

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Tindouf



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers
Laboratoire des Systèmes Environnementaux et Energétiques (L.S.E.E)

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat
Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers
Filière : Géologie
Spécialité : Ressources en Eau, Télédétection et SIG

Présentée par
BENNIA Ahmed

**Investigation des eaux souterraines par Télédétection et
Système d'Informations Géographiques dans les zones arides
Cas de la région de Tabelbala-Tinfouchy**

Soutenue le : 23 avril 2026

Soutenue devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. MEDDAH Amar	MCA	Université de Tindouf	Président
Mr. TALHI Abdelkrim	Professeur	Université de Tindouf	Directeur du thèse
Mr. HAMI Khelifa	Professeur	Université de Tindouf	Examineur
Mme. ALIOUANE Leila	Professeur	Université de M'Hamed Bougara Boumerdès	Examineur
Mr. BOUDERBALA Abdelkader	Professeur	Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana	Examineur
Mr. BEKKOUCHE Med Faouzi	MCA	Université de Tindouf	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Avant-propos

Ce projet de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire des Systèmes Environnementaux et Energétiques (LSEE), promotion "Ressource en eau et télédétection", de l'Université de Tindouf. Il est l'aboutissement de plusieurs années de persévérances et de sacrifices.

Au terme de ce parcours, il m'est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute ma gratitude envers celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Même si tous les noms ne peuvent être mentionnés, chacun d'entre vous occupe une place particulière dans ces remerciements. Que ces quelques lignes témoignent de ma profonde reconnaissance.

Cette thèse, à la fois modeste et ambitieuse, n'aurait pu voir le jour sans l'engagement précieux, la collaboration enrichissante et le soutien indéfectible de nombreuses personnes. Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux honorables membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail et de l'enrichir par leurs remarques et suggestions scientifiques.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon honorable directeur de thèse, Pr Talhi Abdelkrim, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, pour ses conseils techniques, son encouragement et sa supervision exceptionnelle tout au long de ce travail. Sa contribution, en tant que directeur de thèse, est pour moi immense honneur.

Je remercie également mon premier directeur de thèse, Dr. Zeroual Ibrahim, pour sa supervision remarquable, son expertise et ses directives qui m'ont guidé tout au long de cette recherche. Son accompagnement constant a été déterminant dans l'aboutissement de cette thèse. Je lui suis particulièrement reconnaissant de m'avoir permis d'approfondir ma réflexion sur les techniques de prospection des ressources hydriques.

Mes remerciements vont aussi à :

- Dr. Meddah Amar, pour sa connaissance approfondie de la région d'étude et sa géologie, et pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.
- Mme Aliouene Leila, Professeur à l'Université de M'Hamed Bougara de Boumerdès, et Mr. Bouderbala Abdelkader, Professeur à l'Université de Djilali Bounaama de Khemis Miliana, d'avoir accepté de faire partie de ce jury en qualité d'examineurs et pour leur contribution à l'évaluation de ce travail.
- Pr. Hami Khelifa et Dr. Bekouche Mohamed Faouzi, enseignants-chercheurs à l'Université de Tindouf, pour avoir accepté de participer à ce jury en qualité d'examineur et pour leur apport précieux dans l'expertise de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude au Pr. Touhami, ainsi qu'à l'ensemble des membres du laboratoire (LSEE) pour leur soutien moral et leurs conseils précieux, qui ont grandement contribué à la réalisation de nos projets de recherches au cours de cette période.

Mes remerciements vont également aux membres du comité de l'école doctorale, en particulier Dr. Azzi Ahmed, ainsi qu'à l'ensemble du personnel académique et administratif de l'Université de Tindouf. Leur soutien constant et leurs conseils avisés tout au long de la préparation de cette recherche ont été essentiels à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Mr Mahi Habib, Directeur du Centre des Techniques Spatiales, à Mr Karoui Moussa Sofiane, Chef de Département, et à Mr Kebir Lahsen Wahib,

Chef de Service, pour m'avoir offert l'opportunité et l'autorisation de poursuivre mes études, ainsi que pour leur soutien et leur conseil précieux.

Je remercie particulièrement Mr Yahiaoui Abderrahmane, hydrogéologue à l'ANRH de la wilaya de Tindouf, pour son aide précieuse, et ses encouragements tout au long de ce travail, ainsi que la famille Yahiaoui à Tabelbala pour leur accueil bienveillant.

Je reconnais avec sincérité le soutien de Mr Salhi Abdellah, Directeur régional de l'Agence Nationale d'Activité Minière (ANAM), pour son soutien, son accompagnement ainsi que ses conseils et directives essentielles lors des missions de terrain.

Mes vifs remerciements vont à Mr Bouaicha Fouad, professeur à l'Université de Constantine, et Mr Derdour Adessamad professeur à l'Université de Naama, pour leurs encouragements et ses recommandations qui ont guidé le choix des techniques d'évaluation des ressources hydriques.

Je souhaite adresser mes remerciements le plus chaleureux à mes parents et à ma femme pour leur patience, leur soutien inestimable et leur présence constante qui ont été des piliers tout au long de mon parcours doctoral.

Je remercie également :

La Direction des ressources en eau de la wilaya de Beni Abbés en particulier Mr Sahari Abdelghani et Abdelkrim.

Mr Mansoura Taoufik, ingénieur géologue à l'Office National des Recherches Minières (ORGM), pour sa disponibilité et sa sympathie.

Les autorités civiles et militaires de la région de Beni Abbés, pour avoir facilité l'accès aux terrains et chemins menant à l'aboutissement de ce travail.

Les chercheurs doctorants promotion 2021, pour leur amitié, leurs encouragements et leur disponibilité.

Enfin, je dédie ce modeste travail à la mémoire du doctorant Haïssoune Dih, hydrogéologue à l'ADE de Tindouf, en témoignant de ma profonde reconnaissance pour son aide précieuse, notamment la mise à disposition de documents et de données essentielles sur les points d'eau de la région lors de mon passage à Tindouf.

Je dédie ce travail

à mes parents, à ma femme et à mes enfants

A tous mes frères et sœurs, mon beau-frère et belle-sœur,

A tous les membres de ma famille et belle-famille,

*A la mémoire de mon beau-père, en voyage éternel, que Dieu lui accorde la paix
éternelle et l'accueille dans son vaste paradis.*

Résumé

Le sujet d'étude proposé dans le cadre de cette thèse porte sur la cartographie et l'analyse détaillée du comportement morphostructural, visant à améliorer la compréhension des aires de captages d'eau dans la région de Tabelbala (sud-ouest algérien), tout en définissant de manière précise les zones du potentiel hydrique. La région étudiée est soumise à un climat aride, caractérisée avec des hivers froids et des étés chauds et secs. L'estimation du bilan hydrologique, réalisée à l'aide de l'abaque de Verdeil, indique une évapotranspiration réelle (ETR) de 29 mm, mettant en évidence un déficit hydrologique important. L'étude géologique détaillée a révélé que la série stratigraphique s'étend du Protérozoïque au Quaternaire récent. Elle est majoritairement constituée de formations sédimentaires datant du Cambrien, de l'Ordovicien et du Quaternaire (alluvions, éboulis dépôt torrentiels et éoliens) qui sont les plus répondues. Ces formations sont marquées par une activité tectonique intense, ayant conduit à la mise en place des structures plissées bien développées, notamment au niveau du Dj Kahal Tabelbala, du Dj Bet Touaris et du Dj Ben Tadjine. Du point de vue hydrogéologique, la zone d'intérêt recèle un important potentiel hydrique souterrain, stocké au sein de plusieurs systèmes aquifères, parmi lesquels l'aquifère cambro-ordovicien, l'aquifère de la Hamada de la Daoura, la nappe de l'Erg Erraoui et l'aquifère de la nappe de Tabelbala. L'analyse de la cartographie piézométrique, basée sur des campagnes d'observation, met en évidence un écoulement général orienté du nord-ouest et du nord-est vers le sud. L'alimentation des nappes provient principalement de pluie efficace, faible et difficile à estimer, ainsi que des crues exceptionnelles et des échanges latéraux entre nappes (Hamada, Erg et formations Cambro-ordoviciennes). L'intégration conjointe de la géophysique électrique (SEV), des systèmes d'information géographique (Fr, AHP), de la télédétection et des techniques d'intelligence artificielle (Rf, SVM et NN), a permis la délimitation avec précision les zones à fort potentiel hydrique. Par ailleurs, l'analyse hydrochimique, appuyée par l'étude des rapports caractéristiques, a permis d'identifier l'origine de la minéralisation des eaux de l'aquifère de la région. Trois faciès chimiques ont été distingués dans la région d'étude. Le faciès sulfaté sodique, dominant, est principalement observé dans les eaux captées au nord de Chraïa, ainsi qu'aux alentours du village de Tabelbala et du Ksar Makhlouf, témoignant l'influence des formations évaporitiques sur la minéralisation des eaux. Ce faciès se retrouve particulièrement concentré dans la partie centrale de la région d'étude. En revanche, le faciès chloruré calcique, moins répondu, caractérise principalement les eaux situées en périphérie de la région. L'analyse comparative des concentrations en éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-) a relevé une prédominance des ions issus de formations gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) et salifères (Na^+ , Cl^-) par rapport aux ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-), soulignant leur rôle déterminant dans l'augmentation de la salinité des eaux. L'évaluation de qualité des eaux, en vue de leur utilisation pour l'irrigation et la consommation humaine, a permis d'identifier les zones où la composition chimique influence leur aptitude à ces usages. Cette investigation a abouti à l'élaboration d'un ensemble de cartes thématiques et des résultats illustrant l'état, la nature et le mode de fonctionnement du système aquifère. Ces travaux soulignant la nécessité d'une gestion appropriée et durable en eau, afin d'assurer leur préservation et leur exploitation optimale.

Mots clés : hydrogéologie, Tabelbala, données spatiales, géophysique électrique, système d'information géographique, zonéographies, Apprentissage automatique.

Abstract

This thesis focuses on the mapping and in-depth analysis of the morpho-structural behavior of the Tabelbala region (southwest Algeria) to enhance the understanding of water catchment areas and precisely define groundwater potential zones. The study area is characterized by an arid climate, with cold winters and hot, dry summers. The average annual temperature is 14.6°C. The estimation of the hydrological balance assessment, using Verdeil's abacus indicates an actual evapotranspiration (ETR) of 29 mm, highlighting a significant hydrological deficit. A detailed geological study has revealed that the stratigraphic sequence of the region extends from the Proterozoic to the recent Quaternary. It mainly consists of sedimentary deposits from the Cambrian, Ordovician, and Quaternary periods, including alluvium, scree, torrential, and aeolian deposits, which are the most widespread. These formations have been significantly influenced by intense tectonic activity, resulting in the formation of folded structures, particularly in the Djebel Kahal Tabelbala, Djebel Bet Touaris, and Djebel Ben Tadjine areas. From a hydrogeological perspective, the study area contains a substantial underground water potential stored in its aquifer system. Among the main aquifers are the Cambro-Ordovician aquifer, the Hamada de la Daoura aquifer, the Erg Erraoui water table, and the Tabelbala aquifer. The interpretation of piezometric mapping, derived from observation campaigns, has revealed a groundwater flow direction from the northwest and northeast towards the south. Groundwater recharge mainly comes from effective rainfall, which is low and difficult to estimate, as well as from exceptional floods and lateral exchanges between aquifers (Hamada, Erg, and Cambro-Ordovician formations). An integrated framework incorporating electrical geophysics (VES), Geographic Information Systems (Fr, AHP), remote sensing, and machine learning techniques mapping techniques (Random Forest, SVM, and Neural Networks) has enabled the precise delineation of areas with high water potential. Hydrochemical analysis and characteristic ratio studies have identified the origin of water mineralization in the region's aquifer. Three main chemical facies have been distinguished in the study area: Sodium sulfate facies, predominantly found in water samples from the north of Chraïa, as well as around the village of Tabelbala and Ksar Makhoulouf reflecting the influence of evaporitic formations on water mineralization. This facies is particularly concentrated in the central region of the study area. In contrast, the less widespread calcium chloride facies mainly characterizes waters located on the periphery of the region. Comparative analysis of the concentrations of major chemical elements (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-) revealed a predominance of ions derived from gypsiferous formations (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) and saline deposits (Na^+ , Cl^-) over carbonate-related ions (Ca^{2+} , HCO_3^-), highlighting their determining role in increasing water salinity. This study has led to the development of a series of maps and results illustrating the state, nature, and functioning of the aquifer system. The findings highlight the need for an appropriate and sustainable water management strategy to ensure the preservation and optimal utilization of these vital resources.

Keywords: hydrogeology, Tabelbala, spatial data, Electrical geophysics, geographic information systems, machine learning.

ملخص

يدرس هذا البحث رسم الخرائط والتحليل العميق للسيلوم المرفو-الهيكل، بهدف تحسين فهم مناطق تجميع المياه وتحديد دقيق لمناطق الإمكانات في منطقة تلبالة (جنوب غرب الجزائر). تتميز المنطقة بمناخ جاف، حيث يكون الشتاء باردا والصيف حارا وجافا. تظهر تقديرات الموازنة الهيدرولوجية وفقا لمخطط فيرديل أن النتج الفعلي (ETR) يصل الى 29 ملم، مما يؤكد وجود عجز مائي واضح. كشفت الدراسة الجيولوجية أن المنطقة تحتوي على سلسلة طبقية من البروتيروزويك الى العصر الرباعي الحديث، حيث تهيمن رواسب العصر الكامبري والاوردوفيشي والرباعي، بما في ذلك الطهي، الركام، والرواسب الطوفانية والريحية، والتي تعتبر الأوسع انتشارا. كما أن هذه التكوينات تعرضت لنشاط تكتوني مكثف، مما أدى الى ظهور تراكيب مطوية، خاصة في مناطق جبل كحل تلبالة، جبل بيتوراس وجبل بن تاجين. من الناحية الهيدرولوجية، تحتوي المنطقة على إمكانات مائية جوفية هامة مخزنة داخل نظامها الطبقي المائي. ومن بين هذه الأنظمة المائية المكامن الكابرو-أوردوفيشية، خزان حمادة الداورة، المياه الجوفية لوق الراوي، وخزان المياه الجوفية لتلبالة. أظهرت تحليل وتفسير خرائط البيزو مترية، الناتجة عن حملات رصد ميدانية، أن اتجاه تدفق المياه الجوفية يسير من الشمال الغربي والشمال الشرقي نحو الجنوب تغذية المياه الجوفية أساسا من الأمطار الفعلية، وهي ضعيفة ويصعب تقديرها، إضافة إلى الفيضانات الاستثنائية والتبادلات الجانبية بين الطبقات المائية (الحمادة، العرق، وتكوينات الكامبري-الأوردوفيشي). أدت دمج الجيوفيزياء الكهربائية، نظم المعلومات الجغرافية (Fr, AHP)، تقنيات الاستشعار عن بعد، وأساليب الخرائطية المتقدمة (SVM, NN, Rf) كمصادر للمعلومات، الى تحديد دقيق لمناطق الموارد المالية المحتملة. بالإضافة الى ذلك، سمحت التحليلات الهيدروكيميائية ودراسة النسب المميزة بتحديد أصل تمعدن المياه الجوفية في المنطقة. كشفت التحليلات الهيدروكيميائية عن ثلاثة أنماط رئيسية للمياه الجوفية: النمط الكبريتي الكلسي، وهو المهيمن، خاصة في المياه المستخرجة شمال شرايع، وكذلك في محيط قرية تلبالة وقصر مخلوف، مما يعكس تأثير التكوينات التبخيرية على تمعدن المياه. النمط الكبريتي الكلسي يظهر بكثافة في وسط المنطقة المدروسة. أما النمط الكلوري الصوديومي، فهو أقل انتشارا ويتميز بها المياه القادمة من أطراف منطقة الدراسة. كشفت مقارنة تركيزات العناصر الكيميائية (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-) عن هيمنة الأيونات الجبسية (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) والأيونات المالحة (Na^+ , Cl^-) مقارنة بالأيونات الكربوناطية (Ca^{2+} , HCO_3^-)، مما يبرز دورها الحاسم في اكتساب ملوحة المياه. سمح تقييم ملاءمة مياه منطقة تلبالة للري والاستهلاك البشري بتحديد المناطق التي تتأثر جودتها بوجود بعض العناصر الكيميائية، مما يؤثر على مدى صلاحيتها لهذه الاستخدامات. أسفرا هذه الدراسة عن اعداد مجموعة من الخرائط والنتائج التي توضح حالة وطبيعة وألية عمل النظام المائي الجوفي. وتؤكد هذه النتائج على أهمية تبني إدارة ملائمة ومستدامة للمياه لضمان حمايتها واستغلالها الأمثل.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجيولوجيا، تلبالة، البيانات الفضائية، الجيوفيزياء الكهربائية، نظم المعلومات الجغرافية، الخرائط المكانية، التعلم الآلي.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I Introduction	
I. Introduction.....	8
II. Présentation de la zone d'étude.....	9
1. Unités géomorphologiques.....	12
1.1 Les Ergs.....	12
1.2 Les Regs.....	14
1.3 Les Hamadas.....	14
1.4 Les Sebkhas et Vallées.....	15
1.5 Les Daïas.....	16
2. Occupation du sol.....	16
III. Acquisition des données satellites.....	18
1. Télédétection et analyse des données.....	18
2. Interaction énergie matière.....	20
3. Sources et caractéristiques de données de télédétection.....	22
3.1 Données Sentinel.....	23
3.2 Utilisation des données radar (Données Sentinel 1).....	27
4. Intégration des données altimétriques.....	32
1. Analyses géologiques des résultats des différents traitements appliqués sur les images satellites.....	33
IV. Conclusion.....	34
Chapitre II Hydroclimatologie	
I. Introduction.....	36
II. Conditions climatiques.....	39
1. Nébulosité.....	39
2. Température.....	39
3. Pluviométrie.....	43
4. Indice pluviométrique.....	48
5. Humidité relative de l'air.....	49
6. Vent.....	51
7. Humidité du sol.....	52
8. L'évaporation.....	55
9. Evapotranspiration réelle ETR.....	58
10. Indice d'aridité.....	59
11. Bilan hydrologique.....	61
III. Validation de l'ensemble de données POWER.....	61
IV. Conclusion.....	62

Chapitre III Géologie

I.	Introduction	64
II.	Travaux antérieurs	65
III.	Géologie de la zone d'étude	69
1.	Protérozoïque	70
1.1	Série de roches volcano-sédimentaires	71
1.2	Série de roches volcaniques basiques et neutres	71
1.3	Série de roches volcaniques acides	72
2.	Couverture sédimentaire paléozoïque	72
2.1	Cambrien	72
2.2	Ordovicien	75
2.3	Silurien	78
3.	Cénozoïque	78
3.1	Néogène	79
3.2	Quaternaire	79
3.3	Quaternaire ancien	79
3.4	Quaternaire moyen	80
3.5	Quaternaire moyen -supérieur	80
3.6	Quaternaire supérieur	80
3.7	Quaternaire actuel	80
IV.	Contexte tectonique	81
1.	Tectonique panafricaine	82
1.1	Tectoniques plicatives	82
1.2	Tectoniques cassantes	82
2.	Tectonique hercynienne	82
2.1	Tectoniques plicatives	82
2.2	Tectoniques cassantes	83
V.	Minéralisations	86
VI.	Conclusion	87

Chapitre IV Hydrogéologie

I.	Introduction	89
1.	Bilan de l'eau dans la région	90
II.	Différents Aquifères de la région d'étude	91
1.	Aquifère du Cambro-Ordovicien	92
2.	Hamada de la Daoura	92
3.	Nappe de l'Erg Er Raoui	93
4.	Aquifère de la nappe de Tabelbala	93
III.	Inventaire des points d'eau	94

1.	Piézométrie (niveau d'eau).....	96
2.	Zone d'alimentation	101
3.	Caractéristique hydrodynamique.....	101
4.	Épaisseur de la zone non saturée.....	102
5.	Épaisseur de la zone saturée	103
IV.	Conclusion.....	104

Chapitre V Géophysique

I.	Introduction.....	106
1.	Technique de mesure adoptée	107
II.	Lithostratigraphie.....	111
1.	Cambro-Ordovicien	111
2.	Tertiaire continental (néogène).....	112
3.	Quaternaire (les Ergs).....	112
III.	Echelle de résistivité adoptée	114
IV.	Interprétation des mesures de la prospection électrique.....	114
1.	Interprétation des coupes géoélectriques.....	115
1.1	Coupe géoélectrique B.....	115
1.2	Coupe géoélectrique C.....	116
1.3	Coupe géoélectrique E	116
1.4	Coupe géoélectrique G.....	117
2.	Interprétation des cartes de résistivités apparentes	118
2.1	Carte de résistivité apparente ($AB/2 = 40$ m).....	118
2.2	Carte de résistivité apparente ($AB/2 = 200$ m).....	118
2.3	Carte de résistivité apparente ($AB/2 = 300$ m).....	119
2.4	Carte de résistivité apparente ($AB/2 = 600$ m).....	120
3.	Carte d'isopaches des grès Cambro-Ordovicien	120
4.	Carte de résistance transversale.....	120
5.	Carte du substratum.....	121
6.	Carte d'implantation de forage proposé	121
V.	Conclusion	123

Chapitre VI Cartographie hydrogéologique

I.	Introduction.....	125
1.	Matériels utilisés.....	125
II.	Extraction du réseau linéaire (Failles, fractures et dykes)	126
III.	Les principaux facteurs influençant la potentialité.....	131
1.	Lithologie	131
2.	Densité du réseau linéaire.....	131
3.	Densité du réseau hydrographique.....	132

4.	Pente	132
5.	Élévation	133
6.	Occupation du sol.....	134
7.	Indice d'humidité topographique	135
IV.	Méthodes d'évaluation de la potentialité hydrique et applications.....	136
1.	Rapport de fréquence (Fr)	138
2.	Analyse multicritère hiérarchique (AHP) et interprétation	140
3.	Apprentissage automatique	144
3.1	Forêt aléatoire (Random Forest (RF)).....	145
3.2	Réseau de Neurones (NN Neurone network).....	148
a)	Réseaux de neurones artificiels (ANN).....	149
3.3	Machine à vecteur de support (SVM support vector machine)	151
4.	Augmentation des données.....	152
I.	Résultats, validation et évaluation de la performance des approches utilisées	155
V.	Conclusion	159

Chapitre VII Hydrochimie

I.	Introduction.....	162
II.	Paramètres organoleptiques (cartographie hydrochimique).....	164
1.	Couleur	164
2.	Odeur.....	164
3.	Solides Totaux Dissous (TDS)	165
4.	Conductivité électrique (CE) et minéralisation.....	165
5.	Dureté totale TH (Total Hardness)	168
III.	Paramètres physiques	168
1.	Potentiel hydrogène (pH)	168
2.	Paramètres chimiques majeurs (Cations et anions).....	169
2.1	Calcium (Ca^{+2}).....	169
2.2	Magnésium (Mg^{+2})	170
2.3	Sodium (Na^{+}) et potassium (K^{+}).....	171
2.4	Bicarbonates (HCO_3^{-})	173
2.5	Chlorures (Cl^{-}).....	174
2.6	Sulfates (SO_4^{2-}).....	175
2.7	Nutriments.....	176
2.8	Ortho-phosphate (PO_4^{-}).....	178
IV.	Classification et faciès chimique des eaux.....	179
1.	Représentation graphique.....	180
1.1	Diagramme de Piper.....	180
1.2	Diagramme de Stiff	182

