante à la température moyenne de l'air et la tension de vapeur réelle de l'air l'une et l'autre étant exprimée en millibar.

C : facteur de correction pour compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

#### Le paramètre F(u) :

Le paramètre F(u) est une fonction liée au vent. L'effet du vent sur l'ETP avec la méthode de Fenman a été défini comme suit :

$$F(u) = 0.27 \left( 1 + \frac{U_2}{100} \right)$$

Où  $u_2$  représente le parcours total du vent en Km/J à une hauteur de 2m. Cette formule est valable quand (ea-ed) est exprimée en millibars. Si les données concernant le vent ne sont pas recueillies à une hauteur de 2m. Il faut corriger les mesures du vent prises à une hauteur différentes à l'aide des facteurs de corrections.

#### Le rayonnement Net ( $R_n$ ) :

$R_n$  est la différence entre la totalité du rayonnement descendant et du rayonnement ascendant mais c'est une donnée rarement disponible on peut calculer  $R_n$ . s'il en possède les mesures des heures d'insolation ainsi que les données température et l'humidité les calculs seront plus simples on connaît le rayonnement solaire. Il est donné par la relation suivante :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$R_{ns}$  : Rayonnement net de courte longueur d'onde (mm/j)

$R_{nl}$  : Rayonnement net Cie grande longueur d'onde

$R_s$ : rayonnement solaire est fonction de la latitude et de l'époque de l'année. Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_s = \left( 0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) R_a$$

$R_a$  : rayonnement extraterrestre exprimé en évaporation équivalente en (mm/j)

$\frac{n}{N}$  : Représente le rapport entre le nombre réel d'heures d'insolation et la durée astronomique possible d'insolation

$R_{nl}$  : est donnée par la relation suivante :

$$R_{nl} = F(t). F(ed)F \left( \frac{n}{N} \right)$$

$F(t)$  : Correction pour l'effet de la température sur le rayonnement net de grande longueur d'onde  $R_{nl}$

$$F(t) = \frac{4}{\sigma \cdot K \cdot j}$$

F(ed) : Correction pour l'effet de tension de vapeur d'air sur le rayonnement net de grande longueur d'onde  $R_{nl}$

$$F(ed) = 0.34 - 0.044\sqrt{ed} \text{ Millibars}$$

$F\left(\frac{n}{N}\right)$  : Correction pour l'effet du rapport entre le nombre réel et nombre astronomique possible d'heures d'insolation sur le rayonnement net de grande longueur d'onde  $R_{nl}$

$$F\left(\frac{n}{N}\right) = 0.1 + 0.9 \frac{n}{N}$$

**Tableau 10. L'Evapotranspiration Selon la Méthode Penman**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes Annuelles
T C°	6,40	7,55	9,50	12,40	16,70	21,95	25,25	24,75	20,75	15,45	10,10	7,55	14,863
ea(mb)	9,58	10,39	11,90	14,40	19,04	26,33	32,18	31,23	24,53	17,54	12,38	10,39	18,324
HR(%)	68,60	68,70	64,00	61,40	57,30	47,50	39,00	46,10	57,30	62,60	70,00	69,10	59,300
ed(mb)	6,57	7,14	7,62	8,84	10,91	12,51	12,55	14,40	14,06	10,98	8,67	7,18	10,118
U(km/jour)	147,00	190,00	156,00	156,00	156,00	147,00	156,00	130,00	138,00	147,00	147,00	173,00	153,583
f(u) (FAO 33)	0,67	0,78	0,69	0,69	0,69	0,67	0,69	0,62	0,64	0,67	0,67	0,74	0,685
Ra(mm/j)	7,65	9,60	12,25	14,60	16,45	17,15	16,75	15,45	13,13	10,70	8,25	6,90	12,406
N(h/jours)	10,10	11,00	11,90	13,10	14,00	14,50	14,30	13,50	12,40	11,30	10,30	9,80	12,183
n(h/jours)	4,94	5,71	6,33	7,47	8,97	10,02	11,10	10,36	8,29	6,61	5,39	4,74	7,494
Rs(mm/jours)	3,78	4,89	6,32	7,81	9,38	10,21	10,69	9,79	7,67	5,80	4,22	3,39	6,998
f(T)	12,08	12,31	12,63	13,18	13,94	14,99	15,71	15,59	14,75	13,72	12,72	12,31	13,661
f(ed)	0,23	0,22	0,22	0,21	0,19	0,18	0,18	0,17	0,18	0,19	0,21	0,22	0,201
f(n/N)	0,54	0,57	0,58	0,61	0,68	0,72	0,80	0,79	0,70	0,63	0,57	0,54	0,643
Rnl(mm/jours)	1,48	1,55	1,60	1,69	1,84	2,00	2,31	2,13	1,81	1,67	1,53	1,46	1,756
Rn(mm/jours)	1,35	2,12	3,14	4,17	5,20	5,66	5,71	5,21	3,94	2,68	1,64	1,08	3,492
W	0,52	0,54	0,57	0,61	0,67	0,73	0,76	0,75	0,71	0,65	0,58	0,54	0,635
c	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,750
ETo (mm/j)	1,25	1,74	2,30	3,03	4,01	4,98	5,71	4,88	3,56	2,46	1,49	1,26	3,054
N(j/mois)	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	30,500
ETo (mm/mois)	38,74	50,33	71,24	90,94	124,18	149,44	176,91	151,24	106,67	76,20	44,83	38,92	<b>1119,64</b>

**Tableau 12. Données climatique de la station de Tébessa (ANRH) et du Bulletin FAO N° 56**

**Tableau 13. L'Evapotranspiration Selon la Méthode TURC**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes Annuelles
T C°	6,40	7,55	9,50	12,40	16,70	21,95	25,25	24,75	20,75	15,45	10,10	7,55	14,86
Ra <sub>(mm/mois)</sub>	237,2	278,4	379,8	438,0	510,0	514,5	519,3	479,0	393,8	331,7	247,5	213,9	-
N <sub>(h/jours)</sub>	10,10	11,00	11,90	13,10	14,00	14,50	14,30	13,50	12,40	11,30	10,30	9,80	-
n <sub>(h/jours)</sub>	4,94	5,71	6,33	7,47	8,97	10,02	11,10	10,36	8,29	6,61	5,39	4,74	-
RS <sub>(mm/jours)</sub>	114,60	139,71	193,60	233,69	294,36	313,04	343,36	314,09	234,08	180,00	124,85	102,65	-
HR <sub>(%)</sub>	68,60	68,70	64,00	61,40	57,30	47,50	39,00	46,10	57,30	62,60	70,00	69,10	-
c	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,04	1,16	1,06	1,00	1,00	1,00	1,00	-
ET <sub>0</sub> (mm/mois)	34,35	40,68	66,66	88,34	118,00	134,14	142,84	131,74	103,02	77,47	47,88	34,46	<b>1019,58</b>

Données climatique de la station de Tébessa (ANRH) et du Bulletin FAO N° 56

**Tableau 14. L'Evapotranspiration Selon la Méthode Blanney-Criddle**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes Annuelles
T C°	6,40	7,55	9,50	12,40	16,70	21,95	25,25	24,75	20,75	15,45	10,10	7,55	14,86
n <sub>(h/jours)</sub>	4,94	5,71	6,33	7,47	8,97	10,02	11,10	10,36	8,29	6,61	5,39	4,74	-
n <sub>(%)</sub>	5,49	6,35	7,03	8,30	9,98	11,14	12,35	11,52	9,21	7,35	5,99	5,27	-
Kt	0,43	0,48	0,56	0,68	0,81	1,00	1,07	1,06	0,94	0,76	0,59	0,47	-
ET <sub>0</sub> (mm/mois)	26,14	35,37	49,21	78,08	127,82	203,05	260,92	238,30	153,02	85,11	45,15	28,74	<b>1330,91</b>

Données climatique de la station de Tébessa (ANRH) et du Bulletin FAO N° 56

**Tableau 15. L'Evapotranspiration Selon la Méthode Blanney-Criddle**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes Annuelles
T C°	6,40	7,55	9,50	12,40	16,70	21,95	25,25	24,75	20,75	15,45	10,10	7,55	14,86
n <sub>(h/jours)</sub>	4,94	5,71	6,33	7,47	8,97	10,02	11,10	10,36	8,29	6,61	5,39	4,74	-
n <sub>(%)</sub>	5,49	6,35	7,03	8,30	9,98	11,14	12,35	11,52	9,21	7,35	5,99	5,27	-
Kt	0,43	0,48	0,56	0,68	0,81	1,00	1,07	1,06	0,94	0,76	0,59	0,47	-
ET <sub>0</sub> (mm/mois)	26,14	35,37	49,21	78,08	127,82	203,05	260,92	238,30	153,02	85,11	45,15	28,74	<b>1330,91</b>

Données climatique de la station de Tébessa (ANRH) et du Bulletin FAO N° 56

**Tableau 16. Comparaison entre les différentes méthodes**

Mois	Méthodes			
	Penmann	TURC	Blanney-Criddle	Thornthwaite
Janvier	38,74	34,35	26,14	11,11
Février	50,33	40,68	35,37	15,35
Mars	71,24	66,66	49,21	28,71
Avril	90,94	88,34	78,08	49,02
Mai	124,18	118,00	127,82	89,46
Juin	149,44	134,14	203,05	137,99
Juillet	176,91	142,84	260,92	171,63
Août	151,24	131,74	238,30	155,10
Septembre	106,67	103,02	153,02	99,80
Octobre	76,20	77,47	85,11	54,64
Novembre	44,83	47,88	45,15	23,22
Décembre	38,92	34,46	28,74	13,78
<b>ET<sub>0</sub> (mm/An)</b>	<b>1119,64</b>	<b>1019,58</b>	<b>1330,91</b>	<b>849,80</b>

**Tableau 17. Fraction d'Eau Facilement Utilisable (RFU)**

Familles	Désignation	Profondeur des Racines*	Fraction d'Eau Facilement Utilisable	
			Théorique (RFU')	Réelle (RFU)
<b>Céréales et Fourragers</b>				
	BLE AVOINE	80	222,25	128,90
	ORGE	80	222,25	128,90
	LUZERNE	60	166,69	96,68
	SORGHO	60	166,69	96,68
<b>Légumes</b>				
	OIGNON SEC et AIL	50	138,91	80,57
	OIGNON VERT	50	138,91	80,57
	POMME DE TERRE CULTURE D'ÉTÉ	60	166,69	96,68
	POMME DE TERRE PRIMEUR	60	166,69	96,68
	CAROTTE	70	194,47	112,79
	AUBERGINE	80	222,25	128,90
	POIVRON ET PIMENT	75	208,36	120,85
	SALADE	40	111,12	64,45
	TOMATE DE SAISON	75	208,36	120,85
	FEVE DE SAISON	50	138,91	80,57
	PETITS POIS DE SAISON	50	138,91	80,57
	POIS CHICHES	80	222,25	128,90
<b>Fruits</b>				
	POMMIER POIRIER	120	333,37	193,36
	ABRICOTIER	120	333,37	193,36
	AMANDIER	170	472,28	273,92
	OLIVIER	170	472,28	273,92

\* Source: FAO Manuel N° 4, 2002

Capacité au champ (CC), %	35,45	
Point de Flétrissement Permanent (PFP), %	18,62	
Densité Apparente		1,65
Densité Réelle	2,30	
Porosité moyenne	0,26	
RFU' = (CC-PFP)*Densité apparente sol/ Densité apparente eau * Profondeur des racines	1,70	
RFU = F*RFU'; ou F varie entre 1/2 et 2/3. On a choisi pour cette application une valeur F = 0.58.	0,58	

## BILAN HYDRIQUE (station de tebessa)

**Tableau 18.** Variation mensuelle du bilan hydrique, RU =100 % capacité au champ

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
<b>P (m m)</b>	37,58	28,67	22,02	16,41	17,09	32,75	32,00	36,07	19,91	8,58	17,24	42,28	<b>310,6</b>
<b>plui,eff</b>	27,37	20,49	15,28	10,82	11,37	23,66	23,08	26,22	13,61	4,52	11,48	30,95	<b>218,9</b>
<b>ETP (mm)</b>	38,74	50,33	71,24	90,94	124,18	149,44	176,91	151,24	106,67	76,20	44,83	38,92	<b>1119,6</b>
<b>ETR (m m)</b>	21,05	27,36	33,59	43,47	49,42	59,63	85,80	85,75	76,05	54,18	31,81	21,17	<b>589,3</b>
<b>stock initial</b>	372,00	372,00	365,14	346,82	314,18	276,12	240,16	177,44	117,90	55,45	5,79	0	
<b>stock final</b>	378,32	365,14	346,82	314,18	276,12	240,16	177,44	117,90	55,45	5,79	-14,53	9,78	
<b>déficit et surplus</b>	6,32	-6,86	-18,31	-32,64	-38,06	-35,96	-62,72	-59,54	-62,45	-49,66	-20,32	9,78	
<b>ECOULEM ENT</b>	16,10												<b>16,1</b>

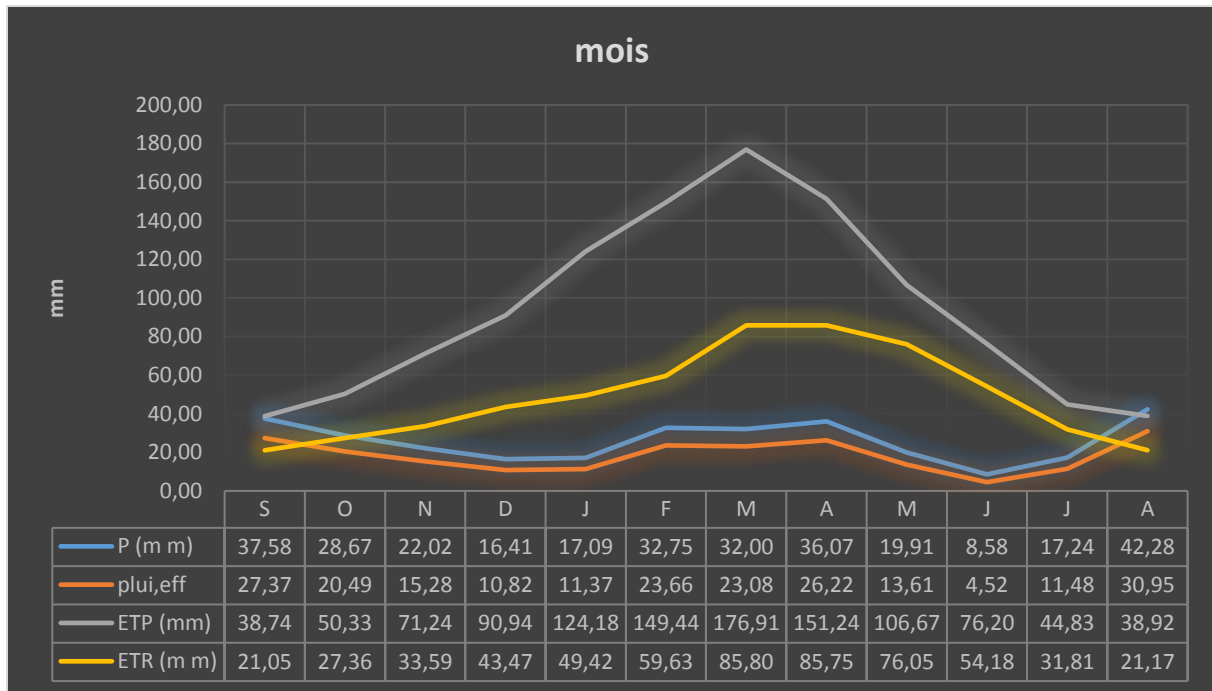
**Tableau 19.** Variation mensuelle du bilan hydrique, RU =RFU

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
<b>P (m m)</b>	37,58	28,67	22,02	16,41	17,09	32,75	32,00	36,07	19,91	8,58	17,24	42,28	<b>310,6</b>
<b>plui,eff</b>	27,37	20,49	15,28	10,82	11,37	23,66	23,08	26,22	13,61	4,52	11,48	30,95	<b>218,9</b>
<b>ETP (mm)</b>	38,74	50,33	71,24	90,94	124,18	149,44	176,91	151,24	106,67	76,20	44,83	38,92	<b>1119,6</b>
<b>ETR (m m)</b>	21,05	27,36	33,59	43,47	49,42	59,63	85,80	85,75	76,05	54,18	31,81	21,17	<b>589,3</b>
<b>stock initial</b>	59,00	65,32	58,45	40,14	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	
<b>stock final</b>	65,32	58,45	40,14	7,49	-30,56	-35,96	-62,72	-59,54	-62,45	-49,66	-20,32	9,78	
<b>déficit et surplus</b>	6,32	-6,86	-18,31	-32,64	-38,06	-35,96	-62,72	-59,54	-62,45	-49,66	-20,32	9,78	
<b>ECOULEM ENT</b>	16,10												<b>16,1</b>

**Tableau 20.** Variation mensuelle du bilan hydrique, RU =0

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
<b>P (m m)</b>	37,58	28,67	22,02	16,41	17,09	32,75	32,00	36,07	19,91	8,58	17,24	42,28	<b>310,6</b>
<b>plui,eff</b>	27,37	20,49	15,28	10,82	11,37	23,66	23,08	26,22	13,61	4,52	11,48	30,95	<b>218,9</b>
<b>ETP (mm)</b>	38,74	50,33	71,24	90,94	124,18	149,44	176,91	151,24	106,67	76,20	44,83	38,92	<b>1119,6</b>
<b>ETR (m m)</b>	21,05	27,36	33,59	43,47	49,42	59,63	85,80	85,75	76,05	54,18	31,81	21,17	<b>589,3</b>
<b>stock initial</b>	0,00	6,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	
<b>stock final</b>	6,32	-0,55	-18,31	-32,64	-38,06	-35,96	-62,72	-59,54	-62,45	-49,66	-20,32	9,78	
<b>déficit et surplus</b>	6,32	-6,86	-18,31	-32,64	-38,06	-35,96	-62,72	-59,54	-62,45	-49,66	-20,32	9,78	
<b>Percolation</b>	16,10												<b>16,1</b>

Donc notre réservoir de bassin reçoit 5.18 % de l'eau par an



**Figure 30.** Evolution mensuelle des différents composants du Bilan hydrique

## ETUDE DES APPORTS LIQUIDE

### 4.1. Apports Liquide:

En raison de l'absence des stations hydrométrique sur l'Oued, l'estimation de l'apport moyen annuel est faite selon les formules empiriques :

- Formule de SAMIE
- Formule de MALLET et GAUTHIER
- Formule de SOGREAHA
- Formule dite Algérienne
- Formule de COUTAGNE
- Formule de l'A.N.R.H

#### **1-Formule de SAMIE :**

$$Le = P^2(293 - 2.2\sqrt{S})$$

Et

$$A = Le \cdot S \cdot 10^{-3}$$

Ou :

- Le : Lame d'eau écoulee ; m
- P : Pluie moyenne annuelle ; m
- A : Apport moyen annuel ; m
- S : Surface du bassin versant ; Km<sup>2</sup>

$$Le = 32.62 \text{ mm}$$

Et

$$A = 12.92 \text{ Hm}^3$$

## 2-Formule de COUTAGNE :

$$Le = (0.164 - 0.00145\sqrt{S}).P$$

Et

$$A = Le.S$$

$$Le = 40.68 \text{ mm}$$

Et

$$A = 22.25 \text{ Hm}^3$$

## 3-Formule de l'A.N.R.H :

$$A = 0.513.P^{2.683}.Dd^{0.5}S^{0.842}$$

Ou :

Dd : densité de drainage ; Km / Km<sup>2</sup>

P : pluie moyenne annuelle ; m

$$Le = 68.88 \text{ mm}$$

Et

$$A = 37.68 \text{ Hm}^3$$

**Tableau 21. Tableau Récapitulative des Apports Moyens Annuels**

Formules	Lame d'eau Le ( mm )	Apport Moyen annuel A ( Hm <sup>3</sup> )
SAMIE	23.62	12.92
COUTAGNE	40.68	22.25
A.N.R.H	68.88	37.68
Moyenne	44.39	24.28

Donc la lame d'eau drainée à l'exutoire du bassin est estimée à : 44.39 mm soit 14.29% de l'eau.

### **Comparaison des données extraite de l'imagerie satellitaire aux données du bassin de Tébessa**

Dans le but de tester la fiabilité de l'outil développé pour l'automatisation du bilan hydrique, un traitement des données émanées de la station de Tébessa a été effectué. La valeur de l'infiltration calculée par la plateforme Google Earth engine est de 22 mm, tandis que celle révélée par le traitement des données issues de la station de Tébessa est de 16 mm. Bien que ces valeurs sont différentes, elles demeurent proches et dans le même intervalle, ces valeurs représentent respectivement une fraction de 6% et 6.8 % des précipitations.

## **Conclusion**

Les progrès récents en hydrologie ont permis des ensembles de données de pointe qui décrivent les variables terrestres du climat du passé à des échelles utiles pour les applications pratiques.

Les décideurs les acteurs non techniques rencontrent des difficultés pour d'acquérir des informations à partir de ces ensembles de données et d'en tirer le meilleur parti. Le présent travail utilise les fonctionnalités avancées offertes par la plateforme GEE librement disponible afin d'extraire la balance et ses composantes à diverses échelles spatiales et temporelles, en utilisant le jeu de données récemment publié ERA5-Land.

Les résultats de son application en comparant avec les résultats issus du traitement conventionnel de données d'un bassin riverain à la région d'étude, soulignent l'utilité et le caractère convivial de l'outil développé au terme de ce travail.



## References

**N. GORELICK, M. HANCHER, M. DIXON, S. ILYUSHCHENKO, D. THAU, R. MOORE, REM. SENS. OF ENVIR, 2017. 202, 18 – 27 (2017) ].**

**GOOGLE EARTH ENGINE, [HTTPS://EARTHENGINE.GOOGLE.COM/](https://earthengine.google.com/)**

**GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D., & MOORE, R. (2017).** GOOGLE EARTH ENGINE: PLANETARY-SCALE GEOSPATIAL ANALYSIS FOR EVERYONE. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 202, 18-27.

**MUÑOZ-SABATER, J., LAWRENCE, H., ALBERGEL, C., ROSNAY, P., ISAKSEN, L., MECKLENBURG, S., ... & DRUSCH, M. (2019).** ASSIMILATION OF SMOS BRIGHTNESS TEMPERATURES IN THE ECMWF INTEGRATED FORECASTING SYSTEM. QUARTERLY JOURNAL OF THE ROYAL METEOROLOGICAL SOCIETY, 145(723), 2524-2548.

**MUÑOZ-SABATER, J., DUTRA, E., AGUSTÍ-PANAREDA, A., ALBERGEL, C., ARDUINI, G., BALSAMO, G., ... & THÉPAUT, J. N. (2021).** ERA5-LAND: A STATE-OF-THE-ART GLOBAL REANALYSIS DATASET FOR LAND APPLICATIONS. EARTH SYSTEM SCIENCE DATA, 13(9), 4349-4383.

**IV. CHAPITRE**

**CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES  
EAUX SOUTERRAINES**

## Introduction

La caractérisation hydrochimique des eaux souterraines peut révéler directement ou indirectement les types de faciès des eaux souterraines, le processus d'évolution chimique des eaux souterraines et la source de contamination (Yan et al, 2021). Par conséquent, la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines est importante pour la gestion et la planification des ressources en eau. Les mécanismes de la circulation naturelle ainsi que des facteurs non naturels, régissent les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines au cours de ses processus de déplacement. La formation et les processus hydrogéochimiques des eaux souterraines sont affectés par divers facteurs complexes, dont la source de recharge, la direction d'écoulement des eaux souterraines, l'évaporation, l'altération des roches, les propriétés du sol, l'échange d'ions, le mélange d'eau salée et les activités anthropiques (Yan et al ; AL-BARAKAH et al, 2016)

De nombreuses méthodes, dont la méthode des facteurs d'influence, la corrélation de Pearson, méthode graphique, l'analyse statistique multivariée et la modélisation géochimique, ont été choisies pour étudier les propriétés hydrochimiques des sols des eaux souterraines ( Bobée et al,1981 ; Sadiki et al 2016 ; AL-barakah et al, 2016).

Dans ce travail une méthode graphique et une analyse multivarié a été utilisée, afin de comprendre les caractéristiques hydrogéochimiques et des processus évolutifs associés aux eaux souterraines

L'objectif de ce chapitre d'identifier les caractéristiques et les processus hydrogéochimiques des eaux souterraines des aquifères du Quaternaire et de la roche-mère dans le bassin de la rivière Dagujia. Cette étude comprend principalement :

- (1) l'analyse de la distribution spatiale des paramètres hydrochimiques hydrochimiques des eaux souterraines en en utilisant les analyses statistiques descriptives ;
- (2) l'évaluation des relations entre les paramètres hydrochimiques des eaux souterraines
- (3) l'identification des types de types de faciès et les processus d'évolution des eaux souterraines en utilisant les diagrammes de Piper et de Gibbs.

(4) déterminer les facteurs contrôlant les caractéristiques hydro chimiques des eaux souterraines.

Le choix des points d'eau (forages) échantillonnés ont été choisis selon l'accessibilité. 26 prélèvements pour analyse physico-chimique ont été réalisés en mois de novembre 2018. A chaque station, 2 litres d'eau ont été collectés et mis dans des bouteilles en plastique jetables. Ces points d'eau ont été localisés par leurs coordonnées géographiques, déterminées par GPS en utilisant le système de coordonnées WGS84 dans le tableau 1 et la figure 2.

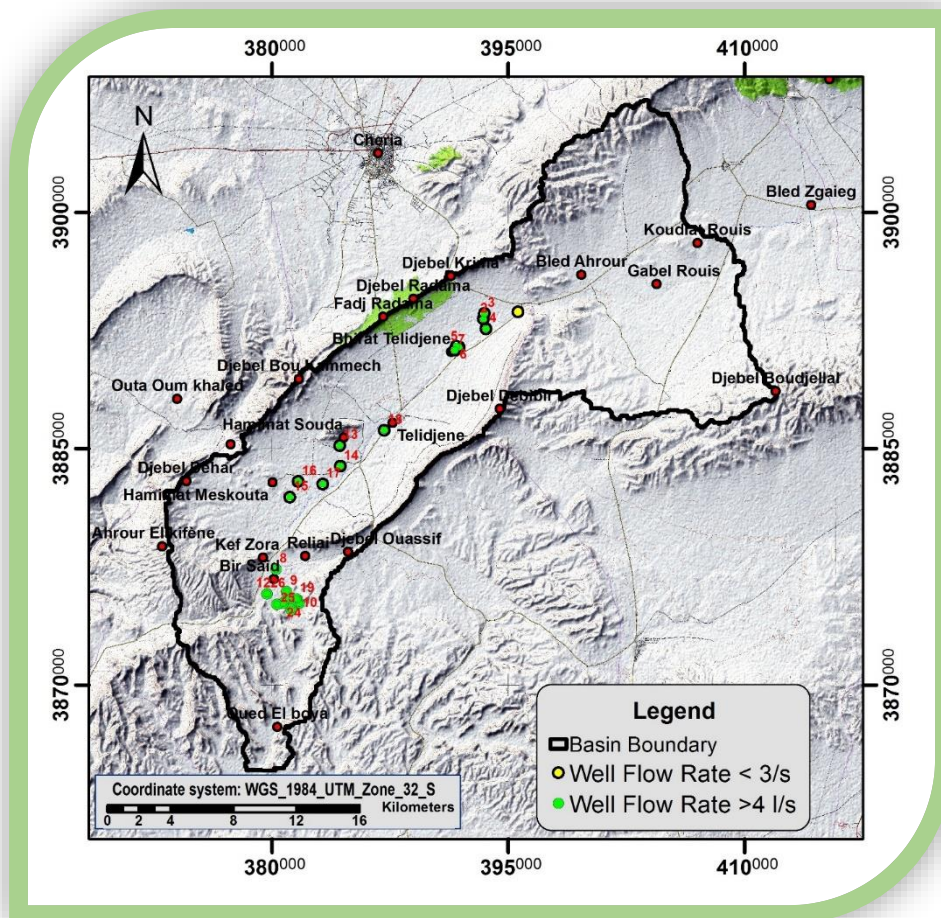


Figure 31. Localisation des points d'eau

Les analyses des échantillons d'eau prélevés ont été effectuées selon la méthode de la directive européenne sur l'eau (EWD) décrite par Rodier et al. (2009). A chaque prélèvement, la température de l'eau, la conductivité électrique et le pH ont été mesurés sur place, à l'aide respectivement d'un thermomètre, un conductimètre et un pH-mètre, respectivement. Les ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , TDS) ont été dosés par différentes méthodes, dont la spectrométrie d'absorption atomique à flamme et la colorimétrie, au

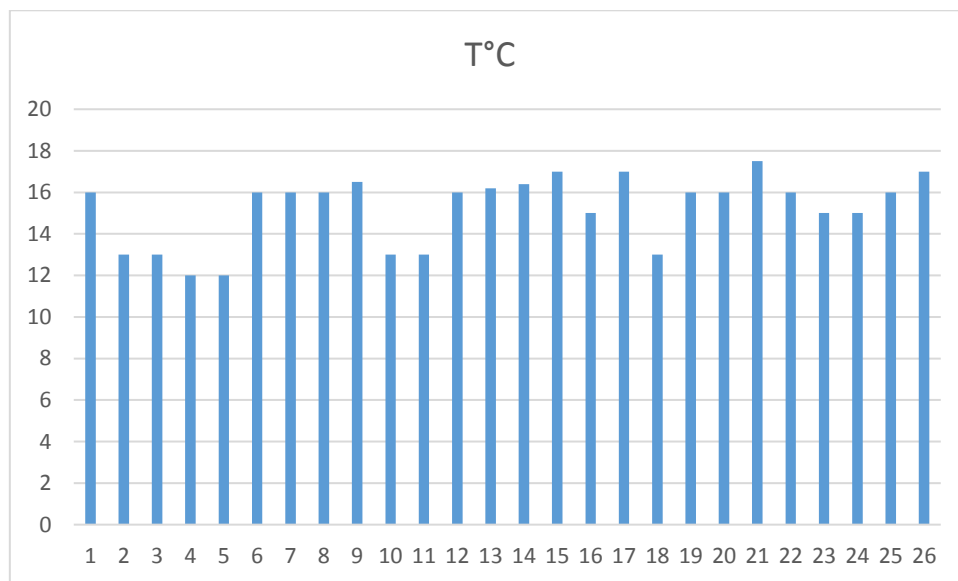
colorimétrique au Laboratoire “Centre d'études et de recherches appliquées au développement CERAD”.