1.3	Diagramme de Schöeller-Berkaloff	184
1.4	Diagramme de Riverside-Wilcox.....	186
2.	Rapport caractéristique.....	187
	rSO ₄ /rCl.....	188
	rCl/HCO ₃	188
	Mg/rCa.....	188
3.	Analyse de la qualité par les approches statistiques.....	188
3.1	Matrice de corrélation	189
3.2	Application du CAH sur les échantillons de la région de Tabelbala	193
4.	Corrélation chimique.....	194
4.1	Relation magnésium-calcium (Mg ²⁺ -Ca ²⁺)	194
4.2	Relation chlorure-sodium (Cl ⁻ -Na ⁺)	195
4.3	Relation sulfates-sodium (SO ₄ ²⁻ -Na ⁺).....	195
V.	Conclusion	197

Chapitres VIII Evaluation de la qualité des eaux

I.	Introduction.....	199
II.	Evaluation de la qualité des eaux de Tabelbala à des fins d'irrigation	200
1.	Taux d'Adsorption du Sodium (SAR)	201
2.	Titre hydrométrique (TH)	202
3.	Pourcentage de Sodium soluble (SSP ou Na %)	204
4.	Indice de perméabilité (IP).....	205
5.	Carbonate de Sodium Résiduel (RSC).....	206
6.	Taux d'Adsorption du Magnésium (MAR/MH)	207
7.	Indice de Kelley (KR)	209
8.	Indice de qualité de l'eau pour l'irrigation	209
III.	Adéquation des eaux de Tabelbala à la consommation humaine	214
IV.	Conclusion.....	220

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.	9
Figure 2 : Réseau hydrographique de la zone d'étude.	11
Figure 3: Modèles de drainage reconnaissables sur les images satellites (Howard, 1967).	12
Figure 4 : Planche photographique montrant Erg Er Raoui.	13
Figure 5 : Répartition spatiale des différents Ergs dans le Sahara Algérien.	14
Figure 6 : Planches photographiques montrant la Hamada de Tabelbala.	15
Figure 7: Planche photographique montrant les dépôts lacustres de la Sebkha.	16
Figure 8 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude.	17
Figure 9 : Pourcentages de différentes classes d'occupation du sol de la zone d'étude.	18
Figure 10 : Onde électromagnétique.	19
Figure 11: Types de capteurs de télédétection et leurs longueurs d'onde.	20
Figure 12: Interaction rayonnement, matière.	20
Figure 13: Réflexion spéculaire (a) et réflexion diffuse (b)	21
Figure 14: Réfraction du rayonnement dans des milieux différents.	21
Figure 15: Image Landsat 8 (OLI) en composition colorée 843, Mosaïque d'images.	22
Figure 16: Image Sentinel 2 en composition colorée 843.	24
Figure 17:(A) Composition en fausse couleur de Landsat 8 OLI : b7(R) b5(G) b4(B), (B)Composition en fausse couleur de Sentinel 2 b8(R) b4(G) b3(B), (C) Rapport des bandesLandsat8 OLI : b7/b3(R) b5/b2(G) b4/b7(B), (D) Analyse en composante principale Landsat8 OLI P1, P2, P3 (E) Filtre Landsat8 OLI à 45° (F) Filtre Sentinel 2 à 45°	26
Figure 18: Organigramme de prétraitement de Sentinel 1 GRDH (Ground Range Detected) (Filipponi, 2019).	27
Figure 19: Application du fichier d'orbite.	28
Figure 20: Suppression de bruit thermique et de bordure.	29
Figure 21: Etalonnage.	30
Figure 22: Correction des terrains.	31
Figure 23: Réseau de fracturation actualisé par imagerie radar.	32
Figure 24 : Modèle numérique de terrain de la zone d'étude (SRTM).	33
Figure 25: Extraction de quelques linéaments à partir du réseau hydrographique.	34
Figure 26: Visionneur d'accès aux données POWER.	37
Figure 27: Répartition des différentes stations météorologiques.	38
Figure 28: Variations des valeurs de températures moyennes annuelles dans la région d'étude de la période 1985-2000.	40
Figure 29: Variations des valeurs de températures moyennes annuelles dans la région d'étude de la période 2000-2022.	41
Figure 30: Température moyenne minimum maximum de la période (1981-2020).	41
Figure 31: Température minimum maximum et moyenne de 2020	42
Figure 32: Température minimum maximum et moyenne de 2000.	42
Figure 33: Température minimum maximum et moyenne de 1981.	43
Figure 34: Variabilité moyenne mensuelle des précipitations (mm) au village.	43
Figure 35: Variation interannuelle des précipitations de la région d'étude (Tabelbala).	44
Figure 36: Variabilité saisonnière des précipitations (mm) au village de	45
Figure 37: Variabilité moyenne mensuelle des précipitations (mm) au NW de la zone.	45
Figure 38: Variation interannuelle des précipitations de l'extrême NE.	46
Figure 39: Précipitation moyenne annuelle de 1981 à 2000.	46
Figure 40: Précipitation moyenne annuelle du 2000 à 2022.	47
Figure 41: Pluviométrie relative au bassin de la Saoura et la partie ouest.	48
Figure 42: Indice pluviométrique interannuelle de Tabelbala de la période 1981-2020.	49
Figure 43: Variabilité mensuelle de l'humidité de la région d'étude (1981-2020).	50
Figure 44: Variabilité moyenne annuelle de l'humidité de l'air de la région.	50
Figure 45: Vitesse et direction du vent de la zone d'étude (Année 2020).	51

Figure 46: Vitesse moyenne mensuelle du vent pour l'année 2020.	52
Figure 47: Distribution spatiale des valeurs mensuelles de l'humidité du sol à Tabelbala1981.....	52
Figure 48: Variabilité mensuelle de l'humidité du sol à Tabelbala1981.	53
Figure 49: Distribution spatiale des valeurs mensuelles de l'humidité du sol à Tabelbala2000.....	53
Figure 50: Variabilité mensuelle de l'humidité du sol à Tabelbala 2000.	54
Figure 51: Distribution spatiale des valeurs mensuelles de l'humidité du sol à Tabelbala 2020.	54
Figure 52: Variabilité mensuelle de l'humidité du sol à Tabelbala 2020.	55
Figure 53: Taux d'évaporation mensuelle de la région de Tabelbala.	56
Figure 54: Répartition spatiale de l'ETP relative à l'année 1981.....	56
Figure 55: Répartition spatiale de l'ETP relative à l'année 2000.....	57
Figure 56: Répartition spatiale de l'ETP relative à l'année 2020.....	58
Figure 57: Abaque de l'indice d'aridité de DeMartone (De.Martonne, 1925).	59
Figure 58: Quotient pluviothermique d'(Emberger, 1955).	60
Figure 59: Diagramme ombrothermique de l'aire de l'étude.	61
Figure 60: Corrélation linéaire entre les données de la station de Beni Abbès et celles de POWER. ...	62
Figure 61: Carte géologique de la chaîne de l'Ougarta et colonne synthétique (Chikhaoui and Donzeau, 1972), (Ghienne et al., 2007) (modifiée).	64
Figure 62: Carte schématique illustrant le contexte régional du Craton ouest-africain, l'Anti-Atlas et la chaîne de l'Ougarta (Ennih and Liégeois, 2001) (modifiée).	65
Figure 63: Travaux de recherche systématique dans la chaîne de l'Ouagarta (Mekkaoui, 2015).....	68
Figure 64: Carte géologique de Tabelbala au 1/200 000 (N° NH-30-IX).	70
Figure 65: Coupe géologique schématique dans le massif de Damrane (Mekkaoui, 2015).	71
Figure 66: Planche photographique illustrant les Roches volcaniques basiques et neutres.	72
Figure 67: Colonne lithostratigraphique de la région de Tabelbala.	73
Figure 68: Planche photographique illustrant les conglomérats arkosiques de Demrane et le Cambrien supérieur.	74
Figure 69: Planche photographique illustrant les grès-quartzites et les conglomérats arkosiques de Demrane.....	75
Figure 70: Première coupe géologique de Kahal Tabelbala (passant par Dj Boukhal), échelle 1:21000ième (Yahiaoui, 1992c), modifiée.	76
Figure 71: Planche photographique illustrant l'Ordovicien inférieur.....	77
Figure 72: Deuxième coupe géologique de Kahal Tabelbala (passant par Si Abed et Bordj), échelle : 21000ième (Yahiaoui, 1992c), modifiée.	78
Figure 73: Planche photographique illustrant les dépôts sablo-argileux, sableux.....	79
Figure 74: Coupe et profil de Hi Zertem (Erg Er Raoui) (Yahiaoui, 1992c), modifié.	81
Figure 75: Planche photographique illustrant les dépôts d'argiles gypsifères, sables,	81
Figure 76: Esquisse structurale des monts de l'Ougarta ((ORGM, 2001)inédit)).	83
Figure 77: Réseau de fracturation de la zone d'étude.....	84
Figure 78 : Esquisse tectonique, schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux e anticlinaux des monts de l'Ougarta (Donzeau, 1972).	85
Figure 79: Rosace directionnelle de classes de direction de structures affectant notre zone.....	86
Figure 80: Répartition spatiale de la minéralisation (gisement, mine et indice) relative à la région de Tabelbala.....	87
Figure 81 : Carte des bassins hydrographiques du Sahara algérien (ABH).	90
Figure 82: Bilan de l'eau dans la région ((DRE. Beni Abbès.2024).....	90
Figure 83: Volume d'eau distribué (dotation) l/j/hab (DRE. Beni Abbès.2024).	91
Figure 84: Puits équipés de pompes et bouchons fermés.	94
Figure 85: Distribution spatiale des différents points d'eau et forages.....	95
Figure 86: Points d'eau et forages du village de Tabelbala.....	96
Figure 87: Distribution spatiale de la surface piézométrique.	97
Figure 88: Schématisation en 3 dimensions.....	98
Figure 89: Carte hydrogéologique de Tabelbala.....	99

Figure 90: Piézométrie du village de Tabelbala.....	100
Figure 91: (a) courbe de descente (p61 et p24), (b) courbe de remontée (p24)	102
Figure 92: Epaisseur de la zone non saturée.....	103
Figure 93: Epaisseur de la zone saturée.....	104
Figure 94: Démarches de mesure géophysique adoptée sur terrain.	106
Figure 95: Configurations d'électrodes pour les enquêtes de résistivité : (A) réseau dipôle dipôle axial (B) réseau Wenner et (C) réseau Schlumberger.....	108
Figure 96: Distribution spatiale des sondages électriques verticaux.....	110
Figure 97: Localisation des différents sondages électriques de la région de Boulaadam.	110
Figure 98: Log lithostratigraphique du forage M0-3.....	111
Figure 99 : Coupe schématique NNE-SSW des Hamadas tertiaires.....	112
Figure 100: Courbe théorique du modèle de résistivité du sondage E1.....	113
Figure 101: Schéma illustrant les différentes coupes géoélectriques.	115
Figure 102: Corrélations entre les différents sondages électriques du profil B.	115
Figure 103: Coupes géoélectriques B.....	116
Figure 104: Corrélations entre les différents sondages électriques du profil C.....	116
Figure 105: Corrélations entre les différents sondages électriques du profil E.....	116
Figure 106: Coupes géoélectriques E.....	117
Figure 107: Coupes géoélectriques G.	117
Figure 108: Corrélations entre les différents sondages électriques du profil E.....	118
Figure 109: Carte d'isorésistivité pour distance interélectrodes $AB/2=40$,	118
Figure 110: Carte d'isorésistivité pour distance interélectrodes $AB/2 = 200$,.....	119
Figure 111 : Carte d'isorésistivité pour distance interélectrodes $AB/2=300$,	119
Figure 112: Carte d'isorésistivité pour distance interélectrodes $AB/2 = 600$, en utilisant Schlumberger Dipôle-Dipôle.....	120
Figure 113: Carte illustrant la résistance transversale.....	121
Figure 114: Carte du toit du substratum.....	121
Figure 115: Structuration de données géophysique de la région de Boulaadam.	122
Figure 116: Modélisation explicite par sondages électriques verticaux de la région de Boulaadam..	123
Figure 117: Organigramme de la méthode proposée pour la mise en évidence du réseau de fracturation.	129
Figure 118: Mnt (a) et ses modèles dérivés. Modèle d'ombrage (Hillshade) avec un azimut de 60° (b), 100° (c), 200° (d), 315° (e) et l'indice de position topographique (TPI)(f).....	130
Figure 119: Carte des pentes de Tabelbala.....	133
Figure 120: Carte d'élévation de Tabelbala.....	133
Figure 121: Occupation du sol de la région de Tabelbala.	134
Figure 122: Carte d'indice d'humidité topographique de la zone d'étude.	135
Figure 123: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (Fr).	140
Figure 124: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (AHP).....	143
Figure 125: Différents algorithmes d'apprentissage automatique utilisés (SVM, NN, RF).	145
Figure 126: Forêt aléatoire (Random Forest : RF).	147
Figure 127: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (RF).	147
Figure 128 : Principe de Réseau de Neurones (NN).....	148
Figure 129: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (NN).	150
Figure 130: Principe de Machine à vecteur de support (SVM).....	151
Figure 131: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (SVM).	151
Figure 132: Technique d'augmentation des données	153
Figure 133: Construction de la matrice de caractéristiques.	154
Figure 134: Pourcentage des différentes zones de potentialité spatiale de la zone d'étude.	156
Figure 135: Courbes ROC correspondant aux différentes méthodes utilisées (AHP, Fr, RF, NN et SVM).	159
Figure 136: Variation des teneurs des éléments chimiques de la plaine de Tabelbala.....	164

Figure 137: Solides totaux dissous (TDS).....	165
Figure 138: Distribution spatiale de la conductivité électrique de Tabelbala.....	166
Figure 139: Distribution spatiale de la minéralisation dans la plaine de Tabelbala.	167
Figure 140: Carte d'iso-pH du village de Tabelbala et ses alentours.	169
Figure 141: Carte de la répartition spatiale d'iso-calcium (Ca^{2+}).....	170
Figure 142: Carte de la répartition spatiale d'iso-magnésium (Mg^{2+}).	171
Figure 143: Carte de la répartition spatiale d'iso-sodium (Na^+).	172
Figure 144: Carte de la répartition spatiale d'iso-potassium (K^+).	173
Figure 145: Carte de la répartition spatiale d'iso-bicarbonates (HCO_3^-).	174
Figure 146: Carte de la répartition spatiale d'iso-chlorures (Cl^-).....	175
Figure 147: Carte de la répartition spatiale d'iso-sulfates (SO_4^{2-}).....	176
Figure 148: Carte de la répartition spatiale d'iso-nitrates (NO_3^-).	177
Figure 149: Carte de la répartition spatiale d'iso-ammonium (NH_4^+).....	178
Figure 150: Carte de la répartition spatiale d'iso-phosphate (PO_4^-).....	178
Figure 151 : Distribution spatiale des différents faciès chimiques relatifs	180
Figure 152: Faciès chimique des eaux relatives aux formations (3-Q6) et (4-Q1-2) selon le diagramme de Piper.	181
Figure 153: Faciès chimique des eaux relatif à la formation (8-Q4-5) selon le diagramme de Piper.	182
Figure 154 : Diagramme de Stiff (3-Q6).	183
Figure 155:Diagramme de Stiff (4-Q1-2).....	184
Figure 156:Diagramme de Stiff (13-Q5).	184
Figure 157: Représentation des eaux relatives à la formation (a :3-Q6) et (b :4-Q1-2)	185
Figure 158: Représentation des eaux relatives à la formation (8-Q4-5) selon Schöeller-Berkaloff.	186
Figure 159:: Diagramme de Riverside-Wilcox.	186
Figure 160 : Analyse en composantes principales (espace des variables).....	189
Figure 161 : Diagramme de corrélation des variables.	192
Figure 162: Analyse en composantes principales (espace des individus).....	193
Figure 163: Dendrogramme des échantillons analysés de Tabelbala.....	194
Figure 164: Dendrogramme des classes des individus de la plaine de Tabelbala.	194
Figure 165: Relation magnésium (Mg^{2+})- calcium (Ca^{2+}).	195
Figure 166: Relation calcium-sodium (Cl-Na).....	196
Figure 167: Relation sulfate-sodium ($\text{SO}_4\text{-Na}$).....	196
Figure 168: Sodium adsorption ratio (SAR).	202
Figure 169: Répartition spatiale du titre hydrométrique (TH).....	203
Figure 170: Présence de pourcentage de sodium ($\text{Na}\%$).	205
Figure 171: Indice de perméabilité (IP) dans la plaine de Tabelbala.	206
Figure 172: Carbonate de sodium résiduel (RSC).	207
Figure 173: Risque de magnésium (MH/MAR).	208
Figure 174: Indice de Kelley (KR).	209
Figure 175 : Différentes classes des eaux d'irrigation selon l'indice IWQI.....	212
Figure 176: Distribution spatiale de l'adéquation de l'eau de Tabelbala à l'irrigation (IWQI).....	212
Figure 177: Organigramme montrant l'approche adoptée.	215
Figure 178: Structure générale du modèle WQI.....	216
Figure 179: Différentes classes des eaux d'irrigation selon l'indice WQI.....	218
Figure 180: Distribution spatiale de l'adéquation de l'eau de Tabelbala à la consommation humaine (WQI).....	219

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des bandes des capteurs Sentinel 2A et Landsat 8 OLI.....	23
Tableau 2: Variation des moyennes mensuelles de nébulosité de Tabelbala pour la période 1939-1941 (Yahiaoui, 1992b).....	39
Tableau 3: Variabilité moyenne mensuelle des précipitations (mm) au village de Tabelbala de la période 1981-2021.	44
Tableau 4: Variabilité saisonnière des précipitations au village de Tabelbala de la période 1981-2021.	45
Tableau 5: Variabilité mensuelle des précipitations (mm) au village de Tabelbala de la période 1981-2021.	46
Tableau 6: Variation d'évaporation de l'année de 2020 relative à la région de Tabelbala.	55
Tableau 7: Taux d'ETP mensuelle pour l'année 1981.	57
Tableau 8: Taux d'ETP mensuelle pour l'année 2000.	58
Tableau 9: Taux d'ETP mensuelle pour l'année 2020.	58
Tableau 10: Indice d'aridité calculé dans la région de Tabelbala.	59
Tableau 11: Statistique des volumes d'eau distribués et produits pour Tabelbala (DRE. Beni Abbès.2024).....	91
Tableau 12 : Gradient hydraulique de la région de Tabelbala	100
Tableau 13: Valeurs de transmissivités des puits (p61 et p24) dans la plaine de Tabelbala.	101
Tableau 14: Résistivité de différentes formations géologiques de la région de Boulaadam (ANRH 2008).	113
Tableau 15: Résultats du modèle du SEV étalon E1 près du forage M0-3 (ANRH 2008).	114
Tableau 16: Gamme de résistivités adoptées (ANRH 2008)	114
Tableau 17: Caractéristiques du forage proposé.....	122
Tableau 18 : Valeurs des paramètres du 'Line module' de Geomatica.	128
Tableau 19: Répartition des classes d'occupation du sol de la région d'étude	135
Tableau 20: Classification des principaux modèles utilisés en géologie ((Harbaugh and Bonham-Carter, 1970).....	137
Tableau 21: Distribution spatiale et la pondération de chaque paramètre calculé par la méthode Fr.	139
Tableau 22: Poids des facteurs intervenant et leur classification.	141
Tableau 23: Matrice de comparaison par paires des critères intervenants (Ahp).	141
Tableau 24: Matrice de comparaison par paires et poids normalisés des critères intervenants (Ahp).	142
Tableau 25: Nombre de facteurs (n), valeur propre de la matrice de jugement (λ_{max}), indice de cohérence aléatoire (RI), Rapport de consistance (CR) et Indice de consistance (CI) de différentes couches considérées.....	142
Tableau 26: Comparaison entre les méthodes d'apprentissage automatique à partir de l'AUC et σ	158
Tableau 27: Standards et caractéristiques statistiques des points d'eau de la plaine de Tabelbala... ..	163
Tableau 28: Statistiques des différents paramètres chimiques de la plaine de Tabelbala	164
Tableau 29: Analyse descriptive des échantillons pour CE.	166
Tableau 30: Classification des eaux de la plaine de Tabelbala selon la CE (RODIER, 2005).....	167
Tableau 31: Analyse descriptive des échantillons pour TH.....	168
Tableau 32: Classification des eaux en fonction de leur dureté.....	168
Tableau 33: Analyse descriptive des échantillons pour pH.....	169
Tableau 34: Analyse descriptive des échantillons pour NO ₃	176
Tableau 35: Analyse descriptive des échantillons pour NH ₄ ⁺	177
Tableau 36: Analyse descriptive des échantillons pour PO ₄	179

Tableau 37: Faciès chimiques et formules ioniques relatifs aux points d'eau de Tabelbala (année 2014).	179
Tableau 38 : Calcul des rapports caractéristiques.	187
Tableau 39: Différents paramètres physico-chimiques utilisés dans l'analyse ACP.	189
Tableau 40: Matrice de corrélation pour les points d'eau de la région de Tabelbala.	190
Tableau 41: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon le SAR (Todd, 1959), (Richards, 1954b)	202
Tableau 42: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon le TH. (Todd, 1959), (Richards, 1954b).	203
Tableau 43: Classification des eaux de la plaine de Tabelbala selon le Pourcentage de Sodium Na% (Todd, 1959).	204
Tableau 44: Classes d'indice de perméabilité relatives aux points d'eau de la plaine de Tabelbala. (Doneen, 1964).	206
Tableau 45: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon le RSC. (Raghaunth, 1989b).	207
Tableau 46 : Classes du taux d'Adsorption du Magnésium relative aux points d'eau de la plaine de Tabelbala. (Doneen, 1964).	208
Tableau 47: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon l'indice de Kelly. (Doneen, 1962)	209
Tableau 48 : Valeurs limites relatives aux paramètres utilisés dans l'évaluation de qualité (qi).	210
Tableau 49 : Poids relatifs utilisés pour calculer l'indice IWQI. (Meireles et al., 2010)	211
Tableau 50: Classification des eaux d'irrigation selon l'indice IWQI.	211
Tableau 51: Résultats de calcul de l'indice d'irrigation.	213
Tableau 52: Poids normalisés relatifs aux éléments chimiques introduits dans le calcul de WQI.	216
Tableau 53: Différentes classes de qualité d'eau de WQI (Tiwari, Singh and Mahato, 2014).	218

Liste des acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales	OMS / WHO	Organisation Mondiale de la Santé
AD	Arbres de décision	ONS	Office national des statistiques
ADE	Algérienne Des Eaux	ORGM	Office de Recherche Géologique et Minière
AHP	Analyse Hiérarchique des Processus	ONU	Organisation des Nations unies
ANAM	Agence Nationale des Activités Minières	PCA	Principal Component Analysis
ANN / RNA	Artificial Neural Network / Réseaux de Neurones Artificiels	PI	Permeability Index
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques	POWER	Prediction Of Worldwide Energy Ressources
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	R	Recharge
AUC	Aire Sous la Courbe	RADI	Rayon du filtre
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique	RF	Random Forest
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System	RMSE	Erreur quadratique moyenne
CE	Conductivité Électrique	ROC	Receiver Operating Characteristic
Cl ⁻	Chlorures	RS / TDR	Télédétection (Remote Sensing)
DD	Densité de drainage	S	Coefficient d'emmagasinement
DEM / MNT	Modèle Numérique de Terrain	S2	Sentinel-2
DL	Densité des linéaments	SAR	Sodium Adsorption Ratio
DPAT	Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire	SEV	Sondages électriques verticaux
DRE	Direction des Ressources en Eau	SIG	Système d'Information Géographique
ERTS	Earth Resources Technology Satellites	SONATRACH	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures
Fr	Rapport de Fréquence	SVM	Support Vector Machine
GIS	Geographic Information System	T	Transmissivité
GPS	Global Positioning System	TAC	Titre Alcalimétrique Complet
IDW	Inverse distance weight	TDS	Total Dissolved Solids
IWQI	Irrigation Water Quality Index	TH	Titre Hydrotimétrique
K	Perméabilité hydraulique	UAV / Drone	Unmanned Aerial Vehicle
KR	Kelly's Ratio	UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
L8 OLI	Landsat 8 Operational Land Imager	VHRR	Very High Resolution Radiometer
LIDAR	Light Detection and Ranging	WQI	Water Quality Index
MAR	Magnesium Adsorption Ratio	ZNS	Zone Non Saturée
MCDM	Multi-Criteria Decision Making	ZS	Zone Saturée
MES	Matières en Suspension		
ML	Machine Learning		
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration		

INTRODUCTION GENERALE

L'eau constitue une ressource naturelle précieuse, jouant un rôle fondamental dans le développement socio-économique des pays ainsi que dans la stabilisation des populations (Gleick, 2014). Dans les zones arides d'Algérie, et en particulier le Sahara algérien le potentiel hydrique est estimé à environ 5.5 milliards de m³/an. Ce volume se répartit en 5 milliards de m³/an issus de ressources souterraines et 0.5 milliard de m³/an provenant d'écoulement superficiel formant d'importantes réserves d'eau (Mozas and Ghosn, 2013). Ces réserves sont particulièrement localisées dans le sud du pays, et sont considérées comme un levier essentiel du développement agricole et urbain de cette région.