## Les principaux paramètres physico-chimiques

### 1. Les paramètres physiques

#### La température de l'eau

La température de l'eau est un facteur important dans la production biologique, car elle affecte les propriétés physiques et chimiques de l'eau. En particulier, sa densité, sa viscosité, la solubilité de ses gaz (l'oxygène en particulier) et la vitesse des réactions chimiques et réactions biochimiques. L'eau est jugée excellente lorsque la température varie entre 20°C et 22°C ; passable lorsque la température oscille entre 22°C et 25°C ; et mauvaise on se situant entre 25° et 30°C (OMS, 2016). La valeur de température la plus élevée est observée à 17.5°C dans l'échantillon 21 et la valeur la plus basse est de 12°C dans l'échantillon 4 et 5, comme le montre la figure 2.



**Figure 32.** Variabilité spatiale de la température des eaux souterraines dans la zone d'étude (novembre 2018)

Selon la classification ci-dessus, tous les échantillons sont jugés excellents en ce qui concerne la qualité de l'eau.

La température de l'eau est aussi un paramètre d'une grande utilité pour les études hydrogéologiques, elle constitue non seulement un indicateur des conditions de recharge et

du flux thermique dans l'aquifère, mais elle contrôle aussi l'activité bactérienne et les équilibres hydro-chimiques dans le sous-sol (Garnier, 2012)

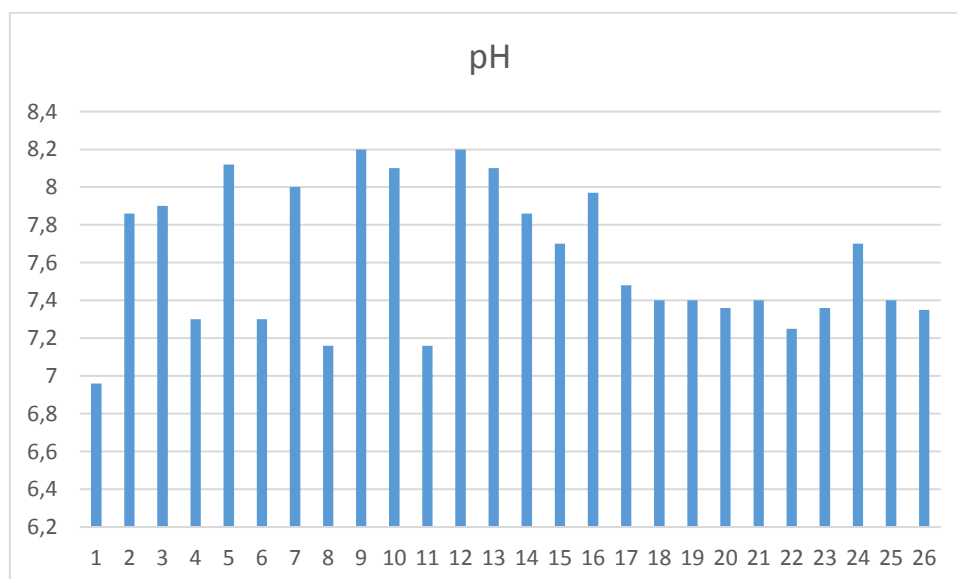
, on peut aussi en déduire des informations sur la profondeur de l'écoulement souterrain, le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère (Les eaux souterraines sont influencées par les propriétés thermiques de la roche), ainsi que son origine (Chabour, 2006).

La température des eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire varie entre 12 et 17.5, les valeurs au-delà de 15 sont probablement en relation avec l'origine des entrées à partir des versants au moyen de failles profondes encore actives (tectonique récente) sous les alluvions.

### **Le pH de l'eau**

Le pH de l'eau est la mesure de la concentration en ions hydrogène (H<sup>+</sup>), contenus dans l'eau. Le pH dépend de l'origine de l'eau, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé (Dussart, 1966). Il est sensible à la température, salinité et aux gaz de l'eau (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO). Le pH interfère avec d'autres paramètres de qualité dans des réactions chimiques complexes : dureté, alcalinité, turbidité et conductivité. L'AMWR (2011) et l'OMS (2016) recommandent un pH compris entre 6,5 et 8,5. c'est également un élément important qui renseigne sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau.

Toutes les valeurs de pH obtenues sont acceptables, La valeur la plus élevée est observée à 8.2 dans l'échantillon 9 et 12 (Figure 3). Ces valeurs sont caractéristiques d'un aquifère peu profond dans les zones arides). Il est connu que les processus de calcite et de dolomite tampon sont dominants pour la plage de pH de 6,5 à 7,5 .

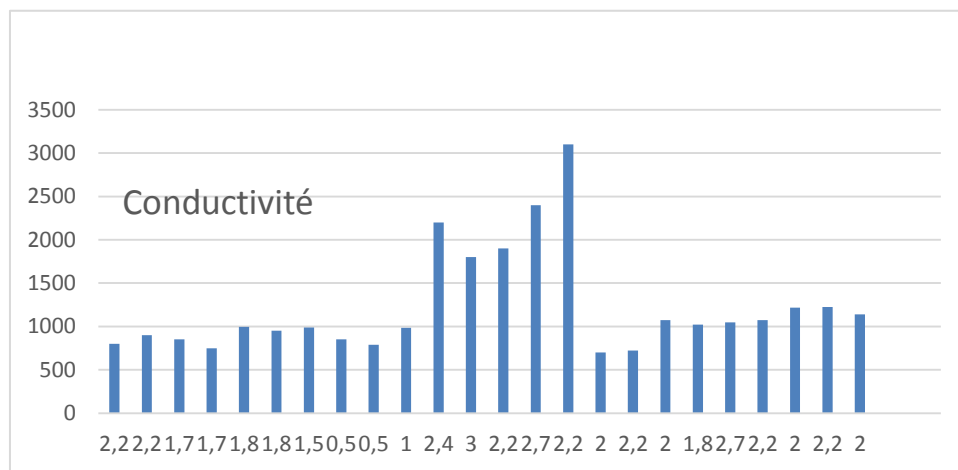


**Figure 33.** Variabilité du pH des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018)

**La conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique d'une eau caractérise sa faculté de laisser passer le courant électrique, elle augmente avec la concentration des ions en solution et de la température. Elle correspond à La conductivité électrique de l'eau est la conductance d'une colonne d'eau placée entre deux électrodes métalliques (platine) de 1 cm<sup>2</sup> de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm.

Elle est l'inverse de la résistivité électrique. La conductivité donne une idée de la minéralisation de l'eau. Sa valeur maximale recommandée est de 2 800  $\mu\text{s}/\text{cm}^2$  (AMWR, 2011 ; OMS, 2016).



**Figure 34.** Variabilité Variabilité de la conductivité des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018)

La salinité, représentée par la CE, augmente au centre de la plaine de Télijdjene; elle passe de 1800 $\mu\text{S} / \text{cm}$  à 3100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figure 4). Ceci est le résultat de la contamination des formations évaporitiques des dômes de de Hamimat Souda et Hamimat Beida.

Des valeurs faibles (CE <1000  $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) sont enregistré à la partie Nord Est du bassin, cette zone correspond à une zone de recharge alimentée à la fois par l'oued de Telidjene et les calcaires Turonien des bordures.

**Tableau 22. Statistique descriptive des paramètres physiques**

Statistique	Forage	T°C	pH
Nb. d'observations	26,00	26,00	26,00
Minimum	1,00	12,00	6,96
Maximum	26,00	17,50	8,20
1er Quartile	7,25	13,50	7,35
Médiane	13,50	16,00	7,44
3ème Quartile	19,75	16,15	7,95
Moyenne	13,50	15,22	7,62
Variance (n-1)	58,50	2,79	0,14
Ecart-type (n-1)	7,65	1,67	0,37

## 2. Les paramètres chimiques

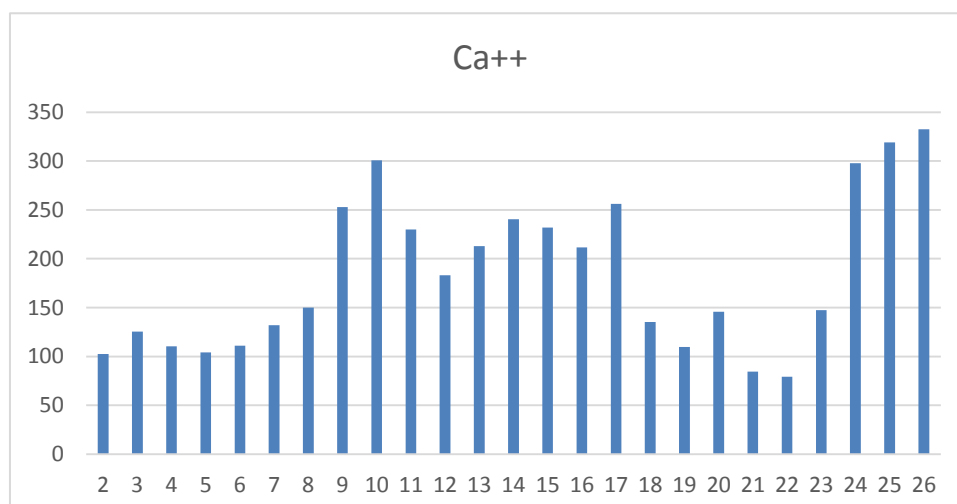
### Les cations

#### (1) Le calcium $\text{Ca}^{2+}$

Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ( $\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Le calcium des eaux de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire varie de 73 mg/l à 300mg / l, avec une valeur moyenne de 167. mg/ l.

La figure 5 montre que les fortes concentrations se situent dans la zone des dômes ainsi que la partie -Sud-Ouest du bassin (> 200 mg/l), tandis que la zone Nord- Est caractérisées par des teneurs inférieures à 140 mg/l.



**Figure 37.** Variabilité du calcium  $\text{Ca}^{++}$  des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018)

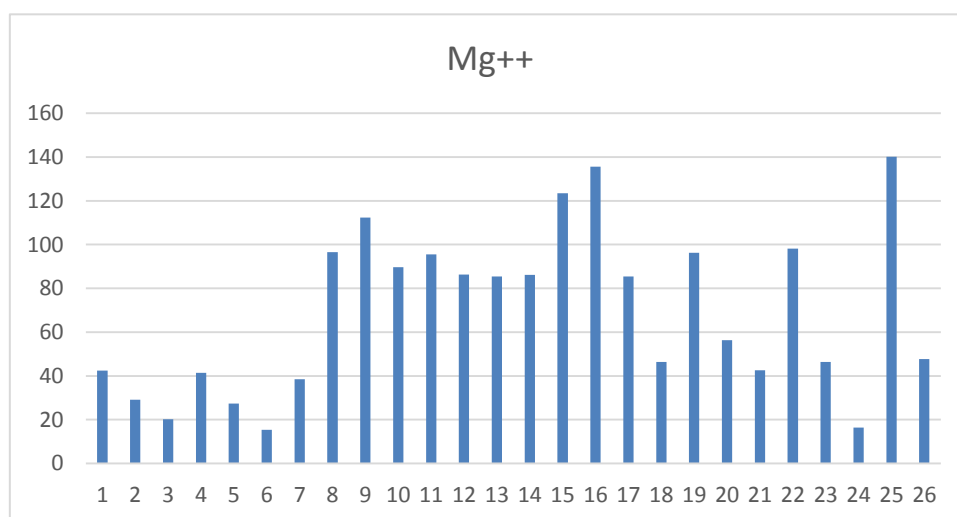


L'apport du calcium est assuré au Sud-Ouest par les entrées au niveau des massifs carbonatés qui donnent des teneurs élevées. Cependant il est en liaison avec la dissolution du gypse par l'intermédiaire de l'axe de l'anticlinal ainsi que les failles transversales parcourant le bassin anticlinal à structure faillée du ride anticlinal et la faille transversale (Est-ouest) (Figure 5). Ces failles affectant jusqu'aux niveaux jurassiques, serait à l'origine de la remontée de Trias gypseux dans le bassin.

### (2) Le magnésium $Mg^{2+}$

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, et provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens.

Dans les points d'eau analysés, les teneurs en magnésium varient de 15 mg/l à 140 mg/l, avec une valeur moyenne de 69mg/l (figure 6) (tableau 2. Statistique descriptive des éléments chimiques).



**Figure 38.** Variabilité du Magnésium  $Mg^{++}$  des eaux souterraines dans la zone d'étude (Novembre 2018)

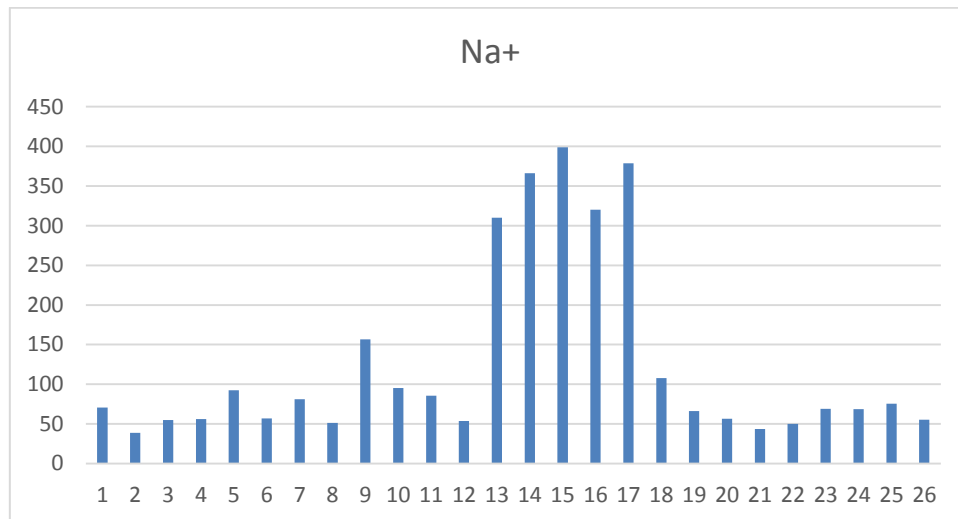
Le magnésium provient en partie des massifs des calcaires éocènes et maestrichtiens dans la région de Bir Said (Sud-Ouest du bassin) ainsi qu'à partir de la composante calcaire des formations aptiennes qui affleurent au cœur de l'anticlinal situé dans la partie des dômes.

### (3) Le sodium $Na^+$

C'est un élément parmi les éléments le plus abondant à l'état naturel, il est toujours présent dans l'eau en proportion très variable. Le sodium joue un rôle important en agriculture, pour l'irrigation à cause du fait de son action sur la perméabilité des sols (Belkhiri, 2011).

En outre, le sodium peut provenir de plusieurs origines : la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, et de l'intrusion marine d'eaux salées dans les nappes aquifères, ou d'origine industriels...etc. (Belghiti et al, 2010).

Le sodium dans le bassin de Telidjene varie d'un minimum de 38 mg/l à un maximum de 400 mg/l, avec une valeur moyenne de 125 mg / l (Figure 39).

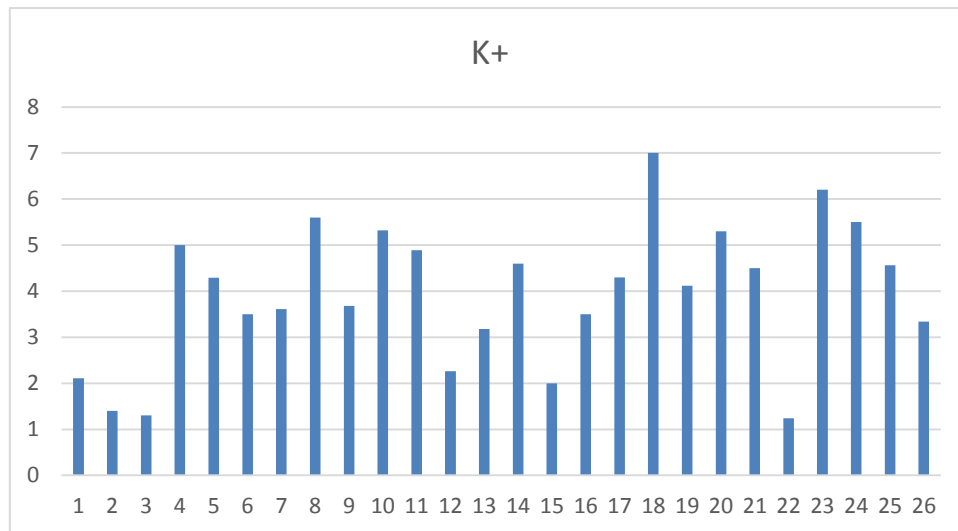


**Figure 39.** Variabilité des teneurs en sodium de la zone d'étude (Novembre 2018)

Le schéma de répartition de cet élément montre une augmentation des concentrations à la partie centrale du bassin. Cette élévation est due à la présence des formations triasiques au niveau des Hamimat Souda et Hamimat Meskouta . .

#### (4) Le potassium K<sup>+</sup>

Le potassium est généralement l'élément le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium. Le sodium est rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l et il ne représente aucun inconvénient particulier.



**Figure 40.** Variabilité spatiale des teneurs en K<sup>+</sup> dans la zone d'étude ( Novembre 2018)

Les concentrations de K<sup>+</sup> dans les points d'eau contrôlés varient de 1.30 mg/l à 7 mg/l, avec une valeur moyenne de 4.64 mg/ l (Figure 40). Les valeurs du potassium sont relativement faibles, la valeur la plus élevée est observée au niveau du forage F18, c'est due à l'activité agricole.

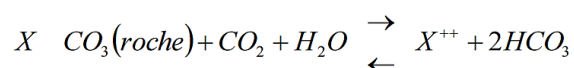
**Tableau 23.** Staistique descriptive des cations

Statistique	Na+	K+	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>
Nb. d'observations	26,00	26,00	26,00	26,00
Minimum	38,65	0,97	15,43	79,32
Maximum	399,00	4,56	135,60	332,45
1er Quartile	55,49	2,21	41,61	114,58
Médiane	72,98	2,79	70,87	166,50
3ème Quartile	105,31	3,58	96,11	238,31
Moyenne	126,49	2,80	68,42	184,67
Variance (n-1)	13737,30	0,97	1161,38	5948,61
Ecart-type (n-1)	117,21	0,99	34,08	77,13

### Les anions

#### (1) Les bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :

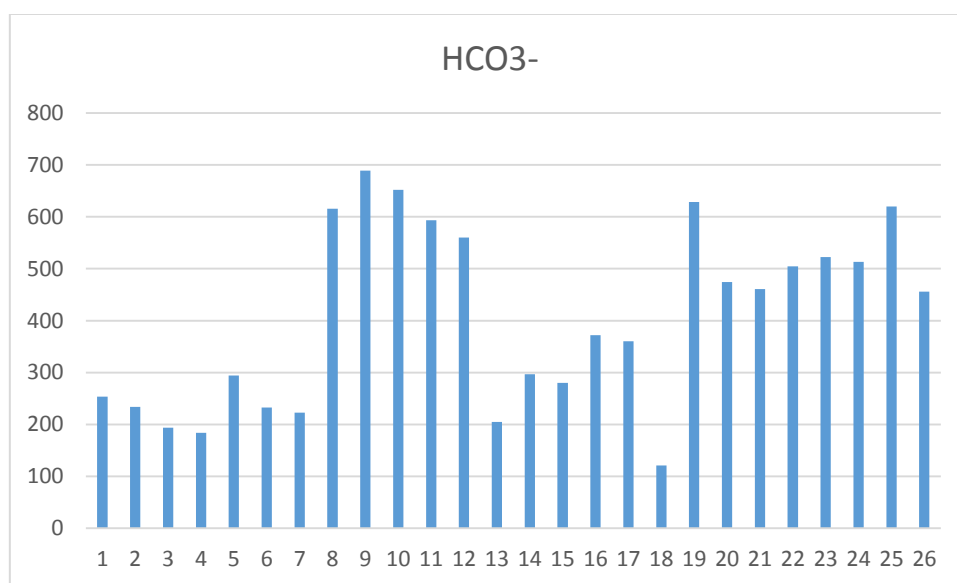


Où : l'élément (X) peut être le (Ca<sup>++</sup>), ou le (Mg<sup>++</sup>) (Beaudry et Henry, 1984).

Les teneurs en bicarbonates dans le bassin de Télijdjene varient de 121 mg/ l à 689 mg / l, avec une valeur moyenne de 405 mg/ l (Tableau 25).

D'après la figure 9, les fortes teneurs se localisent dans la Sud-Ouest du bassin , alors que les faibles teneurs se trouvent à l'opposé, dans la zone nord Est. Les bicarbonates proviennent en partie des reliefs de Reailia et Kef Zora ainsi que les massifs de Foug Sed qui affleure en plateaux en aval . (Calcaires à silex de l'éocène, calcaire du maestrichtien).

Une fois les eaux sont dans la nappe, les vitesses d'écoulements sont faibles, les eaux se mélanges avec l'ensemble des réserves de l'aquifère et se diluent dans ces réserves.

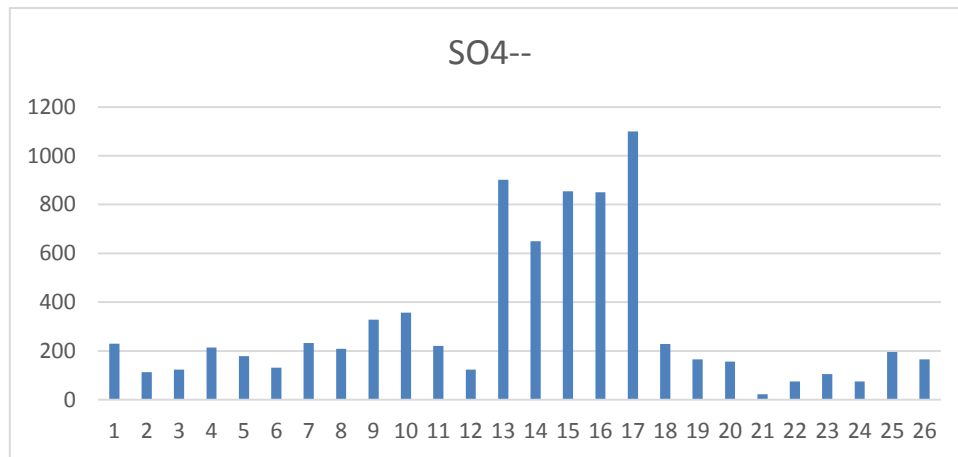


**Figure 40.** Variabilité des teneurs en bicarbonates des eaux souterraines de la région d'étude (Novembre 2018)

(2) Les sulfates  $SO_4^{2-}$

Ils sont présents dans les eaux naturelles à des profondeurs très variables. Ils peuvent provenir de la dissolution du gypse. Ce dernier peut être triasique, comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles du Mio-Plio-Quaternaire. Ils proviennent également par la dissolution des minéraux sulfurés d'une manière générale comme la pyrite (Stoumm et Morgan, 1970) ou l'oxydation des sulfures d'hydrogène et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère (Stumm et Morgan, 1970).

Les sulfates prennent une part plus ou moins importante à la minéralisation de la nappe, les concentrations varient de 125 mg/ l à 1100 mg/ l, avec une valeur moyenne de 307.9 mg/ l (Tableau 25). D'après la carte de répartition de cet élément, la zone centrale de la partie des dômes est caractérisée par les teneurs les plus élevées en  $SO_4^{2-}$  (>800 mg/l) (figure 10). Les températures des eaux ainsi que les teneurs en sulfates sont des preuves de leurs traversées dans des failles encore actives avec remontée des gypses du Trias (Voir Fig. IV.9).

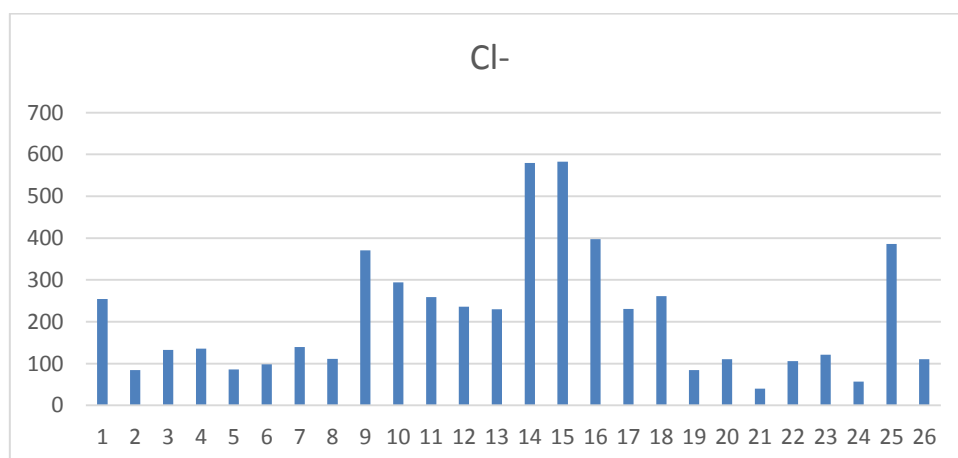


**Figure 4235.** Variabilité des teneurs en sulfates des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene (Novembre 2018)

### (3) Les chlorures Cl<sup>-</sup>

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple. Ainsi, ils peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou suite à une contamination par les eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo sableuses ou argileuses (Beaudry et Henry, 1984). Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion des canalisations et des réservoirs à partir de 50 mg/l (norme de l'O.M. S). La teneur moyenne en chlorures est de 211,38 mg/l (minimum = 40 mg/l, maximum = 582,36 mg/l) (Tableau 25).

Le schéma de variabilité spatiale des teneurs en chlorures montre que les faibles teneurs (< 500 mg/l) se trouvent au Nord et à l'Est de la plaine ainsi qu'au sud-Ouest, alors que les fortes teneurs sont localisées au à la partie centrale (région des dômes )



**Figure 43.** Variabilité des teneurs en chlorures des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene (Novembre 2018 )

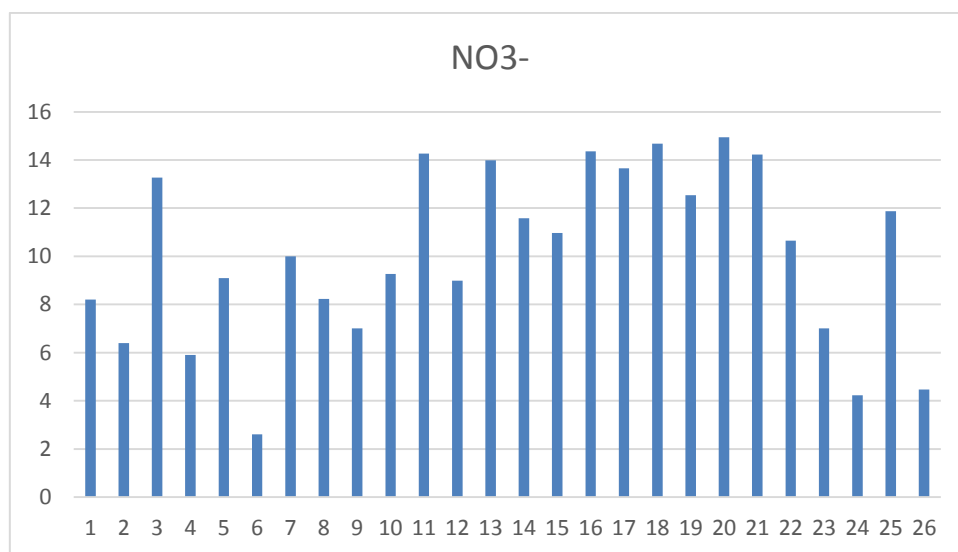
Le  $\text{Cl}^-$  provient des formations salines triasiques et confirme encore la contamination des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire par le lessivage des formations salines.

(4) Les nitrates  $\text{NO}_3^-$

Toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacque, nitrites) sont susceptibles d'être à l'origine des formations des nitrites par un processus d'oxydation biologique des nitrites, soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniacque ( $\text{NH}_4^+$ ), soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action bactérienne (phénomène de dénitrification). Ces formations azotées peuvent également être d'origine agricole (Beaudry et Henry, 1984).

Les concentrations des nitrates varient de 2.60 à 14.95 mg/ l, avec une valeur moyenne de 10.90mg / l (Tableau 25).

L'examen de la représentation graphique des valeurs des nitrates (figure 44) montre que les concentrations sont moyennes à faible, c'est du à la limitation des espaces agricole et une activité agricole très faible.



**Figure 44.** Variabilité des teneurs en chlorures des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene (Novembre 2018 )

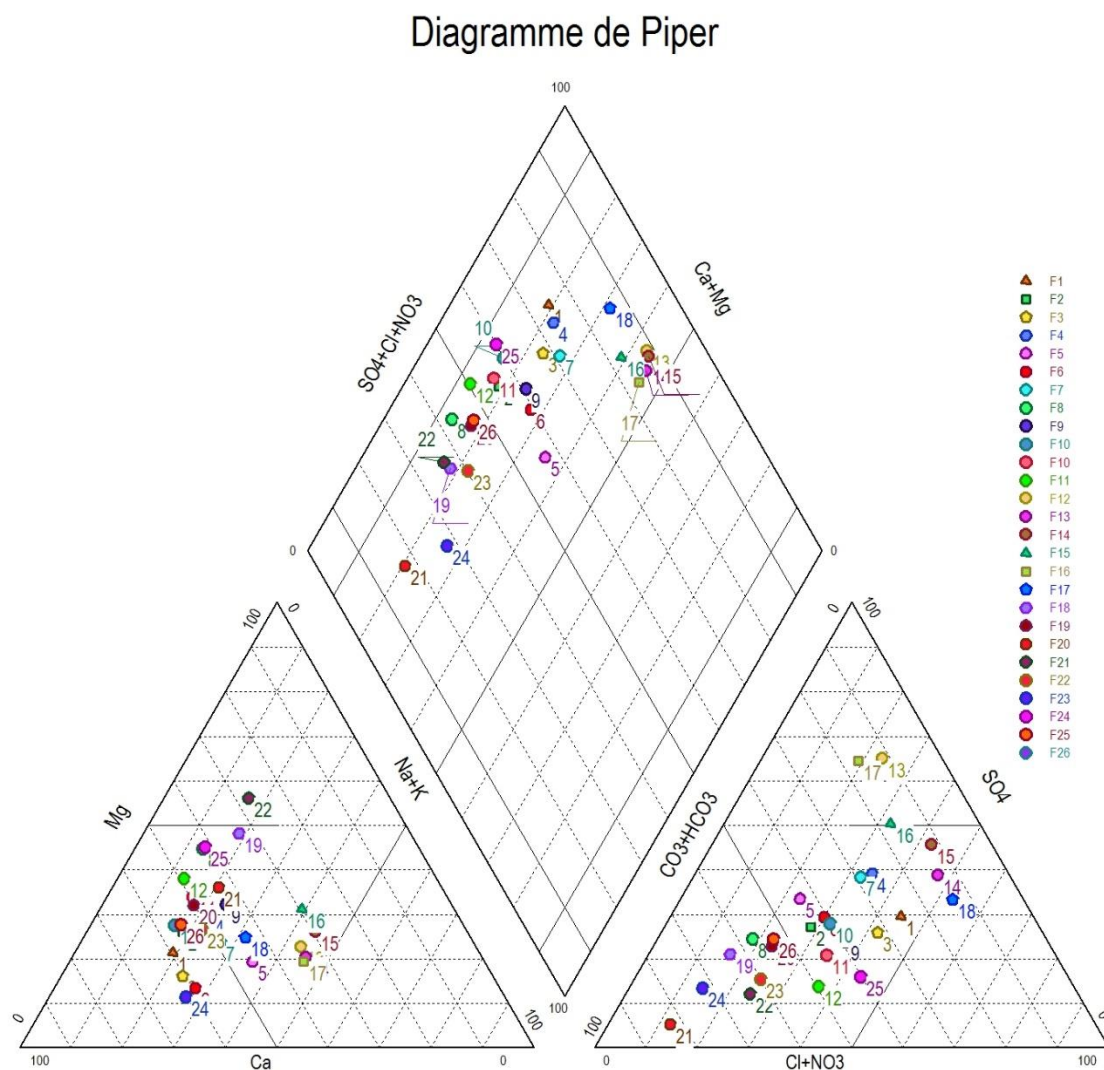
**Tableau 24. Statistique descriptive des canions**

Statistique	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>
Nb. d'observations	26,00	26,00	26,00	26,00
Minimum	121,34	40,00	2,60	22,00
Maximum	689,00	582,36	13,98	1100,00
1er Quartile	238,99	110,27	7,06	137,99
Médiane	416,64	230,08	8,44	203,64
3ème Quartile	584,75	297,35	9,65	304,50
Moyenne	413,84	228,50	8,36	312,65
Variance (n-1)	32684,92	21445,99	5,34	86162,74
Ecart-type (n-1)	180,79	146,44	2,31	293,53

### **Faciès chimique des eaux**

Les différents échantillons d'eau ont été classés selon leur composition chimique en utilisant le diagramme de Piper (Figure 13), en utilisant ce type de graphique, deux types d'eau (faciès) ont été définis pour la zone d'étude. L'analyse a montré que le type d'eau bicarbonaté calcique (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>) caractérise 35% des échantillons, principalement localisés dans le Sud Ouest de la zone d'étude .

La présence de formations calcaires fissurés et fracturés sur les bordures suggère une infiltration d'eau de pluie où elles acquièrent un faciès de calcite, ce qui explique la présence d'eau à faible salinité (CE <1000  $\mu\text{S} / \text{cm}$ ). Le type d'eau chlorurée et sulfatée calcique caractérise 65% des échantillons prélevés, cette situation est principalement détectée le long de l'oued principal de Télijdjene, dans la partie centrale. Ceci explique la présence d'eau à salinité relativement élevé (EC 1800-31000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) dans cette partie de la plaine. Ce faciès est lié à la présence des formations triasiques, néanmoins, les échantillons appartenant à la même catégorie se situant dans partie Nord est à savoir (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7) se considère comme intermédiaire du fait du rapprochement des valeurs des sulfates, des bicarbonates et des chlorures ainsi que pour leurs valeurs de conductivité électrique modérés (inf à 900  $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) ce qui leur confère le caractère d'une eau intermédiaire mélangée .



**Figure 45.** Diagramme Piper appliqué aux échantillons d'eau de l'aquifère de Télijdjene (Piper,1944)

### Analyse statistique des données physico-chimiques

#### 1. Analyse factorielle

Cette analyse a été réalisée sur 26 individus et 9 variables (CE, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Le tableau VIII. 4 montre les valeurs propres des facteurs extraits et la proportion de la variance totale de l'échantillon expliquée par les facteurs. L'analyse génère 5 facteurs, mais seulement trois facteurs ont été retenus, ce qui représente 82% de la variance totale. Les poids des paramètres pour les trois facteurs de l'ensemble de données sont donnés dans le tableau VIII.4.

Le chargement des facteurs est classé comme «fort», «modéré» et «faible», correspondant à des valeurs de chargement absolu de 0,75, 0,75-0,50 et 0,5 respectivement (Unmesch et al. 2006).



Dalton et Upschurch (1978) ont montré que les scores des facteurs peuvent être liés à l'intensité d'une procédure particulière décrite. Les valeurs négatives extrêmes (près de -1) indiquent des zones essentiellement non affectées par le processus et les valeurs positives (près de +1) sont les zones les plus touchées.

Les variables CE, Na<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg et Ca sont marquées par le facteur 1 (F1), qui explique 51% de la variance, Il a une liaison positive forte à modérée avec ces variables (0,8, 0,95, 0,77, 0,95, 0,67, et 0,75) respectivement. Ainsi, le facteur1 (F1) peut être considéré comme un facteur de salinisation liée aux à une forte minéralisation. La présence de failles en contact avec l'aquifère peuvent engendrer une élévation de la concentration Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

**Tableau 25. Liaison variables-facteurs**

	F1	F2
Conductivité	<b>0,8029</b>	0,2308
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,0137	<b>-0,8730</b>
Cl <sup>-</sup>	<b>0,7742</b>	-0,1402
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	<b>0,9519</b>	0,2648
Na <sup>+</sup>	<b>0,9598</b>	0,2681
K <sup>+</sup>	-0,0490	<b>-0,1963</b>
Mg <sup>++</sup>	<b>0,6714</b>	-0,5313
Ca <sup>++</sup>	<b>0,7575</b>	-0,3314
Valeur propre	4,0985	1,4078
Variabilité (%)	51,2318	17,5973
% cumulé	51,2318	68,8291

Le facteur 2 (F2) explique 17% de la variance totale et il a une liaison négative modérée avec K<sup>+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (-0,87, -0,19). Le facteur F1 est donc lié au lessivage des formations carbonatées (Gouaidia et al, 2018).

Le tableau 5 montre la relation facteurs - échantillons d'eau, par la même approche que pour les paramètres, les scores pour chaque échantillon d'eau ont été également calculés lors de la procédure AF. Ces scores représentent l'influence du facteur sur les échantillons. Tous les échantillons de la partie centrale nord ont des résultats positifs avec le premiers facteur avec un score supérieur à 1, ce qui indique qu'ils se caractérisent par un taux élevé de salinité, tandis que la plupart des échantillons de la partie Nord Est et Sud-Ouest affichent des Scores positifs avec le deuxième facteur et une eau de type bicarbonatée calcique (Ca<sup>2+</sup> - HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

La plupart des échantillons de la partie sud de l'aquifère ont affiché des résultats négatifs sur le facteur 2 (F2), indiquant qu'ils se caractérisent par un taux de salinité élevée et un faciès chimique de type sulfatée chlorurée sodique (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>--Cl<sup>-</sup>--Na<sup>+</sup>).

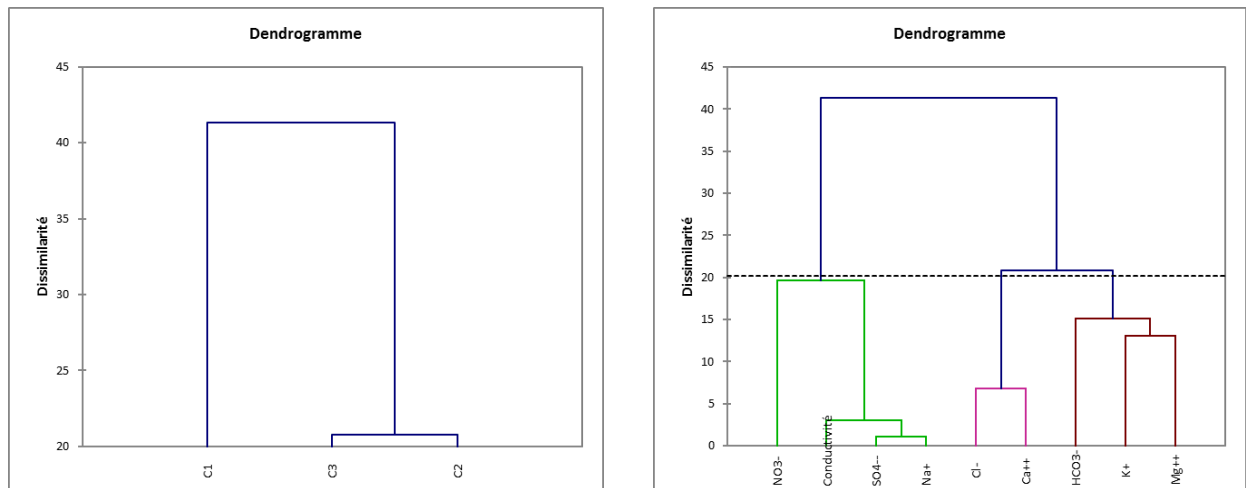
**Tableau 26.** Facteurs des échantillons d'eau

<b>Observation</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>
Obs1	<b>-0,5280</b>	0,3171
Obs2	<b>-0,9615</b>	0,8944
Obs3	-0,8686	<b>1,0075</b>
Obs4	-0,8018	<b>0,9152</b>
Obs5	-0,4259	<b>0,9625</b>
Obs6	-0,7924	<b>1,0508</b>
Obs7	-0,5736	<b>0,8433</b>
Obs8	-0,1768	<b>-0,9423</b>
Obs9	0,8595	<b>-1,5129</b>
Obs10	0,5800	<b>-1,4882</b>
Obs11	0,1663	<b>-1,2306</b>
Obs12	-0,4847	<b>-1,0799</b>
Obs13	<b>1,6600</b>	1,3335
Obs14	<b>1,6179</b>	0,4271
Obs15	<b>2,3759</b>	0,6435
Obs16	<b>1,6106</b>	0,0850
Obs17	<b>2,0131</b>	0,8797
Obs18	-0,4214	<b>0,9799</b>
Obs19	0,0697	<b>-0,6261</b>
Obs20	<b>-0,6427</b>	-0,2903
Obs21	<b>-1,0318</b>	0,0364
Obs22	<b>-0,6709</b>	-0,4742
Obs23	<b>-0,6753</b>	-0,4080
Obs24	<b>-0,8937</b>	-0,1078
Obs25	-0,3210	<b>-2,0441</b>
Obs26	<b>-0,6829</b>	-0,1714

### **Classification ascendante hiérarchique**

Les résultats de la classification ascendante hiérarchique sont présentés par le dendrogramme de la Figure 46. A l'analyse de graphe, on distingue deux grandes classes statistiques distinctes. La première est déterminée par la conductivité, le SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, le Na<sup>+</sup> et le NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ce qui est lié au phénomène de dissolution des minéraux tels que les gypses dont la dissolution produit des sulfates, à la décomposition des matières organiques ainsi que les infiltrations liées aux activités

anthropiques augmentant ainsi la concentration des nitrates bien que reste minime. Dans cette classe on remarque l'influence prépondérante des  $\text{SO}_4^{2-}$  et les  $\text{Na}^+$  sur la minéralisation et la valeur de la conductivité.



**Figure 36.** Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique

La deuxième classe statistique comprend le  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  et le  $\text{Mg}^{++}$ , et le  $\text{K}^+$ , elle peut être subdivisée en deux sous-classes à partir de cette analyse statistique :

- une classe qui comprend les chlorures  $\text{Cl}^-$  et le  $\text{Ca}^{2+}$ . Elle représente l'effet des précipitations sur le processus de lessivage et de l'altération des formations carbonatés par les eaux de pluie, étant donné que les chlorures ne sont pas impliqués dans les réactions géochimiques du sol ou des nappes phréatiques, mais proviennent des épisodes pluvieux.
- une classe avec les éléments  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , et dans une moindre mesure  $\text{K}^+$ , Les deux premiers éléments peuvent être considérées comme les variables décrivant le processus de dissolution des carbonates qui se produisent dans les zones limites pendant la recharge de l'aquifère.

### **Interaction eau-roche**

Les interactions eau-roche et les circulations des fluides sont reconnues comme les moteurs principaux de la mobilisation et du transport de la matière. Les chemins de transfert (pores, fissures, fractures) jouent un rôle primordial puisqu'ils conditionnent largement la distance et la vitesse de transport ainsi que l'évolution de la composition des fluides au cours du cheminement. Ainsi, la composition chimique des eaux souterraines reflète la composition minéralogique des roches de l'aquifère et peut être utilisée pour localiser les aires de recharge,

l'origine des eaux souterraines (météorique, marine, fossile, magmatique et métamorphique) et des différents composés chimiques (carbonate, sulfate, nitrate et ammonium) (Trincal, 2015). Les compositions chimiques de l'eau peuvent aussi donner des informations sur les processus d'interaction eau-roche (Bencer et al. 2016).

#### **Indices de saturations**

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 (CIDU et al., 2009),  $Is = \log(K) - \log(PI)$  Avec K la constante d'équilibre et PI le produit ionique. Trois cas sont possibles :  $Is < 0$  signifie une sous-saturation d'une solution par rapport à un minéral;  $Is = 0$  indique un état de saturation;  $Is > 0$  démontre une sursaturation. Dans notre étude, les indices de saturation par rapport aux minéraux (halite, gypse, anhydrite, calcite, dolomite et aragonite) et les équilibres chimiques ont été calculés à l'aide du programme DIAGRAMM (Version 6.77 , 16-03-2022).

#### **Variation de l'indice de saturation**

les résultats obtenus après calcul sont dans le tableau 1. L'observation du tableau 1 montre que les indices de saturation sont négatifs, indiquant une sous saturation vis-à-vis des minéraux suivants : l'anhydrite, le gypse, ce qui reflète un temps de contact relativement long avec ces minéraux pour permettre la dissolution. Par contre, l'eau est sursaturée vis-à-vis de calcite, aragonite et dolomite. En effet, une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines. Le calcul de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre l'équilibre. Par contre, les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous saturation, malgré les fortes concentrations qu'ils acquièrent.

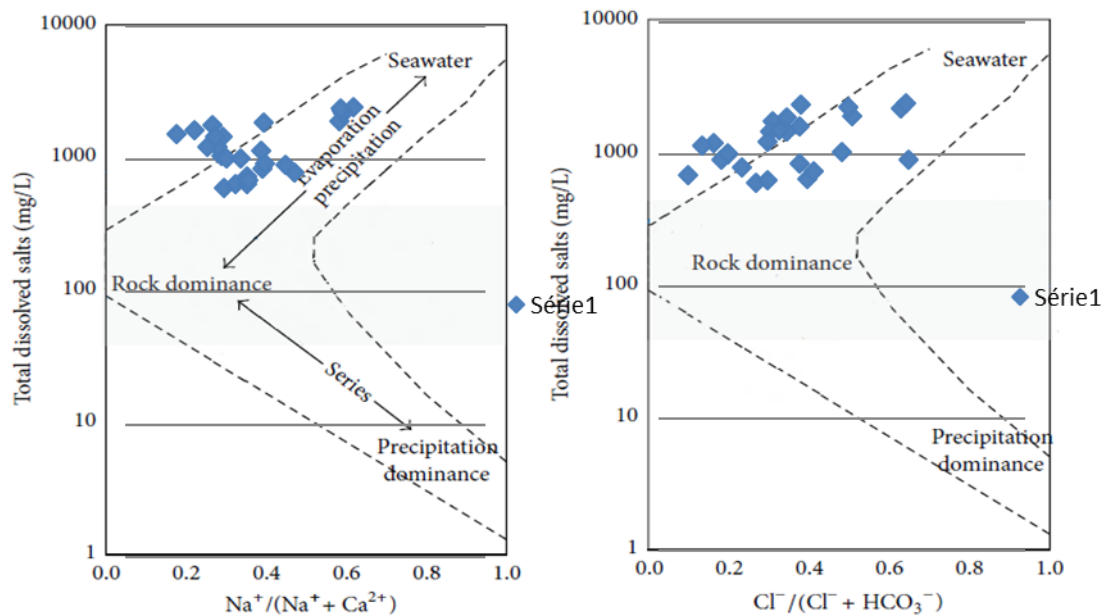
**Tableau 27.** Indice de saturation des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene

Ech.	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum
1	-1,26	-0,23	-0,08	-0,61	-1,02
2	-1,71	0,38	0,53	0,69	-1,45
3	-1,6	0,41	0,56	0,51	-1,35
4	-1,45	-0,31	-0,15	-0,57	-1,2
5	-1,54	0,68	0,84	1,26	-1,28
6	-1,61	-0,1	0,05	-0,54	-1,36
7	-1,37	0,59	0,74	1,17	-1,13
8	-1,46	0,22	0,37	0,77	-1,21
9	-1,16	1,43	1,58	3,04	-0,91
10	-1,02	1,32	1,47	2,57	-0,77
11	-1,29	0,28	0,44	0,63	-1,04
12	-1,6	1,28	1,43	2,76	-1,36
13	-0,82	0,69	0,84	1,51	-0,57
14	-0,91	0,69	0,84	1,47	-0,66
15	-0,85	0,47	0,62	1,21	-0,61
16	-0,88	0,79	0,94	1,9	-0,63
17	-0,7	0,38	0,53	0,83	-0,46
18	-1,38	-0,34	-0,18	-0,69	-1,12
19	-1,66	0,34	0,49	1,16	-1,41
20	-1,53	0,32	0,47	0,76	-1,28
21	-2,49	0,21	0,36	0,67	-2,25
22	-2,09	0	0,15	0,61	-1,85
23	-1,68	0,37	0,52	0,74	-1,43
24	-1,22	0,96	1,12	1,58	-0,98
25	-1,43	0,57	0,72	1,48	-1,18
26	-1,27	0,75	0,9	1,16	-1,03

### Diagramme d'équilibre

Le diagramme de Gibbs peut indiquer clairement si les composants chimiques et des eaux souterraines sont du type à dominance de précipitation, à dominance de roche ou à dominance de cristallisation par évaporation. Il s'agit d'un moyen important de déterminer qualitativement les effets des roches régionales, des précipitations atmosphériques et de la concentration de l'évaporation sur les composants de l'eau des rivières. (Perera et al, 2022 ; Gibbs, 1970). Généralement, les échantillons avec un faible TDS et un fort  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  ou  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  élevé (proche de 1) sont principalement distribués dans le coin inférieur droit, ce qui indique une dominance des précipitations. Les échantillons avec un TDS légèrement élevé et des rapports  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  ou  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  d'environ 0,5 ou inférieur à 0,5 sont principalement distribués dans la zone centrale, indiquant une dominance de roche. Les

échantillons avec un TDS très élevé et des rapports  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  ou  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  importants sont principalement distribués dans le coin supérieur droit, indiquant le type de cristallisation dominante par évaporation, reflétant l'influence de l'évaporation dans les zones aride (Sun et al., 2014).



**Figure 47. Diagrammes de Gibbs pour les échantillons d'eau de l'aquifère de Téli djene**

Selon le diagramme de Gibbs, 46% des concentrations des éléments chimiques des eaux souterraines se situe dans le domaine de l'évaporation en raison du manque des pluies et d'humidité en période estivale durant la période estivale, ce qui entraîne l'accumulation de sels dissous en saison sèche et qui gagent les eaux souterraines en périodes pluvieuse par action d'infiltration. Par contre, 54 % des échantillons dépendent d'un processus qui présente un mélange roche-évaporation.

## Conclusion

La présente étude avait pour objectif de comprendre les mécanismes qui contrôlent l'hydrochimie des eaux souterraines dans le bassin de Télijdjene à partir des techniques d'analyse hydrochimiques et statistique multivariée (analyse factorielle et CAH). Au niveau des paramètres physiques mesurés *in situ*, la température moyenne des eaux des forages est de 15.22°C. Les eaux souterraines sont dans la norme OMS avec pH moyen de 7.62. La conductivité électrique moyenne est de 1201 µS/cm avec des valeurs extrêmes comprises entre 700 et 3100 µS/cm. Dans l'ensemble, les eaux sont minéralisées et ne sont pas aptes à la consommation (<400 norme OMS.) . Les valeurs des nitrates sont faible, cela est dû à la faible activité anthropique.

En termes de faciès hydrochimiques, l'eau est du type sulfaté calcique dans le centre et le sud du bassin, tandis que le nord domine un une eau intermédiaire que l'on peut confère au faciès bicarbonaté calcique, HCO<sub>3</sub>-Ca au nord du bassin (formations calcaires) et du type SO<sub>4</sub>-Cl-Na au centre et au sud de la plaine de Télijdjene.

Les résultats des diagrammes de Gibbs ont révéleque 54 % des échantillons dépendent d'un processus qui présente un mélange roche-évaporation, et 46 % dépendent d'un processus d'évaporation.

## REFERENCES

**5 YAN, J.; CHEN, J.; ZHANG, W. ,(2021).** STUDY ON THE GROUNDWATER QUALITY AND ITS INFLUENCING FACTOR IN SONGYUAN CITY, NORTHEAST CHINA, USING INTEGRATED HYDROGEOCHEMICAL METHOD. *SCI. TOTAL ENVIRON.* 773, 144958.

1 Aminiyan, M.M.; Aminiyan, F.M. Comprehensive integrated index–based geochemistry and hydrochemical analyses of groundwater

resources for multiple consumptions under coastal conditions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020, 27, 21386–21406. [

6 Al-Barakah, F.N.; Al-jassas, A.M.; Aly, A.A. Water quality assessment and hydrochemical characterization of Zamzam groundwater,

Saudi Arabia. *Appl. Water Sci.* 2017, 7, 3985–3996.

4 Wang, H.; Ni, J.; Song, Q.; Li, C.; Wang, F.; Cao, Y. Analysis of coastal groundwater hydrochemistry evolution based on groundwater flow system division. *J. Hydrol.* 2021, 601, 126631. [CrossRef]

**BOBEE, B., LACHANCE, M., & POTVIN, L. (1981).** ANALYSE MULTIVARIEE ET INTERPRETATION GEOCHIMIQUE DE LA VARIABILITE SPATIALE DE LA QUALITE DE L'EAU DES RIVIERES DU QUEBEC MERIDIONAL. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 53(1-2), 95-116.

**SADIKI, M., & MRABET, S. (2016).** APPLICATION DE L'ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIEE POUR LA COMPREHENSION DE LA CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN DE L'OUERGHA, MAROC. *AFRIQUE SCIENCE*, 12(2), 1-14.

**GARNIER, F. (2012).**CONTRIBUTION A L 'EVALUATION BIOGEOCHIMIQUE DES IMPACTS LIES A L 'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE DES AQUIFERES SUPERFICIELS. EXPERI - MENTATIONS ET SIMULATIONS A L 'ECHELLE D 'UN PILOTE ET D 'INSTALLATIONS REELLES. THESE DE DOCTORAT DE L 'ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES, UNI - VERSITE D 'ORLEANS)

**CHABOUR N., (2006).** «HYDROGEOLOGIE DES DOMAINES DE TRANSITION ENTRE L'ATLAS SAHARIEN ET LA FORME SAHARIENNE A L'EST DE L'ALGERIE», MEMOIRE PRESENTE POUR L' OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT D'ETAT EN GEOLOGIE, UNIVERSITE DE CONSTANTINE .177P

**EDMONDSON, W. T., (1967), DUSSART, BERNARD. 1966. LIMNOLOGIE.** L'ETUDE DES EAUX CONTINENTALES. PARIS, GAUTHIER-VILLARS. XXIV + 677 P., ILLUS. \$27.60., LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY, 12, DOI: 10.4319/LO.1967.12.1.0181B.

**BELKHEIR L, 2011. ETUDE DE LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES .CAS DE LA PLAINE D'AIN AZEL-EST ALGERIEN.** THESE DE DOCTORAT EN HYDRAULIQUE, UNIVERSITE DE BATNA 2, BATNA, ALGERIE.

**BELKHIRI L, BOUDOUKHA A, MOUNI L ET BAOUZ T, 2010.** APPLICATION OF MULTIVARIATE STATISTICAL METHODS AND INVERSE GEOCHEMICAL MODELING FOR CHARACTERIZATION OF GROUNDWATER - A CASE STUDY: AIN AZEL PLAIN (ALGERIA). *GEOD* 159: 390-398.