L'urbanisation croissante, observée tant dans les zones urbaines que rurales, conjuguée à la croissance démographique ainsi qu'au développement industriel et agricole, a entraîné une augmentation significative de la demande et les besoins en eau (Shao *et al.*, 2020). Par ailleurs, la rareté croissante des eaux de surface accentuée par les effets du changement climatique, en particulier dans les zones arides (Derdour *et al.*, 2022), représente l'un des défis majeurs incitant la recherche de ressources alternatives (Feng *et al.*, 2020). Cette situation a incité de s'orienter vers la prospection de ressources hydriques souterraines et qui s'est imposée comme une nécessité en vue de répondre aux besoins et satisfaire la demande croissante en eau induite par ces transformations (Arabameri *et al.*, 2020). Ainsi, la mise en place d'outils efficaces de planification et de gestion devient indispensable pour assurer une exploitation rationnelle et durable des ressources hydriques (Misra, 2014). L'extension inévitable des zones urbaines et rurales autour des zones d'activités industrielles exerce une pression accrue sur l'environnement notamment sur les ressources hydriques (Adeyeye, Ikpokonte and Arabi, 2019). De ce fait, les eaux souterraines, composante particulièrement vulnérable de l'écosystème, sont directement affectées par les activités anthropiques telles que l'agriculture intensive, l'industrialisation et l'urbanisation.

La pérennité de ressources hydriques dépend étroitement de leur gestion maîtrisée (Feng *et al.*, 2020, Nguyen *et al.*, 2020). Dans ce cadre, les politiques de développement, et notamment dans les zones arides, ont encouragé le recours à des méthodes innovantes d'investigation. Les techniques modernes d'investigation, telles que la télédétection, l'intelligence artificielle, et l'analyse morphologique, offrent des observations précieuses, rapides et complémentaires aux approches classiques pour l'étude du sous-sol (Abijith *et al.*, 2020).

Cependant, l'impact, le coût financier élevé provenant lors des enquêtes et des investigations de terrain telles que la campagne géophysique, l'échantillonnage physico-chimique, la campagne piézométrique, ainsi que l'absence partielle ou totale de données suffisamment représentatives (Jha, Chowdary and Chowdhury, 2010), en raison de l'extrême imprévisibilité et de l'étendue de l'hydrosystème, constituent souvent des obstacles majeurs entravant l'application des approches d'investigation hydrogéologique classiques.

L'avènement de la technologie spatiale et l'application des techniques modernes telles que la Télédétection, le Système d'Information Géographique (SIG) et intelligence artificielle ont considérablement amélioré les approches méthodologiques et techniques en ce qui concerne la cartographie géologique, hydrogéologique, et la recherche minière (Gabr, Hassan and Sadek, 2015, Eldosouky, Abdelkareem and Elkhateeb, 2017, Kerzabi *et al.*, 2021), notamment dans les zones arides et semi-arides.

Dans certains travaux, des approches prédictives combinant des modèles empiriques et hydrogéologiques, intégrés aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), s'appuient sur des modèles mathématiques et statistiques tels que le processus hiérarchique analytique (AHP) (Rahmati *et al.*, 2015) et le rapport de fréquence (Fr) (Guru, Seshan and Bera, 2017a). Parallèlement, des techniques d'apprentissage automatique exploitent des algorithmes avancés tels que la forêt aléatoire (RF), les réseaux de neurones (NN) et la machine à vecteur de support (SVM) et autres (Lee, Hong and Jung, 2018). Ces approches hybrides intègrent généralement des données issues des méthodes classiques, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus fiables et mieux adaptés à des contextes variés. L'apport de ces méthodes est particulièrement significatif dans les régions caractérisées par une insuffisance, voire une absence de données, où les approches classiques d'investigation montrent leurs limites. Ces milieux sont souvent marqués par une faible couverture végétale et une forte diversité lithologique, rendant l'analyse hydrogéologique plus complexe.

La région de Tabelbala s'inscrit à la vieille plate-forme saharienne, caractérisée par sa stabilité, son caractère cratonisé et sa relative monotonie (Fabre, 1976a). Elle appartient à un domaine climatique marqué par une forte irrégularité des précipitations (Dubief, 1960a), avec des cumuls annuels généralement inférieures à 50mm/ans. Dans ce contexte, le système aquifère constitue la principale, voire l'unique, source d'approvisionnement en eau, dans une région où le réseau hydrographique est de type endoréique (Conrad, 1984). Ce système est structuré en bassins autonomes, appelés *Daoura*, formant un réseau hiérarchisé capable de drainer des volumes d'eau importants lors des épisodes de crues, notamment en provenance du bassin de Guir et de l'Oued Daoura. Les limites de l'aire d'étude sont définies au nord par le bassin de Guir, au sud par Erg Echech et Erg Iguidi tandis qu'à l'est et à l'ouest respectivement par le Grand Erg occidental et le bassin de Tindouf. Ce secteur présente un intérêt majeur tant sur le plan hydrogéologique que minier (Furon, 1964), d'autant plus que les activités de prospection se sont intensifiées suite aux récentes découvertes et au développement de projets miniers dans la région.

Plusieurs organismes nationaux, tels que l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), l'Office National de Recherche Géologique et Minière (ORGM), l'Agence Nationale des Activités Minières (ANAM) et le Service Géologique de l'Algérie (ASGA), ont conduit de nombreux travaux de prospection, incluant forages et levés géologiques. Toutefois, une actualisation de ces données demeure nécessaire, notamment en ce qui concerne les aspects lithologiques et structuraux (failles, cisaillements, dykes), afin de mieux comprendre les conditions de mise en place des faciès, les environnements de sédimentation et les corrélations avec d'autres bassins à différentes échelles spatiales et temporelles.

Au cours de dernières années, la région a connu une augmentation progressive de la demande en eau liée à divers usages, notamment l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Cette évolution s'explique par le progrès de l'industrialisation, et notamment dans le secteur minier, la croissance démographique ainsi qu'à la modernisation des pratiques agricoles.

Face la baisse de la pluviométrie dans ces régions arides, il devient impératif de protéger les importantes potentialités hydriques disponibles. Cette préservation repose sur une gestion

durable visant à garantir leur disponibilité à long terme, tout en mettant en œuvre des mesures préventives pour limiter leur dégradation et leur pollution.

Par ailleurs, la dégradation du milieu naturel, et en particulier des aquifères, constitue une préoccupation croissante à l'échelle mondiale. Les eaux souterraines sont aujourd'hui exposées aux rejets urbains ainsi qu'à des contaminants chimiques et organiques, susceptibles d'entraîner des phénomènes d'eutrophisation (Kharroubi *et al.*, 2022, Dourdour *et al.*, 2022). Ces polluants peuvent avoir des impacts significatifs sur la qualité de l'eau et, par conséquent, sur la santé publique.

Dans cette optique, l'évaluation qualitative et quantitative des ressources hydriques, fondée sur l'utilisation des techniques modernes telles que la télédétection, le Système d'Information Géographique et l'intelligence artificielle apparaît comme démarche indispensable. Ces outils offrent des capacités avancées en matière de prédiction, d'identification, de gestion et de protection des nappes aquifères (Dar, Sankar and Dar, 2011a, Thapa *et al.*, 2017a, Nasir *et al.*, 2018a).

Problématique et objectifs

La problématique de cette recherche est directement liée à l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines dans la région de Tabelbala. Elle s'articule autour de la question scientifique centrale suivante : Comment l'intégration des techniques spatiales, des Systèmes d'Information Géographique (SIG), de l'intelligence artificielle et des données in situ, peut-elle améliorer la prospection, la gestion et la préservation des ressources hydriques dans un contexte saharien ?

Dans ce cadre, cette étude vise à répondre aux objectifs spécifiques suivantes :

- Atténuer la rareté des ressources hydriques en assurant leur durabilité et leur disponibilité à long terme ;
- Analyser les données historiques, prévoir les tendances futures et cartographier les ressources hydriques afin d'optimiser leur gestion et d'appuyer la prise de décision ;
- Évaluer l'impact des facteurs géologiques et géomorphologiques sur la répartition spatiale des zones à fort potentiel hydrique ainsi que sur la qualité des eaux souterraines ;
- Déterminer le rôle des paramètres climatiques (températures, précipitation, vent, humidité...) dans les variations qualitatives et quantitatives des ressources hydriques ;
- Étudier l'évolution des caractéristiques physicochimiques des eaux en fonction des différents points de prélèvements ;
- Exploiter les données géophysiques et spatiales afin d'améliorer, à l'aide des modèles d'apprentissage automatique, la prédiction et à la cartographie du potentiel hydrique.

A travers ces interrogations, il paraît que les connaissances sont très fragmentaires concernant plusieurs aspects notamment le nombre d'aquifères, leurs géométries, leur champ de potentiel hydrique, leurs paramètres physiques et hydrodynamiques ainsi que leurs éventuelles interactions entre les différents horizons aquifères.

La présente étude se focalise sur la région de Tabelbala, appartenant au sous-bassin hydrographique de la Daoura. La délimitation et l'identification des zones de potentialité hydrique à l'aide de techniques classiques présentent un défi majeur dans les régions sahariennes en raison de vastes étendues, rendant difficile la réalisation des travaux

d'investigation rentable. Pour cela, il est impératif de faire appel aux techniques spatiales (outil permettant d'explorer de plus vastes régions) dans le domaine de la gestion, la prospection, et l'évaluation des eaux souterraines. Le recours à ces techniques est d'une importance capitale, car elles facilitent l'identification des paramètres clés, tout en réduisant les coûts d'exploration et en favorisant la valorisation des ressources.

Cette investigation vise à entreprendre une stratégie d'investigation qualitative et quantitative ainsi d'effectuer une prospection de ressources hydriques souterraines en se focalisant sur le contexte saharien, en particulier la région de Tabelbala. L'objectif principal de ce projet de thèse est de délimiter les différents champs de captages pertinents pour l'implantation d'un nombre de forages à gros débits capables de répondre au besoin et satisfaire la demande en eau. En outre, l'étude vise à mettre en évidence les caractéristiques spécifiques de la zone en question en vue de caractériser d'éventuels réservoirs aquifères. Cela implique la détermination de la nature des formations géologiques, l'identification du contexte structural et la compréhension de son rôle dans le fonctionnement du système hydrogéologique afin de mettre en exergue les zones de recharge et de drainage.

En se basant sur des indices géomorphologiques, géologiques, hydrogéologiques, cette investigation met l'accent sur les conditions globales de la recharge. Par ailleurs, une attention particulière doit être portée aux zones d'affleurement, en introduisant le concept « d'affleurement perméable utile » en surface. Cela permet d'avoir des informations précieuses sur la capacité d'infiltration, permettant la qualification des aires d'alimentation effective.

Afin d'effectuer une synthèse scientifique exhaustive (qualitative et quantitative) des ressources hydriques actuelles de la région de Tabelbala, une investigation hydrogéologique a été menée. Cette étude s'est basée particulièrement sur l'exploitation des données spatiales et des techniques modernes et notamment l'intelligence artificielle. En se référant sur les divers travaux antérieurs entrepris sur la région, la présente étude consiste ; à fournir une compréhension approfondie, à effectuer une analyse détaillée de la distribution du potentiel hydrique ainsi qu'à comprendre les conditions hydrogéologiques dans la région.

Méthodologie globale

Afin de réaliser une analyse hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Tabelbala, visant à mieux comprendre les ressources en eau dans cette région, une approche méthodologique structurée a été adoptée. Celle-ci repose d'une part, sur la synthèse des travaux antérieurs menés par différents auteurs, et d'autre part, sur la compilation et la collecte des données disponibles. Ces données comprennent des informations géologiques, hydroclimatiques, hydrogéologiques, géophysiques, cartographiques et hydrochimiques. Elles seront ensuite traduites en termes de propriété physique, hydrodynamique et de qualité de l'eau afin d'établir un schéma global de l'écoulement souterrain dans la région.

- L'interprétation géologique est réalisée sur la base du traitement et d'analyse d'images satellites ainsi que les travaux antérieurs, permettant de comprendre la distribution spatiale et la nature des formations géologiques. Cette interprétation est corroborée par des missions de terrain ciblant des sites stratégiques tels que le synclinal de Kahal Tabelbala, Dj Betouaris, Dj Ben Tadjine, Hamada de la Daoura, Dait El Kouar et Damrane.
- L'analyse hydrogéologique a pour but principal d'identifier et de délimiter les différents champs de captage, en mettant en évidence les caractéristiques et les structures

hydrogéologiques spécifiques de la zone concernée. Cela inclut l'évaluation des propriétés des aquifères et de leur étendue.

- L'étude géophysique réside dans le choix de différents points d'eau en fonction de type d'aquifère et des données exploitées, afin d'effectuer une visualisation géospatiale 3D (coupe transversale) des aquifères. Cette approche permet de cartographier et de modéliser les principales caractéristiques des nappes aquifères, notamment leur géologie, leur structure, leur géométrie (limites et épaisseurs des couches) ainsi que leur propriétés hydrogéologiques.
- La Cartographie des zones à potentiel hydrique a été réalisée en utilisant des méthodes d'analyse multicritères, notamment le processus hiérarchique analytique (AHP) et le rapport de fréquence (FR), ainsi que des techniques d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones (NN), la forêt aléatoire (RF) et les machines à vecteurs de support (SVM). Ces approches se révèlent particulièrement performantes pour l'identification des zones à fort potentiel en eau souterraine, en particulier dans les zones arides.
- L'étude hydrochimique et l'évaluation de la qualité des eaux de la région de Tabelbala, en vue de leur utilisation à la consommation humaine et l'irrigation, ont été réalisées en référence aux normes et directives nationales et internationales. Cette analyse a permis de déterminer leur aptitude aux différents usages.

Structuration de la thèse

Le présent travail s'inscrit dans la continuité des recherches géologiques antérieures et vise à les compléter en approfondissant certaines approches méthodologiques et analytiques. Il s'appuie sur les travaux existants afin d'affiner les résultats obtenus et proposer de nouvelles perspectives. Dans ce cadre, ce projet de thèse est structuré de la manière suivante :

Chapitre 1 : Généralité et Introduction

Ce chapitre, essentiellement introductif, est consacré à une présentation générale, décrivant le contexte de la recherche et mettant en lumière les défis actuels liés à l'évaluation de ressources hydriques dans les zones arides et semi-arides. Il aborde également les différents objectifs de l'étude tout en exposant la problématique de la présente investigation. De plus, il examine les caractéristiques naturelles liées à l'aspect géographique et physiographique de la région d'étude, offrant ainsi un cadre contextuel essentiel à cette recherche.

Chapitre 2 : Hydroclimatologie

Dans ce chapitre, une description approfondie du contexte hydroclimatique est menée, mettant en exergue les paramètres climatiques essentiels tels que la précipitation, la température, l'humidité du sol et de l'air, le vent, et le bilan hydrologique. L'étude s'est focalisée principalement sur des données issues des sources globales, notamment le programme Power de la NASA.

Chapitre 3 : Géologie

Dans cette partie, une description géologique et structurale détaillée liée à la zone d'intérêt a été abordée, où les éléments lithologiques et structuraux susceptibles d'influencer la dynamique et l'écoulement de l'eau ont été mis en évidence. Cette analyse s'est penchée particulièrement sur les caractéristiques lithologiques ainsi que les différentes failles et fractures, qui peuvent influencer la circulation et l'infiltration des eaux.

Chapitre 4 : Hydrogéologie

Ce chapitre est réservé à la caractérisation hydrogéologique, où une description de divers aquifères présents dans la région a eu lieu. Cette description englobe l'identification ainsi que la description de différents aquifères relatifs à notre zone en mettant en relief les caractéristiques hydrodynamiques et hydrogéologiques (perméabilité, débit...).

Chapitre 5 : Géophysique

Ce chapitre présente une description détaillée des paramètres hydrogéométriques issus des sondages électriques verticaux (SEV), incluant notamment les épaisseurs de différents niveaux aquifères ainsi que les résistivités transversales de l'aquifère cambro-ordovicien. Ces données ont été intégrées et exploitées en vue de délimiter les différents aquifères existants ainsi de déterminer les champs propices à l'implantation de forages.

Chapitre 6 : Cartographie des ressources hydriques souterraines

Ce chapitre décrit en détail l'état de l'art des différentes méthodes et modèles adoptés pour la réalisation de cette étude. Ces méthodes appropriées à l'évaluation de la potentialité en eau souterraine impliquent des techniques d'analyse probabiliste indirecte telles que le processus hiérarchique analytique (AHP) et le rapport de fréquence (FR) ainsi que des techniques avancées de l'intelligence artificielle, notamment la forêt aléatoire (Random Forest, RF), les réseaux neurones (Neural Network, NN) et la machine à vecteur de support (Support Vector Machine, SVM).

Chapitre 7 : Hydrochimie

Cette partie se focalise sur l'analyse hydrochimique relative aux aquifères de la région de Tabelbala. Cette action implique un échantillonnage des différents points d'eau afin de déterminer et d'identifier le faciès, la composition et les propriétés chimiques des eaux dans la région considérée. Il est important de souligner que cette caractérisation se limite aux aquifères à nappe libre.

Chapitre 8 : Evaluation de la qualité des eaux

Dans cette partie, nous avons essayé d'évaluer l'aptitude des eaux de la plaine de Tabelbala à l'irrigation ainsi qu'à la consommation domestique. Cette évaluation s'articule autour de l'exploitation d'un ensemble d'outils et de techniques (indices) permettant d'évaluer la qualité des eaux en se basant sur divers paramètres physicochimiques.

En conclusion générale sont présentées les différentes constatations, mettant en lumière le contexte géologique, hydrogéologique et structural qui influe d'une manière directe sur l'estimation qualitative et quantitative de divers aquifères du secteur d'étude.

Chapitre I
Introduction

I. Introduction

La région de Tabelbala se distingue par ses importantes réserves en ressources hydriques et minières, incluant des minéraux tels que le cuivre (Cu), l'argent (Ag), le plomb (Pb), le thorium (TH), l'uranium (U), le manganèse (Mn), le fer (Fe), la baryum (Ba), le bismuth (Bi) (SONAREM, 1977, ORGM EX EREM, 1979). Dans cette région, l'agriculture et l'industrie représentent les principales activités capables de favoriser la stabilisation de la population ainsi qu'au développement durable. Cependant, la gestion des ressources dans cette région saharienne est une tâche ardue, constituant un défi majeur (Zegait, Bensaha and Addoun, 2021) en raison des conditions météorologiques difficiles (conditions extrêmes) ainsi qu'aux contraintes logistiques et humaines significatives.

La cartographie des ressources hydriques réalisée à travers la Télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), combinée à l'intégration des techniques d'analyse multicritères et d'apprentissage automatique joue un rôle essentiel dans l'identification, la gestion, la protection ainsi que l'exploitation du potentiel hydrique des nappes souterraines (Dar, Sankar and Dar, 2011b, Magesh, 2012, Thapa *et al.*, 2017b, Nasir *et al.*, 2018b).

La position géologique stratégique du secteur d'étude confie à celle-ci une particularité notable qui réside dans la variabilité lithologique ainsi que la tectonique intense induisant la mise en place des structures telles que les anticlinaux, les synclinaux et l'apparition des dykes et des sills doléritiques (Fabre, 1976b, IDRES *et al.*, no date). Par ailleurs, la présence des formations qualifiées d'êtres aquifères, telles que les formations gréseuses et les quartzites fortement diaclasés et intensément fracturées, attribuées au Cambro-Ordovicien, à l'Erg Er Raoui et à la nappe de Tabelbala, offrant la possibilité d'identifier de sites favorables aux zones de captages des eaux souterraines.

Les premières investigations hydrogéologiques de la région remontent aux différents travaux de reconnaissance et d'exploration menés dès les années 1940, sous la direction de nombreux chercheurs tels que (Menchikoff, 1930a, Gevin, 1960, Fabre, 1976a) et d'autres. Ces pionniers ont pu dresser la carte piézométrique de la Hamada du Guir, qui a été ultérieurement mise à jour à une échelle plus fine. Par la suite, une série de forages a été réalisée, particulièrement au niveau de plaine de Tabelbala. A cette époque, malheureusement, les données hydrogéologiques étaient très limitées, ce qui a condamné cette région à une absence de prospection pour une longue période.

Par ailleurs, la SONATRACH a entamé un grand projet portant sur la prospection sismique couvrant plusieurs régions du Sahara, nécessitant d'importants moyens logistiques et humains. Ce mégaprojet a été suivi par la réalisation d'un nombre significatif de forages d'exploration et de reconnaissance. Ce programme est toujours en cours de réalisation, et qui a donné des résultats prometteurs.

Il convient de noter que l'intérêt porté aux ressources hydriques souterraines s'est accru à la suite de découverte, dans les années 1950, de divers sites de minéralisation de Tabelbala et du gisement de Gara Djebilet ainsi que sa mise en exploitation. A cette époque, la problématique de l'approvisionnement en eau pour l'usine de traitement du minerai de fer est devenue une préoccupation majeure.

Dans le cadre de cette investigation, notre démarche s'est focalisée sur l'analyse et l'interprétation ainsi que la conception d'une base de données hydrogéologique complète. Cette base donnée regroupe l'ensemble des informations nécessaires à l'identification et à la mise en place des sites potentiels, dans le but de proposer les zones les plus appropriées pour le captage d'eau souterraine. Grâce à cette étude, associée à la cartographie établie, nous visons à formuler des conclusions précises sur la localisation de différentes zones présentant du potentiel hydrique important. Ces résultats pourraient servir du support de base et d'orientation efficace de gestion et d'exploitation durables des ressources hydriques.

II. Présentation de la zone d'étude

La région de Tabelbala est une Daïra située à environ de 150 km au sud-ouest de Béni Abbès et à 400 km au sud de Béchar. Elle s'insère précisément dans la partie occidentale du Sahara algérien. Cette zone a été retenue comme site d'investigation approfondie, en raison de sa position géographique stratégique en tant que zone frontalière, faisant partie du Sahara nord-occidental algérien. Ces limites géographiques s'étendent entre les latitudes Nord 29° à 30°N, et les longitudes Ouest 3° à 5° W, couvrant une superficie d'environ de 12321Km².

Cette entité naturelle se particularise par son paysage unique et sa localisation géographique particulière. En outre, elle est traversée par la fameuse structure désertique du Grand Erg Occidental contribuant à sa particularité unique et qui crée un paysage distinctif.