**BEAUDRY T ET HENRY TM, 1984. CHIMIE DES EAUX, EDITION. LES GRIFFONS D'ARGILES, 1ERE EDITION, INC CANADA.**

**STUMM, W., & MORGAN, J.J. (1970). AQUATIC CHEMISTRY: CHEMICAL EQUILIBRIA AND RATES IN NATURAL WATERS.**

**GOUAIDIA, L., LAOUAR, M. S., DEFAFLIA, N., & ZENATI, N. (2017). ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES D'UN AQUIFERE DANS UNE ZONE SEMI—ARIDE, CAS DE LA NAPPE DE LA MERDJA, NORD—EST ALGERIEN. INT. J. ENVIRON. WATER, 6, 104.**

**TRINCAL, V. (2015). INTERACTIONS FLUIDE-ROCHE, CONDITIONS PHYSICO-CIMIQUES ET TRANSFERTS DE MATIERE DANS DES ZONES DE FAILLES EN MILIEUX SEDIMENTAIRES: EXEMPLE DE FAILLES CHEVAUCHANTES PYRENEENNES (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE).**

**BENCER S, BOUDOUKHA A ET MOUNI L, 2016. MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS OF THE GROUNDWATER OF AIN DJACER AREA (EASTERN OF ALGERIA), ARAB. J. GEOSCI., 9:248. DOI: 10.1007/s12517-015- 2277-6.**

**CIDU, R., BIDDAU, R., & FANFANI, L. (2009). IMPACT OF PAST MINING ACTIVITY ON THE QUALITY OF GROUNDWATER IN SW SARDINIA (ITALY). JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION, 100(2-3), 125-132.**

**PERERA, T.A.N.T.; HERATH, H.M.M.S.D.; PIYADASA, R.U.K.; JIANHUI, L.; BING, L. SPATIAL AND PHYSICOCHEMICAL ASSESSMENT OF GROUNDWATER QUALITY IN THE URBAN COASTAL REGION OF SRI LANKA. ENVIRON. SCI. POLLUT. RES. 2022, 29, 16250–16264. [CROSSREF]**

**GIBBS, R.J.1970. MECHANISMS CONTROLLING WORLD WATER CHEMISTRY. SCIENCE , 170, 1088–1090. [CROSSREF]**

**GARRELS RM AND MACKENZIE FT, 1967. ORIGIN OF THE CHEMICAL COMPOSITIONS OF SOME SPRINGS AND LAKES, IN: EQUILIBRIUM CONCEPTS IN NATURAL WATERS. AM. CANCER SOC., WASH., DC.**

**MEYBECK M, 1987. GLOBAL CHEMICAL WEATHERING FROM SURFICIAL ROCKS ESTIMATED FROM RIVER DISSOLVED LOADS, AM. J. SCI., 287: 401–428.**

**CHEN J, 1987. WATER ENVIRONMENT CHEMISTRY, HIGHER EDUCATION PRESS, BEIJING, CHINA.**

## **V. CHAPITRE**

# **APPORT DE LA GEOPHYSIQUE DANS L'IDENTIFICATION DE LA STRUCTURE ET LA GEOMETRIE DE L'AQUIFERE**

## INTRODUCTION

La région de Télijdene est caractérisée par plusieurs systèmes aquifères à potentiel hydrique bien distinct. La configuration géométrique et structurale de ces systèmes aquifères reste mal connue malgré l'exploration géologique et hydrogéologique entreprise par plusieurs auteurs (CGG , 1974, villa). Si les résultats de l'étude géophysique mené par la CGG est d'une grande importance, la non maîtrise d'une manière approfondie de la géométrie de l'aquifère limite certaines interprétations des phénomènes déterminants pour la gestion de la ressource en eau dans la région ; notamment dans le cas des tentatives des autorités locales à prospecter de nouveaux points d'eau par rapport à l'extension latérale de quelques réservoirs importants tel que le turonien et le cénomanien, de la relation entre les nappes profondes ainsi que a nappe du moi-plio-. Pour remédier au problème de la pénurie des eaux potables, l'utilisation rationnelle des eaux des aquifères profonds reste une solution opportune qui pourrait constituer une alternative pour combler en partie le déficit hydrique observé dans la région. Dans ce sens une connaissance approfondie des caractéristiques géométriques, structurales et hydrogéologiques des formations profondes se révélerait nécessaire. La reconstitution de la configuration géométrique du système aquifère de la région de Télijdene peut être améliorée en intégrant les données de sondages électriques permettant ainsi de mieux identifier la structure et la géométrie du sous-sol, grâce à l'identification de la résistivité et de l'épaisseur de chaque unité géologique. L'objectif de ce travail vise à préciser l'architecture géométrique et structurale des aquifères de du bassin de Télijdene et ses conséquences hydrogéologiques, dans l'optique d'une gestion raisonnable de ces aquifères. Pour atteindre cet objectif nous avons utilisé d'une part les données de Gravimétrie dérivant du modèle gravimétrique terrestre EGM2012, les données sondages électriques réalisés dans la zone d'étude en plus des données géo-électrique de la CGG corrélés aux données de forages hydrauliques et pétroliers .

## 1. GRAVIMÉTRIE

### 1-1-Principe de la méthode gravimétrique

Le principe de la gravimétrie repose sur la Loi de l'Attraction Universelle établie par Isaac Newton (1642-1727). Cette loi stipule que la force créée par la masse  $m_1$  sur la masse  $m_2$  est directement proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare (Telford et al. 1990).

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

Le signe (-) indique que la force est toujours attractive, avec :

$\vec{F}$  : vecteur force de gravitation

$r$  : distance entre les masses  $m_1$  et  $m_2$

$\vec{r}$  : vecteur unitaire dirigé de  $m_1$  vers  $m_2$

$G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$  dans le Système International (SI) est la constante de gravitation universelle.

L'accélération gravitationnelle est définie comme étant la force qui s'exerce sur l'unité de masse  $m_2$  telle que :

$$g = \frac{F}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2}$$

L'unité dans le Système International de l'accélération est le «  $\text{m/s}^2$  » dont le sous multiple est le «  $1 \text{ cm/s}^2 = 1 \text{ Gal}$  », ainsi nommé en hommage à G. Galilée (1564-1642). La gravimétrie repose sur la mesure de la variation du champ de pesanteur «  $g$  ». Cette variation est mesurée pour chaque station par rapport à une station de base.

Les mesures gravimétriques sont réalisées en utilisant un gravimètre. Le gravimètre le plus simple est un pendule dans lequel une masse est suspendue à un ressort. La variation du champ de pesanteur entre deux endroits cause une variation proportionnelle de la longueur du ressort.

Ainsi, la variation de la pesanteur entre la base et les stations successives permet la détermination de la valeur pour chaque station si on connaît la valeur à la base. Afin d'avoir des valeurs du champ de pesanteur causées par les hétérogénéités du sous-sol, les mesures gravimétriques sont corrigées des effets de la latitude, de l'altitude, de plateau, de l'effet du relief environnant ainsi que des effets de la lune et du soleil. Ainsi, ces corrections nous permettent d'établir la carte de l'anomalie de Bouguer qui englobe les anomalies liées aux structures géologiques locales et profondes.

### 1. Corrections gravimétriques

#### Correction de dérive :

La dérive du gravimètre est la différence des mesures entre le début et la fin à la station de base. Pour tout gravimètre, les lectures à la même station changent en fonction du temps à cause du vieillissement du ressort et de la variation de pression et de température. On estime la dérive en prenant les lectures en une station à intervalles de temps fixes.

#### Correction de marée :

Le terme de marée dépend de la position relative de la lune et du soleil par rapport à la Terre en fonction du temps. La correction de marée corrige l'effet de l'attraction de la lune et du soleil.

#### Correction de latitude :

C'est la valeur théorique de la pesanteur au niveau de la station de mesure. Cette correction tient compte des variations de la pesanteur avec la latitude dues à la rotation de la Terre et à son aplatissement.

#### Correction de Faye (Air libre):

La correction d'air libre ou de Faye « F » contribue à corriger la valeur de la gravité en fonction de l'altitude à laquelle la mesure a été prise. Il s'agit donc d'estimer la différence de pesanteur à la surface du géoïde et celle à la station de mesure d'altitude « h » sans tenir compte des masses comprises entre les deux niveaux :  $F(mgal) = 0.3086 h(m)$

La correction d'Air libre est positive au-dessus du géoïde et négative en dessous.

#### Correction de plateau :

Elle tient compte de la masse comprise entre le géoïde et la station de mesure.

$$P(mgal) = 0.0419 d h(m)$$

$h$  : altitude de la station de mesure

$d$  : densité moyenne des terrains compris entre la surface et le géoïde

### Correction de terrain ou de relief :

La correction de relief tient compte des variations d'altitude autour de la station de mesure. Un excès de masse au-dessus (colline) et un déficit au-dessous (vallée) du niveau du point de mesure diminuent tous deux la valeur de la pesanteur. Il en résulte que la correction de terrain est positive et s'ajoute toujours. Cette correction consiste à ramener la mesure à ce qu'elle serait si la surface topographique était un plan horizontal passant par la station. Il faut donc « *combl*er » les vallées autour de la station avec un terrain de densité «  $d$  » et « *raser* » les collines avoisinantes comme si elles avaient la même densité.

## **2. Isostasie et correction isostatique**

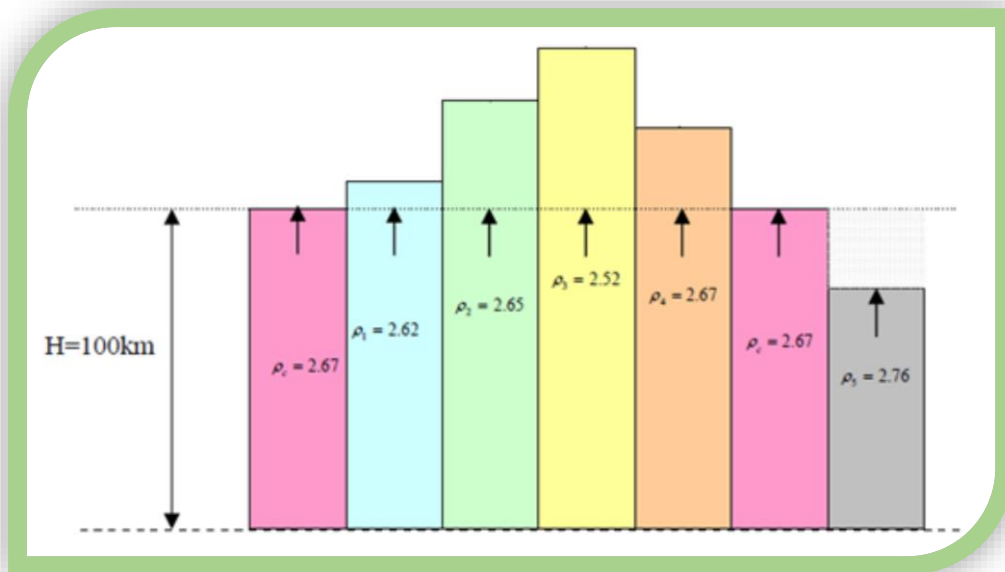
Les modèles d'isostasie supposent que la croûte est formée par des blocs flottant sur un magma plus dense ayant les propriétés d'un fluide. Chaque compartiment peut éventuellement se déplacer verticalement et indépendamment de son voisin.

L'hypothèse de Pratt :

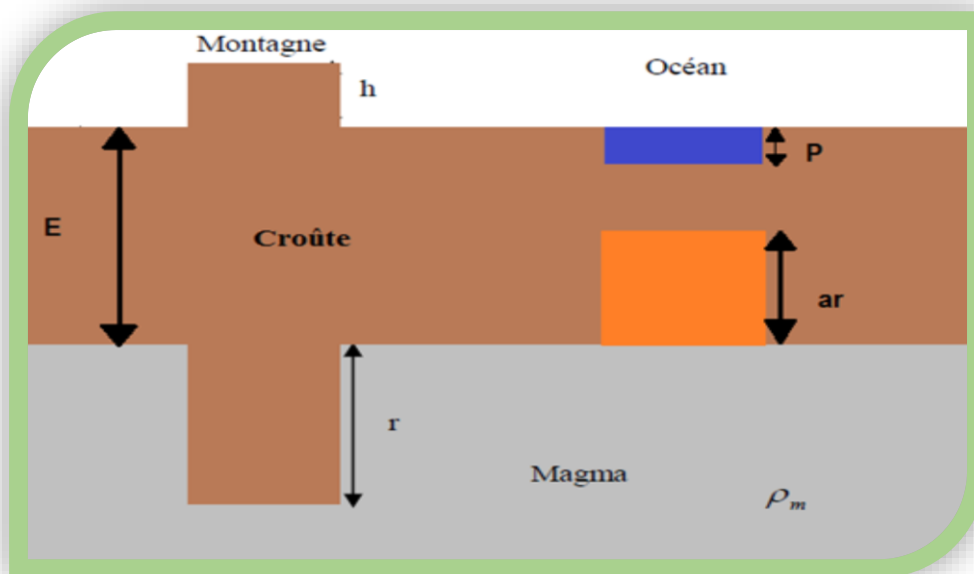
Pratt suppose que la croûte a une densité variable et est constituée de blocs atteignant tous la même profondeur, de telle sorte que la densité est moindre dans les blocs d'altitude élevée que dans les moins élevés (*figure 1*).

L'hypothèse d'Airy :

Airy suppose que la croûte est formée de blocs d'épaisseur variable mais de densité constante (*figure 2*). Ainsi, aux montagnes correspondrait une portion de croûte qui s'enfonce dans le magma appelée « *racine* » et aux dépressions (mers et océans) correspondrait une « *anti racine* ». D'après les lois de l'hydrostatique, plus la montagne est élevée, plus la racine est importante.



**Figure 37.** Modèle de Pratt (Dubois et Diamant, 2001)



**Figure 38.** Modèle d'Airy où E représente l'épaisseur de la croûte

### 3. Anomalie de Bouguer

L'anomalie de Bouguer est calculée grâce aux différentes corrections et à un choix judicieux de la densité.

$$AB = g_{mc} - g_{th}$$

$$g_{mc} = g_m + F - P + T$$

$AB$  : Anomalie de Bouguer,

$F$  : correction d'Air libre,

$g_{mc}$  :  $g$  mesuré corrigé,

$P$  : correction de plateau,

$g_m$  :  $g$  mesuré,

$T$  : correction de terrain.

$g_{th}$  :  $g$  théorique,

#### 4. Choix de la densité

Cette densité représente la densité moyenne des roches de la zone d'étude. Elle peut être déterminée par différentes méthodes.

##### Méthode Nettleton (1939)

Méthode graphique de détermination de la densité qui consiste à comparer des anomalies gravimétriques et des altitudes. On représente sur une même figure un profil topographique (assez accidenté) et les profils d'anomalies gravimétriques qui lui correspondent, calculées avec plusieurs densités. La meilleure valeur sera celle du profil qui présente le moins de corrélation avec la topographie. Les limites d'application de cette méthode sont de deux ordres :

- Les profils doivent être placés à travers un relief suffisamment accidenté pour que l'influence de l'altitude puisse se faire sentir (vallées et collines)
- Les profils calculés doivent être placés dans des régions dépourvues de toute anomalie.

##### Méthode des Triplets

Cette méthode consiste à chercher des groupements de trois points de mesure alignés et à peu près équidistants, tel que le point central présente une dénivelée importante par rapport aux points extrêmes. C'est une méthode statistique qui exige donc un grand nombre de triplets.

##### Méthode de Parasnis (1985)

Cette méthode suppose une densité homogène de la région sans composante régionale trop importante. Elle consiste à déterminer la valeur de densité telle que la somme algébrique de L'anomalie résiduelle est nulle.

$$\Delta g = g_m + (0.3086 - 0.0419d)h + dT - g_{th} = 0$$

$$g_m - g_{th} + 0.3086h - d(0.0419 - T) = 0$$



$g_m$  : g mesuré,

h: altitude de la station,

T : correction de terrain,

$g_{th}$  : g théorique

Cela revient à écrire l'équation sous la forme :  $Y=dX$

$$Y = g_{mes} - g_{th} + 0.3086h \quad \text{et} \quad X = (0.0419h - T)$$

La pente de la droite est une régression linéaire, ce qui représente la densité moyenne de *correction*.

### 5. Origine des données

Les données gravimétriques dérivant du modèle gravimétrique terrestre EGM2012 ont été utilisées dans ce travail. Le modèle EGM2012, qui est une version améliorée du modèle gravitationnel terrestre EGM2008 (**Balmino et al., 2011**), a été publié par la National Geospatial Intelligence Agency. Ce modèle, avec une assez bonne résolution spatiale pour des études régionales est plus répandu que les données de gravimétrie terrestre et permet ainsi de surmonter la rareté et voir l'absence même des données de terrain. C'est la raison pour laquelle de nombreux chercheurs font généralement intervenir ce type de modèle dans leurs travaux respectifs (**Eyike et al., 2010; Abate Essi et al., 2017; Zelalem et al., 2018**).

Les corrections de Bouguer ont été effectuées au Bureau Gravimétrique International (BGI). Les anomalies de Bouguer ont été calculées à partir des coefficients d'harmoniques sphériques par le biais du programme FA2BOUG (**Fullea et al., 2008**) sur une grille moyenne de 2,5 minutes par 2.5 minutes (soit environ 4km x 4km). La correction topographique a été effectuée à l'aide des données altimétriques numériques ETOPO1 (**Amante & Eakins, 2008; Balmino et al., 2011**) avec une résolution spatiale de 1 minute par 1 minute (soit 1.5km x 1.5km). La réduction de densité pour l'anomalie de Bouguer utilisée était de 2,67g/cm<sup>3</sup>.

### 6. Méthodologie de traitement

#### Prolongement vers le haut et séparation régionale résiduelle

Le PVH correspond à un filtre passe-bas qui permet d'atténuer les anomalies de courtes longueurs d'onde dont les sources sont proches de la surface (**Jacobsen, 1987**). Cette méthode permet non seulement de suivre l'évolution d'un corps en profondeur mais aussi de donner une estimation de la profondeur moyenne du dudit corps en s'appuyant sur les travaux de **Jacobsen (1987)**. En effet selon **Jacobsen (1987)**, pour un prolongement vers le haut à une altitude H donnée, la profondeur Z d'une source d'anomalie magnétique ou gravimétrique est approximativement égale à la moitié de sa hauteur H de prolongement (**Equation 1**).

$$Z = H/2 \quad (1)$$

Le PVH est également utilisé dans de nombreux travaux comme méthode de séparation régionale-résiduelle (**Abate Essi et al., 2017; Zelalem et al., 2018; Meying et al., 2019**). Elle

va permettre ici de calculer une grille régionale par simple prolongement vers le haut à un niveau d'altitude H fixé par le géophysicien en fonction l'objectif visé. La grille résiduelle pourra ainsi être obtenue par simple soustraction entre le champ d'origine et le champ prolongé vers le haut à une altitude H (considéré ici comme une régionale). La profondeur maximale du modèle résiduelle est directement liée à la hauteur de prologement maximale (**Jacobsen, 1987**). De manière générale, l'équation 2 donne la relation existant entre ces différents champs :

$$\text{Anomalie résiduelle} = \text{Anomalie de Bouguer} - \text{Anomalie régionale} \quad (2)$$

#### **Analyse spectrale**

Le Spectre de Puissance d'un ensemble de données gravimétriques peut être utilisé dans le but de déterminer les profondeurs moyennes des différentes formations géologiques. Cette technique a été largement utilisée par nombreux auteurs (**Spector & Grant, 1970; Gerard & Griveau, 1972; Gerard & Debeglia, 1975; Bhattacharyya, 1978; Nnange & V. Ngako, 2000; Njandjock et al., 2006; Abate Essi et al., 2019**). La méthode est basée sur l'hypothèse que chaque unité géologique peut-être associée à une distribution de blocs non-corrélée, de profondeurs, d'épaisseurs, de largeurs et de contraste de densité variables. Les anomalies gravimétriques peuvent être convenablement traitées sous forme d'une série spatiale applicable à la synthèse et à l'analyse de Fourier sans que l'aspect intrinsèque des anomalies soit affecté (**Pal et al., 1979; Nadiyah et al., 2016**). L'analyse spectrale n'a pas besoin à priori de la connaissance de la géométrie ou du contraste de densité des corps responsables des anomalies observées. Elle demande tout simplement l'étude de la puissance ou de l'énergie spectrale en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence (**Saada, 2016; Luelseged et al., 2017**). Les sources de proche surface donneront ainsi un spectre de puissance plus plat, alors que les sources plus profondes donneront un spectre de puissance plus abrupt. Le spectre ainsi obtenu sera subdivisé en différents domaines spectraux (**Reeves, 2005; Ahmed et al., 2016; Zelalem et al., 2018**) :

- Domaine de basses fréquences ou de grandes longueurs d'onde correspondant aux sources profondes et qui est défini par le géophysicien ;
- Domaine de hautes fréquences ou de faibles longueurs d'onde correspondant aux sources de proche surface. Ce domaine peut également être subdivisé en plusieurs petits domaines en fonction des objectifs de l'étude ;
- Domaine des bruits communément appelé fréquences de « Nyquist » (**Reeves, 2005**). Ce domaine dépend de la résolution des données utilisées ainsi que de l'ordre de dérivé du champ de potentiel. Dans ce domaine, le spectre tend à devenir horizontal.

L'énergie spectrale en question se calcule à partir de la transformée de Fourier. Ce calcul peut se faire à partir des valeurs échantillonnées selon un profil (1D) ou à partir d'une grille (2D). La profondeur (**h**) d'une interface peut être obtenue en utilisant la formule de **Gerard & Griveau, 1972**, donnée par l'équation (3).

$$\mathbf{h} = \Delta(\mathbf{LogE})/4\pi\Delta(\mathbf{n}) \quad (3)$$

#### **Dérivées horizontale et verticale**

Les filtres de dérivées amplifient l'effet des sources superficielles en atténuant l'effet des sources profondes, focalisent l'anomalie et permettent de cerner d'avantage les limites géométriques de l'anomalie recherchée (**Mounir et al., 2012**). Il existe plusieurs filtres de dérivées à savoir : la dérivée horizontale (suivant X et suivant Y) et la dérivée verticale **Z**. Chacune de ces dérivées est basée sur le traitement du signal dans le domaine fréquentiel (**Blakely, 1995**). Dans cette étude, seule la carte de dérivée verticale a été utilisée dans le processus d'interprétation. Ce filtre est utilisé pour amplifier les courtes longueurs d'ondes et individualiser les corps géologiques dans le proche sous-sol. L'opérateur de la dérivée verticale d'ordre V est :

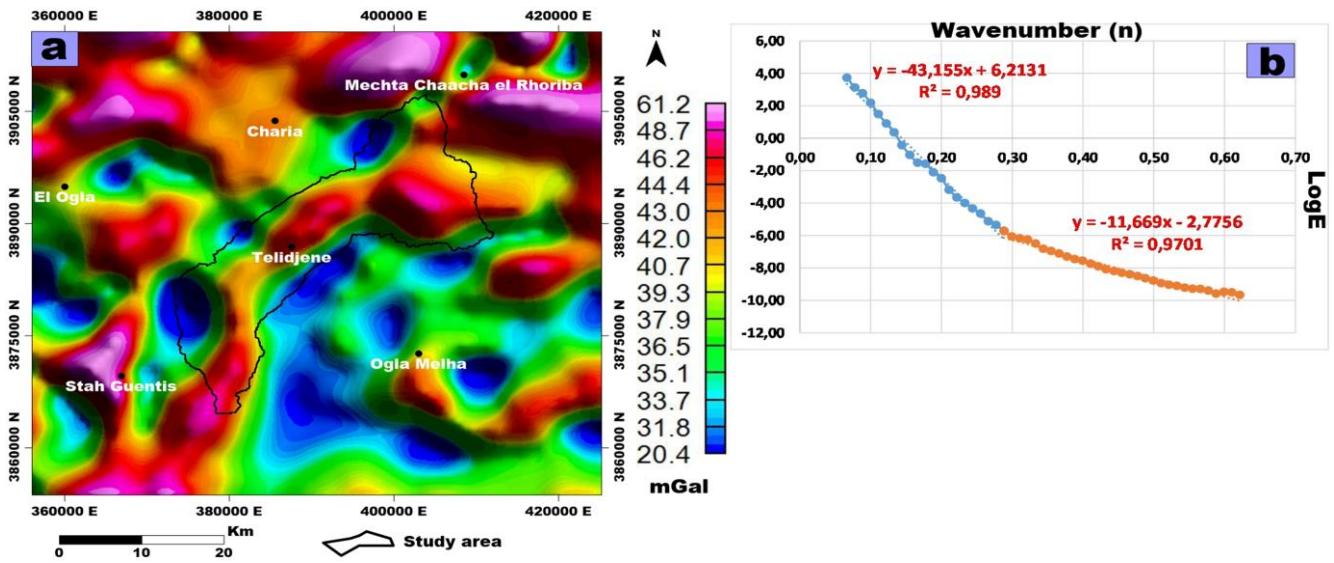
$$O_{DV} = \sqrt{(k_x^2 + k_y^2)^n} \quad (4)$$

### **7. Analyses et interprétations des résultats des traitements gravimétriques**

La grille d'anomalies de Bouguer a été élaborée en utilisant le Minimum curvature comme méthode d'interpolation avec un pas d'échantillonnage de 0,01 degré (soit environ 1.1 km) (**Fig 3a**). Le calcul du spectre radial 2D associé à la grille de Bouguer montre que la profondeur moyenne maximale Z des sources gravimétriques est de 3.436 km (**Fig 3b**). Afin d'obtenir un modèle résiduel à 1 km de profondeur environ qui sera débarrassé de l'influence des sources d'anomalies très profondes, l'approche de séparation basée sur le prolongement vers le haut a été utilisée. Elle a consisté tout d'abord à effectuer un prolongement vers le haut de la grille de Bouguer à une altitude maximale H de 2 km. Par la suite, la grille résiduelle (**Fig 4a**) a été obtenue par simple soustraction entre la grille de Bouguer et celle prolongée à 2km. Au sens de **Jacobsen (1987)**, le modèle résiduel ainsi obtenu met en évidence les anomalies comprises entre la surface et une profondeur maximale moyenne de 1km. Cette profondeur estimée selon l'approche de **Jacobsen (1987)**, se rapproche de celle obtenue par application d'un spectre radial sur la grille résiduelle de Bouguer qui est de 1.058 km (**Fig 4b**). Cela permet d'estimer à 1km la profondeur maximale des différents modèles qui seront produits par la suite.

Sur la carte résiduelle de Bouguer (**Figure 53a**), l'amplitude des anomalies a remarquablement chuté. De 20.4 à 61.2 mGal sur la carte d'anomalies de Bouguer, elle varie maintenant de -11.5 à 13.4 mGal sur celle de sa résiduelle. Ceci montre que l'influence majoritaire des corps plus denses et plus profonds situés au-delà de 1 km a été atténué. L'organisation des anomalies a également été modifiée. Le relief des anomalies ici est moins perturbé, plus net et surtout il définit une certaine tendance directionnelle pouvant être interprétée sur le plan tectonique. Que ce soit sur la carte de la Bouguer (Figure 52a) ou sur la carte résiduelle, on peut constater une grande anomalie positive qui traverse entièrement le bassin de la zone d'étude en passant exactement par son axe principale (axe du pli du bassin). Cette situation laisse donc croire que l'axe du pli de ce bassin est contrôlé par des corps intrusifs et par conséquent que ce bassin s'est mis en place à la suite d'un métamorphisme de contact. D'après les principes stratigraphiques, ces formations intrusives sont donc plus jeunes que les formations sédimentaires qu'elles traversent. Si on calcul la dérivée verticale associée à la grille résiduelle (Figure 5), on peut constater que cette anomalie axiale paraît plus détaillée et surtout plus continue que sur les deux précédentes cartes. Cette observation permet de comprendre la proximité du toit de cette anomalie avec la surface. En analysant de façon plus détaillée cette anomalie axiale sur la carte de dérivée verticale (Figure 54), on peut observer des contrastes gravimétriques pouvant correspondre à des zones de failles, ce qui fait ainsi de ce socle intrusif un potentiel acquière de fracture. De part et d'autre de cette anomalie axiale (Figure 55), on observe deux couloirs d'anomalies négatives qui définissent ici les deux épontes de l'anticlinal dont les axes de compression suivent le même mouvement (Figure 55).