Le secteur d'étude est constitué d'un ensemble d'Ergs, notamment Erg Er Raoui et Erg El Atchane, et de structures géologiques bien individualisées telles que le synclinal de Kahal Tabelbala, Dj Betouris, Dj Ben Tadjine, et la Hamada de la Daoura. Ces structures géologiques sont orientées NNW-SSE, et situées au N-W du Grand Erg Occidental (fig.1).

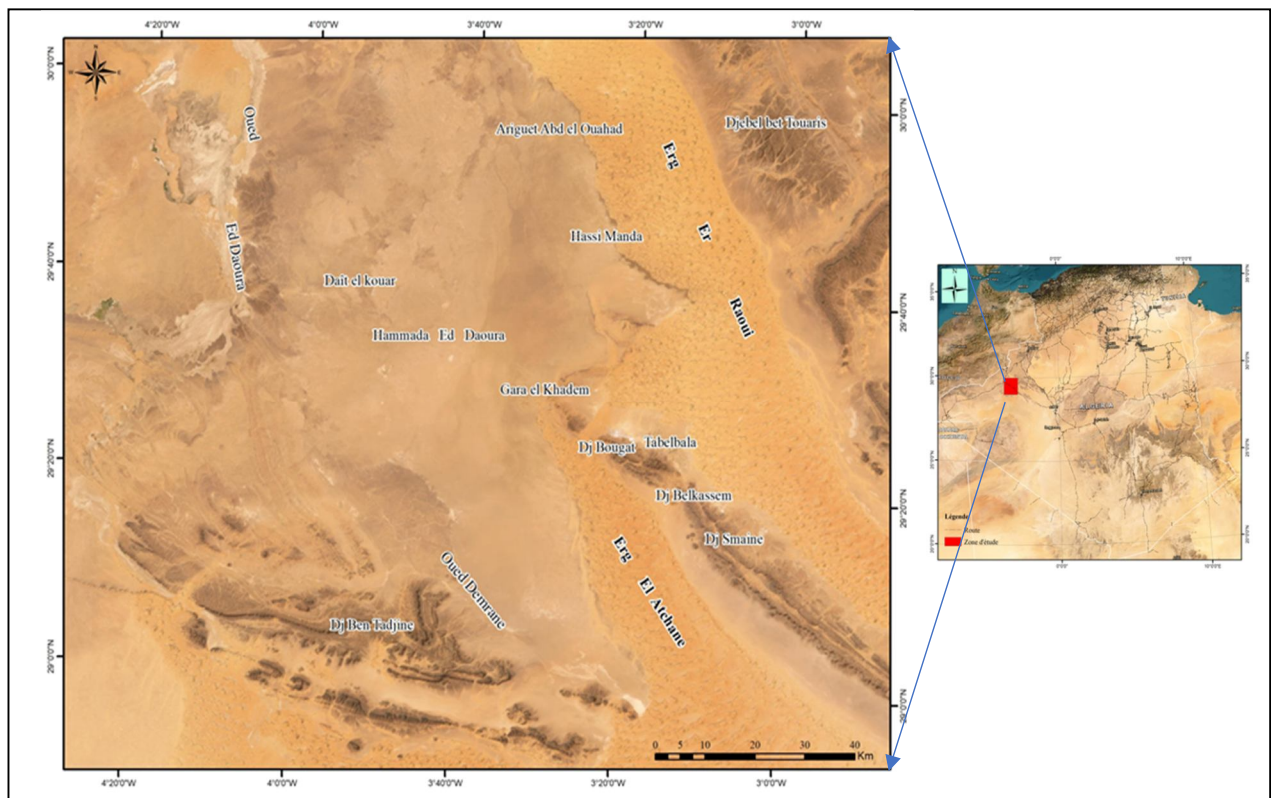


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

Le couvert végétal de la zone est effectivement très réduit, se limitant parfois à quelques palmeraies. Bien que les conditions climatiques de la région soient difficiles et limitent en quelque sorte la biodiversité, le monde animal y est assez varié.

En 2008, la population de la plaine de Tabelbala était estimée à 5448 habitants, selon la donnée recueillie du recensement officiel. D'après les estimations, actualisées fournis par la Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (DPAT) de la wilaya de Beni Abbés en 2024, la population de cette plaine a atteint 6656 habitants¹ (Mabrouk, 2007), enregistrant ainsi une augmentation notable sur une période de 16 ans avec un taux moyen d'accroissement annuel de 1.44 %. En effet, la densité de population demeure extrêmement faible, évaluée à seulement 0.1 habitant par Km² soulignant l'étendue et le faible peuplement de la région. Cette faible densité s'explique probablement par les conditions environnementales difficiles propres au milieu désertique, où les ressources naturelles, en particulier hydriques jouent un rôle clé dans l'organisation et la dynamique de l'habitat.

Les habitants de la région de Tabelbala dépendent largement de l'agriculture et l'élevage pour leur subsistance. Ces deux secteurs sont les principales activités contribuant à l'économie locale. Les différentes cultures telles que la céréale, les fruits, les légumes et les olives sont considérés comme étant les sources de subsistances. Parallèlement, d'autres activités pastorales qui concernent l'élevage de bovin, de chèvres et des moutons constituent des ressources alimentaires et des sources d'emplois pour la population locale. La région en question a été également le lieu de nombreux travaux d'investigation et de recherche dans les domaines minier et pétrolier, ayant un impact significatif sur l'environnement de la zone étudiée.

Les altitudes absolues de la région oscillent entre 402 et 890 mètres, offrant une topographie diversifiée. Le secteur d'étude présente de conditions favorables pour l'observation géologique, notamment aux limites des Djebels, où les surfaces sont recouvertes par des sédiments récents, avec peu d'affleurements de roches en place. En revanche, les zones d'Ergs ne présentent pas d'affleurement discernable à la surface.

La région se particularise par une complexité géologique modérée, mettant en évidence les dépôts du Cambrien inférieur. Les conditions d'accès et d'observations sont favorables, facilitant ainsi les travaux d'exploration. De nombreuses structures majeures marquent notre zone, notamment l'Erg Er Raoui au nord-est, Djebel Kahal Tabelbala à l'est, Djebel Ben Tadjine au sud-ouest et Erg El Atchan au sud.

Du point de vue hydrogéologique, le nombre d'aquifères identifiés dans la région demeure méconnu. Cependant, les différentes zones présentant un intérêt hydrique significatif correspondent principalement aux zones d'affleurement du Cambro-Ordovicien, et du Tertiaire telles que la Hammada de la Daoura, la plaine de Tabelbala, l'Erg Er Raoui, qui abritent des aquifères importants. En raison de leur position géographique et leur contexte géologique et structural, ces aquifères sont caractérisés par leurs couches qui se prolongent vers le sud. Cette disposition favorise un écoulement souterrain orienté principalement dans la même direction, du nord vers le sud.

Le Sahara nord-occidental est doté d'un réseau hydrographique qui demeure généralement sec tout au long de l'année, à l'exception des périodes de fortes précipitations provoquant des crues (fig.2). Ce réseau draine de nombreux bassins hydrographiques

¹ « Population et Emploi ».

autonomes, comprenant les entités hydrologiques telles que la Saoura, la Daoura, le Seggeur, le Namous et le Rharbi, portant les noms de différents Oueds qui les traversent (Conrad, 1984). Au cours de son histoire, la région a traversé des périodes de sécheresse intenses (d'aridité sévère), en particulier durant le Quaternaire moyen et récent. Ce phénomène climatique a entraîné un tarissement et un assèchement progressif de l'écoulement de surface, contribuant ainsi à la dégradation continue du réseau hydrographique au fil du temps (Gautier, 1908),(Augiéras, 1919).

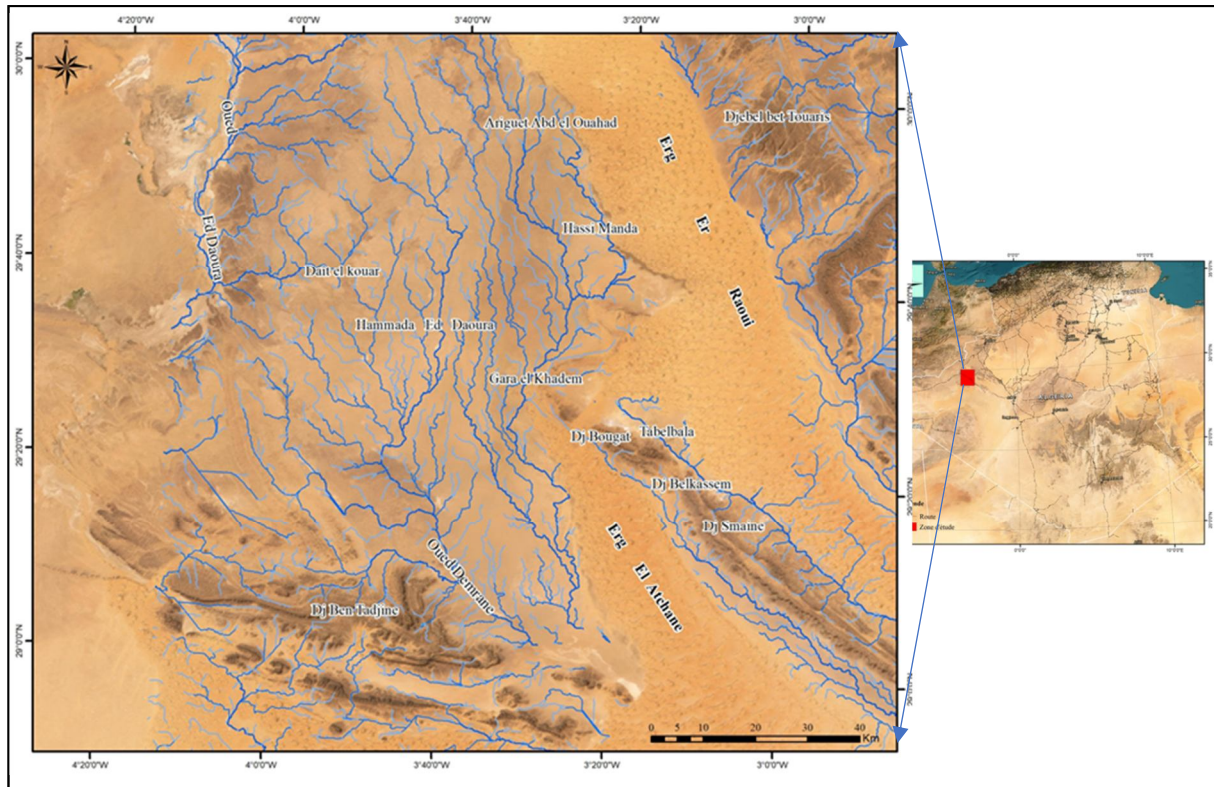


Figure 2 : Réseau hydrographique de la zone d'étude.

Le réseau hydrographique caractérisant la région d'étude est bien marqué dans le paysage, bien qu'il reste généralement sec la plupart du temps. Le principal cours d'eau de la région est celui de la Daoura (Oued Daoura), situé au nord, prend sa source au Maroc. Un autre Oued majeur drainant la région de Tabelbala, contribue à l'alimentation des nappes souterraines qui est à l'origine du développement d'Oued Saoura-Massaoud et du lac de Hassi Maanda (Conrad, 1969b), et ceci par l'eau infiltrée.

Il est important de noter que le modèle du réseau hydrographique pourrait également fournir des informations sur le faciès existant dans la région. En effet, les caractéristiques du réseau hydrographique telles que sa longueur, sa densité et son orientation pourraient apporter des informations sur les caractéristiques lithologiques, physiques et topographiques de la zone étudiée (Hauchard, 2001, Delahaye, 2003). Un réseau hydrographique dense pourrait indiquer une faible infiltration suggérant la présence de roches compactes (fig.3). Ces caractéristiques pourraient servir à l'identification ainsi qu'à la délimitation précise des zones potentielles, des zones d'écoulement ainsi que de zones de recharge (Nag and Chakraborty, 2003).

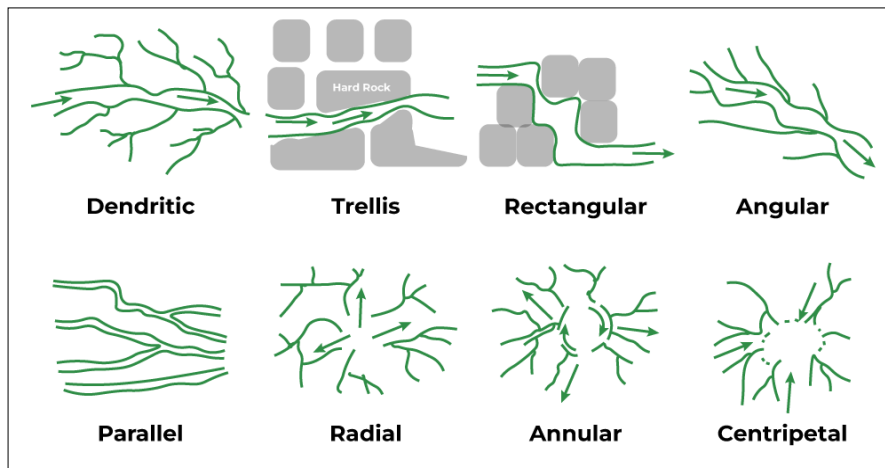


Figure 3 : Modèles de drainage reconnaissables sur les images satellites (Howard, 1967).

Le choix de la zone d'étude n'est pas fortuit, mais repose sur des arguments solides liés à la forte demande en eau, que ce soit destiné à l'alimentation en eau potable ou à l'irrigation. Par ailleurs, l'absence et la disponibilité limitée totales ou partielles de l'information géologique (carte, document géologique, rapport...), hydrologique, hydrogéologique dans cette zone renforcent l'intérêt pour une étude approfondie dans la région. Ces deux facteurs principaux font de cette zone un lieu d'étude particulièrement patient.

1. Unités géomorphologiques

La région que nous venons de décrire, est caractérisée principalement d'une configuration géomorphologique diversifiée et un paysage varié, comprenant une combinaison de Hamadas (formations calcaro-gréseuses), de géant Ergs et de relief ayant une orientation particulière nord-ouest sud-est, façonnée par l'orogénèse hercynienne.

1.1 Les Ergs

C'est une structure imposante de dune de sable qui confère une dimension majestueuse au paysage. Leur mise en en place, résulte de la désagrégation d'anciens grès sous l'effet de conditions climatiques hyperarides. Par la suite, les vents transportent leurs accumulations dans les dépressions (domaine éolien) propices à l'apparition des systèmes dunaire (Merzougui *et al.*, 2021a). Situé entre les monts de l'Ougarta et le Kahal Tabelbala, l'Erg Er-Raoui s'étend d'Oglat Beraber, au nord-ouest, jusqu'à Oued El-Tseibat, au sud-est (fig.4). Cette unité géomorphologie emblématique illustre parfaitement l'action du vent dans la formation et la transformation du paysage désertique.

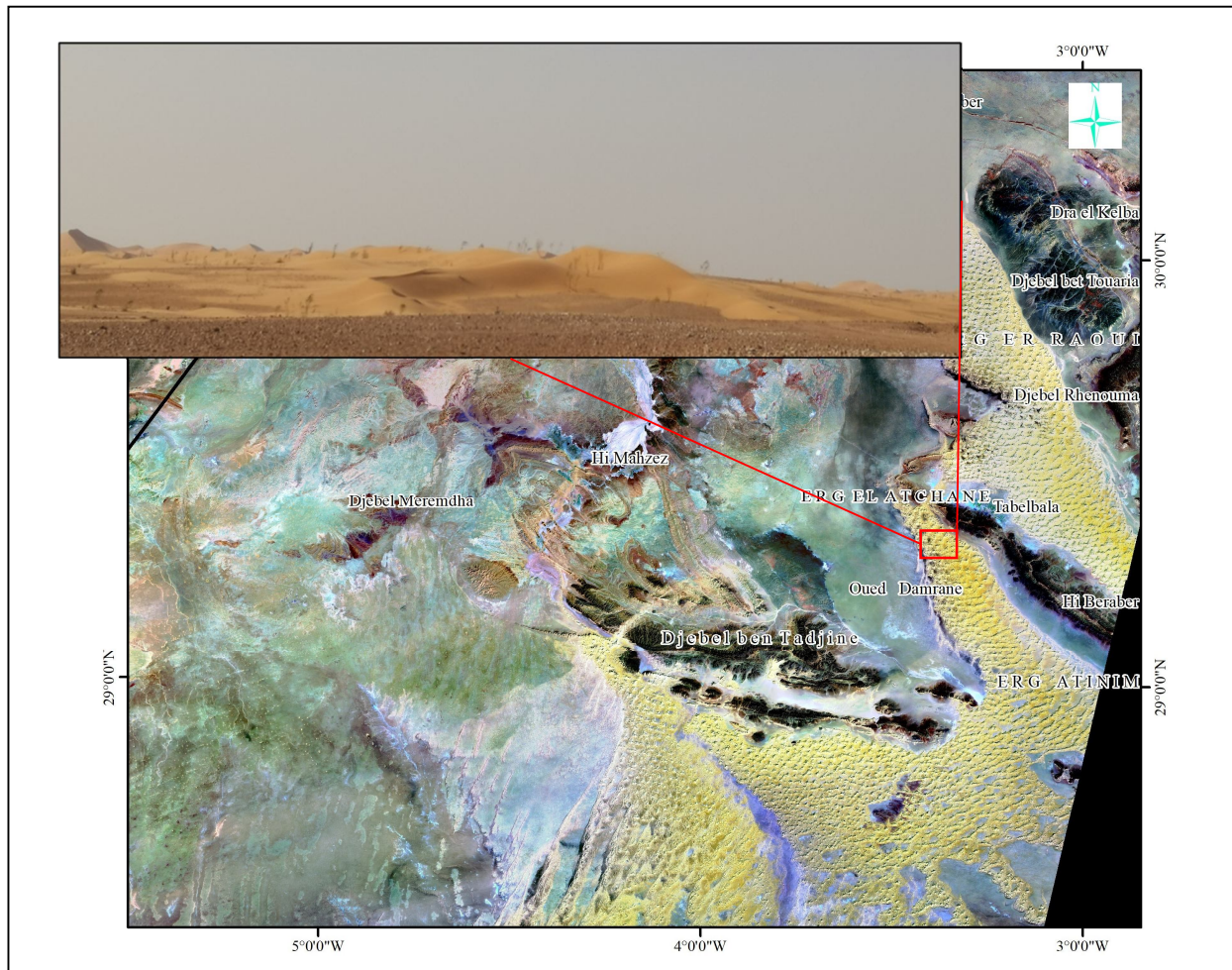


Figure 4 : Planche photographique montrant Erg Er Raoui.

Il s'agit d'une forme d'accumulation sableuse spectaculaire, caractérisée par un édifice dunaire orienté NNE-SSW et couvrant une superficie d'environ 10 000 Km²(fig.5). Ces édifices dunaires alignés sont légèrement jointés dans leur partie nord, où les Gassi ne présentent que de très rares ravins, une structure rappelant celle de la partie occidentale du Grand Erg occidental. En outre, au sud, ces édifices deviennent plus espacés, laissant apparaître des structures sous forme de Gours, une particularité paysagère caractéristique de la partie méridionale d'Erg-Er Raoui (Yahiaoui, 1992a). La végétation éphémère, telle que l'Aâchab, est le type de végétation adaptée au climat de l'Erg, dont sa densité est influencée principalement par le taux de précipitation (Mabrouk, 2007). Ce type de végétation contribue largement la diversité ainsi à l'équilibre de l'écosystème local en s'adaptant aux conditions climatiques extrêmes des régions désertiques.

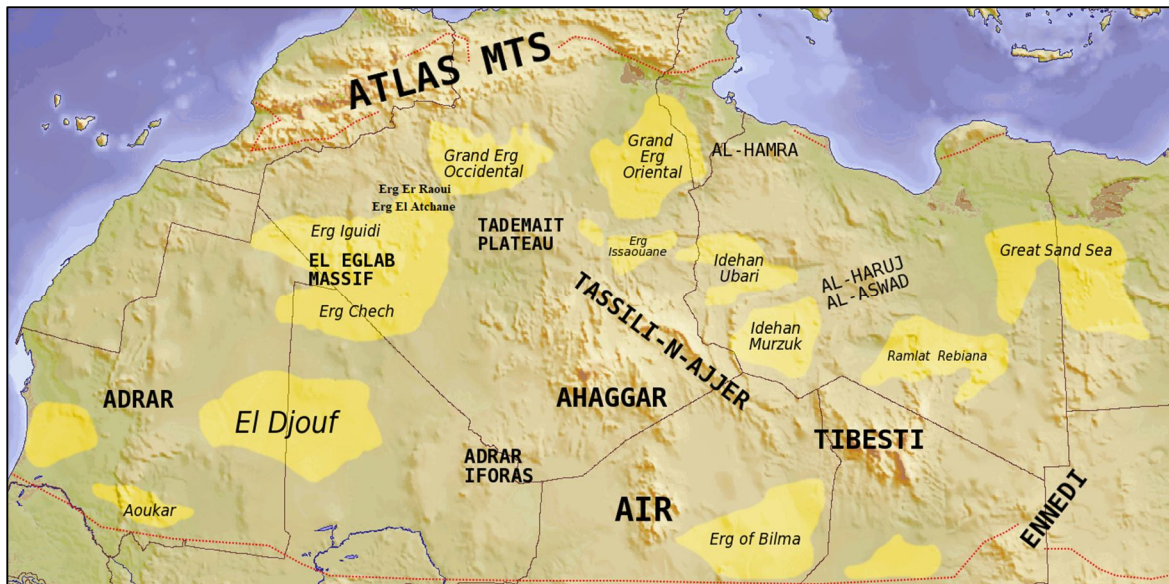


Figure 5 : Répartition spatiale des différents Ergs dans le Sahara Algérien².

Au sud-Ouest de la structure de Kahal Tabelbala s'allonge un vaste système de dune de sable, formant l'Erg El Atchane. Ce massif dunaire est dépourvu en ressource hydrique souterraine et se particularise par son étendue particulière. Cependant, au nord-est de la région, se manifeste une structure d'accumulation sableuse correspondant au grand Erg occidental, s'étalant sur une superficie qui avoisine les 100000 Km². Ce système ne possède aucune surface de sable libre.

L'Erg Chech est considéré comme la forme d'accumulation sableuse la plus célèbre (Conrad, 1969b), il s'étend jusqu'au Tanezrouft (fig.5). Ce dernier présente des cordons dunaires méticuleusement structurés, entrecoupés par des structures linéaires rocheuses (Dubief, 1953a). De nombreux travaux de recherche visant à comprendre les spécificités de cette unité géomorphologique unique et sa genèse.

1.2 Les Regs

Les Regs sont l'une des formes géomorphologiques les plus répandues dans le Sahara algérien. Ils se caractérisent par des vastes étendues horizontales souvent recouvertes par débris de granulométrie variable (Mabrouk, 2007). Par ailleurs, le Reg de Tanazrouft est considéré comme étant le Reg le plus fameux s'étalant du sud de Reggane à l'Adrar des Iforas, bordant l'Ahnet et le Hoggar à l'est. En raison de sa vaste étendue et de la variété lithologique qu'il présente, le Reg de Tanazrouft pourrait être considéré comme l'une des unités géomorphologiques les plus marquantes au désert algérien. Au nord-est de Tibesti et du Hoggar, les Regs sont communément appelés 'Serirs' (Conrad, 1969b).

1.3 Les Hamadas

Les Hamadas correspondent à des plateaux rocheux caractéristiques du désert saharien. Ils se particularisent par des entités particulières le long d'une étendue appelée 'Hamada tertiaire' constituée de calcaire gréseux (fig.6). Sur cette unité géomorphologique se manifeste

² « Welcome to Sahara Overland | Sahara Overland ».

un paysage où une végétation permanente dense prend forme au niveau de Daïas et de vallées sèches reliant certaines dépressions (Merzougui, Rezzoug and Abderahmane, 2022a). La végétation éphémère, quant à elle, dépend étroitement des précipitations.

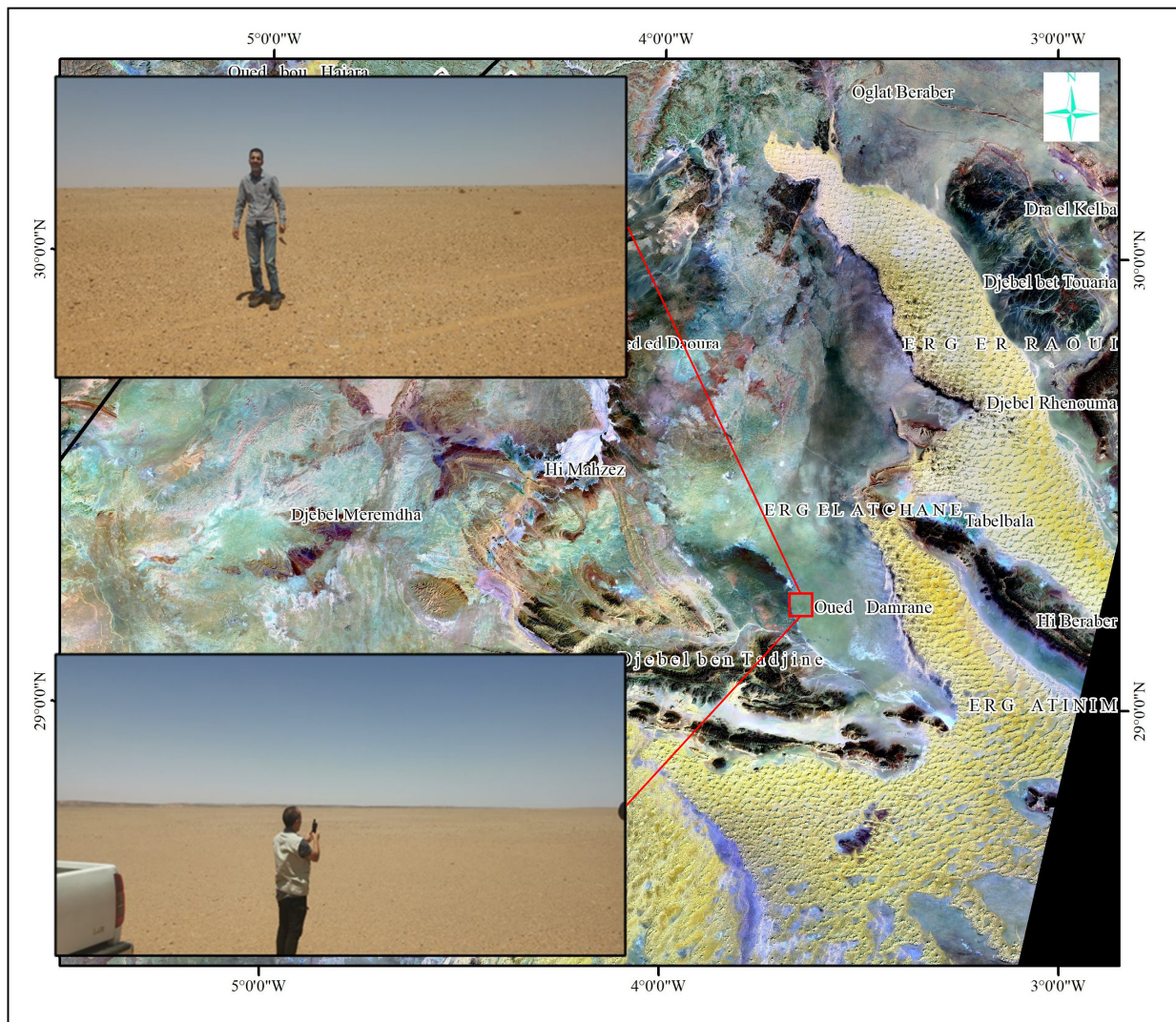


Figure 6 : Planches photographiques montrant la Hamada de Tabelbala.

1.4 Les Sebkhass et Vallées

En raison de l'existence d'un inféoflux dans les alluvions (Domaine fluvial et lacustre (fig.7)), les vallées des grands Oueds ainsi que leurs affluents abritent une végétation permanente, bien qu'elles soient rarement inondées, à l'exception des régions qui sont extrêmement arides. Un couvert végétal est également fréquemment observé au niveau de Sebkhass, où il persiste grâce à la présence d'une nappe salée peu profonde. Durant le Quaternaire, ce couvert végétal a joué un rôle déterminant en offrant un environnement favorable aux déplacements humains (Mabrouk, 2007).



Figure 7: Planche photographique montrant les dépôts lacustres de la Sebkhha.

1.5 Les Daïas

Correspondent à des formes karstiques particulières, généralement développées au niveau des plateaux calcaires associés aux Hamadas du Sahara septentrional au cours des périodes pluviales du plio-quaternaire (Mabrouk, 2007). Les Daïas du Sahara septentrional sont caractérisés par une structure et une morphologie relativement complexe, en raison, d'une part, de la diversité des assises sédimentaire constituant les plateaux calcaires sur lesquels elles se forment, et d'autre part, de la durée prolongée de l'action karstique à travers différentes époques, dont les effets se sont cumulés au fils de temps. Les Daïas du Sahara Septentrional présentent une grande diversité liée particulièrement à la variation des structures sédimentaires des plateaux calcaires. Il existe de Daïas anciennes, apparues dès la fin de la sédimentation néogène, et de Daïas plus récentes, poste-Villafranchien, et qui se sont manifestées sur les surfaces calcaires des petites Hamadas.

2. Occupation du sol

La région d'intérêt présente une diversité significative dans les classes d'occupation du sol, traduisant et reflétant ainsi les caractéristiques du milieu désertique aride ayant un impact direct sur l'évaluation des ressources hydriques. Cette diversité revêt d'une importance capitale dans les zones arides où l'eau est une ressource rare et précieuse.

La compréhension de la distribution de différentes classes d'occupation des sols pourrait être un paramètre clé d'identification des zones où l'eau est susceptible d'être présente, ainsi que les zones où elle est moins disponible.

Etant donné la disponibilité des données spatiales de qualité et en quantité suffisante dans notre zone, nous avons opté pour une classification supervisée afin d'élaborer la carte d'occupation du sol. Cette approche, largement connue et couramment utilisée dans les études similaires, nous a permis d'exploiter efficacement les informations fournies par les images Sentinel 2. Plus précisément, nous avons choisi la méthode de maximum de vraisemblance qui s'articule sur des principes statistiques robustes. En croisant ces informations avec une interprétation visuelle des données images, différentes classes d'occupation ont été identifiées (fig.8). Cette technique estime la probabilité d'un pixel soit attribué à une classe spécifique en s'appuyant sur ses caractéristiques spectrales observées, tout en intégrant la distribution statistique des données. Elle se caractérise principalement par sa pertinence, notamment dans

les zones où les classe présentant une variabilité spectrale (signatures spectrales bien différenciées).

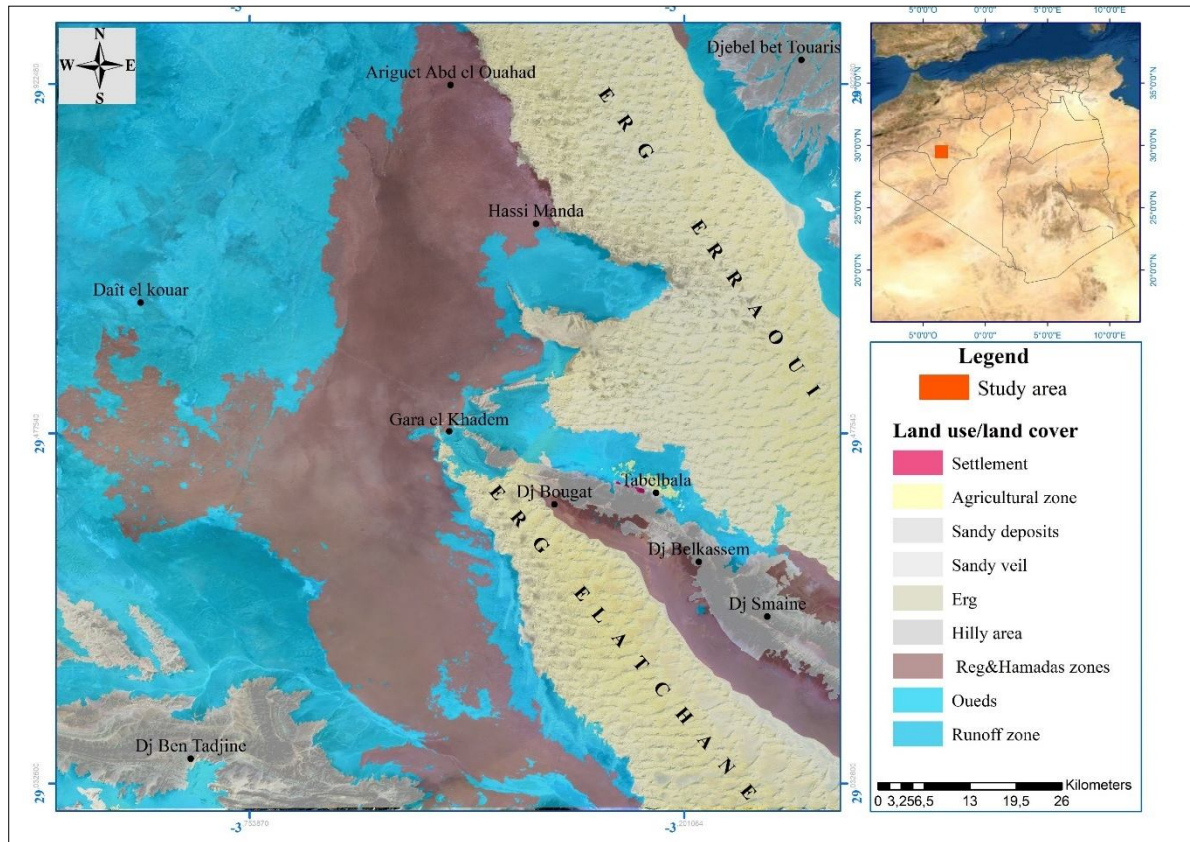


Figure 8 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude.

L'analyse de l'occupation du sol par classification est jugée pertinente lorsque l'indice statistique Kappa (basé sur la matrice de confusion utilisée pour évaluer la précision de classification) se situe entre 50 et 70 %. Dans la zone examinée, le calcul de la matrice de confusion a abouti à un coefficient de Kappa compris entre 0.90 et 0.92, ce qui indique une classification très précise et des résultats fiables en termes d'occupation du sol. Cette carte a permis de mettre en évidence neuf classes d'occupation du sol, chacune couvrant des pourcentages variés de la superficie globale de la région considérée (fig.9). La classe prédominante correspond aux zones de ruissellement, représentant 35,01 % de la superficie totale. Ensuite, les zones de Reg et Hamada occupent 27,65 %, suivies par les zones d'Erg avec 26,56 %. Les autres classes incluent les zones de relief (10,26 %), les zones d'Oued (0,27 %), les dépôts sableux (0,13 %), les zones agricoles (0,106 %) et les voiles sableux (0,002 %).

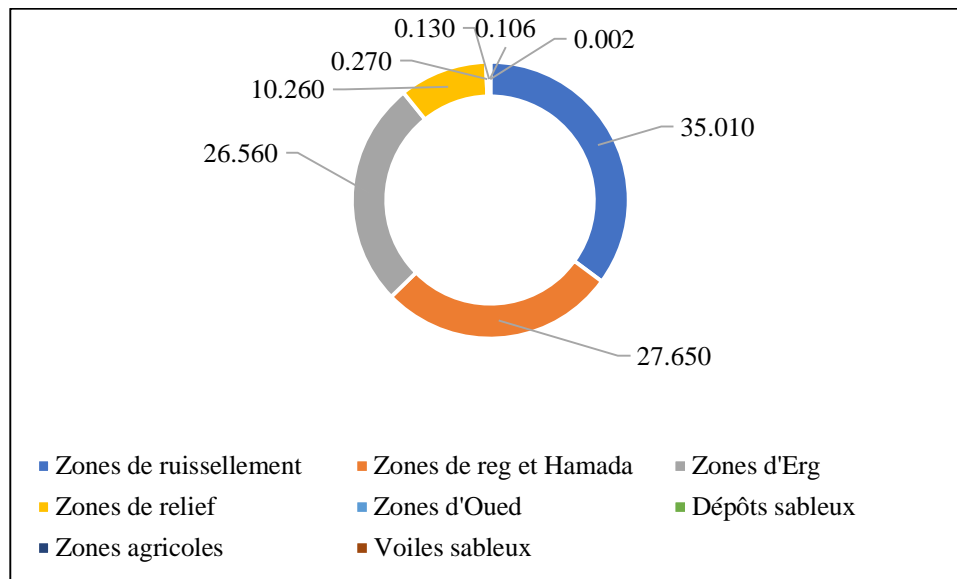


Figure 9 : Pourcentages de différentes classes d'occupation du sol de la zone d'étude.

III. Acquisition des données satellites

1. Télédétection et analyse des données

La télédétection, dans son acception la plus large, regroupe l'ensemble des techniques et méthodes permettant de collecter des informations sur un objet ou un phénomène à distance, sans contact direct. Ces techniques reposent essentiellement sur l'utilisation d'instruments technologiques spécifiques. Elle offre de nombreuses possibilités, notamment la discrimination, la délimitation, la reconnaissance de formes, la classification et la quantification des éléments observés. Ces procédés se concentrent principalement sur l'étude des phénomènes liés aux ondes électromagnétiques.

Les éléments constituant l'écorce terrestre, tels que les roches, les sols, la végétation et les masses d'eau, ainsi que les structures ou objets qui les recouvrent, interagissent de manière spécifique avec les ondes électromagnétiques. Ils peuvent absorber, réfléchir ou émettre (fig.12) une certaine quantité d'énergie, laquelle varie en fonction de plusieurs facteurs tels que la longueur d'onde, l'intensité du rayonnement incident, les propriétés intrinsèques des objets et leur position relative par rapport au soleil ou à toute autre source d'éclairage. Ces interactions, propres à chaque type de matériau ou objet, constituent la base de l'analyse en télédétection et permettent d'extraire des informations détaillées sur les caractéristiques et les dynamiques des surfaces terrestres.

Le rayonnement électromagnétique représente une forme d'énergie capable de se propager dans l'espace tout en interagissant avec la matière (fig.10). Cette énergie se manifeste sous la forme d'ondes électromagnétiques, résultant de la combinaison dynamique de deux champs : un champ électrique E et un autre magnétique B . Ces champs oscillent perpendiculairement l'un par rapport à l'autre ainsi qu'à la direction de propagation de l'onde, générant par la suite un mouvement ondulatoire harmonieux.

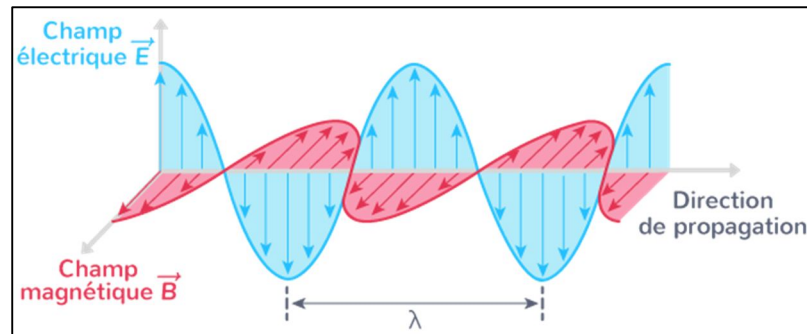


Figure 10 : Onde électromagnétique³.

Les principales grandeurs physiques associées à une onde électromagnétique sont la période T (en seconde), la fréquence f (en hertz), la longueur d'onde λ (en mètres) et la célérité c (en mètre par seconde). Ces paramètres sont liés par la relation suivante :

$$\lambda = c * T = c/v \quad (1.1)$$

La génération de ces ondes électromagnétiques découle des variations couplées du champ électrique et magnétique, qui se propagent mutuellement au cours de leur déplacement. Ces ondes couvrent un spectre très étendu, allant des ondes radio aux rayons gamma. Chaque portion du spectre présente des propriétés spécifiques ainsi que des interactions distinctes avec la matière.

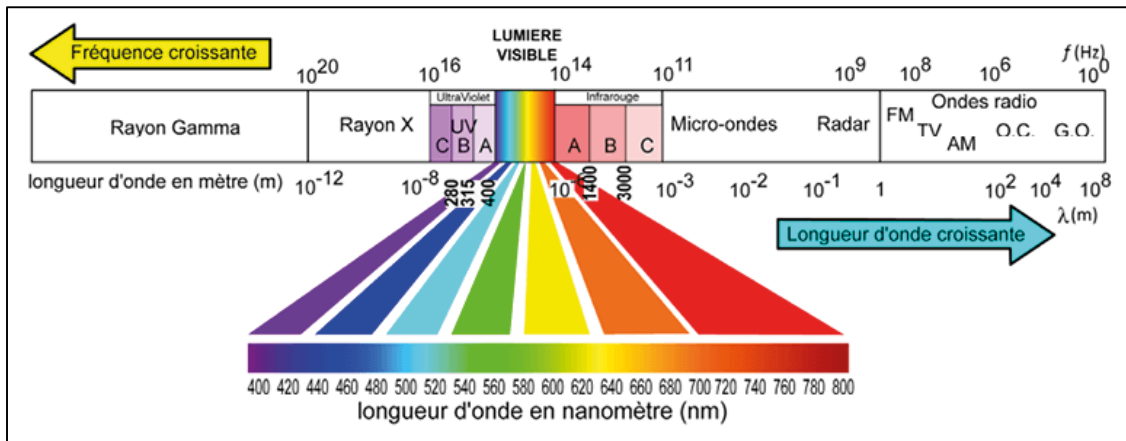
La fréquence d'une onde électromagnétique correspond au nombre d'oscillations complètes effectuées en une seconde. Exprimée en hertz (Hz), elle constitue une caractéristique fondamentale permettant de différencier les différents types d'ondes électromagnétiques.

Actuellement, les capteurs et détecteurs disponibles ne sont sensibles qu'à certaines plages du spectre électromagnétique. Cette sensibilité limitée s'explique notamment par les propriétés de transmissions de l'atmosphère terrestre, qui agit comme un filtre naturel.

En effet, l'atmosphère n'est transparente qu'à certaines bandes du spectre, laissant passer certaines ondes tout en absorbant d'autres. En télédétection, ce phénomène détermine les domaines spectraux utilisables pour l'observation. A ce jour, quatre principaux domaines du spectre électromagnétique sont couramment exploités (fig.11) :

- Le visible : domaine perceptible par l'œil humain, généralement compris entre 0.4 et 0.7 micromètre (μm) ;
- L'infrarouge proche et moyen : utilisé pour l'étude de la végétation, de l'humidité des sols et d'autres paramètres environnementaux ;
- L'infrarouge thermique : essentiel pour mesurer des températures de surface et de la surveillance des phénomènes thermiques ;
- Les micro-ondes : permettent l'observation de jour comme de nuit, même à travers la couverture nuageuse, ce qui les rend particulièrement utiles pour les applications radar.

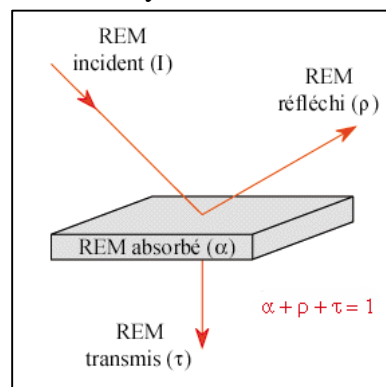
³ « Ondes électromagnétiques ».



2. Interaction énergie matière

Lorsque l'énergie entre en contact avec la matière, elle peut être absorbée (A), réfléchie (R) ou transmise (T), conformément à la loi de Kirchhoff. La figure ci-dessous (fig.12) illustre le comportement de l'énergie solaire incidente lors de son interaction avec la matière. Cette interaction se traduit par divers phénomènes physiques tels que l'absorption, la transmission, la réflexion, la réfraction, et la diffusion. Ces mécanismes sont fondamentaux pour comprendre et exploiter les données issues de télédétection, où les propriétés de réflexion et de réflectance jouent un rôle déterminant dans l'interprétation des signaux reçus par les capteurs.

- *Émission* : Tout corps dont la température thermodynamique est supérieure au zéro absolu (0 K, soit -273 °C) émet un rayonnement électromagnétique résultant de l'agitation thermique de ses molécules.
- *Absorption* : lorsqu'un corps est exposé à une énergie rayonnante, il peut en absorber une partie, ce qui entraîne une augmentation de son énergie interne (fig.12).
- *Transmission* : Lorsqu'un corps est exposé à une énergie rayonnante, une partie de cette énergie peut traverser le matériau sans n'être absorbée ni réfléchie. Ce phénomène dépend principalement des propriétés optiques du matériau, notamment de sa transparence et de sa perméabilité au rayonnement.



⁴ « e15cb251-0b85-4abc-802f-2317730f347d (772×299) ».

⁵ « Interactions rayonnement ».

- **Réflectance** : elle correspond à la fraction de l'énergie réfléchiée par un objet par rapport à l'énergie totale reçue. Elle joue un rôle important dans la perception des couleurs, particulièrement dans le domaine du visible ($0,38 \mu\text{m}$ à $0,70 \mu\text{m}$), qui correspond à la plage sensible de l'œil humain (Girard M.-C. et Girard C.-M., 1989). La réflectance varie en fonction de la composition physico-chimique de l'objet, influençant ainsi la qualité et la quantité de la lumière réfléchiée.
- **Réflexion** : lorsqu'un cor reçoit de l'énergie provenant d'une source externe, il peut en réfléchir une partie. Ce phénomène, fondamental en télédétection, fondamentale en télédétection, se décline en deux types principaux (fig.13) :
 - **Réflexion spéculaire** : elle se produit sur une surface lisse, où l'énergie est réfléchiée dans une direction unique, conformément à la loi de Descartes selon laquelle l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence (fig.13(a)).
 - **Réflexion diffuse** : elle se manifeste généralement sur une surface rugueuse, où l'énergie est diffusée dans plusieurs directions, indépendamment de l'angle d'incidence (fig.13(b)).

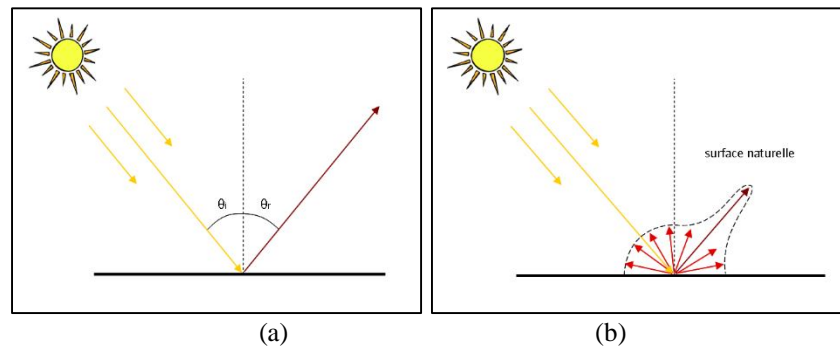


Figure 13: Réflexion spéculaire (a) et réflexion diffuse⁶ (b)

- **Réfraction** : La réfraction désigne la déviation d'un rayonnement lorsqu'il traverse un milieu semi-transparent (fig.14). Ce phénomène s'observe notamment lors du passage de lumière de l'air à l'eau, ou inversement, en raison de la différence de vitesse de propagation du rayonnement entre ces deux milieux.