L'ensemble de ces analyses a donc permis d'élaborer le modèle structural de la Figure 7 qui met ainsi en évidence le potentiel hydrogéologique de ce bassin à travers les fractures de l'anticlinal lié aux cœur diapirique qui contrôle l'axe principal de ce pli. Bien que le modèle obtenu soit peu détaillé à cause de la faible résolution des données gravimétriques utilisées (4 km x 4 km), ce modèle peut être utilisé comme document de base pour tout projet d'investigation hydrogéologique.



$$\begin{aligned}
 DEPTH_{max} = Z &= \frac{\Delta \text{Log} E}{4\pi\Delta(n)} = \frac{\text{Slope}}{4\pi} \\
 &= \frac{43.155}{4 * 3.14} = 3.436 \text{ km} \\
 &= 3436 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Figure 39. (a) Carte d'anomalies de Bouguer ; (b) Spectre de puissance associé à la Bouguer

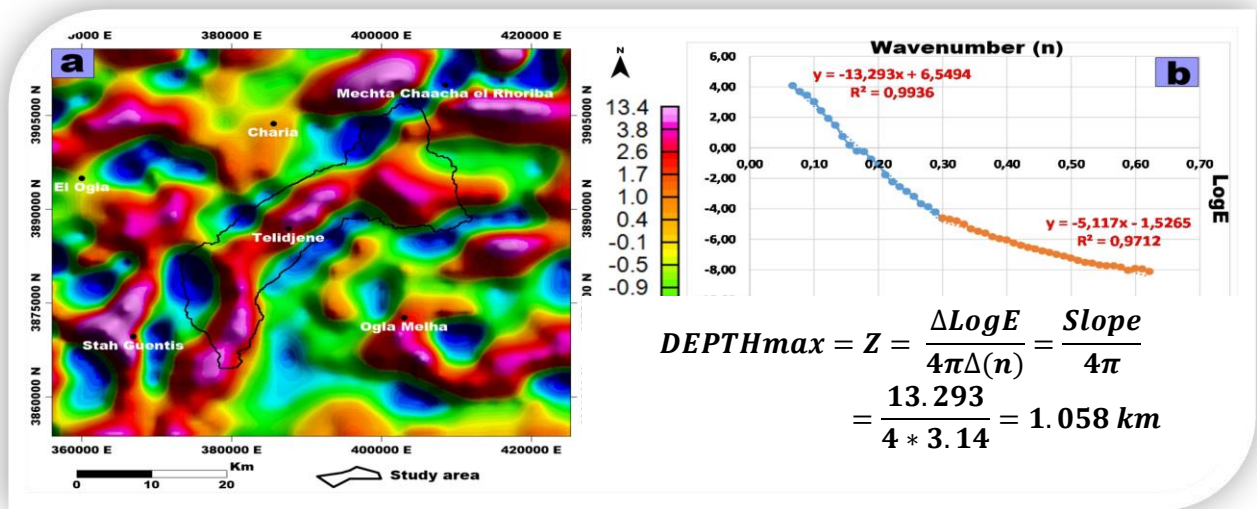


Figure 40. (a) Carte résiduelle de Bouguer ; (b) Spectre de puissance associé à la résiduelle

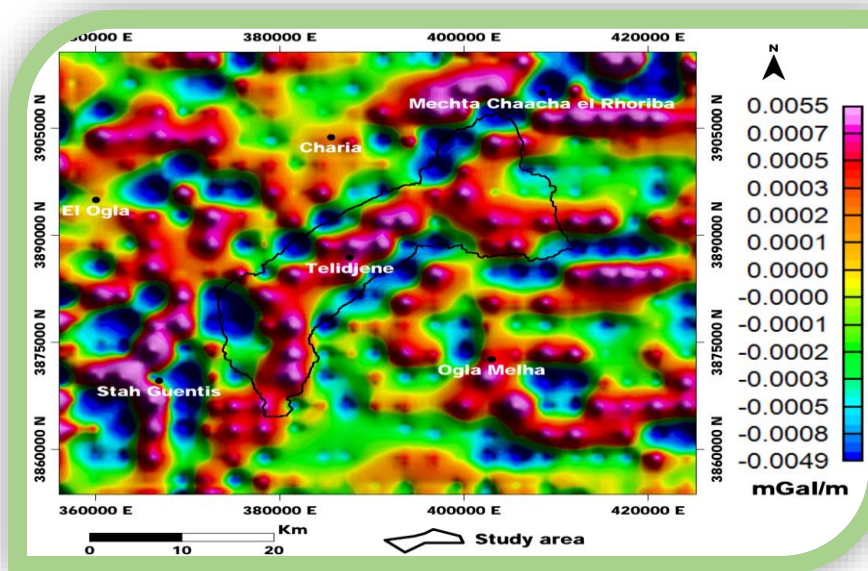


Figure 41. Carte de dérivée verticale de la résiduelle de Bouguer

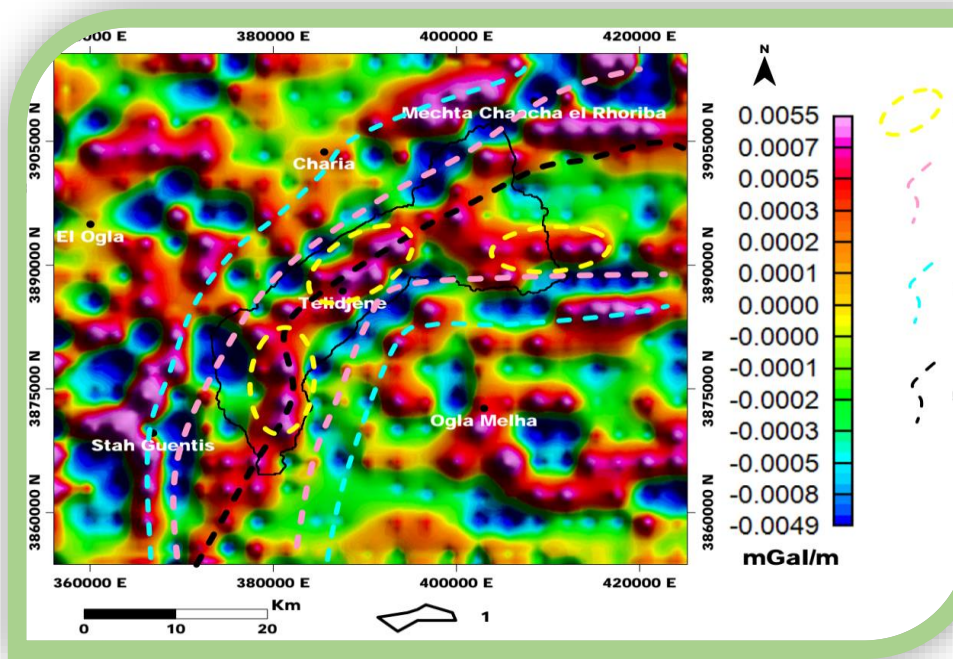
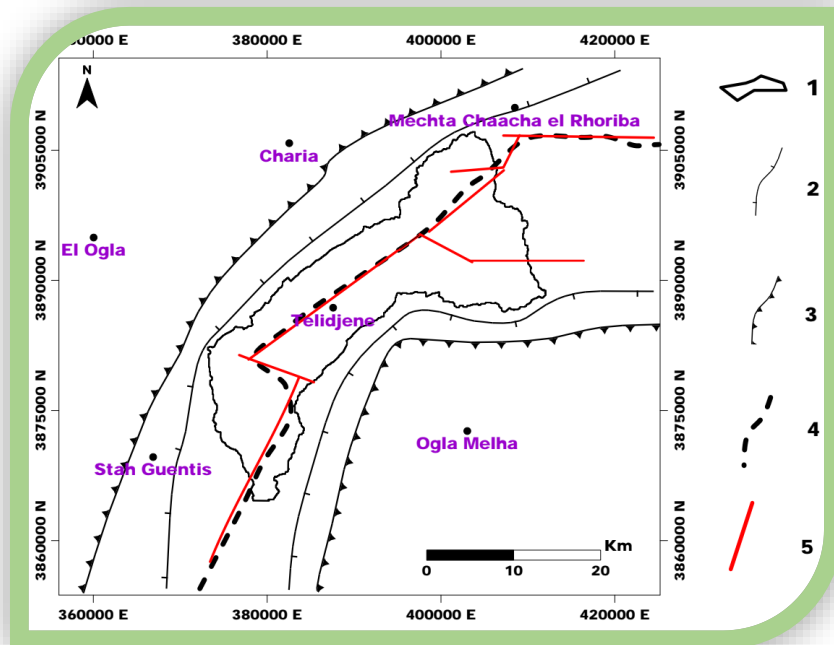


Figure 42. Carte analytique de la dérivée verticale. (1) Zone d'étude ; (2) Zone de contraste pouvant correspondre aux zones de failles ; (3) Axes de compression ; (4) Couloirs d'anomalies négatives correspondant aux épontes du pli ; (5) Axe du pli



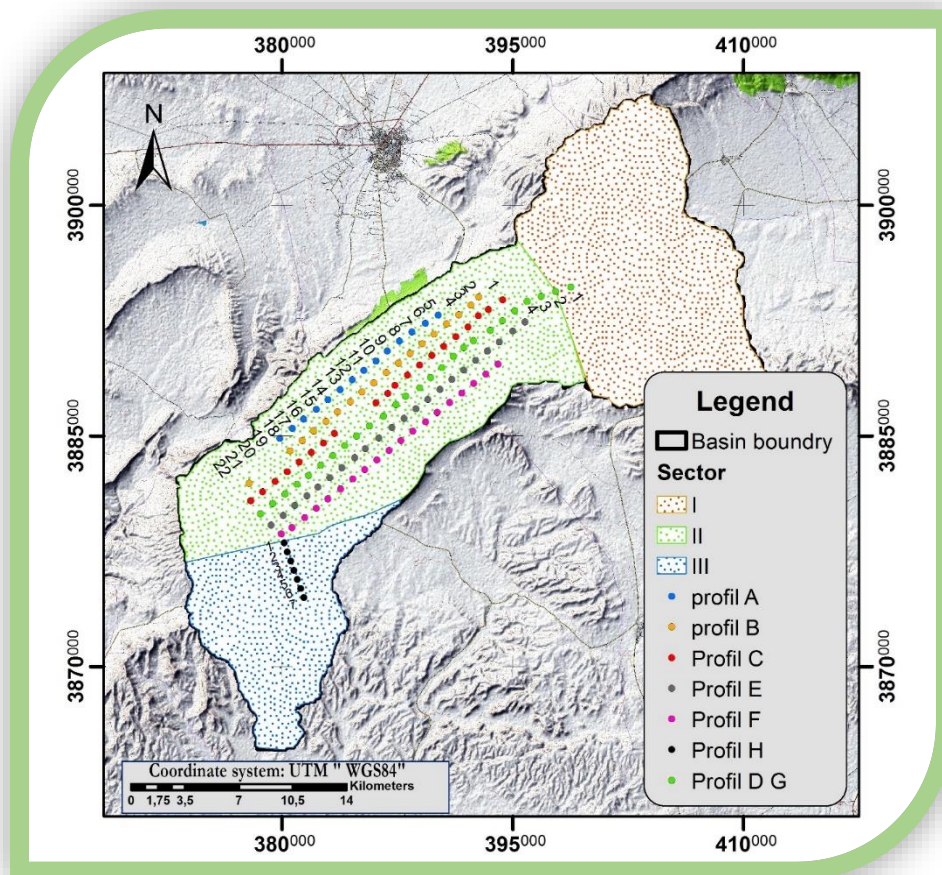


**Figure 43.** Modèle structural interprétatif (1 : Zone d'étude ; 2 : Les épontes de l'anticlinal ; 3 : Zone de compression ; 4 : Axe du pli ; 5 : Fracture le long de l'axe du pli représentant les zones idéales pour des investigations hydrogéologiques



## 2. La méthode électrique

Afin de déterminer la géométrie des aquifères existants, un relevé géophysique de la Compagnie Générale de Géophysique Générale de Géophysique (CGG, 1976) (**Figure 57**) couvrant le secteur (II) a été utilisé. Un profil électrique de 7 sondages électriques verticaux (VES) en AB 1000 a été réalisé dans le secteur III de Bir Said (**figure 57**), visant à mettre en évidence la géométrie des aquifères superposés du Quaternaire et de l'Eocène-Maastrichtien superposés, captés par les forages BS1 et BS2. Aucun programme d'investigation n'a été réalisé dans le secteur I, cela est dû à l'absence de points d'eau pour valider les résultats.



**Figure 44. Carte d'implantation des sondages électriques verticaux**

### 1. Inventaire des forages et des puits

Le nombre de forages et puits inventoriés dans le bassin est de 32, les plus représentatifs sont ceux destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) avec 4 forages situés dans la région de Bir Said (III) et à côté de la ville de Telidjene (Secteur II).

En plus des forages mentionnés, 26 puits exploités par les agriculteurs pour l'usage domestique et l'irrigation qui captent la nappe alluviale ont été utilisés pour dessiner la carte piézométrique.

La partie nord-est du bassin (zone I), en revanche, est alimentée en eau potable par le bassin d'Elmalabiod situé à la limite nord-est du périmètre, nous n'avons pas trouvé de forages ou de puits dans cette zone probablement en raison des possibilités aquifères limitées, voire inexistantes, dans cette partie du du bassin. Le tableau 1 présente la distribution des forages/puits par type d'utilisation et leurs caractéristiques

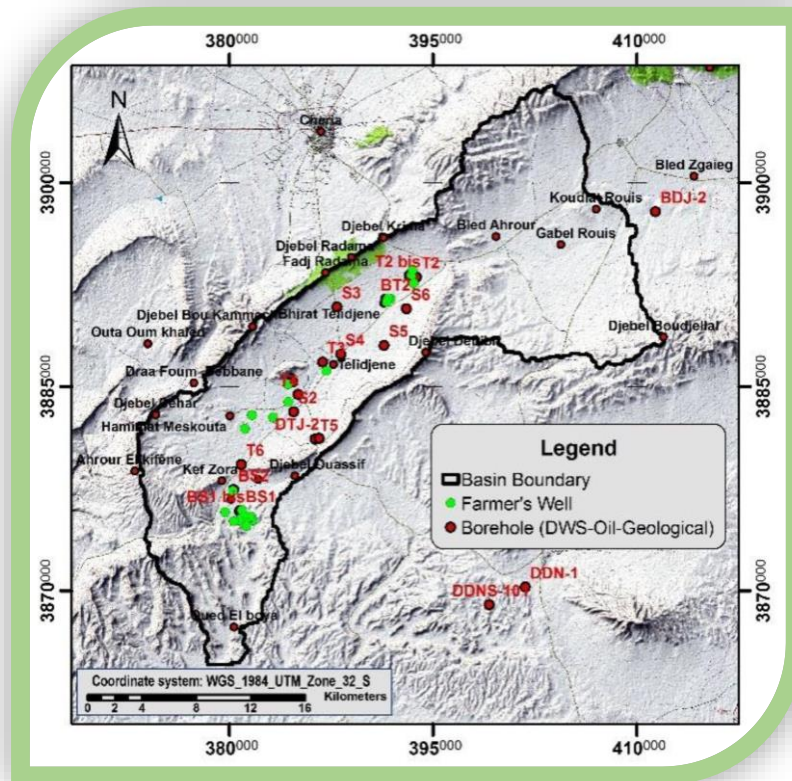
Les données hydrauliques géologiques des forages présentées dans le tableau 1 ont été utilisées pour calibrer et réinterpréter les sections géo-électriques (Figs. 59 et 61) et pour déterminer l'âge des formations géologiques aquifères, l'épaisseur et la résistivité des différentes formations.

**Tableau 28.** Inventaire des puits et forages dans le bassin de Télijdjene

Well/ Bor.	Aquifer	W.D (m)	I.W.L (m)	C.W.L (m)	I.F (l/s)	C.F (l/s)	Rea. Date	E.I.S. date	Dest.	Expl. State.	Obs.
BT-1	Quat.-Cenom. Albo-Aptian	142	9.2	11.15	14.2	0	1984	2009	DWS	O.U	R.B BT2
T-2 bis	Campano- Maastrichtian	60	16.4	17.32	20	6	2005	2009	DWS	I.U	-
BS-1 bis	Maast.	100	40	40	4	4	2011	2011	DWS	I.U	-
BS2	Quat-Maast.	300	41	41.61	6	6	1987	2009	DWS	I.U	-
BT-2	Quat-Cenom.	80	24	24.3	5	5	1985	2017	DWS	I.U	-
BS-1	Maast.	150	40	40	6	6	1985	1985	DWS	O.U	R.B. BS-1 Bis
T2	Turonian	70	16.6	-	-	7.38	-	-	H.R	Aban	Flow drop
T3	Albo-Aptian	105	9.25	-	2.6	0	-	-	H.R	Aban	Flow drop
T4	Quat.-Albo.Aptian	150	Neg.	-	-	0	1982	-	H.R	-	-
T5	Santonian	-	150	-	Neg.	Neg.	1982	-	H.R	-	-
T6	Quat.-Camp. Senonian	150	17	-	-	0	1982	-	H.R	Untap	-
S2	Quat.-Cenom.	20	-	-	-	0	-	-	H.R	Untap	-
S3	Quaternary	36.7	18.4	-	-	-	-	-	H.R	Untap	-
S4	Quat.	45.7	31	-	-	0	1969	-	H.R	Untap	-
S5	Albo-Aptian	51	30	-	-	-	-	-	H.R	Untap	-
S6	Santonian	32	24.5	-	-	-	-	-	H.R	Untap	-
DTJ-1	Albian-Aptian	210	-	-	-	-	2013	-	G.R	-	-
DTJ-2	Santonian	300	-	-	-	-	2014	-	G.R	-	-
DDNS 101	Eocene-Maast.	350	120	-	-	2	2012	-	O.E	-	-
DDN-1	Eocene-Aptian	3175	-	-	-	-	2000	-	O.E	-	-
BDJ-2	Maast.-Upper Campanian Neocomian	3560	-	-	-	-	-	-	O.E	-	-

\*Aband: abandoned; Bor: borehole; Camp.:Campanian. Cenom.: Cenomanian; Rea.: Realization. C.W.L: current water level, Dep: depth; Dest: destination; DWS: drinking water supply; E.I.S: enter into service; Expl: exploitation; G.R: geological research; H.R:

hydrogeological research; I.F: Initial flow; I.U: in use; I.W.L: initial water level; Maast: (Maastrichtian); Neg.: negative; O.U: out of use; Ser: service; Exp.: exploitation; Obs.:observation; Neg.: negative; O.E: oil exploration; Quat.: quaternary; Untap: untapped; W.D: well depth



**Figure 45.** Carte d'implantation des sondages électriques verticaux

## 8. Interprétation

- Le bassin de Telidjene a été couvert par une campagne de prospections géophysiques réalisées par la compagnie de géophysique (C.G.G) en 1976 , sur cette zone 109 sondage électrique en longueur de ligne AB égale à 300 m ont été exécutés. Ils sont répartis selon une maille carré de 1 km de côté, constituant 5 profils NE-SW (A à F) et 22 profils NE-SE (1 à 22).(figure 57)

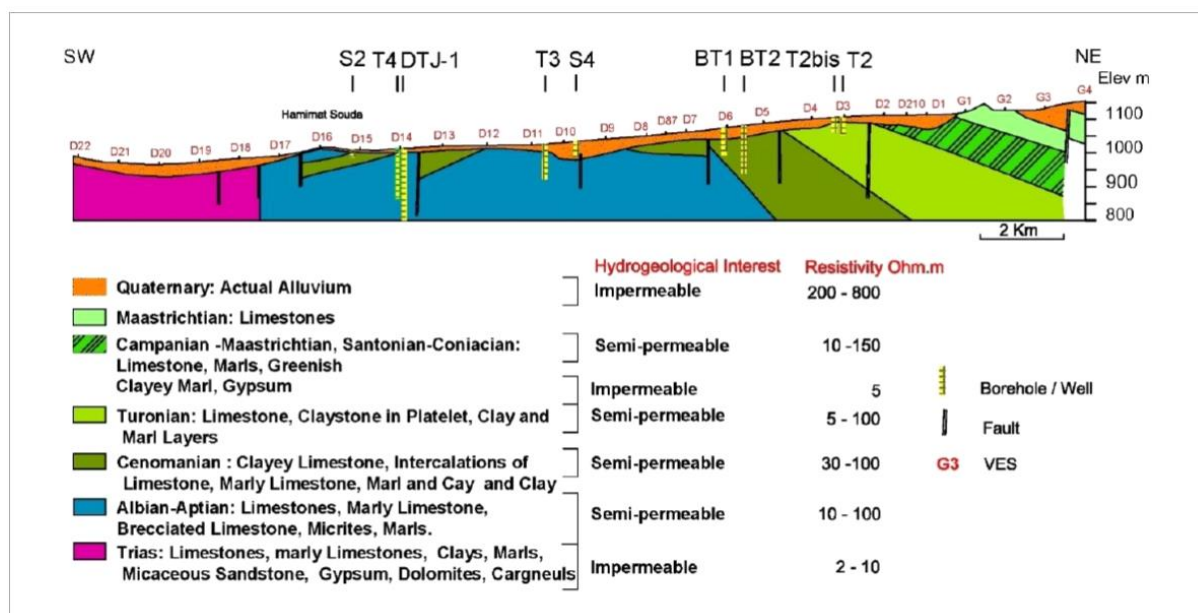
15 SEV en AB 2000 m ont été répartis sur le long des profils D13 et 15, et au nord du bassin (profil G) sur les calcaires maestrichtiens, pour tenter de déterminer la structure du substratum.

Au total 114 SEV en AB 300 et 15 SEV en AB 2000 m ont été exécutés.

Le profil C' ( figure 57) a été utilisé pour tracer la section géologique sur l'axe de l'anticlinal , comme discuté dans la section la section géologique (Figure. 57).

Les profils D-G' (CGG, 1976, pl. 5, profil D-G) (Fig. 4) ont permis de de dessiner une section hydrogéologique représentative dans la partie du dôme du secteur II (Fig. 8).

La section géoélectrique qui suit les profils D-G montre l'alternance, du haut vers le bas, de 8 niveaux géoélectriques dont les plus importants sont le Mio-Plio-Quaternaire, représenté par les alluvions récentes, modérément résistantes (50-150Ωm) et discordantes avec les formations crétacées et triasiques qui recouvrent la zone du dôme. Les calcaires maastrichtiens mis en évidence dans la partie nord-est sont caractérisés par la plus haute résistivité (200-800Ωm) la plus élevée (200-800Ωm). Cet horizon ne présente pas d'intérêt hydrogéologique en raison de la faible fracturation affectant cette zone ; la résistivité la plus faible est attribuée aux formations triasiques (2-10 Ωm). Entre ces deux niveaux, on trouve des horizons d'intérêt hydrogéologique, comme l'Albo-Aptien, le Cénomaniens et le Turonien, dont les résistivités sont proches et se situent entre 5 et 100 Ohm.m ce qui est dû à la présence de la composante conductrice matérialisée par des argiles et des marnes en plus des formations carbonatées.



**Figure 46.** Coupe géo-électrique réinterprétée sur le Profil DG (modifié)

Le profil H' (Fig. 10) est situé dans le secteur III, les données de terrain ont été obtenues par l'exécution de 7 sondages électriques verticaux VES qui ont été traités par le logiciel IPI2WIN (Fig. 10).

Ce logiciel permet une interprétation interactive semi-automatique qui prend en compte ainsi que la prise en compte des données géologiques existantes.

Un profil électrique H de 7 sondages électriques verticaux (VES) en AB 1000 a été réalisé



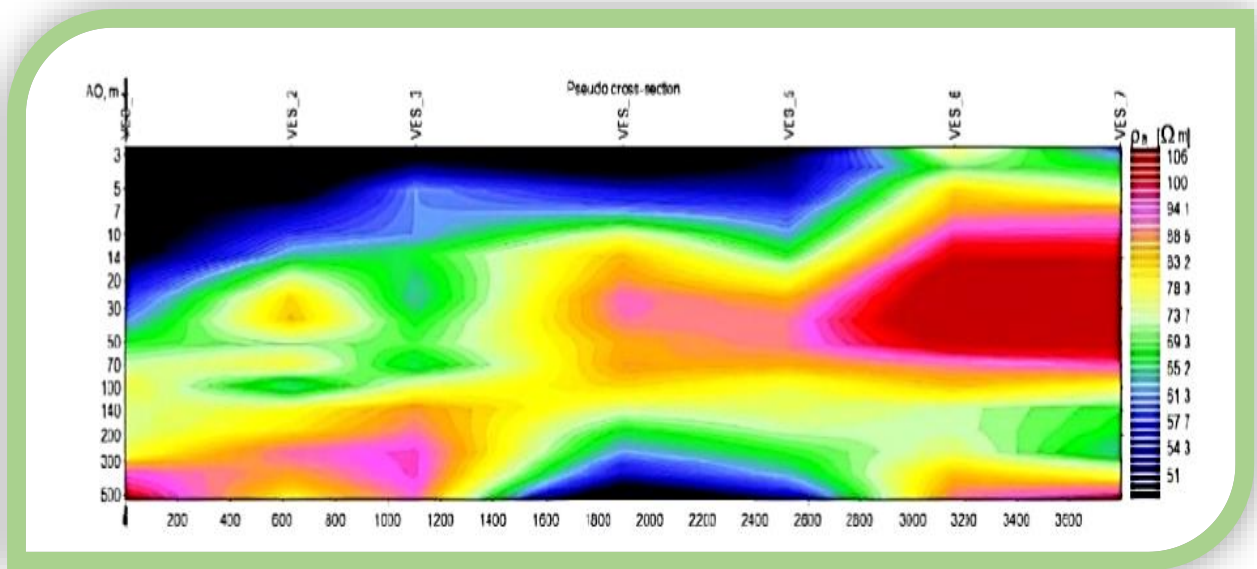


Figure 47. Coupe verticale des résistivité apparente sur le profil H

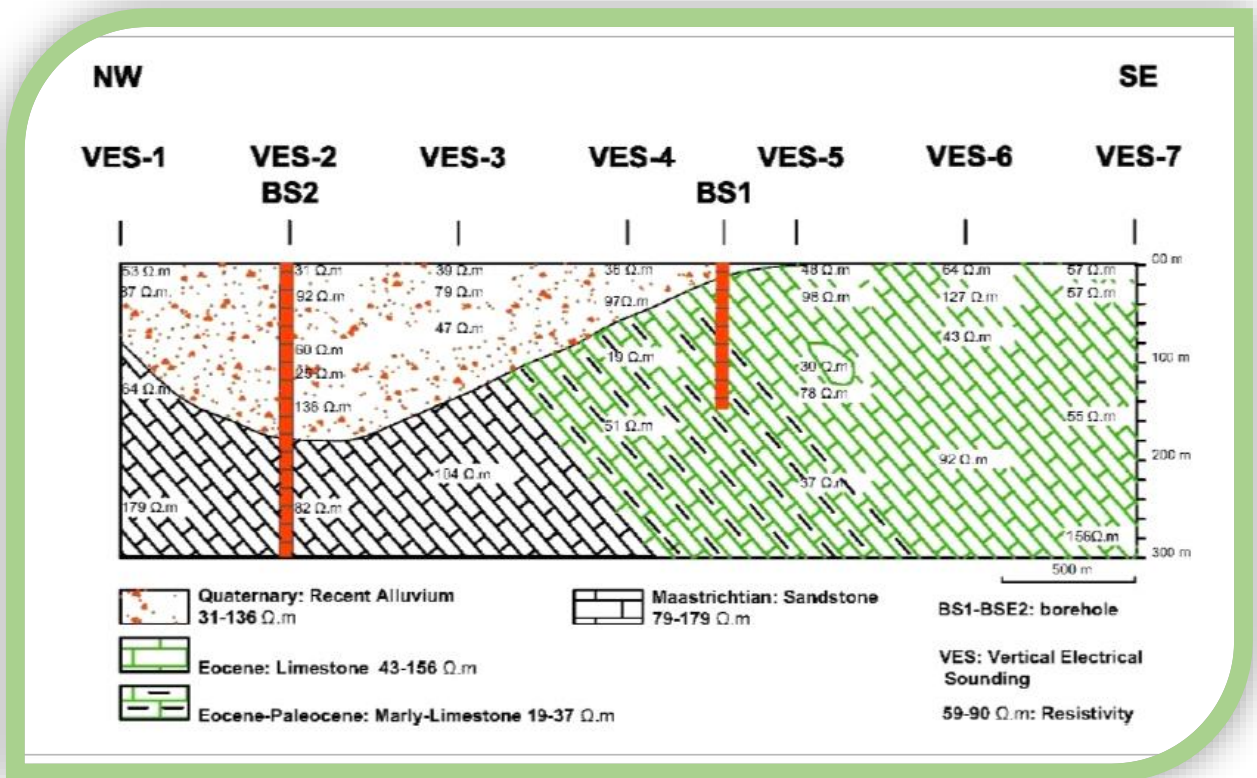


Figure 48. Coupe géo-électrique établies selon le profil H

La section géoélectrique du profil H (Fig. 10) a été établie sur la base de l'étalonnage effectué

sur les forages BS-1 et BS-2, qui correspondent à la lithostratigraphie suivante :

- 'Quaternaire' construit par des alluvions récentes et anciennes, marquée par une résistivité comprise entre 10 et 150  $\Omega\text{m}$  ;

- 'Éocène' calibré par le forage BS1 ; de haut en bas, elle est constituée de calcaires, de calcaires marneux ainsi que de une couche résistante non identifiée qui pourrait être attribuée aux calcaires marneux durs. Les valeurs de résistivité correspondantes sont de 46-64  $\Omega\text{m}$ , 37-39  $\Omega\text{m}$ , et 156  $\Omega\text{m}$  ;

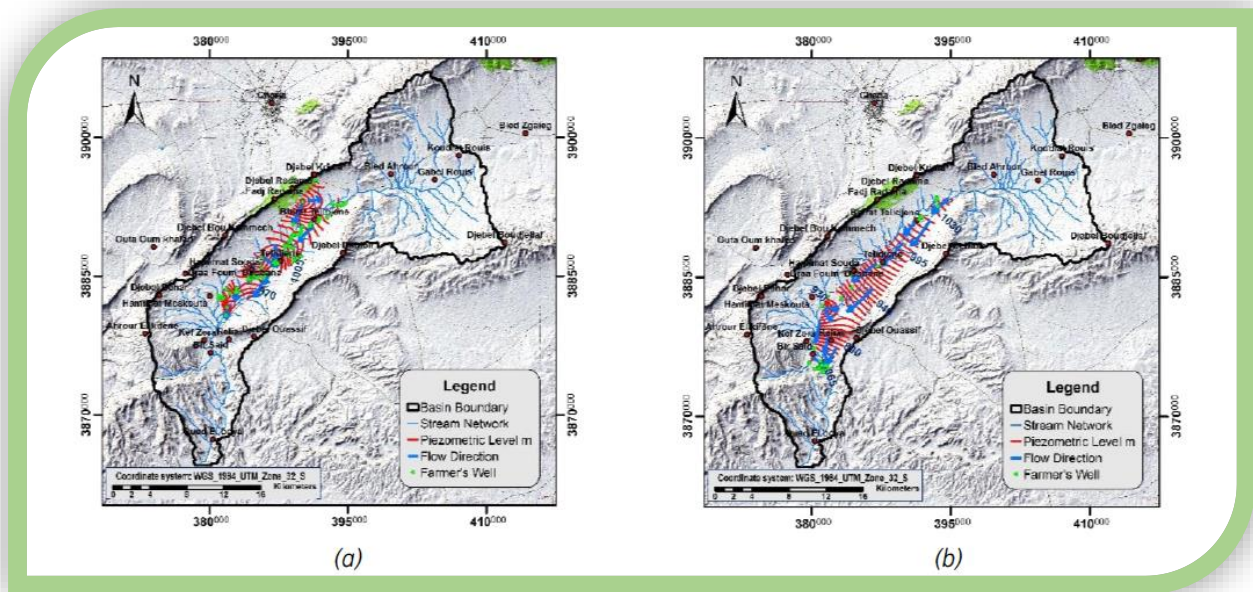
\_ Le 'Maastrichtien' constitué par des calcaires francs dont la résistivité variant entre 59 et 136  $\Omega\text{m}$ . Le niveau piézométrique piézométrique est situé à environ 41 m ; il est détectable par une baisse de la résistivité. détecté par une baisse de résistivité dans la même formation.