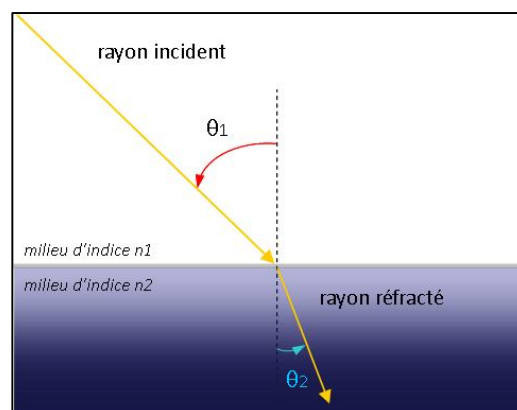


Figure 14: Réfraction du rayonnement dans des milieux différents⁷.

⁶ « Réflexion ».

⁷ « Réfraction ».

- *Diffusion* : lorsqu'un rayonnement traverse un milieu, les particules rencontrées agissent comme des sources secondaires en réémettant l'énergie dans toutes les directions.

3. Sources et caractéristiques de données de télédétection

Les capteurs utilisés en télédétection, ainsi que les données qu'ils produisent, peuvent être classés selon plusieurs critères. Bien que cette partie n'ait pas pour objectif d'offrir une liste exhaustive, elle met en lumière certains critères particulièrement pertinents pour cette recherche. Les capteurs passifs détectent le rayonnement électromagnétique émise ou réfléchi par des sources naturelles, tels que le rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre, ou encore le rayonnement thermique émis par les objets selon leur émissivité. Ces instruments sont largement utilisés lorsque des sources naturelles de lumière ou de chaleur sont disponibles. Toutefois, leur efficacité est limitée en l'absence d'éclairage naturel, ce qui constitue une contrainte dans certaines conditions d'observation.

A l'inverse, les capteurs actifs disposent de leur propre source d'énergie. Ils émettent un rayonnement électromagnétique puis enregistrent l'énergie réfléchi par les objets imagés. Ils présentent ainsi l'avantage de fonctionner indépendamment des conditions d'éclairage naturel.

Dans le cadre de cette étude, les caractéristiques des capteurs et des données satellitaires ont été choisies en fonction des exigences spécifiques liées à la cartographie envisagée, ainsi qu'à l'échelle finale fixée au 1/200000, afin de garantir une précision adéquate et une couverture adaptée à l'étendue de la zone d'étude. Pour répondre à ces exigences, nous avons retenu des données librement accessibles, issues du satellite américain Landsat8 OLI (fig.15).

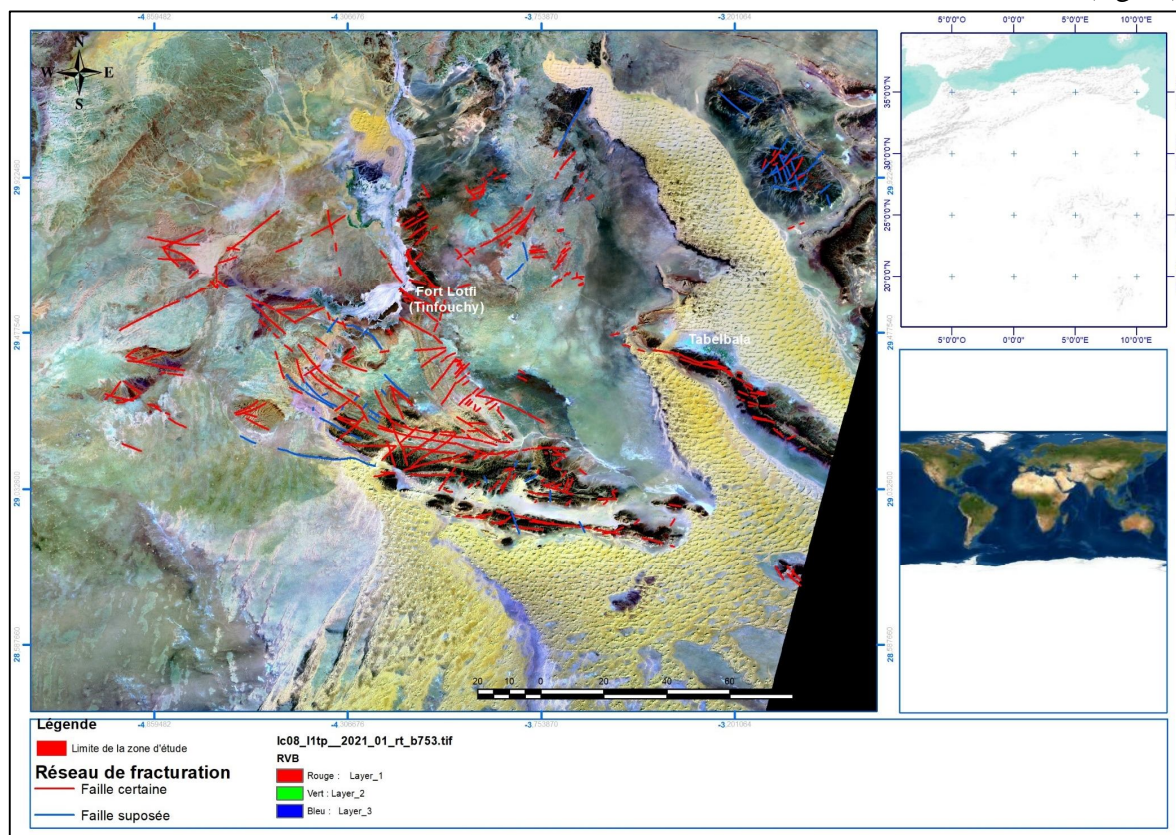


Figure 15: Image Landsat 8 (OLI) en composition colorée 843, Mosaique d'images (LC08_LITP_199039_20211013_20211019_01_T1/LC08_LITP_199040_20211013_20211019_01_T1, LC08_LITP_200039_20211020_20211022_01_RT/LC08_LITP_200040_20211020_20211022_01_RT)

Ces données offrent une résolution spatiale de 30 m en mode multispectrale et 15 m en mode panchromatique, avec une largeur de fauché de 185 km sur 185 Km (Tab.1). Cette particularité permet d'obtenir une vue synoptique particulièrement adaptée à l'importante extension spatiale de la zone d'étude, estimée à environ 34000 Km². La zone d'étude est couverte par quatre scènes d'images Landsat 8 (OLI), présentant les spécifications suivantes.

Tableau 1: Caractéristiques des bandes des capteurs Sentinel 2A et Landsat 8 OLI⁸.

Sentinel2 Band N°	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial Resolution (m)	Landsat OLI Equivalent band (Wavelength/Resolution)
B1	443	20	60	Aerosols (0.43-0.45/30)
B2	490	65	10	Bleu (0.45-0.51/30)
B3	560	35	10	Green (0.53-0.59/30)
B4	665	30	10	Red (0.64-0.67/30)
B5	705	15	20	-
B6	740	15	20	-
B7	783	20	20	-
B8	842	115	10	NIR (0.85-0.88/30)
B8A	865	20	20	
B9	945	20	60	-
B10	1380	30	60	Cirrus (1.36-1.38/30)
B11	1610	90	20	SWIR (1.57-1.65/30)
B12	2190	180	20	SWIR (2.11-2.29/30)

3.1 Données Sentinel

Nous nous sommes également basés sur les données des satellites européens Sentinel 1 et Sentinel 2, librement accessibles aux l'utilisateur. Ces satellites s'inscrivent dans le cadre du programme *Copernicus*, initié par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en 2001, sous l'appellation *Global Monitoring for Environment and Security (GMES)*, puis rebaptisé *Copernicus* en 2012. Ce programme vise le déploiement d'une série du satellite Sentinel dédiés à l'observation de la terre.

Un ensemble d'images satellites Sentinel 2, acquises à différentes dates, a été exploité dans cette étude (fig.16). Leur traitement, leur analyse et leur interprétation ont permis d'extraire des informations précises sur la lithologie et les structures géologiques. Afin d'optimiser le processus d'analyse et d'automatiser les différentes étapes de calculs, une chaîne de traitement d'images a été mise en place. Pour garantir une résolution spatiale homogène de 10 m sur l'ensemble des bandes spectrales de Sentinel 2, un rééchantillonnage par convolution cubique a été appliqué, afin d'assurer la cohérence et la précision d'analyse géospatiale.

⁸ « https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt_science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con. ».

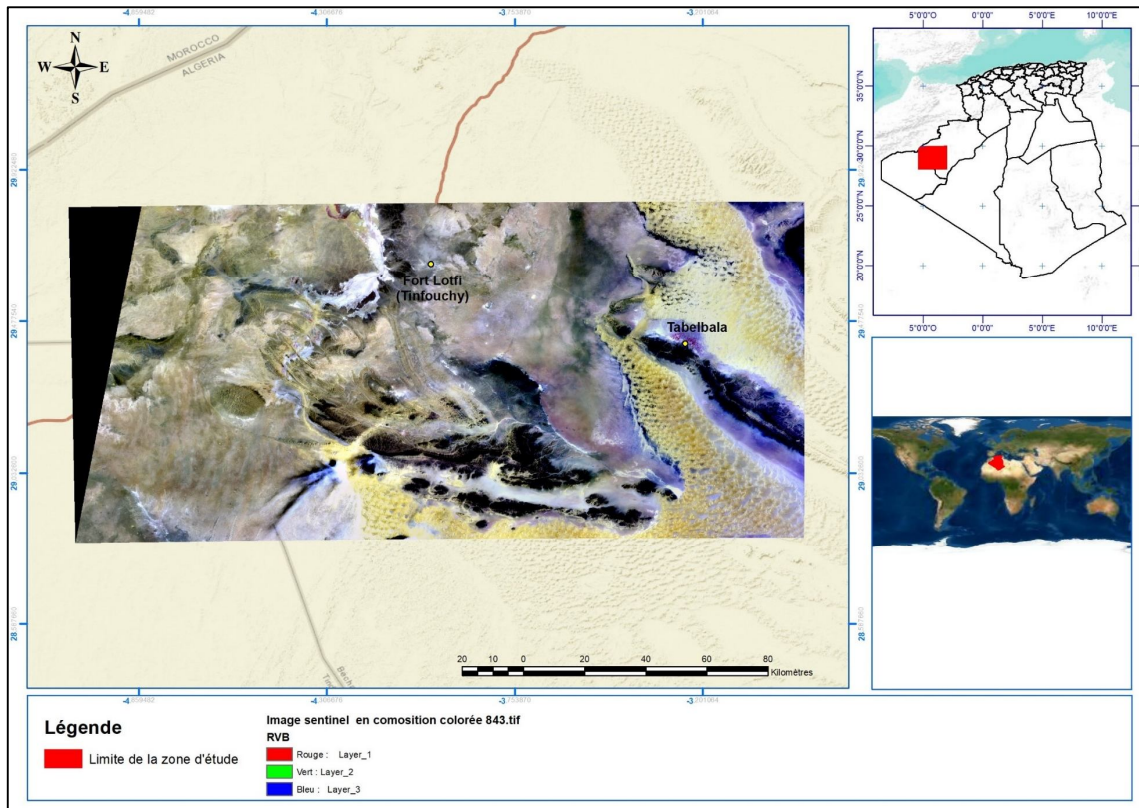


Figure 16: Image Sentinel 2 en composition colorée 843.

L'utilisation d'image satellite constitue une étape incontournable en géoscience pour l'analyse de la configuration géologique, géomorphologique, hydrogéologique et structurale. Elle repose principalement sur de nombreuses techniques de traitement et d'analyse, permettant d'extraire un volume important d'information avant leur exploitation. Dans cette étude, un ensemble d'images acquises à différentes dates été utilisé afin d'en extraire des informations utiles. Pour optimiser leur valorisation, de nombreux traitements numériques ont été appliqués.

Parmi ces dernières, la visualisation d'image en fausse couleur (trichromie) consiste à attribuer les couleurs primaires à différentes bandes spectrales selon l'objectif recherché (fig.17. (A)) et (fig.17. (B)). Le choix des combinaisons spectrales repose sur l'Indice du Facteur Optimum (OIF), indicateur statistique permettant d'identifier la meilleure combinaison de trois bandes en maximisant l'information utile et en minimisant la redondance. Cette méthode améliore considérablement la discrimination des formations géologiques et hydrogéologiques selon leur signature spectrale.

Une des techniques adoptées pour la création de nouveaux canaux est l'analyse en composante principale (méthode statistique). Cette dernière est couramment utilisée dans le traitement d'image afin de réduire et de condenser le volume d'information réparti sur les différentes bandes spectrales de l'image satellite (fig.17. (D)). De nouvelles composantes (pseudo-canaux) issues de cette méthode conservant jusqu'à 97 % des données originales renfermant de l'information utile tout en minimisant les corrélations entre les données initiales. Cette technique est couramment utilisée dans les applications géologiques.

La conversion des couleurs du modèle RVB (rouge, vert, bleu) vers le modèle ITS (intensité, teinte, saturation) représente une autre méthode de traitement favorisant une meilleure discrimination de couleurs dans une image satellite. Elle améliore les contrastes et

permet de différencier les formations lithologiques en dissociant trois composantes principales l'intensité (I), la teinte (T) et la saturation (S), notamment les terrains sédimentaires et ignés. Cette transformation permet d'offrir une meilleure mise en évidence des variabilités spectrales des différentes formations géologiques.

Les rapports des bandes également appelés traitements en ratio consistent en des combinaisons de deux ou plusieurs canaux spectraux permettant l'extraction de l'information spécifique sur l'objet étudié. Cette technique repose particulièrement sur les variations de réflectances entre différentes bandes spectrales pour la même cible. Ces rapports sont obtenus généralement en divisant une bande par une autre, ce qui contribue à atténuer les effets de variations topographique et atmosphérique susceptibles d'altérer la qualité de l'image. Dans la région considérée, le terrain accidenté dans certaines zones constitue une contrainte pour l'interprétation spectrale, afin de réduire cet effet, l'exploitation de rapport de bandes $b7/b3(R)$ $b5/b2(G)$ $b4/b7(B)$ a amélioré le contraste et facilité la séparation des faciès géologiques, permettant une meilleure discrimination lithologique (fig.17. (C)).

En fin, l'application de filtrage directionnel constitue une technique essentielle en télédétection appliquée à la géologie et à l'analyse structurale. Son principe de fonctionnement repose sur l'amplification des discontinuités orientées selon des directions particulières. Ce type de traitement est principalement utilisé afin d'améliorer les contrastes et de mettre en évidence les structures linaires associées aux formations géologiques, facilitant ainsi l'analyse structurale (fig.17(E)) et (fig.17(F)). Dans le cadre de cette étude, cette approche a permis d'accentuer les différentes structures linéaires, de tous types confondus.

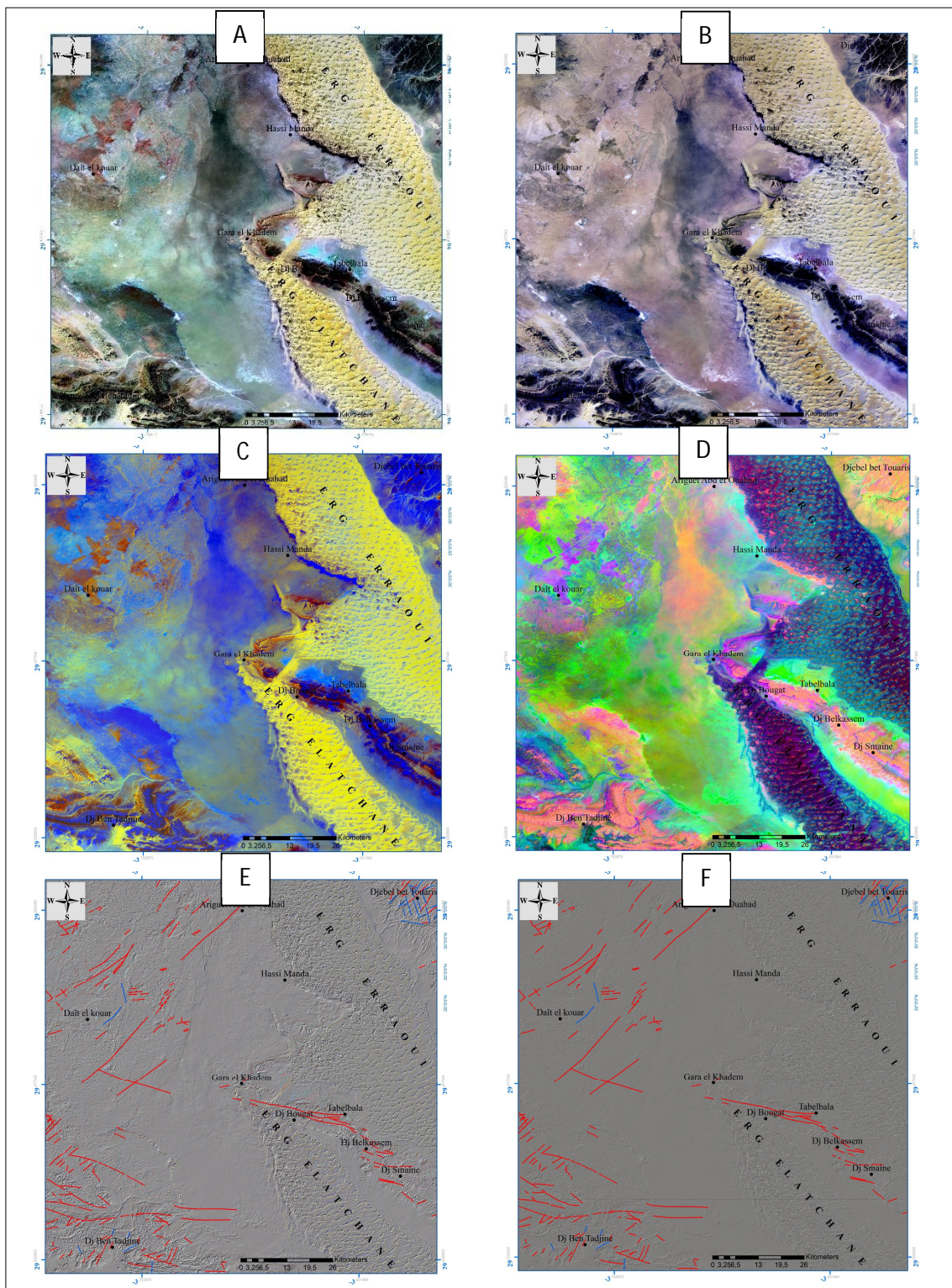


Figure 17:(A) Composition en fausse couleur de Landsat 8 OLI : b7(R) b5(G) b4(B), (B)Composition en fausse couleur de Sentinel 2 b8(R) b4(G) b3(B), (C) Rapport des bandes Landsat8 OLI : b7/b3(R) b5/b2(G) b4/b7(B), (D) Analyse en composante principale Landsat8 OLI P1, P2, P3 (E) Filtre Landsat8 OLI à 45° (F) Filtre Sentinel 2 à 45°

3.2 Utilisation des données radar (Données Sentinel 1)

Dans les régions arides, l'image radar se révèle sensible aux variations topographiques et permet de distinguer les formes géomorphologiques. Le satellite Sentinel 1, doté d'un cycle de revisite de 12 jours et une orbite quasi polaire héliosynchrone, fonctionne selon plusieurs modes d'acquisition : IW (interferometric Wide Swath), WV (Wave Mode), SM (Stripmap) et EW (Extra-Wide Swath).

Dans le cadre de cette étude, des images radar Sentinel 1 au format GRDH acquises le 25/02/2021 ont été utilisées. Ces données ont été retenues en raison de leurs caractéristiques géométriques et spatiales, adaptées à une cartographie géomorphologique à moyenne échelle. Elles sont disponibles en polarisation VV (verticale-verticale) et croisée HV (horizontale-verticale).

La méthodologie adoptée pour cette partie du travail est synthétisée dans l'organigramme présenté à la figure 18.

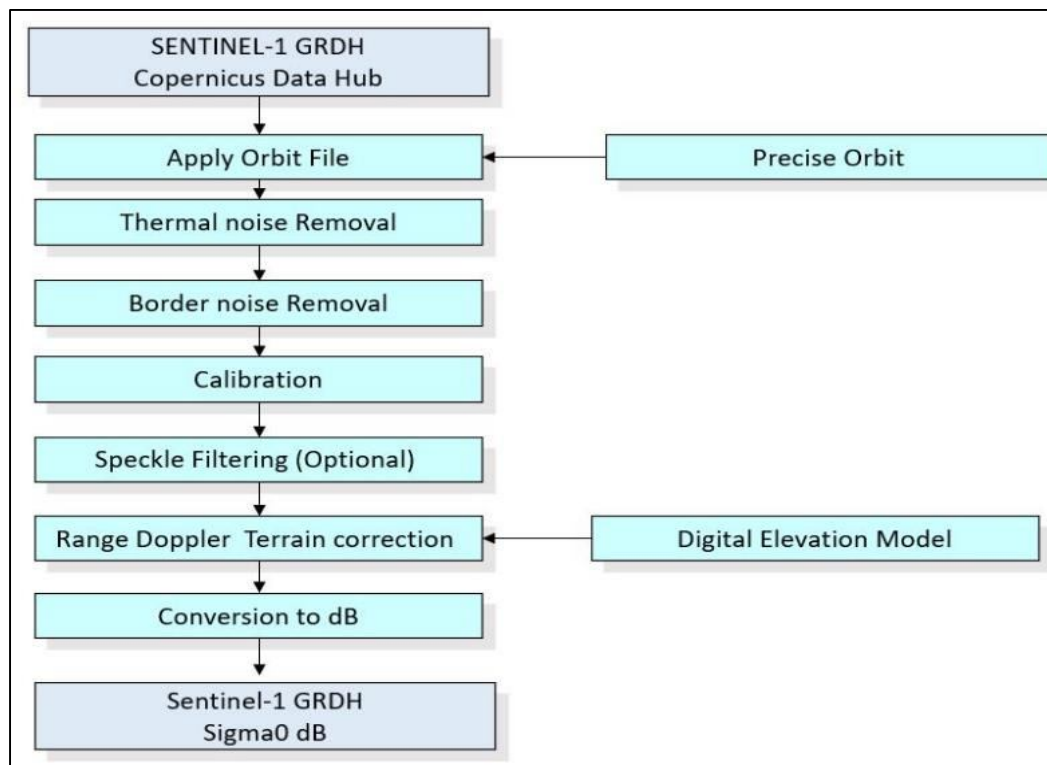


Figure 18: Organigramme de prétraitement de Sentinel 1 GRDH (Ground Range Detected) (Filipponi, 2019).

a) Application du fichier d'orbite

Dans le prétraitement des images satellites radar, l'application du fichier d'orbite constitue une étape clé. Elle permet de corriger les imprécisions présentes dans les images brutes de niveau 1. Ce fichier contient des informations plus précises sur la position et la vitesse du satellite au moment de l'acquisition d'images satellites, en particulier pour les données Sentinel 1 (fig.19).

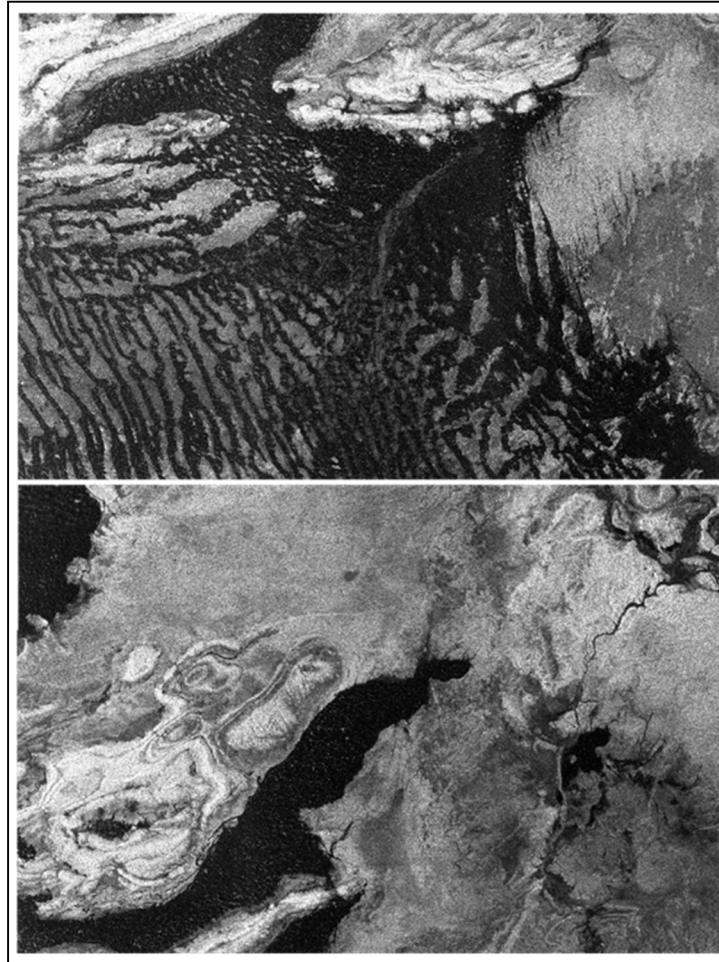


Figure 19: Application du fichier d'orbite.

b) Suppression du bruit thermique et du bruit de bordure

Afin d'obtenir une image homogène et de meilleure qualité radiométrique (signal de rétrodiffusion normalisé sur l'ensemble de la scène), la suppression du bruit thermique est nécessaire. Ce bruit d'instrument résultant des mouvements microscopiques des électrons dans les composantes électroniques du capteur, principalement dus aux variations de température internes (Park *et al.*, 2017). Ce phénomène pourrait influencer la qualité des données radar dans le canal de polarisation croisée et générer des artefacts indésirables notamment dans les zones à faible rétrodiffusion (fig.20).

Le bruit de bordures présent dans l'image SAR GRD (Ground Range Detected) doit également être éliminé. Le logiciel SNAP intègre un opérateur particulièrement conçu pour la suppression de ce bruit de faible intensité ainsi que des données invalides aux bords de la scène SAR⁹. Pour ce faire, il est nécessaire d'ajuster l'heure et le début de l'échantillonnage afin de fournir l'effet de la courbure de la terre. Les produits de niveau 1 sont soumis à une compression à la fois en azimut et en portée, engendrant par la suite des artefacts¹⁰.

⁹ « SNAP – STEP ».

¹⁰ « SNAP – STEP ».

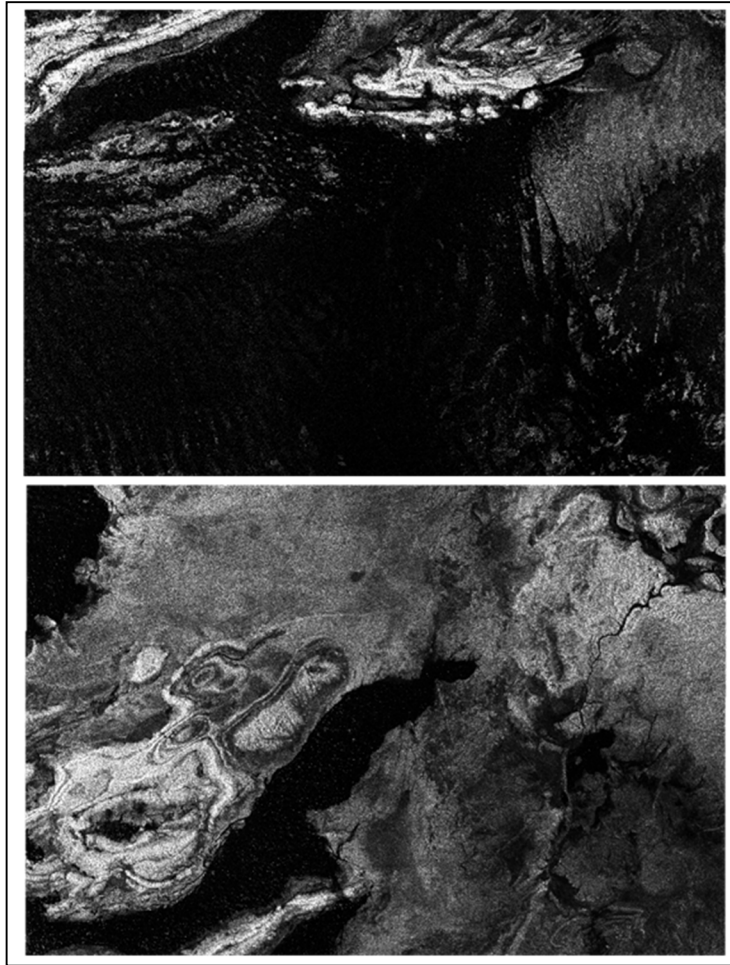


Figure 20: Suppression de bruit thermique et de bordure.

c) *Étalonnage radiométrique (Calibrate)*

L'étalonnage constitue une étape fondamentale dans l'analyse et le traitement des images SAR, car il rend les données comparables et exploitables pour une large gamme d'applications. Son objectif est de produire une image dont chaque pixel présente fidèlement la rétrodiffusion réelle de la surface observée. Ce processus transformant les valeurs des pixels des données images SAR en image d'intensité de rétrodiffusion SAR calibrés radiométriquement. L'intensité de la rétrodiffusion est calculée à partir des paramètres d'étalonnage du capteur, fourni avec les informations des métadonnées des ensembles des données GRD, puis convertit en valeurs équivalentes de sigma zéro. Cela permet de générer la rétrodiffusion SAR calibrée radiométriquement sur le plan horizontal nominal. Ce processus corrige les variations liées aux conditions d'acquisition, offrant ainsi une image plus fidèle à la réalité du terrain (fig.21).

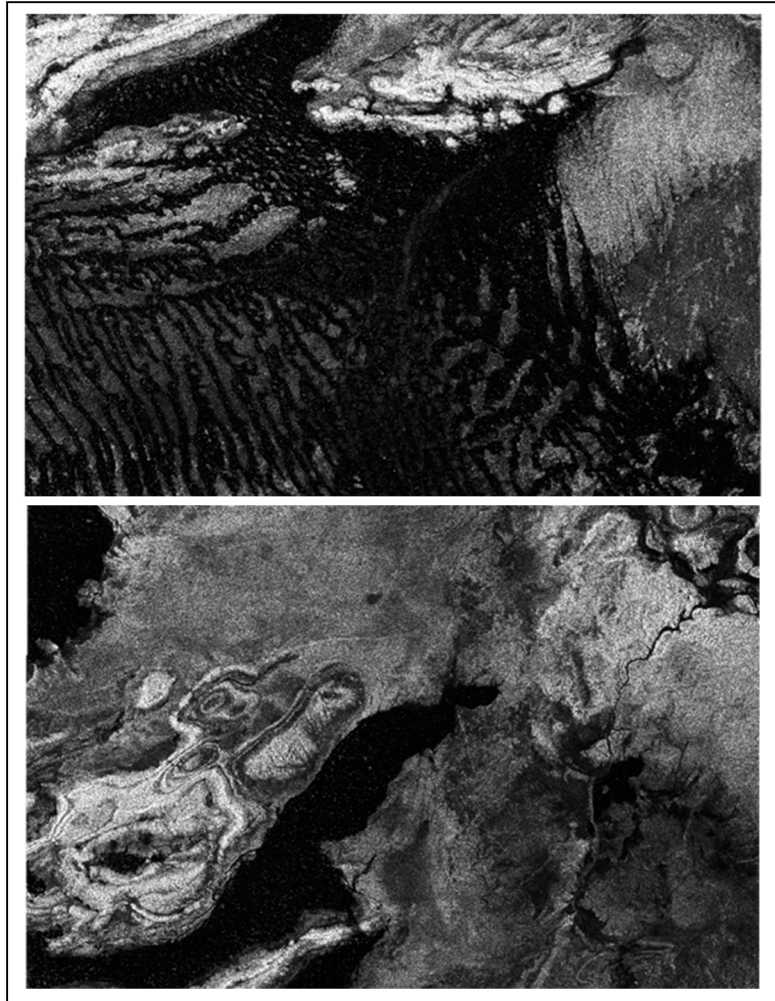


Figure 21: Etalonnage.

d) Filtrage

Le speckle est un bruit granulaire caractéristiques des images radar, résultant principalement de l'interférence constructive des signaux radar rétrodiffusés par multiples diffuseurs élémentaires présents dans une même cellule de résolution (Lee *et al.*, 1994). Il est généralement considéré comme un effet indésirable. Pour le réduire, des filtres adaptatifs sont appliqués. Ceux-ci estiment la réflectivité réelle en se basant sur la valeur mesurée d'un pixel et les statistiques locales calculées dans son voisinage. Les filtres adaptatifs de bases estiment ces statistiques locales en utilisant une fenêtre de taille fixe centrée sur le pixel à filtrer.

e) Correction des terrains

La correction du terrain constitue une étapes essentielles dans la chaîne de traitement d'images radar, visant à géocoder l'image tout en corrigeant les distorsions géométriques dues aux effet de la géométrie d'acquisition radar notamment, à l'effet Doppler (Small *et al.*, 2008). Cette étape permet d'ajuster les données SAR en fonction de la topographie réelle du terrain, en intégrant les paramètres orbitaux (issus des métadonnées), les relations de conversions entre la portée radar et la distance au sol, ainsi qu'un modèle numérique de terrain (MNT), afin d'obtenir un produit cartographique fidèle à la surface terrestre ¹¹.

¹¹ « SNAP – STEP ».

L'opérateur de correction de relief abouti à la production d'une image orthorectifiée dans le système de référence WGS84. A cet effet, la méthode d'orthorectification dite 'Range-doppler' est couramment utilisée pour géocoder les images radar à partir de leur géométrie raster 2D unique. Cette technique exploite les informations contenues dans les métadonnées, notamment les vecteurs d'état de l'orbite ou les données d'orbite externe, afin d'assurer une correction géométrique précise et une géolocalisation rigoureuse de l'image (fig.22).

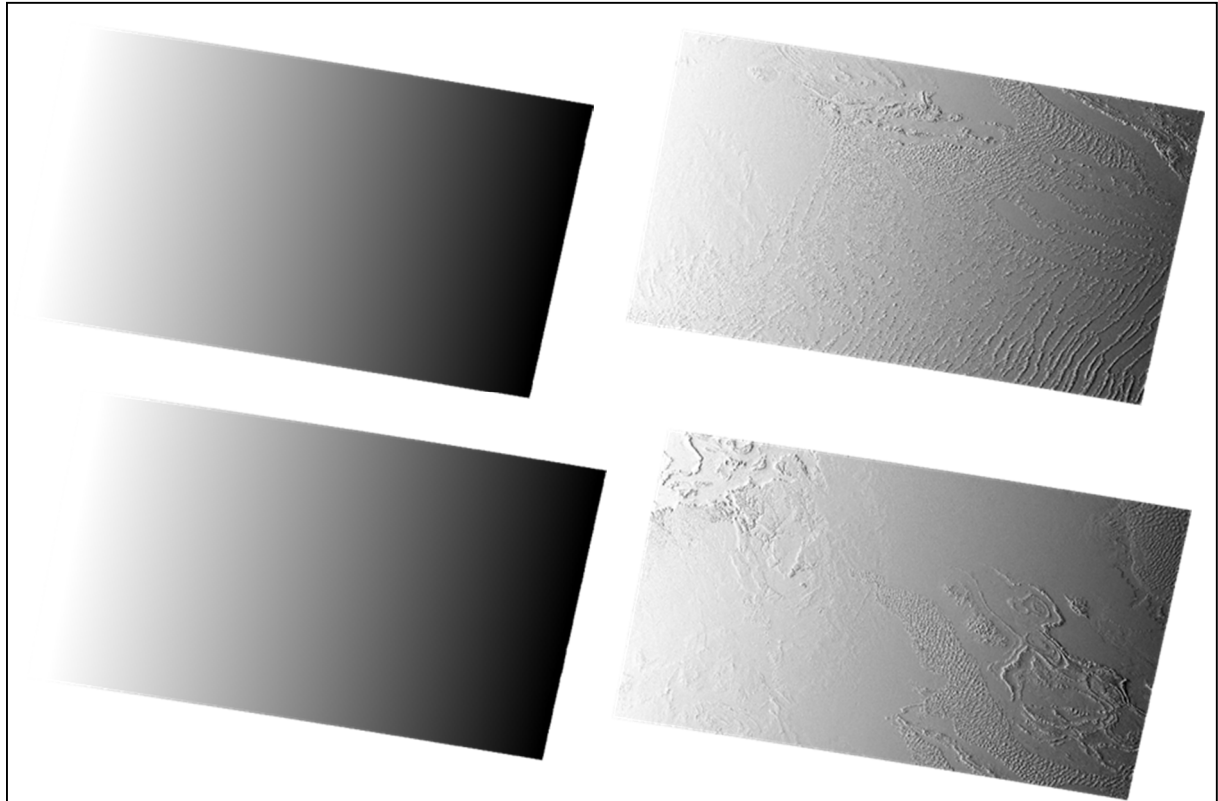


Figure 22: Correction des terrains.

f) Détection de contours

Dans les régions désertiques caractérisées par un couvert sableux dense, la détection des structures géologiques enfouies demeure particulièrement difficile. Ce voile sableux limite fortement l'efficacité des capteurs optiques, car il masque les signatures spectrales des formations sous-jacentes. En revanche, l'image radar présente un avantage notable, car elles peuvent, dans certaines conditions (longueur d'onde, humidité, rugosité), pénétrer partiellement le couvert sableux et révéler l'expression des structures enfouies. Ainsi, les données radar permettent une meilleure identification des structures géomorphologiques, ce qui les rend particulièrement adaptées à l'étude morpho-structurale des environnements désertiques.

La segmentation demeure l'une des techniques d'analyse la plus couramment employée en télédétection, que ce soit pour les images optiques ou radar. Elle correspond au processus de partitionnement d'une image en un ensemble de régions homogènes et spatialement cohérentes.

Parmi les approches de segmentation, les méthodes déterministes reposent sur l'application d'opérateur de convolution à l'image d'origine I à l'aide d'un filtre prédéfini F ($I * F$). Ce processus met en évidence les discontinuités radiométriques, produisant une image binaire correspondant aux contours ou aux limites des objets (fig.23).

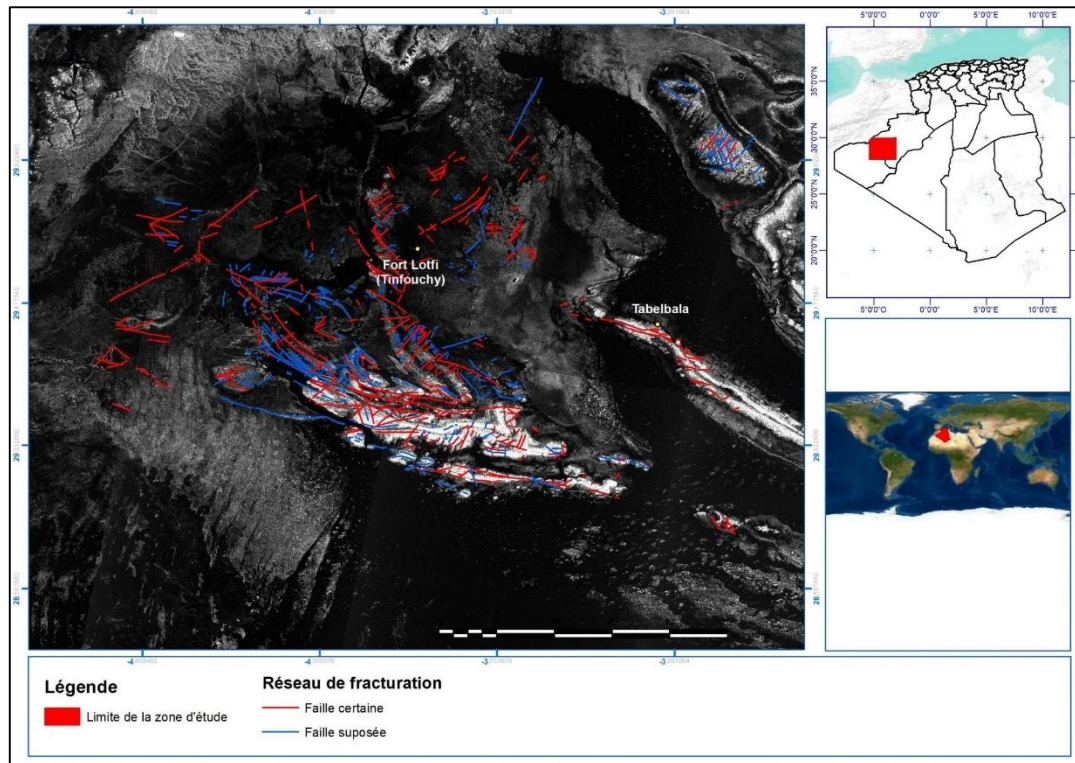


Figure 23: Réseau de fracturation actualisé par imagerie radar.

4. Intégration des données altimétriques

L'aspect topographique constitue un outil fondamental pour la reconnaissance géologique, en particulier dans la région d'intérêt. Il repose sur l'exploitation des données altimétriques issues d'un MNT permettant la génération des modèles tridimensionnelles (3D), et offrant ainsi une visualisation en perspective du relief (fig.24). Cette approche permet de dériver des paramètres morphométriques tels que la pente (inclinaison), l'exposition (aspect), qui sont des données essentielles pour le processus d'orthorectification et d'analyse spatiale. Par ailleurs, l'analyse topographique contribue à l'extraction du réseau hydrographique, facilitant ainsi l'interprétation morphostructurale du terrain. Grâce à des traitements numériques, il devient également possible d'identifier de manière rapide et efficace les lignes de rupture de pente, ce qui est un atout majeur dans l'analyse géologique et la cartographie structurale.

La génération des lignes de rupture de pente nécessite la mise en œuvre de plusieurs traitements. L'outil de calcul de la pente et de l'orientation permet d'obtenir des informations précises sur la morphologie du terrain. Une autre approche consiste à exploiter et interpréter le réseau hydrographique dérivé du MNT, après détermination de la direction d'écoulement (flow direction) et de l'accumulation d'écoulement (flow accumulation), qui permettent de mieux caractériser l'organisation du drainage.

En outre, le profil topographique constitue un élément important de cette analyse. Il est généré à l'aide d'outils de profil en 3D permettant de représenter les variations altimétriques le long d'entité linéaires. Les variations brusques de pentes observées sur les cartes correspondantes sont souvent révélatrices de la présence de structures linéaires, telles que des failles ou des fractures (Li, 2010 ; NKono et al., 2013).

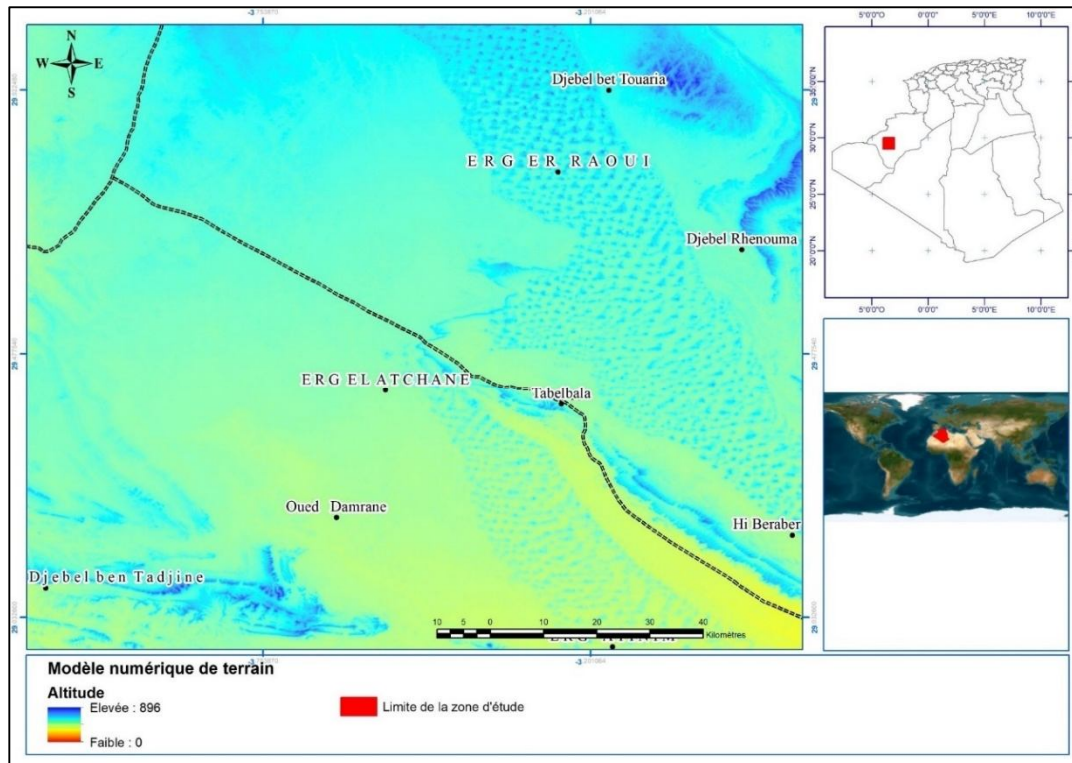


Figure 24 : Modèle numérique de terrain de la zone d'étude (SRTM).

1. Analyses géologiques des résultats des différents traitements appliqués sur les images satellites

Une approche méthodologique intégrée a été mise en œuvre afin d'extraire et de caractériser la configuration lithologique, structurale et hydrogéologique de la région étudiée. Cette démarche repose sur une analyse conjointe des données géologique et hydrogéologique, complétée par des missions de terrain. Ces dernières permettent de valider et d'affiner les interprétations issues de la télédétection, à travers des observations directes, des descriptions détaillées des affleurements ainsi que des mesures de pentages de différents faciès rencontrés dans la région d'intérêt.

L'interprétation visuelle des images satellitaires est effectuée à l'aide de logiciels de traitement d'image tels que l'ENVI, SNAP et ERDAS IMAGINE, généralement à une échelle de l'ordre de 1/200 000. Les entités identifiées sont digitalisées à l'écran et enregistrées sous forme de fichiers vectoriels au format shapefile. Ces couches vectorielles peuvent ensuite être superposés aux images satellitaires, facilitant une analyse spatiale plus fine et une meilleure interprétation des structures.

L'analyse s'est principalement focalisée sur l'identification d'éléments révélateurs d'information structurale, pouvant être corrélés avec des indices déjà inventoriés. Il s'agit notamment des failles, des chevauchements, des structures linéamentaires, ainsi que des structures susceptibles d'être associées à des intrusions magmatiques, tels que les dykes. Les principaux traits géomorphologiques significatifs ont été pris en compte (fig.25). En revanche, les limites lithologiques n'ont pas été intégrées dans cette phase spécifique de l'analyse.