### **Piezometrie**

L'Observation de la morphologie de la carte piézométrique de décembre 1991 (Charef et al., 1991), montre que l'écoulement des eaux souterraines suit généralement une Direction nord-est à sud-est (Fig. 11a).

L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide avec le cours de l'oued Telidjene, qui draine les eaux de surface ainsi que l'axe de l'anticlinal. Localement, deux directions d'écoulement peuvent être observées, l'une parallèle à l'axe de l'oued et l'autre presque perpendiculaire, qui provient des pentes vers l'oued, ce qui suggère que les eaux souterraines sont alimentées par les versants

La carte piézométrique de novembre 2018 (Fig. 11b) montre que les écoulements sont dirigés du nord-est vers le sud-ouest, un changement significatif dans la direction des écoulements apparaît au niveau de Bir Said (secteur III) suite au changement de direction de l'oued Telidjene. l'Oued Telidjene avec également une direction d'écoulement provenant des massifs et est perpendiculaire à l'axe de l'oued. Cette orientation suggère également que la nappe phréatique est alimentée par les eaux des massifs périphériques



**Figure 49.** (a) Carte des contours piézométriques du bassin versant basée sur les mesures de 78 puits. Modifié à partir de Charef et al. (1991) ; (b) Carte des contours piézométriques du bassin versant basée sur les mesures de 26 puits (2018)

#### Comparaison des cartes piézométriques pour la période 1991- 2018

En général, la direction actuelle de l'écoulement est inchangée par rapport à celle de 1991. L'orientation est toujours du nord-est vers le sud-ouest, l'extension des isopièzes de novembre 2018 sur le secteur III de Bir Saïd confirme que la direction de l'écoulement suit celle de l'oued principal.

Une baisse du niveau piézométrique a été observée entre 1991 et 2018 sur l'ensemble de la plaine. Hamimat Meskhouta et Hamimat Souda sont les secteurs où la plus forte baisse du niveau piézométrique est observée avec piézométrique est observée à 59,5 et 58 m, respectivement. Dans les autres secteurs secteurs, la valeur de la variation moyenne entre 1991 et 2018 varie entre 30 et 44 m. D'une manière générale, le niveau le niveau piézométrique a diminué de manière significative, ce qui a conduit à l'arrêt de la plupart des puits inventoriés

### Géométrie et structure des aquifères :

#### 1. Aquifères.

L'identification des systèmes aquifères a été élaborée sur la base des données lithologiques des formations géologiques affleurantes, et les résultats des travaux de forage existants, permettant la définition des principaux systèmes aquifères. L'étude géophysique réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique a été utilisée pour mettre en évidence l'étendue de l'aquifère alluvial

l'aquifère alluvial de la partie du dôme érodé . Les systèmes aquifères définis dans le bassin versant de Telidjene sont présentés dans les Fig. 11 et 13. et Fig. 10 et sont numérotés comme suit :

**(1) L'aquifère du Plio-Quaternaire**

Constitué principalement d'alluvions, de graviers et de galets, il est généralement localisé le long de l'Oued de Telidjene, des plaines et les cônes de déjection, il est le plus exploité par les agriculteurs.

Cet aquifère, situé dans la région du dôme, CGG (1976) repose sur un substratum rocheux de composée de marnes, de calcaires durs, et parfois d'argiles, ce qui est dû à l'hétérogénéité latérale de la structure géologique de nature variée.

**(2) L'aquifère bicouche de la région de Bir Said III**

Il est le résultat de la superposition de formations quaternaires constituées par des alluvions anciennes et récentes et de calcaires maastrichtiens, avec des formations fissurées et karstiques plus ou moins denses.

L'aquifère du Maastrichtien est confiné, il présente un toit dur sans fissures, avec une épaisseur variant de 20 à 40m. D'après les forages DDNS-101, DDN-1 et BDJ-2, l'épaisseur des calcaires du Maastrichtien est d'environ 200m; des entrées d'eau sont observées entre 41 et 85 m de profondeur, ce qui montre que l'eau de ces aquifères circule sous pression.

**(3) L'aquifère Turonien**

Cette zone présente un aquifère karstique confiné dans des calcaires fissurés et karstifiés constitués de calcaires durs interceptés par le forage T2.

**(4) Aquifère du Cénomani**

Cet aquifère est exploité par le forage BT2, il s'agit d'un aquifère captif d'environ 30 m d'épaisseur dans des calcaires marneux fissurés, avec un toit construit par des formations marneuses.

**(5) Aquifère Albo-Aptien**

La diversité des conditions hydrogéologiques hydrogéologiques, essentiellement liée à la structure et aux propriétés géologiques des roches albo-aptiennes, montre un changement dans les ressources en eau de cette zone.

Le T3 qui recoupe cette zone présente des horizons saturés dans les calcaires ; ces calcaires marneux forment un système aquifère confiné. Cependant, les informations sur le gisement de cet aquifère et son lien hydraulique sont insuffisantes et souvent confuses pour permettre une



estimation de l'exploitation de la zone. A une distance de 3 000 m vers le sud-ouest, le forage T4 interceptant les formations calcaires marneuses s'est avéré improductif pour le pompage, ce qui indique que ces intercalations calcaires sont imperméables et stériles. Il convient de rappeler que le forage T3 a été arrêté depuis plusieurs années en raison d'une baisse du débit, et qu'au moment de la réalisation du forage, le débit de ce forage était de 2.6 L/s.

## **Conclusion**

Les différentes méthodes de traitements appliquées aux données gravimétriques et géo-électriques ont permis de faire ressortir les traits structuraux au niveau du bassin de Télijdjene.

L'analyse gravimétrique a débouché sur un modèle structural mettent en évidence les fractures majeures qui contrôlent l'axe principale du pli anticlinal ; cette information servira de document de base pour orienter les investigations futurs, d'autre part, l'analyse des données géo-électriques à permis d'identification de la structure ainsi que les principaux systèmes aquifère dans le bassin à savoir :

- (1) L'aquifère du Plio-Quaternaire constitué principalement d'alluvions
- (2) L'aquifère bicouche de la région de Bir Said résultant de la superposition des formations quaternaires reposant sur un aquifère carbonaté fissuré d'âge éocène et maestrichtien.  
Des aquifères d'âge crétacé sous-jacents et discordants à la nappe du moi-plio-quaternaire :
- (3) L'aquifère Turonien formé par calcaires.
- (4) Aquifère du Cénomaniens matérialisé par des calcaires marneux fissurés.
- (5) Aquifère Albo-Aptien marquant un changement de ressource en fonction de l'hétérogénéité de la lithologie allant entre les horizons carbonatés et les plages argilo-marneuses.

## REFERENCES

**ABATE ESSI, J. ET AL., 2017.** INTERPRETATION OF GRAVITY DATA DERIVED FROM THE EARTH GRAVITATIONAL MODEL EGM2008 IN THE CENTER-NORTH CAMEROON: STRUCTURAL AND MINING IMPLICATIONS. ARABIAN JOURNAL OF GEOSCIENCES, VOLUME 10, P. 130–132.

**ABATE ESSI, J. ET AL., 2019.** GRAVITY MODELING OF THE AU–U MINERALIZED CRUST AT THE NORTH-CENTRAL CAMEROON ILLUSTRATING CRUSTAL PERMEABILITY. NATURAL RESOURCES RESEARCH, VOLUME 50, P. 4880–502.

**AHMED, K. ET AL., 2016.** INFERRING THE SUBSURFACE BASEMENT DEPTH AND THE STRUCTURAL TRENDS AS DEDUCED FROM AEROMAGNETIC DATA AT WEST BENI SUEF AREA, WESTERN DESERT, EGYPT. VOLUME 5, P. 380–392.

**AMANTE, C. & EAKINS, B., 2008.** ETOPO1 1ARC-MINUTE GLOBAL RELIEF MODEL: PROCEDURES, DATA SOURCES AND ANALYSIS. NOAA TECHNICAL MEMORANDUM. NESDIS NGDC-24.

**BALMINO, G., VALES, N., BONVALOT, S. & BRIAIS, A., 2011.** SPHERICAL HARMONIC MODELLING TO ULTRA-HIGH DEGREE OF BOUGUER AND ISOSTATIC ANOMALIES. J. GEODES, VOLUME 86, P. 499–520.

**BHATTACHARYYA, B., 1978.** COMPUTER MODELING IN GRAVITY AND MAGNETIC INTERPRETATION. GEOPHYSICS, 43(5), P. 912–929.

**BLAKELY, R.J., 1995.** POTENTIAL THEORY IN GRAVITY AND MAGNETIC APPLICATIONS. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, NEW YORK: 435P.

**FULLEA, J., FERNA`NDEZ, M. & ZEYEN, H., 2008.** FA2BOUG-A FORTRAN 90 CODE TO COMPUTE BOUGUER GRAVITY ANOMALIES FROM GRIDDED FREE-AIR ANOMALIES: APPLICATION TO THE ATLANTICMEDITERRANEAN TRANSITION ZONE. COMPUTERS AND GEOSCIENCES, 34(12), P. 1665–1681.

**GERARD, A. & GRIVEAU, P., 1972.** QUANTITATIVE INTERPRETATION OF GRAVITY OR MAGNETIC FIELDS FROM TRANSFORMED MAPS OF THE FIELDS' FIRST VERTICAL DERIVATIVE. GEOPHYSICAL, 20(2), P. 459–481.

**GERARD, A. AND N. DEBEGLIA, 1975.** AUTOMATIC THREE-DIMENSIONAL MODELING FOR THE INTERPRETATION OF GRAVITY OR MAGNETIC ANOMALIES. GEOPHYSICS, 40 (6), 1014–1034.

**JACOBSEN, 1987. A.** CASE FOR UPWARD CONTINUATION AS A STANDARD SEPARATION FILTER FOR POTENTIAL-FIELD MAPS. GEOPHYSICS, VOLUME 52, P. 1138–1148.

**LUELSEGED, L. ET AL., 2017.** EVOLUTION OF THE BROADLY RIFTED ZONE IN SOUTHERN ETHIOPIA THROUGH GRAVITATIONAL COLLAPSE AND EXTENSION OF DYNAMIC TOPOGRAPHY. TECTONOPHYSICS, VOLUME 699, P. 213–226.

**MEYING, A., GOUET, H.D., NDOUGSA .MBARGA, T., NDAM NJIKAM, M.M., OWONO AMOUGOU, O.U., 2019.** 2.5D MODELLING OF AEROMAGNETIC DATA AND THEIR MINING IMPLICATIONS OVER THE NGAOUNDERE AREA (ADAMAWA PROVINCE, CAMEROON). INTERN. J. GEOSCI. 10, 173-192.

**MOUNIR, A., AHMED, M. & MUSTAPHA, M., 2012.** CONTRIBUTION OF THE AIRBORNE AEROMAGNETIC MAPPING TO THE STRUCTURAL IDENTIFICATION OF THE AQUIFER SYSTEM OF THE OASIS' SPRINGS OF FIGUIG, MOROCCO. BULLETIN DE L'INSTITUT SCIENTIFIQUE, RABAT, SECTION SCIENCES DE LA TERRE, ISSUE 34, PP. 29-40.

**NADIAH, H., HAMZAH, U., SAMSUDIN, A. & IBRAHIM, A., 2016.** BASEMENT DEPTH ESTIMATION OF CHESHIRE BASIN IN NORTHWEST ENGLAND BY POWER SPECTRUM ANALYSIS OF GRAVITY DATA. ELECTRONIC JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, VOLUME 21, PP. 395-408.

**NJANDJOCK, P., MANGUELLE-DICOUM, E., NDOUGSA-MBARGA, T. & TABOD, C. T., 2006.** SPECTRAL ANALYSIS AND GRAVITY MODELLING IN THE YAGOUA, CAMEROON, SEDIMENTARY BASIN. GEOFÍSICA INTERNACIONAL, 45(2), P. 209–215.

**NNANGE, J., 1991.** THE CRUSTAL STRUCTURE OF THE CAMEROON VOLCANIC LINE AND THE FOUMBAN SHEAR ZONE BASED ON GRAVITY AND AEROMAGNETIC DATA. PH. D. THESIS, UNIV. LEEDS, ENGLAND, 242P.

**PAL, P., KHURANA, K. & UNNIKRISHNAN, P., 1979.** TWO EXAMPLES OF SPECTRAL APPROACH TO SOURCE DEPTH ESTIMATION IN GRAVITY AND MAGNETIC. PAGEOPH, VOLUME 117, P. 772–783.

**REEVES, C., 2005.** AEROMAGNETIC SURVEYS : PRINCIPLES, PRACTICE AND INTERPRETATION. EARTHWORKS ÉD. WITWATERSRAND: GEOSOFT, P. 155.

**SAADA, A. S., 2016.** EDGE DETECTION AND DEPTH ESTIMATION OF GALALA EL BAHARIYA PLATEAU, EASTERN DESERT-EGYPT, FROM AEROMAGNETIC DATA. GEOMECH. GEOPHYS. GEO-ENERG. GEO-RESOUR, VOLUME 2, P. 25–41.

**SPECTOR, A. & GRANT, F., 1970.** STATISTICAL MODELS FOR INTERPRETING AEROMAGNETIC DATA. GEOPHYSICS, VOLUME 35, PP. 293-302.

**ZELALEM, D. ET AL., 2018.** UPPER LITHOSPHERIC STRUCTURE OF THE DOBI GRABEN, AFAR DEPRESSION FROM MAGNETICS AND GRAVITY DATA. JOURNAL OF AFRICAN EARTH SCIENCES, VOLUME 147, P. 136–151.

**CGG (1976).** ETUDE GEOPHYSIQUE DANS LA REGION DE TEBESSA, REGION DES DOMES, BASSIN DE TELIDJENE

## **VI. CHAPITRE**

### **APPORT DE LA GEOPHYSIQUE DANS CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DE L'AQUIFERE ALLUVIONNAIRE**

### **AUTOMATISATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES EN UTILISANT ARCGIS ET PYTHON**

## INTRODUCTION

La résistivité géoélectrique est un outil essentiel des processus géophysiques, qui se sont avérés importants à une grande échelle, principalement pour la phase de reconnaissance de la procédure de faisabilité (Dahlin et al. 1999 ; Albouy et al. 2001 ; Ismail 2003 ; Cavinato et al. 2006 ; Ganerød et al. 2006 ; Asfahani 2007 ; Al Temamy et al. 2008 ; Elwaseif et al. 2012 ; Abu El-Ata et al. 2016 ; Abou Heleika et al. 2018 ; Sharaf El Dein et al. 2019). Ils sont appliqués (VESes) pour étudier la nature, les types lithostratigraphiques (Lithofacies), le génie civil, les investigations géoenvironnementales et la géométrie d'un aquifère superficiel et profond.

En plus de l'interprétation spécifique des données, la connaissance du contexte géologique de la région est importante. La capacité de l'investigation géoélectrique est de se référer aux changements dans les conditions des couches souterraines au moyen de par le biais de résistivités variables, puis d'être des Outils importants pour les procédures de pré-investigation et de production (procédures de pré-enquête et de production (Abu El-Ata et Ismail 1999 ; Abu El-Ata et al. 2016). Cependant, il n'est pas toujours possible de de relier une variation de résistivité à une condition ou une propriété spécifique de la roche.

Le présent chapitre a pour but d'évaluer les paramètres hydrauliques de l'aquifère, tels que l'anisotropie électrique, l'anisotropie électrique, la conductivité hydraulique et la transmissivité de la section étudiée, en la loi d'archie ( Archie, 1942) à partir des valeurs de résistivité vraie acquises. Avant de réaliser les paramètres mentionnés, une interprétation quantitative a été effectuée pour déterminer la résistivité et l'épaisseur réelles de chaque couche et de les représenter les représenter sous forme de coupes géoélectriques 2D et de cartes de distribution surfacique.

L'hydrodynamique est basée sur l'équation de conservation de masse et la loi de Darcy. L'analogie entre la circulation du courant électrique et le débit d'eau, suppose une relation entre la résistivité et la perméabilité.

Les cartes géo-électriques de la CGG ainsi que le profil géo-électrique ont été utilisés pour l'estimation des propriétés hydrauliques de l'aquifère alluvionnaire, à savoir: la porosité, la perméabilité et la transmissivité. A cet effet, les valeurs de résistivité de l'horizon aquifère

alluvionnaire constituée de gravier sableux, ont été extraites, ainsi que la conductivité électrique mesurée des 26 puits témoins dans le bassin. Pour le calcul de ces paramètres hydrauliques, la méthode qui combine la loi d'Archie et l'équation de Kozeny a été utilisée.

Cette approche peut se proposer comme une méthode complémentaire à appliquer dans des zones où les données de forage et les essais de pompage sont insuffisants ou même inexistantes. Bien qu'un étalonnage avec les données hydrogéologiques disponibles soit nécessaire, ces méthodes sont fiables, faciles à mettre en œuvre et économiques.

### **1. Automatisation des cartes des paramètres hydrodynamiques par des scripts Python et l'environnement arcGIS**

Calculer les paramètres hydrodynamiques en utilisant les données de résistivité est un processus long et nécessite l'utilisation de plusieurs environnements de traitement à la fois ainsi que plusieurs processus long et répétitifs. Il est donc préférable d'automatiser les calculs grâce à des scripts informatiques. Pour l'automatisation du calcul des paramètres hydrodynamiques, nous avons donc naturellement utilisé le langage de programmation Python associé à la suite de logiciel d'ESRI. Apparue avec la version ArcGIS 10.5, Python est un langage de programmation open source et libre (<http://www.python.org/>). Il offre une syntaxe simple à utiliser qui en facilite l'apprentissage et la maîtrise. Il permet en effet une initiation aux principes de bases de la programmation plus aisée que pour d'autres langages, comme par exemple les langages C et Java. L'existence de bibliothèques spécialisées sur divers traitements rend ce langage adapté à une grande diversité d'utilisations. Pour autant, on l'utilise le plus communément en tant que langage de script pour automatiser des tâches simples mais fastidieuses ou des enchaînements d'actions répétitives. En plus d'être intégré au logiciel ArcGIS, ce langage répond aux besoins mis en avant dans cette étude.

Cette partie focalise sur la présentation des scripts codés en Python pour traiter les données de résistivité selon la loi d'Archie et de Kozeny, en un premier temps, les données de résistivité issues des données de la CGG et des mesures effectuées sur terrain, en plus des données de la conductivité mesurées sur les 26 puits existant dans le bassin sont préparés dans des tableurs excel. Ensuite ces données des deux paramètres rattachées à leur contexte géographique seront traitées par python et arcgis ; l'algorithme utilisé permettra de générer des cartes thématiques selon l'approche décrite par les méthodes discutées dans la prochaine rubrique à savoir :

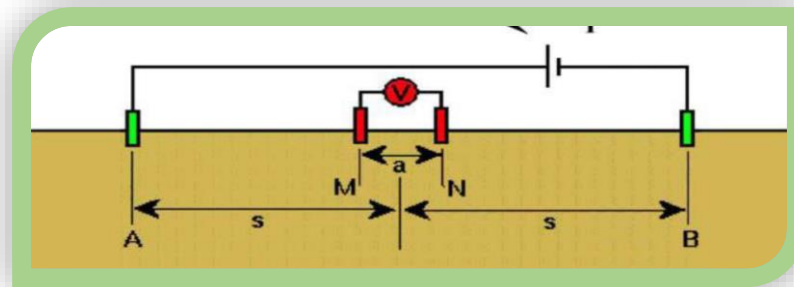
- (1) Résistivité du terrain
- (2) Résistivité de l'eau
- (3) Conductivité de l'eau
- (4) Le facteur F lié à la lithologie
- (5) La porosité
- (6) La perméabilité
- (7) La transmissivité

### 1. Théorie de la méthode électrique

La prospection électrique implique la détection en surface d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Cette méthode géophysique est couramment utilisée pour : caractériser des fractures ; détecter des cavités ; imager des intrusions d'eau salée et des migrations de polluants dans le sol.

#### Principe de la méthode électrique à courant continu

Pour mesurer la résistivité de couches géologiques constituant un terrain prospecté, un courant



**Figure 50.** Schéma du dispositif de Schlumberger

continu d'intensité  $I$  (mA) est injecté au moyen de deux électrodes A, B et une différence de potentiel  $AV$  (mV) est mesurée entre deux autres électrodes M et N (Fig. 63).

D'après la loi d'Ohm, la circulation du courant injecté obéit au principe de la conservation de la charge électrique. Une équation de continuité exprime le fait que lorsqu'une charge quitte un point, la densité de charge en ce point diminue, alors que la densité de courant augmente. La densité de charge  $q$  et la densité de courant  $J$  satisfont toujours la condition :

$$\nabla \cdot J = - \frac{Dq}{Dt} \quad (L1)$$

$\nabla$  : opérateur nabla

$q$  : densité de charge ( $C/m^3$ )

Si la densité de courant  $J$  ( $A.m^2$ ) est constante au cours du temps, la distribution de courant est stationnaire, alors :

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (I.2)$$

Et c'est le cas de la méthode électrique à courant continu.

### Résistivité

La résistivité  $\rho$  d'un milieu est la propriété physique qui détermine l'aptitude de ce milieu à s'opposer au passage du courant électrique. La résistivité est la résistance ohmique d'un cylindre de section  $S$  et de longueur unitaire ( $L=1$ ).

$$\rho = R (S/L) \quad (I.3)$$

avec :

$\rho$  : résistivité électrique (SI.m)

$R$  : résistance électrique (SI)

La conductivité électrique  $a$  est l'inverse de la résistivité et s'exprime en mho/m. En hydrogéologie on emploie le plus souvent le  $\mu S/cm$ .

$$\rho (SI.m) = 10^4 / a (\mu S/cm) \quad (I.4)$$

La valeur de résistivité obtenue sur le terrain résulte de la contribution volumique de toutes les parcelles du milieu traversé par le courant électrique émis. Si le sol est homogène, cette résistivité est égale à la résistivité intrinsèque. Pour la mesurer, on utilise un quadripôle formé d'un dipôle d'injection de courant électrique  $I$  et d'un dipôle de mesure de la différence de potentiel  $\Delta V$ . La **figure 64** montre la plage de résistivité de différentes formations géologiques.



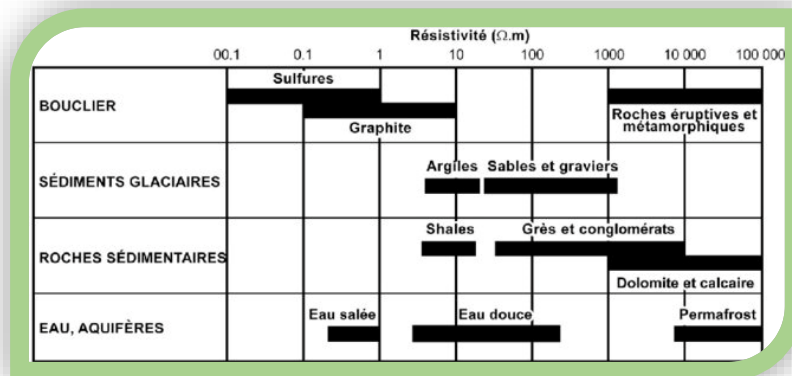


Figure 51. . Résistivité de formations géologiques (Chapellier, D., MARI, J.L., 1998)

$$\rho_a = k (AV/I) \quad (1.5)$$

Où k est un coefficient géométrique dépendant des distances séparant les électrodes, il est donné par :

$$k = 2i (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)^{-1} \quad (1.6)$$

$$AV = VM - VN = \rho I / 2\pi (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN) \quad (1.7)$$

Comme le sol est en général plus ou moins hétérogène, la valeur donnée par la formule (1.5) correspond à une résistivité apparente. Les résistivités vraies sont calculées à l'aide d'un logiciel d'inversion basé sur un modèle tabulaire.

#### Paramètres influençant la résistivité

Pour la plupart des roches, la circulation du courant électrique est de type électrolytique ; les ions transportent des charges, sous l'effet du champ électrique, grâce à l'eau qu'elles contiennent. La résistivité d'une roche dépend de :

- la qualité de l'électrolyte qui est liée à la quantité de sels dissous (résistivité  $R_w$ ) ;
- la quantité de l'électrolyte contenue dans la roche (porosité (P)) ;
- le mode de distribution de l'électrolyte ;
- la température de l'électrolyte : une augmentation de la température diminue la viscosité, augmente la mobilité des ions et la dissociation, ce qui a pour effet de diminuer la résistivité.

### Loi d'Archie

La résistivité électrique d'une roche dépend de la teneur et de la qualité de l'eau. Ces paramètres ont été pris en compte dans une loi expérimentale établie pour les milieux saturés par Archie en 1942. Cette loi (1.8) lie la résistivité de la roche à la porosité, à la résistivité de l'eau et au type de distribution de celui-ci (Archie, 1942).

$$R_T = F R_W \quad (1.8)$$

$$F = a (\varphi^{-m}) \quad (1.9)$$

$R_T$  : résistivité de la roche ;  $R_W$  : résistivité de l'eau ;  $F$  : facteur de formation ; ( $p$  : porosité ;  $a$  : facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 ( $a < 1$  pour les roches à porosité inter-granulaires et  $a > 1$  pour les roches à porosité de fracture) ;

$m$  : facteur de cimentation (il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés).

Pour les formations meubles, sables et grès, on utilise la formule de Humble (I.10) :

$$F = 0,62 (\varphi^{-2,15}) \quad (I.10)$$

### Saturation

La loi d'Archie a été établie pour des roches saturées en eau, il faut maintenant tenir compte d'un nouveau paramètre : la saturation.

$$S_w = \frac{\text{Volume total des pores saturés en eau}}{\text{Volume total des pores}} \quad (I. 11)$$

$$R_T = F R_w S_w^{-n} \quad (I.12)$$

$F R_w$  : résistivité de la roche saturée en eau  
 $R_T$  : résistivité de la roche désaturée en eau

$n$  : l'exposant  $n$  varie très peu, sa valeur est environ 2 pour la plupart des formations de porosité normale et dont la teneur en eau est comprise en 20 et 100 %.

D'où :

$$S_w = (F R_w / R_T)^{1/2} \quad (I. 13)$$

## 2. Caractéristiques générales d'un milieu poreux

Les milieux poreux sont décrits par deux critères : la roche doit contenir de petits espaces vides délimités par une matrice solide et doit être perméable à l'écoulement de fluides. Ceci renvoie à deux caractéristiques essentielles d'un milieu poreux : la porosité et la perméabilité, qui sont des variables macroscopiques ; estimées sur un volume contenant de nombreuses entités microscopiques composant la roche : les pores.

### Porosité

La quantité de fluide contenue dans une roche dépend de sa porosité  $y$  qui est indépendante du mouvement du fluide qui peut s'y trouver, on distingue la porosité totale et la porosité efficace (Tableau I.1).

**Porosité totale ( $\phi_T$ )** : est le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche, exprimée en % (I.14). On différencie : la porosité primaire, de type intergranulaire, formée pendant le dépôt des sédiments et la porosité secondaire englobant la porosité vacuolaire, acquise par dissolution d'origine chimique ainsi que la porosité de fracture due à l'altération.

$$\phi_T = \frac{v_p}{v_T} = \frac{v_p}{v_s + v_p}$$

VP, VS : volumes des pores et du matériau solide respectivement ; VT : volume total.

**Porosité efficace ( $\phi_E$ )** : est le rapport entre le volume des vides communicants et le volume total de la roche. Les pores, pour permettre le passage d'un fluide, doivent être connectés.

Type de sédiments	Diamètre (mm)	Porosité totale (%)	Porosité efficace (%)
gravier moyen	2,5	45	40
sable gros	0,250	38	34
sable moyen	0,125	40	30
sable fin	0,09	40	28
sable très fin	0,045	40	24
sable silteux	0,005	32	5
silt	0,003	36	3
silt argileux	0,001	38	-
argile		47	-

Tableau 29. Porosité totale et efficace de divers sédiments (Chapellier, D., MARI, J.L., 1998)

### Perméabilité

La perméabilité représente la capacité que possède un milieu à se laisser traverser par un fluide. Cette propriété est exprimée numériquement par le coefficient de perméabilité de Darcy qui a été établi en étudiant l'écoulement de l'eau à travers une colonne de sable ( Fig.1.3).

Il n y a aucun rapport entre la porosité et la perméabilité, mais pour être perméable, la roche doit obligatoirement être poreuse. La perméabilité du sol varie en fonction de la granulométrie (Fig. I.4) et constitue un facteur important en ce qui concerne les infiltrations. Si l'eau ne peut pas s'infiltrer, son accumulation à la surface peut provoquer de s inondations.

$$Q = -KA \cdot i \quad (I.15)$$

avec :

i : gradient hydraulique

$$i = (h'1 - h'2) / L \quad (I. 16)$$

Q : débit (m<sup>3</sup>/s) ; A : section de la colonne de sable (m<sup>2</sup>) ; h' : hauteur de la charge d'eau (m) ; K : coefficient de perméabilité de DARCY (m/s).

$$K = -KA * \left( \frac{dh'}{dl} \right)$$

Le signe (-) indique que le fluide s'écoule dans la direction de diminution du gradient hydraulique.

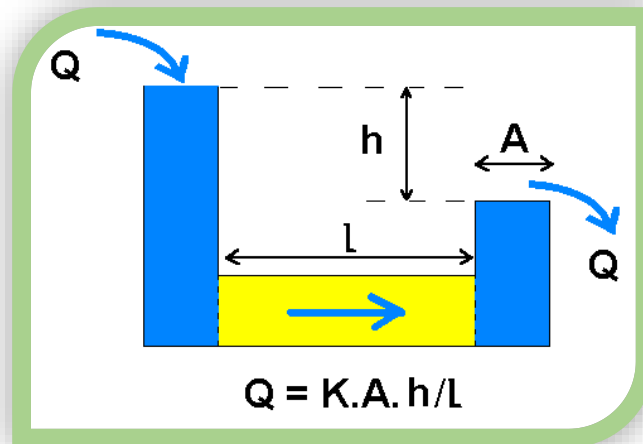


Figure 3. Dispositif avec écoulement latéral.

Figure 52. Dispositif avec écoulement latéral.

Le coefficient de perméabilité s'écrit sous la forme :

$$(I. 18) \quad k = \frac{Q}{A \, dh'/dl}$$

On définit aussi la vitesse de filtration  $V$  (m/s) :

$$V = Q/A \quad (1.19)$$

<b>PERMÉABILITÉ (K)</b>	en m/s ▶	10 <sup>1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>
	en darcy cm/s ▶	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>
<b>GRANULOMÉTRIE</b>	homogène ▶	graviers		sable pur		sable très fin		silt		argiles			
	diamètre des grains en mm ▶	2		0.25		0.06		0.002					
	variée ▶	graviers gros et moyens		graviers et sables		mélange sable, argile, limons				argiles			
<b>TYPES DE FORMATIONS</b>	roches perméables				semi-perméables				impermeables				

Figure 53. granulométrie et perméabilité (Chapellier, D., MARI, J.L., 1998)

### Transmissivité

La productivité d'un captage dans un aquifère dépend de la perméabilité  $K$  et de l'épaisseur  $d_a$  de l'aquifère, on définit ainsi la transmissivité :

$$T = K \times d_a$$

(I.20)

K : perméabilité (m/s)

$d_a$  : épaisseur

de l'aquifère (m) T :

transmissivité (m<sup>2</sup>/s)

### Méthodologie

L'estimation de la perméabilité à partir des mesures de résistivité électrique peut se proposer comme une nouvelle tendance et offre les avantages suivants : l'évaluation du potentiel en eaux souterraines avant la foration de nouveaux puits, ce qui permet de sélectionner les endroits les plus productifs ; les mesures sont indirectes, donc minimalement invasives ; et enfin, cette méthode est fiable, facile à mettre en œuvre et économique.

#### Paramètres de caractérisation d'un aquifère avec le sondage électrique

Les paramètres interprétés à partir d'un sondage électrique sont : les résistivités, les épaisseurs et les profondeurs de différentes couches. A partir de ces informations, on peut déduire la résistivité, l'épaisseur de l'aquifère et aussi calculer :

- le facteur de formation F (résistivité de l'aquifère  $R_T$  et la résistivité de l'eau  $R_w$ ) ;
- la porosité  $y$  (facteur de formation F) ;
- la conductance longitudinale C (résistivités des différentes couches et leurs épaisseurs) ;
- la résistance transverse R (résistivités des différentes couches et leurs épaisseurs) ;
- la transmissivité (conductivité électrique, résistance transverse et perméabilité).

### 3. Relation entre la résistivité électrique et la perméabilité

Il est essentiel de connaître les informations contenues dans les mesures de résistivité et la manière de les extraire, avant d'essayer de les utiliser dans l'estimation quantitative des paramètres hydrauliques.

Mathématiquement, la circulation de courant électrique ( $j$ ) dans un milieu conducteur est régie par la loi d'Ohm :

$$i = \sigma \frac{dv}{dr}$$

$j$  : densité de courant (A/m<sup>2</sup>)

$a$  : conductivité électrique  
 (Siemens/m)  $v$  : potentiel électrique  
 (V)  
 $r$  : distance (m)

et l'écoulement des eaux souterraines dans un milieu poreux par la loi de Darcy

$$q' = -\frac{Kdh}{dr}$$

avec :

$q'$  : décharge spécifique (décharge par unité de surface)  
 $K$  : perméabilité (m/s)  
 $h'$  : hauteur de la charge d'eau (m)

L'analogie entre la circulation du courant électrique et le débit d'eau est largement acceptée ainsi, la méthode électrique fournit un puissant outil pour l'exploration et la modélisation des eaux souterraines. Pour un milieu homogène et isotrope, les flux de courant électrique et des eaux souterraines satisfont l'équation de Laplace :

$$\frac{d^2v}{dr^2} + \frac{2dv}{rdr} \tag{I. 23}$$

$$\frac{d^2h'}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh'}{dr} = 0 \tag{1.24}$$

Pour une source de courant ponctuelle, la solution de l'équation (I.23) dans un milieu homogène semi-infini peut être écrite comme suit :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r} \tag{I. 25}$$

et pour le débit hydraulique, une équation similaire peut être écrite :

$$h' = \frac{Q}{2\pi T} \ln r \quad (\text{I. 26})$$

Si la transmissivité d'un aquifère saturé, d'une épaisseur  $d_a$  est exprimée par :

$$T = K d_a \quad (\text{I. 27})$$

alors :

$$h' = \frac{Q}{2\pi K d_a} \ln r$$

D'une manière générale, les pores connectés donnent de meilleures caractéristiques de débit pour l'eau et pour le courant électrique, il devrait y avoir donc, une certaine relation entre les paramètres électrique et hydraulique (Ayoola, W.F., Timothy, Y.W., 2013).

#### 4. Estimation des paramètres de circulation à partir de la résistivité

##### Loi d'Archie et équation de Kozeny

Le modèle de perméabilité de Kozeny est conçu pour modéliser des écoulements dans des milieux poreux et décrire le phénomène de filtration. Le milieu poreux est considéré comme un assemblage de tubes capillaires de même diamètre, la perméabilité est donc déduite en fonction de la porosité  $y$  et du diamètre des grains  $d$ .

Lorsque la quantité d'argile est considéré comme étant négligeable et en utilisant la loi d'Archie (1.8) ainsi que l'équation de Kozeny (I.29), il est possible d'obtenir la perméabilité  $K$  de l'aquifère (Kazakis et al, 2016).

$$K = \frac{g p_w}{\mu_w} \frac{d^2 \varphi^3}{180(1 - \varphi)^2}$$

(1.29)

$K$  : perméabilité (m/s)

$\rho_w$  : densité de l'eau ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\mu_w$  : viscosité dynamique de l'eau ( $\text{kg/m s}$ )

$g$  : accélération due à la gravité ( $\text{m/s}^2$ )

$d$  : diamètre de grains (m)



y : porosité

Dans les conditions de la loi d'Archie (I.8), la formation géologique doit être totalement saturée et à faible teneur en argile, d'où le facteur de formation apparent sera égal au facteur de formation intrinsèque.

En utilisant la résistivité de l'aquifère  $R_T$ , interprétée à partir d'un sondage électrique, et la résistivité des eaux souterraines  $R_w$ , mesurée à partir d'échantillons de forages, le facteur de formation  $F$  est ainsi calculé (I.9). Ensuite, la porosité  $y$  est obtenue en exploitation l'équation (I.10), pour enfin estimer la perméabilité avec la relation (I.29).

## 5. Données géo-électriques

Dans cette étude, douze (7) Sondages Électriques Verticaux (SEV), ont été exécutés en configuration schlumberger dans la région de Bir Said à la partie sud-ouest du bassin (Fig. 5). La longueur de la ligne d'émission de courant électrique **AB** a été fixée à 1000m permettant ainsi d'atteindre l'aquifère alluvionnaire .

Les données de la CGG relatifs à la reconstitution du système aquifère alluvionnaires ont été pris en compte ,

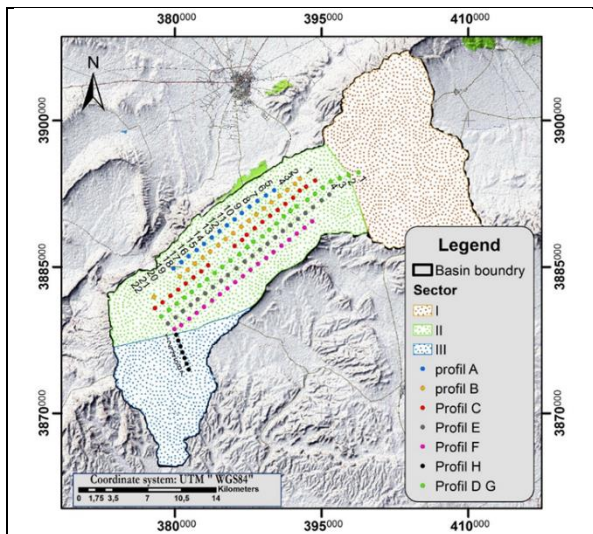


Figure 54. Plan de position des SEV

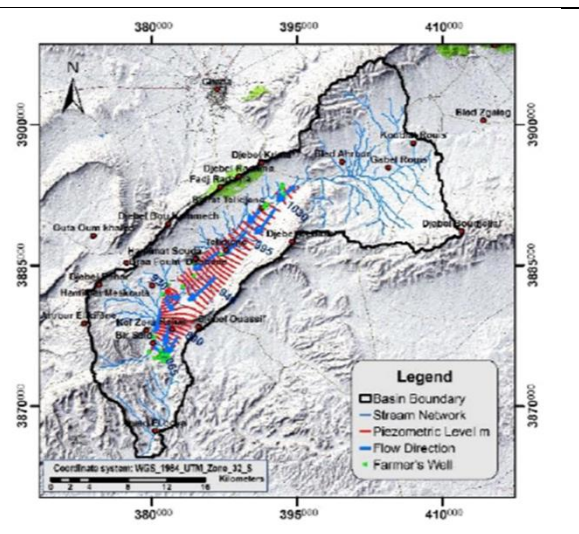


Figure 55. Carte piézométrique de la région

Les cartes de résistivité ainsi que les SEV réalisés dans la partie sud du bassin ont été utilisés pour estimer les résistivités, les épaisseurs et les paramètres hydrauliques de l'aquifère. Le niveau statique a été pris en compte afin de choisir les horizons saturés, en outre des valeurs de conductivité des eaux des puits mesurés au laboratoire, il n'était retenu que les mesures relatives à la dernière couche de l'aquifère alluvionnaire qui assure une saturation totale .

## 6. Traitement et analyse des données

L'interprétation des SEV ainsi que l'exploitation des coupes géo-électrique de CGG déjà traité dans la partie " géométrie de l'aquifère " a permis de classer les couches du système aquifère, leurs résistivité, profondeur ainsi que la lithologie. Nous nous sommes intéressés par l'aquifère alluvionnaire dont la lithologie est identique pour toute la profondeur" graveleuse"

## 7. Détermination des paramètres de circulation de l'aquifère

Pour le calcul de la porosité ainsi que la perméabilité et la transmissivité, une approche qui consiste à combiner la loi d'Archie (I.8) (Archie, 1942) et l'équation de Kozeny (I.29) (Kazakis et al, 2016).

### 1. Loi d'Archie et équation de Kozeny

Les résistivités ont été utilisées pour le calcul du facteur de formation F grâce à l'équation (I.8), de sorte que la relation F - ( peut être déterminée pour chaque formation en utilisant l'équation (I.10). Cependant, l'équation (I.8) est valable uniquement pour les systèmes totalement saturé, propres et à grains isolants ; elle n'est pas valable pour les systèmes à saturation partielle, contaminés par des argiles et pour des minéraux conducteurs ( $F \sim R_t/R_w$ ) (Ayoola and Timothy , 2013).

Les conditions d'application de la loi d'Archie ont été respectées lors du choix des données représentatives, en plus de la formation géologique ciblée matérialisé par le gravier, nous n'avons retenu que les données situées en dessous du niveau statique.

### 2. Calcul de la porosité

Les valeurs de la porosité du milieu poreux, constitué de gravier sableux, ont été calculées en utilisant les équations (III.1) ainsi que (III.2) et les résultats sont dressés dans le tableau III.2.

$$F = R_t / R_w \quad (III.1)$$

$$\phi = (0.62/F)^{1/2.15} \quad (III.2)$$

### 3. Calcul de la perméabilité K et de la transmissivité T

Les paramètres dynamiques de la nappe ont été estimés (Tableau III.3) grâce aux relations (I.29)

et (I.20) et en exploitant les paramètres ci-après:

$$P_w = 999.14 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\mu_w = 1.028 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m s à } 19^\circ\text{C}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

d : varie de 0.06 à 10mm

#### 4. Scripts de prétraitements et algorithme de calcul

Les scripts de prétraitements concernent la cartographie de la carte de conductivité à partir des données de conductivité mesurées des eaux des 26 puits, et la carte de résistivité et des iso-épaisseurs (iso-paque) de la dernière couche saturée à partir des données géo-électriques existantes et mesurées.

**Algorithme 1.** Exemple du script pour la création de couches d'informations au format raster à partir des fichiers Excel

```
# code pour la cartographie des paramètres de résistivité et de conductivité et l'isopaque
pour la création de couches raster
# Description :
# Import arcpy module
import arcpy
# définir la Carte thématique de la résistivité
carte_res = "carte_res"
model_res = "J:\\MODEL\\DEFINITIF\\CARTE_RES\\model_res"
# Utilisation de la méthode d'interpolation Natural Neighbor pour dessiner la carte de résistivité
arcpy.gp.NaturalNeighbor_sa(carte_res, "résistivi", model_res, "68,852")
# les mêmes étapes sont suivies pour la cartographie de la carte de conductivité et la carte iso-paque
de la dernière couche saturée de l'aquifère alluvionnaire
# Carte thématique de la conductivité:
conduc_def_shp = "J:\\MODEL\\DEFINITIF\\CARTE_COND\\conduc_def.shp"
carte_con2 = "J:\\MODEL\\DEFINITIF\\CARTE_COND\\carte_con2"
# Utilisation de la méthode d'interpolation Natural Neighbor
arcpy.gp.NaturalNeighbor_sa(conduc_def_shp, "Conductivi", carte_con2, "63,656")
# Carte thématique isopaque:
carte_isopaque_csv_Events = "carte isopaque.csv Events"
crite_isopaq2 = "J:\\MODEL\\DEFINITIF\\CARTE_ISOPAQUE\\carte_isopaq2"
# Utilisation de la méthode d'interpolation Natural Neighbor
arcpy.gp.NaturalNeighbor_sa(carte_isopaque_csv_Events, "épaisseur", crite_isopaq2,
"68,852")
```

Le script est écrit pour créer des fichiers et cartes raster pour les paramètres de résistivité, conductivité et d'iso-épaisseur ( iso-paque), C'est donc à l'utilisateur du script de sélectionner le fichier de données qui l'intéresse en fonction de la tranche d terrain qui assure une saturation totale.

Le calcul et la cartographie des paramètres hydrodynamique et les raster y correspondants à partir des fichiers Excel, est précédé par ce premier algorithme qui a généré 3 couches d'information illustrées dans les figures 67, 68 et 69.

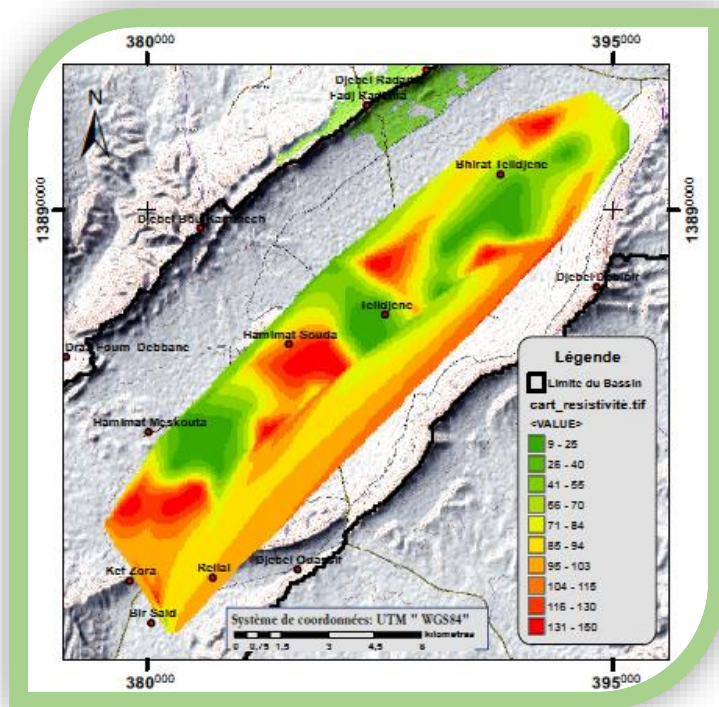


Figure 67. Carte de résistivité

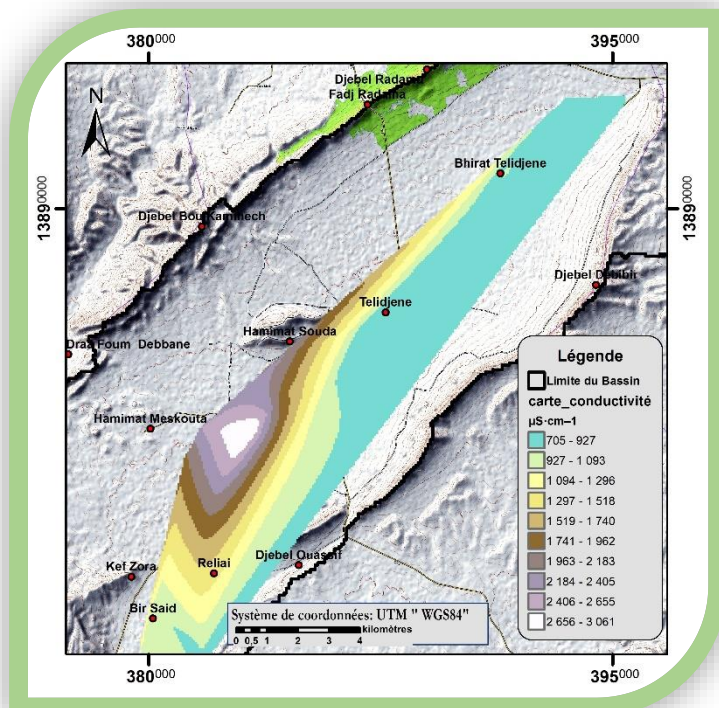
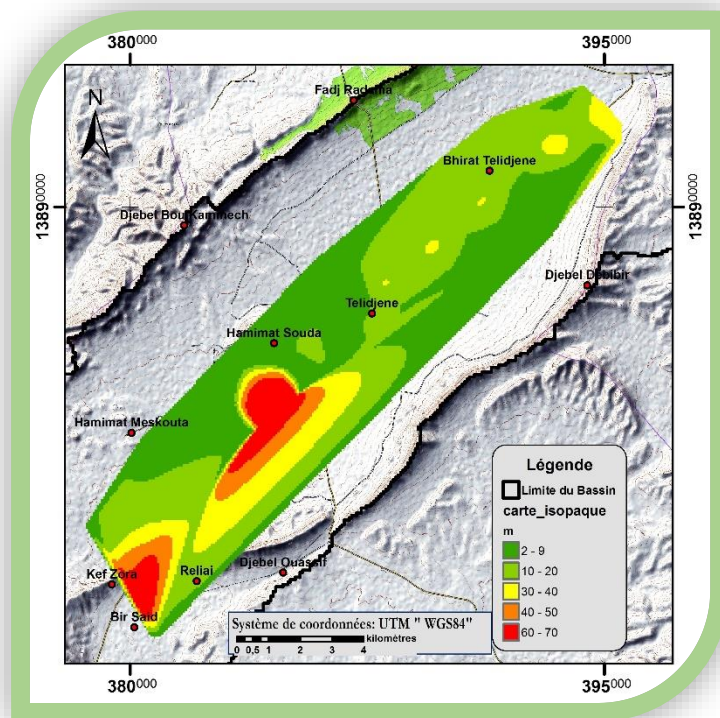


Figure 68. Carte de conductivité





**Figure 69.** Carte isopaque des alluvions (horizon saturé)

Chaque variable calculée est sauvegardée en tant que couche d'information au format raster dont le nom reprend l'identifiant de la variable. Par exemple, les couches « carte\_isopaq2» et « model\_res».

Une fois que les données relatives à la résistivité, la conductivité et l'iso-épaisseur ( isopaque) en couches d'information au format raster sont calculées , il est possible de calculer les paramètres hydrodynamiques. Le script pour automatiser ces paramètres consiste en l'enchaînement de lignes de codes pour le calcul de plusieurs variables.

Le script de calcul des paramètres hydrodynamiques utilise une fonction ArcGIS "Raster calculator" qui peut s'exécuter sous Arcpy, car l'exécution de cette fonction à partir du "Toolbox" ne permet pas l'exécution d'expressions mathématiques complexes.

Cette fonction permet d'ajouter une expression mathématique et faire des calculs sur les rasters, on peut par exemple calculer et générer une couche raster de la résistivité de l'eau en calculant l'inverse de la fraction de la conductivité en utilisant le script :

```
ReswRas = 1 / Raster ("carte_con2")
```

Où

ReswRas = raster résistivité de l'eau à calculer

"carte\_con2" = carte de conductivité

Le calcul se fait au niveau de chaque pixel et génère un nouveau raster qui est la résistivité de l'eau. De la même façon et moyennant la fonction de Raster calculator, les paramètres hydrodynamiques ont été générés en couches raster selon les expressions mathématiques reliant leurs composantes.

**Algorithme 2.** Script pour la génération des paramètres hydrodynamiques

```
# Génération des cartes des paramètres hydrodynamique par l'application du code raster
calculation

from arcpy.sa import *

# 1) création de la carte de résistivité de l'eau à partir de la carte de conductivité
# resistivité raster = 1/raster de conductivité
#ReswRas = 1/Raster("carte_con2")

from arcpy.sa import *

ReswRas = 1/Raster("carte_con2")

# 2)calcul du raster du facteur F = Resistivité du terrain/ résistivité de l'eau
FacFRas = Raster("cart_res1.tif")/Raster("car_res_eau.tif")

# calcul du raster de la porosité en exploitant l'expression = (0.62/F)**1/2.5

PorosiRas = (0.62/Raster("FacFRas1.tif"))**0.46

# 3) calcul du raster de la perméabilité en exploitant l'expression mathématique
(gRw/viscosité)*(d2*porosité/viscos*180*(1-poros)^2)

#où viscosité = 1000kgm^-3, g=9.81, d= 2.5mm, densité de l'eau eau =999.14

RasPer = (9.81 * 999.14*6.25*Raster("PorosiRas1.tif"))**3)/(0.001028*180*(1-
Raster("PorosiRas1.tif"))**2))
```

Ces scripts ont permis de calculer et cartographier les paramètres hydrodynamiques figures 71, 72 et 73, leur exécution permettent de visualiser les jeux de données en sortie, ils permettent ainsi d'analyser l'aptitude de l'aquifère aux échanges et de caractériser son fonctionnement.



Le script peut être appliqué sur n'importe quelle région notamment celle souffrant de données permettant de cartographier les paramètres hydrodynamiques à partir des mesures directes des essais de pompage.

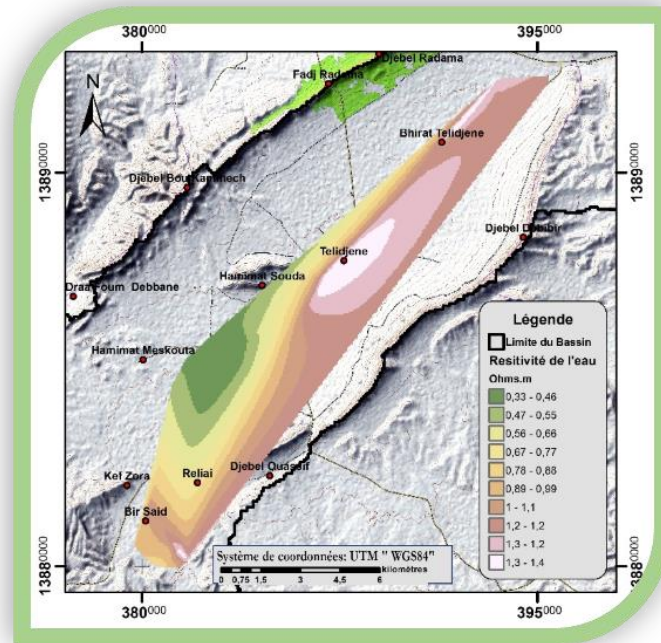


Figure 70. Carte de la résistivité de l'eau

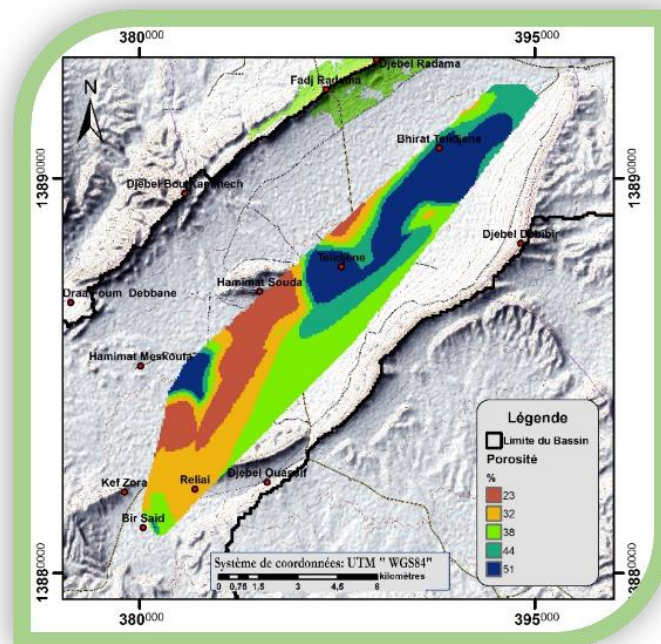


Figure 71. Carte de porosité

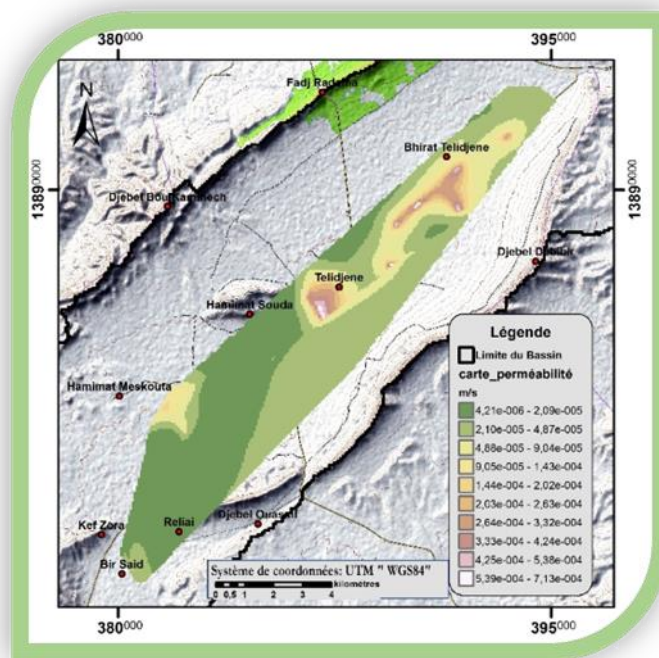


Figure 72. Carte de perméabilité

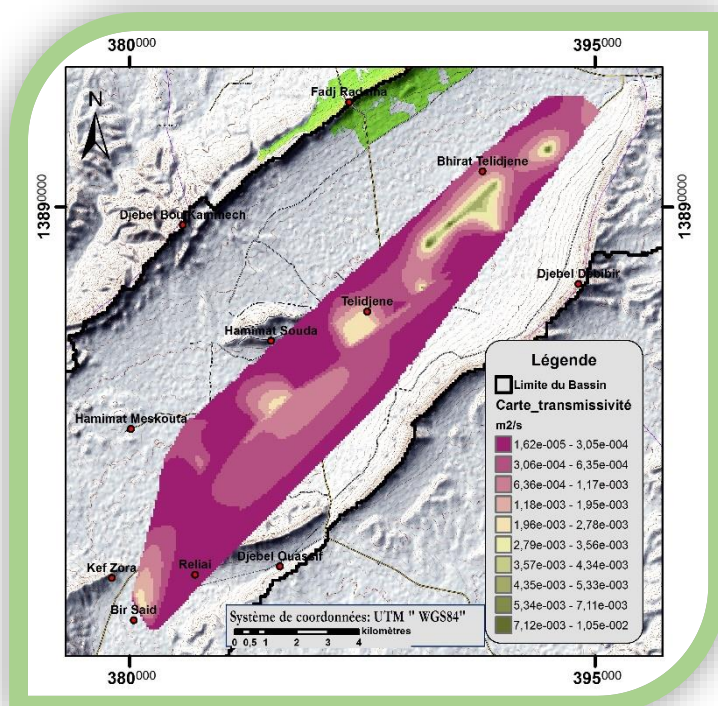


Figure 72. Carte de transmissivité

## 5. Interprétation

La carte de conductivité de la nappe alluvionnaire révèle que les zones les plus conductrices (1741  $\mu\text{s}/\text{cm}$ -3061  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) se situent entre les dômes de Hamimat Souda et Hamimat meskhouta (**figure 68**) à cause de l'abondance des formations triasiques.

Les cartes de distribution spatiale, de la porosité et la transmissivité, révèlent que la partie nord coïncidant avec l'axe de l'anticlinal est dominée par les classes moyennes à forte perméabilité (  $2\text{e}^{-4}$  m/s -  $7.13\text{e}^{-4}$  m/s ), de porosité (44% - 51 %) et de transmissivité (  $3.56\text{e}^{-3}$  m<sup>2</sup>/s –  $1.05\text{e}^{-2}$  ), tandis que la classe faible occupe la partie entre le centre de la plaine et le territoire de Bir Said. Néanmoins, la partie sud-ouest du bassin versant révèle les rendements les meilleurs au niveau du recouvrement quaternaire, cela est peut-être dû au fait que son alimentation se fait principalement par les calcaires des bordures étant donné que les paramètres hydrodynamiques enregistrent des valeurs faibles à moyennes. La direction dominante de l'écoulement des eaux souterraines a été révélée comme étant vers la direction de Sud-Ouest. Dans la partie gravimétrie, il a été découvert aussi que l'axe de l'anticlinal favorisent la circulation par la création d'un cheminement des eaux le long de son axe ainsi que le talweg principal qui lui est superposé ; ces constatations laissent suggérer que l'alimentation de la nappe aquifère du miocène-quaternaire est alimentée en partie majeure par les horizons sous-jacents moyennant le réseaux de failles et linéament lié à la structure anti-clinale.

## **Conclusion**

Le résultat obtenu montre que l'application du SIG et des techniques géophysiques s'est avérée être une méthode efficace et peu coûteuse pour caractériser et évaluer l'aquifère.

L'application de la technique de sondage électrique vertical (VES) a été appliquée et orientée vers le calcul de la conductivité hydraulique des aquifères et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Quaternaire dans le bassin de Téli djene.

Cette approche présente de nombreux avantages par rapport à la technique traditionnelle de test de pompage. Elle est peu coûteuse, facile à mettre en œuvre et donne des résultats plus rapides avec une meilleure résolution lorsqu'elle est appliquée avec un maillage plus dense dans la zone d'étude.

Les cartes des transmissivité, de perméabilité et de porosité obtenues, dérivées en appliquant la technique proposée donne une idée de la distribution potentielle de l'aquifère quaternaire dans le bassin de Téli djene. De telles informations sont nécessaires pour la modélisation et la gestion des ressources en eau dans la région de Téli djene .

## REFERENCES

**ARCHIE, G. E., 1942.** THE ELECTRICAL RESISTIVITY LOG AS AN AID IN DETERMINING SOME RESERVOIR CHARACTERISTICS. PET. TRANS. AM. INST. MINERAL. METALL. ENG. 146, 54-62.

**AYOOLA W. FAGBENRO, TIMOTHY YAKUBU WOMA., 2013.** QUANTITATIVE USE OF SURFACE RESISTIVITY DATA FOR AQUIFER HYDRAULIC PARAMETER ESTIMATION INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY. VOL 2.

**BARKER, R. D., 1989,** DEPTH OF INVESTIGATION OF COLLINEAR SYMMETRICAL FOUR-ELECTRODE ARRAYS : GEOPHYSICS, SOC. OF EXPL. GEOPHYS., 54, 1031-1037.

CHAPELLIER, D., MARI, J.L., 1998. PRINCIPES DE BASE, COURS ONLINE DE GEOPHYSIQUE, UNIVERSITE DE LAUSANNE.

**KHALDAOUI, F., 2004.** APPLICATION DES TECHNIQUES DE PROSPECTION ELECTRIQUE A L'IDENTIFICATION DES STRUCTURES DE SUB-SURFACE. THÈSE DE MAGISTER, FSTGAT, USTHB, ALGER.

**KELLY, W.E., FROHLICH, R.K., 1985.** RELATIONS BETWEEN AQUIFER ELECTRICAL AND HYDRAULIC PROPERTIES. GROUND WATER 23 (2), 182–189.

**NIWAS, S., CELIK, M., 2012.** EQUATION ESTIMATION OF POROSITY AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF RUHRTAL AQUIFER IN GERMANY USING NEAR SURFACE GEOPHYSICS. J. APPL. GEOPHYS. 84, 77–85

**NIWAS, S., SINGHAL, D.C., 1981.** ESTIMATION OF AQUIFER TRANSMISSIVITY FROM DAR–ZARROUK PARAMETERS IN POROUS MEDIA. J. HYDROL. 50, 393–399

**SLATER, L., 2007.** NEAR SURFACE ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY: FROM PETROPHYSICAL PROPERTIES TO AQUIFER GEOMETRIES - A REVIEW. SURV. GEOPHYS. 28, 169–197

**TOUBAL, A. C., 1998.** APPORTS DE LA GEOPHYSIQUE A L'ETUDE DES PROBLEMES D'HYDRODYNAMIQUE ET D'INVASION MARINE EN MILIEU SOUTERRAIN. EXEMPLE DES PLAINES D'ANNABA, DE LA MITIDJA ET DE LA BAIE D'ALGER. THESE DE DOCTORAT, FSTGAT/USTHB.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Du point de vue Télédétection, tous les caractéristiques morphométriques du bassin versant ont été calculés à partir des données extraites de l'imagerie satellitaires, l'extraction des linéaments a permis de mettre à jours la carte géologique de la région ainsi les directions majeures qui ont un lien avec les directions des formations géologiques. Les principales familles directionnelles prédominantes sont respectivement "NW-SE" et "E-W". La famille "NW-SE" est marquée dans toute la région et est subparallèle aux accidents majeurs du fossé Tébessa-Morsott, suivie par la direction "E-W", qui prédomine principalement dans la partie sud-ouest du bassin versant. Cette dernière provient de deux autres séries de linéaments, mais à un degré moindre que les deux premières directions, avec une orientation "NE-SW" et une orientation "NNW-SSE" à N-S.

La télédétection a aussi permis d'automatiser le bilan hydrique dans le bassin versant de Télijdjene par l'extraction des données climatique en utilisant l'outil Google Earth Engine. Le traitement des données a débouché sur un modèle de calcul automatique du bilan hydrique pouvant être appliqué sur les régions ne disposant pas de stations de mesures climatiques en utilisant le langage de programmation JavaScript.

Au niveau Géophysique, l'ensemble des analyses des données de gravimétrie a permis d'élaborer le modèle structural du bassin versant qui met ainsi en évidence le potentiel hydrogéologique de ce bassin à travers les fractures des formations triasiques qui contrôlent l'axe principal de ce pli. Bien que le modèle obtenu soit peu détaillé à cause de la faible résolution des données gravimétriques utilisées (4 km x 4 km), ce modèle peut être utilisé comme document de base pour tout projet d'investigation hydrogéologique.

La méthode électrique non-invasive de surface capable de fournir une couverture rapide et à faible coût de nombreuses données, qui peut être très utile pour les prospections des eaux souterraines. Cette méthode est efficace sur plusieurs échelles, pour des études géologiques, en particulier sur notre site d'étude. Elle est efficace pour localiser les aquifères, mettre en œuvre des déformations et discontinuités qui affectent la structure anticlinale. La méthode de SEV a été utilisée avec succès pour déterminer la géométrie de l'aquifère, détecter les failles et les zones de contact. Le traitement des données géo-électriques a permis de déterminer un système aquifère formé de 5 horizons : (1) L'aquifère du Moi-Plio-Quaternaire formé de matériaux alluvionnaire localisé dans la plaine et se déposant en discordance cordance avec les horizons aquifères d'âge crétaé

(2) L'aquifère Turonien bâtie par des formations calcaires karstifiés

(3) Aquifère du Cénomaniens matérialisé par des calcaires marneux de 30 m d'épaisseur et bâti par un toit marneux..

(5) Aquifère Albo-Aptien. Marqué par un changement latéral dans les ressources en eau en raison de la diversité des conditions géologiques et hydrogéologique notamment la présence des plages conductrices imperméables qui s'alternent avec des formations calcaires productives

(6) enfin un aquifère bicouche de la région de Bir Said bâti par des formations quaternaires alluvionnaires reposant sur un horizon carbonaté d'une fissuration plus ou moins denses.

Cette prospection électrique a la capacité d'améliorer la connaissance tant au niveau local que régional de cet important aquifère en raison de la couverture rapide et dense du site d'étude. Sur la base des données géophysique et de télédétection, il était possible de corriger et de compléter la carte structurale locale.

Au niveau Hydrogéochimique, il en ressort qu'au niveau des paramètres physiques mesurés *in situ*, la température moyenne des eaux des forages est de 15.22°C. Les eaux souterraines sont dans la norme OMS avec pH moyen de 7.62. La conductivité électrique moyenne est de 1201 µS/cm avec des valeurs extrêmes comprises entre 700 et 3100 µS/cm. Dans l'ensemble, les eaux sont minéralisées et ne sont pas aptes à la consommation (<400 norme OMS.) . Les valeurs des nitrates sont faibles ce qui est lié à une faible activité anthropique.

En termes de faciès hydrochimiques, l'eau est du type sulfaté calcique dans le centre et le sud du bassin, tandis que le nord domine un une eau intermédiaire que l'on peut conférer au faciès bicarbonaté calcique. HCO<sub>3</sub>-Ca au nord du bassin (formations calcaires) et du type SO<sub>4</sub>-Cl-Na au centre et au sud de la plaine de Télijdjene.

L'application de la technique de sondage électrique vertical (VES) a été appliqué et orientée vers le calcul de la conductivité hydraulique des aquifères et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Quaternaire dans le bassin de Télijdjene.

Les cartes des transmissivité, de perméabilité et de porosité obtenues, dérivée en appliquant la technique proposée donne une idée de la distribution potentielle de l'aquifère quaternaire dans le bassin de Télijdjene et permettent la modélisation et la gestion des ressources en eau dans la région de Télijdjene.

### **Perspectives et recommandations**

Nous envisageons de comprendre davantage le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère sous-jacent par l'acquisition toujours en cours des données climatiques, géophysique et hydrologiques

A court terme, nous envisageons un traitement plus approfondi des données géochimiques et hydrogéologiques;

A moyen terme, nous envisageons une cartographie pseudo 3D avec les données géophysiques.

. Cette étude constitue la première étude de l'aquifère du bassin de Télijdjene moyennant une approche multidisciplinaire. Les résultats obtenus peuvent fournir un document important pour les planificateur et détenteurs de décision afin de passer en action et de définir de nouveau points d'impact pour la réalisation de forages notamment sur l'axe de l'anticlinal. Les modèles créés dans le chapitre 2 et le chapitre 6 pourraient être appliquée d'autres régions notamment celles souffrants de manque de données pour apporter une contribution significative majeure à la résolution des problèmes d'approvisionnement en eau potable qui se posent avec de plus en plus d'acuité.



# ANNEXES

**1 Tension de vapeur saturante (ea) en mb, en tant que fonction de la température moyenne de l'air (T) en C° (FAO Bulletin 33)**

Température (C°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
ea (mb)	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,7	9,3	10,0	10,7	11,5	12,3	13,1	14,0	15,0	16,0	17,0	18,2	19,4	20,6	22,0	23,4	24,9	26,4	28,1	29,8	31,7	33,6	35,7	37,8	40,1	42,4	44,9	47,6	50,3	53,2	56,2	59,4	62,8	66,3	69,9

**2 Rayonnement extra-terrestre (Ra) exprimé en mm/jour d'évaporation équivalente (FAO Bulletin 33)**

Hémisphère nord												Lat. °	Hémisphère sud											
Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.		Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
6,4	8,6	11,4	14,3	16,4	17,3	16,7	15,2	12,5	9,6	7	5,7	40	17,9	15,7	12,5	9,2	6,6	5,3	5,9	7,9	11,0	14,2	16,9	18,3
6,9	9,0	11,8	14,5	16,4	17,2	16,7	15,3	12,8	10,0	7,5	6,1	38	17,9	15,8	12,8	9,6	7,1	5,8	6,3	8,3	11,4	14,4	17,0	18,3
7,4	9,4	12,1	14,7	16,4	17,2	16,7	15,4	13,1	10,6	8,0	6,6	36	17,9	16,0	13,2	10,1	7,5	6,3	6,8	8,8	11,7	14,6	17,0	18,2
7,9	9,8	12,4	14,8	16,5	17,1	16,8	15,5	13,4	10,8	8,5	7,2	34	17,8	16,1	13,5	10,5	8,0	6,8	7,2	9,2	12,0	14,9	17,1	18,2
8,3	10,2	12,8	15,0	16,5	17,0	16,8	15,6	13,6	11,2	9,0	7,8	32	17,8	16,2	13,8	10,9	8,5	7,3	7,7	9,6	12,4	15,1	17,2	18,1
8,8	10,7	13,1	15,2	16,5	17,0	16,8	15,7	13,9	11,6	9,5	8,3	30	17,8	16,4	14,0	11,3	8,9	7,8	8,1	10,1	12,7	15,3	17,3	18,1
9,3	11,1	13,4	15,3	16,5	16,8	16,7	15,7	14,1	12,0	9,9	8,8	28	17,7	16,4	14,3	11,6	9,3	8,2	8,6	10,4	13,0	15,4	17,2	17,9
9,8	11,5	13,7	15,3	16,4	16,7	16,6	15,7	14,3	12,3	10,3	9,3	26	17,6	16,4	14,4	12,0	9,7	8,7	9,1	10,9	13,2	15,5	17,2	17,8
10,2	11,9	13,9	15,4	16,4	16,6	16,5	15,8	14,5	12,6	10,7	9,7	24	17,5	16,5	14,6	12,3	10,2	9,1	9,5	11,2	13,4	15,6	17,1	17,7
10,7	12,3	14,2	15,5	16,3	16,4	16,4	15,8	14,6	13,0	11,1	10,2	22	17,4	16,5	14,8	12,6	10,6	9,6	10,0	11,6	13,7	15,7	17,0	17,5
11,2	12,7	14,4	15,6	16,3	16,4	16,3	15,9	14,8	13,3	11,6	10,7	20	17,3	16,5	15,0	13,0	11,0	10,4	12,0	13,9	15,8	17,0	17,4	
11,6	13,0	14,6	15,6	16,1	16,1	16,1	15,8	14,9	13,6	12,0	11,1	18	17,1	16,5	15,1	13,2	11,4	10,4	10,8	12,3	14,1	15,8	16,8	17,1
12,0	13,3	14,7	15,6	16,0	15,9	15,9	15,7	15,0	13,9	12,4	11,6	16	16,9	16,4	15,2	13,5	11,7	10,8	11,2	12,6	14,3	15,8	16,7	16,8
12,4	13,6	14,9	15,7	15,8	15,7	15,7	15,7	15,1	14,1	12,8	12,0	14	16,7	16,4	15,3	13,7	12,1	11,2	11,6	12,9	14,5	15,8	16,5	16,6
12,8	13,9	15,1	15,7	15,7	15,5	15,5	15,6	15,2	14,4	13,3	12,5	12	16,6	16,3	15,4	14,0	12,5	11,6	12,0	13,2	14,7	15,8	16,4	16,5
13,2	14,2	15,3	15,7	15,5	15,3	15,3	15,5	15,3	14,7	13,6	12,9	10	16,4	16,3	15,5	14,2	12,8	12,0	12,4	13,5	14,8	15,9	16,2	16,2
13,6	14,5	15,3	15,6	15,3	15,0	15,1	15,4	15,3	14,8	13,9	13,3	8	16,1	16,1	15,5	14,4	13,1	12,4	12,7	13,7	14,9	15,8	16,0	16,0
13,9	14,8	15,4	15,4	15,1	14,7	14,9	15,2	15,3	15,0	14,2	13,7	6	15,8	16,0	15,6	14,7	13,4	12,8	13,1	14,0	15,0	15,7	15,8	15,7
14,3	15,0	15,5	15,5	14,9	14,4	14,6	15,1	15,3	15,1	14,5	14,1	4	15,5	15,8	15,6	14,9	13,8	13,2	13,4	14,3	15,1	15,6	15,5	15,4
14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4	2	15,3	15,7	15,7	15,1	14,1	13,5	13,7	14,5	15,2	15,5	15,3	15,1
15,0	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8	0	15,0	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8

**3 Durée journalière moyenne d'insolation maximum possible en heures (N) pour différents mois et latitudes (FAO 33)**

Latitudes nord	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Latitudes sud	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin
40	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,3
35	10,1	11,0	11,9	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
30	10,4	11,1	12,0	12,9	13,6	14,0	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
25	10,7	11,3	12,0	12,7	13,3	13,7	13,5	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6
20	11,0	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15	11,3	11,6	12,0	12,5	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
10	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
5	11,8	11,9	12,0	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8
0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

4 Effet de la température f(T) sur le rayonnement de grande longueur d'onde (Rnl) (FAO 33)																			
T C°	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
f(T) = 6Tk <sup>4</sup>	10,0	11,4	11,7	12,0	12,4	12,7	13,1	13,5	13,8	14,2	14,6	15,0	15,4	15,9	16,3	16,7	17,2	17,7	18,1

5 Effet de la tension de vapeur f(ed) sur le rayonnement de grande longueur d'onde (Rnl)																		
ed (mb)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
f(ed) = 0.34 - 0.044 (ed) <sup>1/2</sup>	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06

6 Effet du rapport entre le nombre d'heures d'insolation réelle et maximum f(n/N) sur le rayonnement de grande longueur d'onde (Rnl)																					
n/N	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
f(n/N) = 0.1 + 0.9 n/N	0,10	0,15	0,19	0,24	0,28	0,33	0,37	0,42	0,46	0,51	0,55	0,60	0,64	0,69	0,73	0,78	0,82	0,87	0,91	0,96	1,00

7 Valeurs du coefficient de pondération (W) tenant compte de l'effet du rayonnement sur ET <sub>0</sub> à différentes températures et altitudes (FAO 33)																				
Température C°	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
W à une altitude de m																				
0	0,43	0,46	0,49	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77	0,78	0,80	0,82	0,83	0,84	0,9
500	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60	0,62	0,65	0,67	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,9
1000	0,46	0,49	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,9
2000	0,49	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86	0,87	0,9
3000	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86	0,88	0,88	0,89

8 Coefficient d'ajustement c dans la formule de Penman (FAO 33)												
Rs mm/jour	HR <sub>max</sub> =30%				HR <sub>max</sub> =60%				HR <sub>max</sub> =90%			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
U diurne m/s	U jour/U nuit = 4.0											
0	0,86	0,90	1,00	1,00	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,10	1,10
3	0,79	0,84	0,92	0,97	0,92	1,00	1,11	1,19	0,99	1,10	1,27	1,32
6	0,68	0,77	0,87	0,93	0,85	0,96	1,11	1,19	0,94	1,10	1,26	1,33
9	0,55	0,65	0,78	0,90	0,76	0,88	1,02	1,14	0,88	1,01	1,16	1,27
U diurne m/s	U jour/U nuit = 3.0											
0	0,86	0,90	1,00	1,00	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,10	1,10
3	0,76	0,81	0,88	0,94	0,87	0,96	1,06	1,12	0,94	1,04	1,18	1,28
6	0,61	0,68	0,81	0,88	0,77	0,88	1,02	1,10	0,86	1,01	1,15	1,22
9	0,46	0,56	0,72	0,82	0,67	0,79	0,88	1,05	0,78	0,92	1,06	1,18
U diurne m/s	U jour/U nuit = 2.0											
0	0,86	0,90	1,00	1,00	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,10	1,10
3	0,69	0,76	0,85	0,92	0,83	0,91	0,99	1,05	0,89	0,98	1,10	1,14
6	0,53	0,61	0,74	0,84	0,70	0,80	0,94	1,02	0,79	0,92	1,05	1,12
9	0,37	0,48	0,65	0,76	0,59	0,70	0,84	0,95	0,71	0,81	0,96	1,06
U diurne m/s	U jour/U nuit = 1.0											
0	0,86	0,90	1,00	1,00	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,10	1,10
3	0,64	0,71	0,82	0,89	0,78	0,86	0,94	0,99	0,85	0,92	1,01	1,05
6	0,43	0,53	0,68	0,79	0,62	0,70	0,84	0,93	0,72	0,82	0,95	1,00
9	0,27	0,41	0,59	0,70	0,50	0,60	0,75	0,87	0,62	0,72	0,87	0,96

0 x	y	résistivité	
1	394341	3893856	80
2	395119	3893129	80
3	395796	3892398	160
4	392783	3894030	80
5	392783	3894030	100
6	393418	3893223	95
7	394325	3892494	80
8	394995	3891810	80
9	392269	3893501	30
10	392767	3892805	150
11	393531	3891849	10
12	394129	3891104	100
13	391486	3892866	100
14	392101	3892074	100
15	392432	3891184	50
16	393352	3890524	120
17	394043	3889665	50
18	390143	3892845	150
19	390692	3892274	100
20	391307	3891442	100
21	391800	3890739	10
22	392582	3889905	50
23	393260	3889009	120
24	389309	3892329	150
25	389309	3892329	10
26	388945	3889595	100
27	391144	3890167	20
28	391818	3889287	8
29	392455	3888406	20
30	388436	3891760	150
31	389104	3890983	100
32	387344	3888290	150
33	390382	3889448	7
34	391031	3888665	150
35	391683	3887771	60
36	387629	3891165	100
37	388310	3890358	50
38	387344	3888290	15
39	389652	3888781	10
40	390264	3888017	100
41	390900	3887157	50
42	386835	3890516	15
43	387556	3889731	100
44	383397	3885149	15

45	388938	3888116	80
46	389472	3887375	5
47	390078	3886513	80
48	386095	3889868	50
49	386763	3889117	40
50	387344	3888290	150
51	388027	3887566	100
52	388712	3886770	100
53	389323	3885908	150
54	385307	3889254	30
55	385969	3888440	30
56	383397	3885149	50
57	387405	3887028	20
58	387934	3886135	30
59	388505	3885299	100
60	384557	3888642	30
61	386580	3886276	200
62	384847	3884979	150
63	383895	3882917	150
64	381316	3884679	10
65	383101	3882274	50
66	383804	3881542	50
67	381719	3882411	60
68	382323	3881655	15
69	380965	3881842	150
70	381612	3881093	150
71	382229	3880280	80
72	380197	3881221	100
73	380826	3880474	150
74	381468	3879665	150
75	379377	3880586	150
76	380064	3879823	100
77	380648	3879014	150
78	378583	3879924	100
79	379281	3879187	100
80	379942	3878611	20
81	380139	3878034	97
82	380335	3877434	136
83	380553	3876844	47
84	380770	3876250	97
85	384434	3887200	50
86	385685	3885646	200
87	386291	3884849	10
88	386963	3884035	50
89	382217	3886729	30
90	382849	3885920	40

91	381890	3883922	200
92	384068	3884363	100
93	384730	3883580	100
94	384730	3883580	100
95	385368	3882805	10

Forage	tac	T°C	pH	Conductivité HCO3-		Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
1	3,5	16	6,96	900	253,91	253,91	8,2	230,38	70,5	2,11	42,35	195,51
2	2,5	13	7,86	850	234,02	84,32	6,4	112,85	38,65	1,4	29,16	102,54
3	2,2	13	7,9	800	193,8125	132,5	7,27	123,16	55	1,3	20,21	125,32
4	2,2	12	7,3	900	183,84375	135,69	5,9	213,68	56	2,26	41,36	110,45
5	1,7	12	8,12	850	294,23	86,2	9,1	179,25	92,35	2,43	27,42	104,23
6	1,7	16	7,3	750	232,64	98,15	2,6	131,65	56,95	0,97	15,43	111
7	1,8	16	8	995	223	139,81	10	232,63	81	3,61	38,5	132
8	1,8	16	7,16	950	615,4375	110,91	8,23	208,28	51,408	2,6	96,53	150
9	1,5	16,5	8,2	990	689	370,36	7	328,45	156,45	3,68	112,4	252,87
10	0,5	13	8,1	850	651,875	294	9,26	356,87	95,23	3,23	89,6	300,68
11	0,5	13	7,16	790	593	259	7,98	220,5	85,56	3,89	95,5	230
12	1	16	8,2	985	560	235,89	8,99	123,65	53,53	2,26	86,32	183
13	2,4	16,2	8,1	2200	205	230	13,98	901,23	310,17	3,18	85,42	213
14	3	16,4	7,86	1800	297	579,5	11,58	649,12	366,23	3,6	86,14	240,48
15	2,2	17	7,7	1900	280	582,36	10,97	854,64	399	2	123,4	231,78
16	2,7	15	7,97	2400	372,28	397,34	9,35	850	320	3,5	135,6	211,56
17	2,2	17	7,48	3100	360,1	230,15	8,14	1100	378,76	4,3	85,4	256
18	2	13	7,4	700	121,34375	260,925	8,65	228,28	107,7426	3	46,41	135,26
19	2,2	16	7,4	723	628,54	84,65	9,75	165,36	66,35	4,12	96,31	109,74
20	2	16	7,36	1072	474,62	110,05	10,5	157	56,56	2,19	56,33	145,61
21	1,8	17,5	7,4	1020	461	40	8,97	22	43,66	2,5	42,5	84,35
22	2,7	16	7,25	1049	504,25	105,84	9,85	75	50	1,24	98,16	79,32
23	2,2	15	7,36	1074	522,125	120,7	7	105,65	68,9724	2,97	46,32	147,32
24	2	15	7,7	1216,43	556,35	298,47	6	199	98	3,5	40,64	297,85
25	2,2	16	7,4	1223,49	620	389,85	7,24	195,21	75,46	4,56	98	319
26	2	17	7,35	1139,65	632,45	310,48	4,47	165	55,32	2,34	43,54	332,45