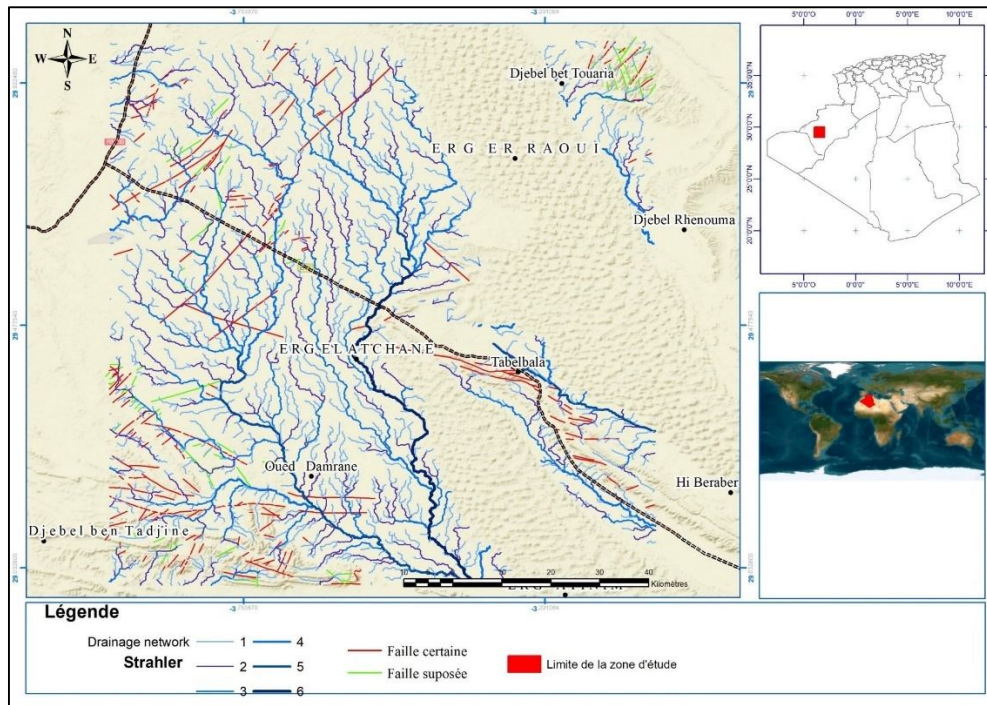


Figure 25: Extraction de quelques linéaments à partir du réseau hydrographique.

L'analyse et l'interprétation géologique reposent sur un ensemble de paramètres structuraux et morphologiques essentiels. Les failles sont généralement identifiées à travers des structures linéaires marquées, se traduisant soit par des discontinuités morphologiques nettes, soit par des décalages lithologiques significatifs. Les Dykes, quant à eux, se manifestent le plus souvent sous forme de crêtes linéaires ou par une signature lithologique contrastée (notamment en termes de couleur) par rapport à l'encaissant. Les linéaments correspondent à toute structure linéaire identifiable sur l'image, qu'elle soit d'origine géologique ou géomorphologique. Les structures circulaires, caractérisées par une morphologie spécifique ou une lithologie distincte de leur environnement, peuvent être interprétée comme des indicateurs potentiels de massifs intrusifs. Enfin, la morphologie regroupe l'ensemble des formes du relief présentant une organisation ou une signature particulière, susceptible de refléter un contrôle structural ou lithologique.

Dans les zones caractérisées par un fort recouvrement (notamment sableux), l'interprétation directe des structures peut s'avérer plus délicate. Toutefois, l'analyse de l'agencement du réseau hydrographique constitue une approche indirecte efficace pour révéler des structures géologiques sous-jacentes. En effet, le drainage reflète souvent le contrôle structural du substratum, faisant du réseau hydrographique un élément très important de la texture de l'image et un critère pertinent pour l'interprétation à la fois structurale et lithologique.

IV. Conclusion

La région de Tabelbala, située au cœur du Sahara, constitue un véritable pôle de vie dans cet environnement aride. Cependant, elle est confrontée à une sécheresse intense, qui a entraîné la destruction de nombreuses palmeraies, essentielles à son équilibre écologique et social. S'insère dans le contexte géologique des monts de l'Ougarta, cette région présente une configuration géologique offrant généralement des conditions favorables pour la mise en place des réservoirs avec des structures qui pourraient constituer une superposition d'aquifères exploitables. Toutefois, les conditions climatiques extrêmes caractérisées par de faibles précipitations, des températures élevées et des vents persistants limitent considérablement le développement du couvert végétal. Ce dernier demeure très réduit et typique des milieux désertiques, tels que l'Erg, le Reg et la Hamada.

Chapitre II
Hydroclimatologie

I. Introduction

Dans les travaux d'investigation et d'évaluation des ressources hydriques, notamment la détermination des zones susceptibles d'être aquifères, l'étude hydroclimatique revêt une importance primordiale en permettant d'analyser les caractéristiques climatiques et leur impact sur le cycle de l'eau (Yin *et al.*, 2020).

Cette section prend en considération l'aspect climatologique, traite la variabilité climatique de la région, et quantifie la contribution de la précipitation à la recharge et à l'alimentation des nappes et des aquifères.

En raison de l'isolement de la zone d'étude et de l'absence de station météorologique à proximité (la plus proche est celle de Beni Abbès, située à environ 160 km et de Bécharr à environ 383 km), l'analyse repose particulièrement sur les données satellitaires (fig.27). Nous avons ainsi exploité les bases de données universelles POWER (Prediction Of Worldwide Energy Ressources), ainsi que la plateforme Google Earth Engine (GEE), qui offrent des informations indépendantes des stations météorologiques locales (Marzouk, 2021). Les mesures obtenues grâce aux capteurs spatiaux embarqués à bord de satellites fournissent des données précieuses pour l'étude du climat et des ressources en eau (Pietroniro and Leconte, 2005, Abubakar and Idi, 2024a).

De nombreux travaux ont démontré l'efficacité des données satellitaires pour l'étude des phénomènes météorologiques dans les régions dépourvues de stations météorologiques ou lorsque les données in situ sont insuffisantes ou inexistantes (Gunaratne, De Silva and Amarasinghe, 2022, Bandira *et al.*, 2023, Halimi, Karaca and Büyüktaş, 2023, Abubakar and Idi, 2024b, Darman *et al.*, 2024).

Dans la zone considérée, aucune station météorologie n'est présente (fig.27). Face à cette situation, nous avons eu recours aux données satellitaires, qui fournissent des estimations simulées. Ces dernières ont été corrélées aux données des stations météorologiques avoisinantes afin d'améliorer leur précision. Ces données sont particulièrement très sollicitées, notamment pour l'analyse des vastes étendues, en raison de leur puissance d'observation et de leur large couverture spatiale (Kheyruri, Nikaein and Sharafati, 2023). Il a été également constaté que ces données fournissent des informations d'excellente qualité en matière de précision et de résolution.

Comparées aux données in situ des stations météorologiques, qui sont ponctuelles et reflètent des conditions d'observations très locales, les données satellitaires permettent une vision globale et cohérente. De plus, les stations météorologiques terrestres présentent souvent des lacunes d'enregistrement, entraînant des séries temporelles discontinues, et leur répartition spatiale est généralement hétérogène. Par conséquent, l'exploitation et l'utilisation des sources des données universelles s'avèrent une ressource incontournable, qui convient mieux pour une telle recherche (régions éloignées et mal instrumentées), en raison de l'étendue spatiale et la fiabilité de l'information qu'elles fournissent.

Les premiers jeux de données satellitaires remontent à 1972, avec le lancement des satellites américains ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellites plus tard renommé Landsat) en juillet, suivi de NOAA-2 (National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite, équipé du radiomètre VHRR (Very High Resolution Radiometer), en octobre. L'amélioration continue des instruments, notamment en termes de résolution, de précision de

calibration, a fait de l'observation satellitaire un domaine en constante évolution, offrant des perspectives prometteuses (Mialon, 2005).

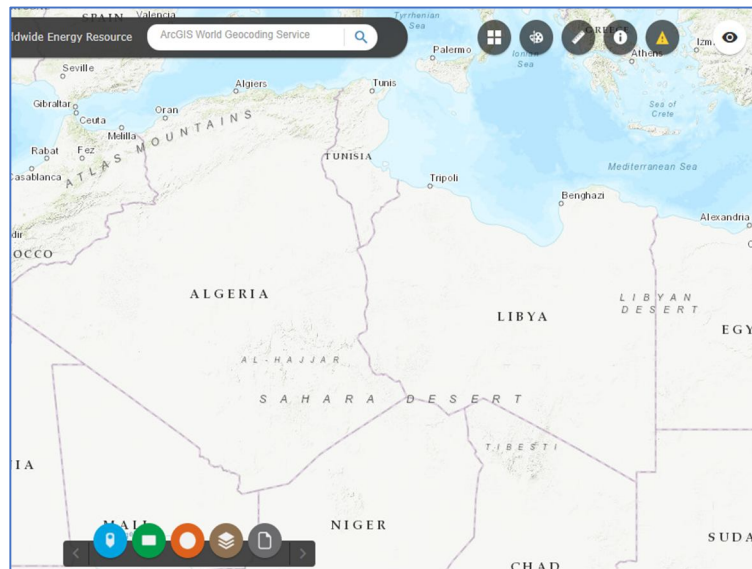


Figure 26: Visionneur d'accès aux données POWER¹².

Le projet POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) est un programme dédié aux sciences appliquées de la NASA, visant à faciliter l'accès aux observations terrestres (EO : Earth Observation) de la NASA pour la recherche et les applications communautaires. Il se concentre sur trois domaines principaux ; le développement des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et les applications agro climatologiques. En offrant un accès simplifié aux données solaires et météorologiques via divers outils, ce dernier permet aux communautés de mieux s'adapter aux fluctuations des changements et aux changements climatiques¹³.

La plateforme POWER fournit des données météorologiques améliorées sous différentes échelles temporelles : horaires, quotidiennes, mensuelles, annuelles et climatologiques (fig.26). Ces données incluent la température d'air et de surface, les précipitations, l'humidité relative de l'air, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique ainsi que le rayonnement solaire¹⁴. Elles assurent une couverture météorologique, depuis 1981, avec une série chronologique quotidienne s'étendant sur 40 ans. Les paramètres liés au rayonnement solaire sont disponibles à partir de 1984. Quant aux données horaires, elles couvrent une période de 20 ans à partir de 2001 et sont issues des modèles de GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) et du programme de CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System).

L'approche adoptée repose sur l'intégration du produit CHIRPS, qui exploite le potentiel des données images météorologiques issues des satellites NOAA et METEOSAT. Ces données sont corrélées avec celles des stations météorologiques afin d'améliorer leur précision. Par ailleurs, la plateforme POWER offre des paramètres météorologiques à des intervalles quotidiens, hebdomadaires, mensuels et annuels, allant de 1984 jusqu'à une semaine en temps

¹² « NASA POWER | Prediction of Worldwide Energy Resources »

¹³ « NASA POWER | Prediction of Worldwide Energy Resources »

¹⁴ « NASA POWER | Prediction of Worldwide Energy Resources ».

réel. Elle met également à disposition des fonctions et des outils analytiques personnalisables, tels que des climatologies sur mesure, des rapports d'anomalies climatiques, ainsi que des données conformes à l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), pour l'évaluation des conditions climatiques des bâtiments. Le jeu de données POWER, disponible sur une période de 40 ans (de 1981 à 2020), figure parmi les séries de données satellitaires les plus longues, soulignant ainsi son importance pour l'étude de phénomènes climatiques.

Du point de vue climatique, la région d'intérêt présente un climat continental aride, caractérisé par des hivers froids avec des températures pouvant descendre en dessous de 0°C , et des étés particulièrement chauds où elles peuvent atteindre 50° (Dubief, 1960b). La région est fréquemment exposée à des vents violents et à des tempêtes de sable. Les précipitations sont extrêmement faibles. L'analyse des données satellitaires sur la répartition des précipitations annuelles, couvrant la période de 1981 à 2020, montre que la région de Tabelbala se situe dans une zone où les isohyètes sont inférieures à 50 mm (fig.15).

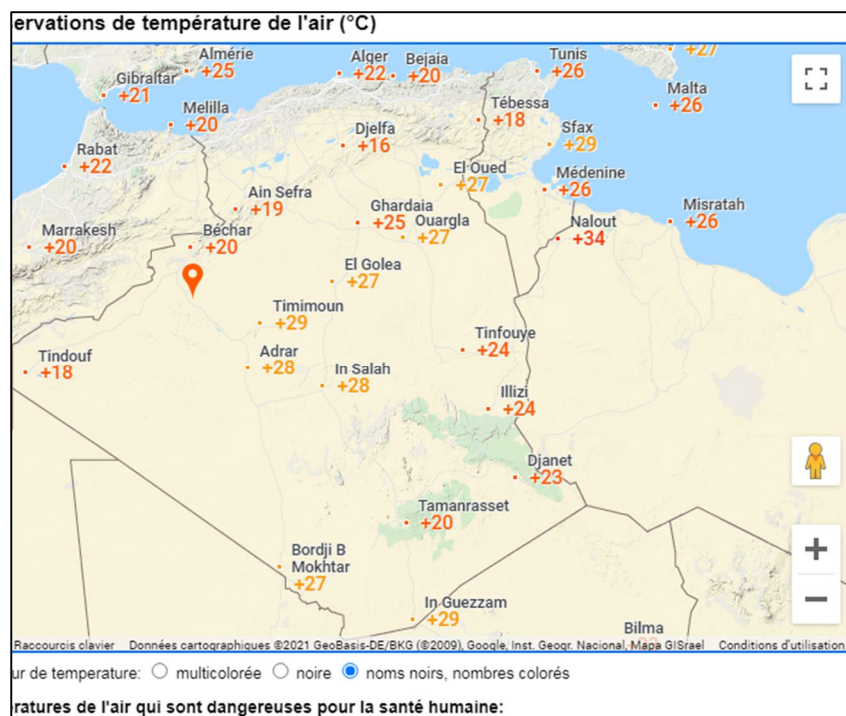


Figure 27: Répartition des différentes stations météorologiques.

Dans un premier temps, le jeu de données renfermant l'information météorologique sur la zone considérée doit être téléchargé du site POWER¹⁵ où une base de données est disponible gratuitement au public sous différents formats (GeoJSON, ASCII, NetCDF, CSV) sous forme de série de données horaire, journalière, mensuelle et annuelle d'une période qui s'étend sur 42 années du 1981 jusqu'à 2023. Cela en fait, l'une des plus longues séries de satellites fournissant d'information continue, ce qui explique leur importance capitale pour les études des variabilités climatiques.

¹⁵ « NASA POWER | Prediction of Worldwide Energy Resources ».

Les zones sahariennes sont connues par leur climat aride caractérisé généralement par une faible pluviosité, une haute température et un cortège du vent qui est généralement sec et chaud (Ozenda, 1991).

Un nombre assez important de travaux de recherche et de développement a été mené dans le but d'évaluer l'exactitude et la crédibilité des données provenant de POWER, résultats qui ont été valorisés dans des revues spécialisées. En effet (Jed *et al.*, 2022), ont fait une étude comparative entre des données météorologiques provenant des stations physiques dans quatre régions distinctes en Afrique (M'Sila, Saida, Tamanrasset, and Nouakchott), et celles issues de la plateforme POWER, mettant en relief leur similitude et leur ressemblance.

(Polo, 2015) a pu comparer entre les données in situ en Asie (plateau Tébétain) et celles prenant de POWER dont il a constaté une forte corrélation et similitude comme c'est le cas pour l'Espagne (Sayago *et al.*, 2020) et les Etats-Unis (Almorox *et al.*, 2017).

II. Conditions climatiques

1. Nébulosité

L'analyse et l'interprétation des travaux menés par (Dubief, 1960b), de la période 1939-1941 font apparaître que les taux moyennes mensuelles de la nébulosité relatives à notre zone oscillent entre 0.8 et 1.9 dixièmes alors que la valeur moyenne annuelle est de 1.4 dixième (Yahiaoui, 1992).

Tableau 2: Variation des moyennes mensuelles de nébulosité de Tabelbala pour la période 1939-1941 (Yahiaoui, 1992b).

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
Nubu	1	1.1	1.6	1.6	1.6	0.8	0.8	1.5	1.7	1.9	1.4	1.3	1.4

Après avoir examiné ces données, il a été constaté que les mois de juin et juillet sont considérés comme les mois les plus clairs de l'année (Tab.2). Cela pourrait signifier qu'il y a eu des mois de précipitations.

2. Température

La température est l'un des facteurs climatiques qui influent sur les estimations de l'évapotranspiration et les caractéristiques climatiques d'une région (estimation du bilan hydrique) ainsi qu'elle influence la biogéographie et l'écologie de tous les êtres vivants de la biosphère (Ahmadi *et al.*, 2020).

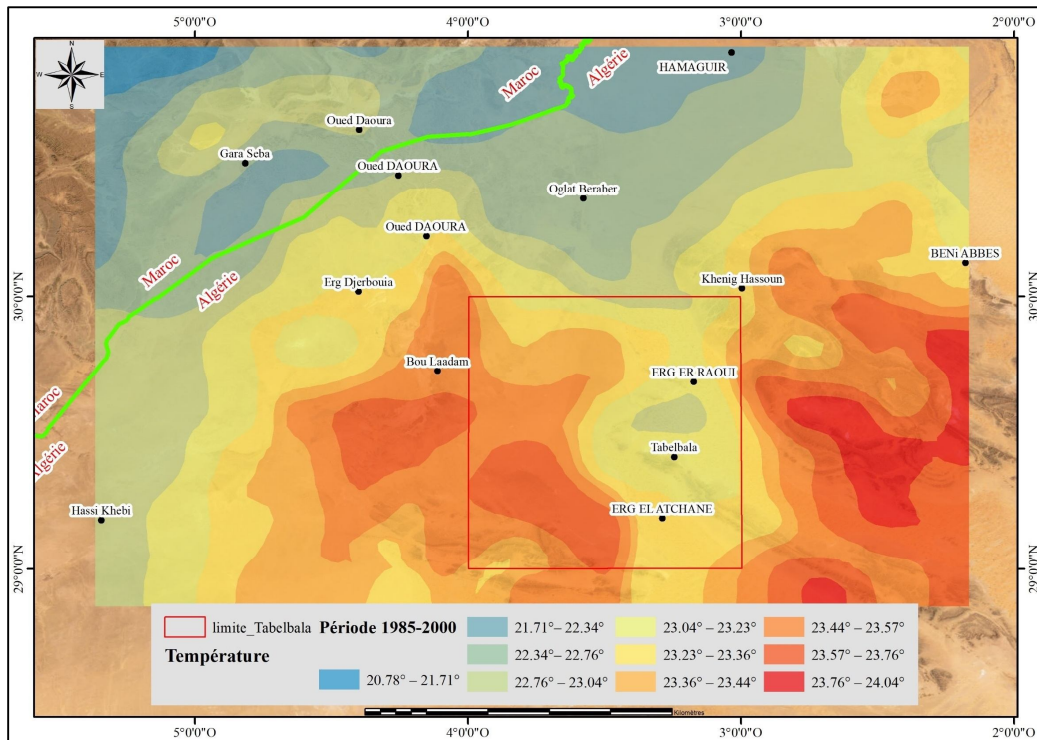


Figure 28: Variations des valeurs de températures moyennes annuelles dans la région d'étude de la période 1985-2000.

Elle est un paramètre essentiel pour les changements de chaleur affectant la surface de la Terre. En raison des changements environnementaux, locaux, mondiaux et des activités anthropiques, les températures de l'air dans la région ont subi une variabilité au profil du temps. L'étude spatiotemporelle de tel paramètre est devenue une nécessité dans les processus d'évaluation et d'investigation des ressources hydriques en particulier dans les zones arides et semi-arides. Pour l'étude de la température de notre zone, une série de données provenant des sources spatiales a été exploitée et examinée, et ceci dans le but d'effectuer une analyse spatiotemporelle et une estimation de température de la région de Tabelbala d'une période étalant de 1981 à 2020. Ces données ont été reportées dans les figures 28 et 29.

Les taux de température moyenne mensuelle sont exprimés par l'équation suivante :

$$Tmm = \frac{\sum_i^n T_i}{n} \quad (2.1)$$

Où Tmm Correspond à la température moyenne mensuelle observée.

T_i Est la température mensuelle enregistrée.

n : est la période (nombre d'années).

L'observation détaillée du diagramme de la figure 30, montre que les hautes valeurs de température moyenne mensuelles sont observées au mois de juin, juillet et aout avec respectivement 31.44°C, 35.13°C et 34.36°C, représentant la saison sèche, alors que les basses valeurs moyennes de températures sont observées au mois de décembre et mois de janvier avec 11.68°C et 10.39°C, reflétant la saison froide.

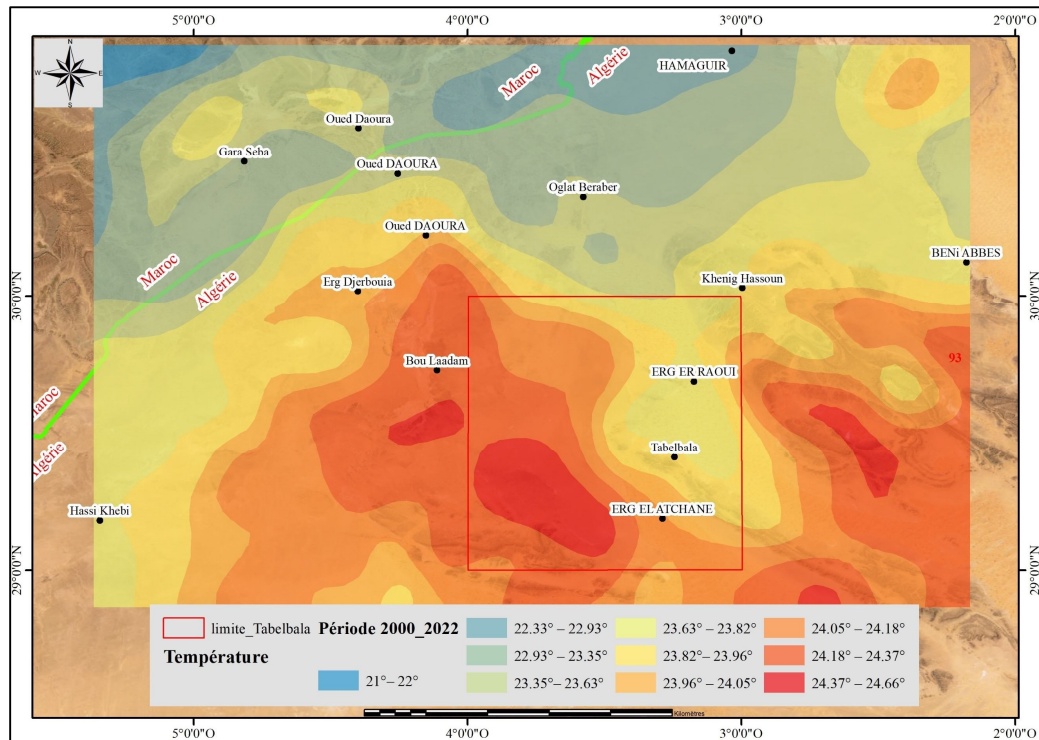


Figure 29: Variations des valeurs de températures moyennes annuelles dans la région d'étude de la période 2000-2022.

Les figures ci-dessous montrent la distribution spatiale des variations des valeurs moyennes annuelles de température sur deux périodes d'observation : la première période s'étend du 1985 à 2000. Quant à la deuxième période s'étale du 2000 à 2022. Selon les figures générées, des changements de température significatifs ont été observés entre les deux périodes d'observation. Cette variabilité de température pourrait indiquer la tendance climatique à long terme et avoir un impact assez important sur l'écosystème et ses changements ainsi que les ressources hydriques relatives à la région.

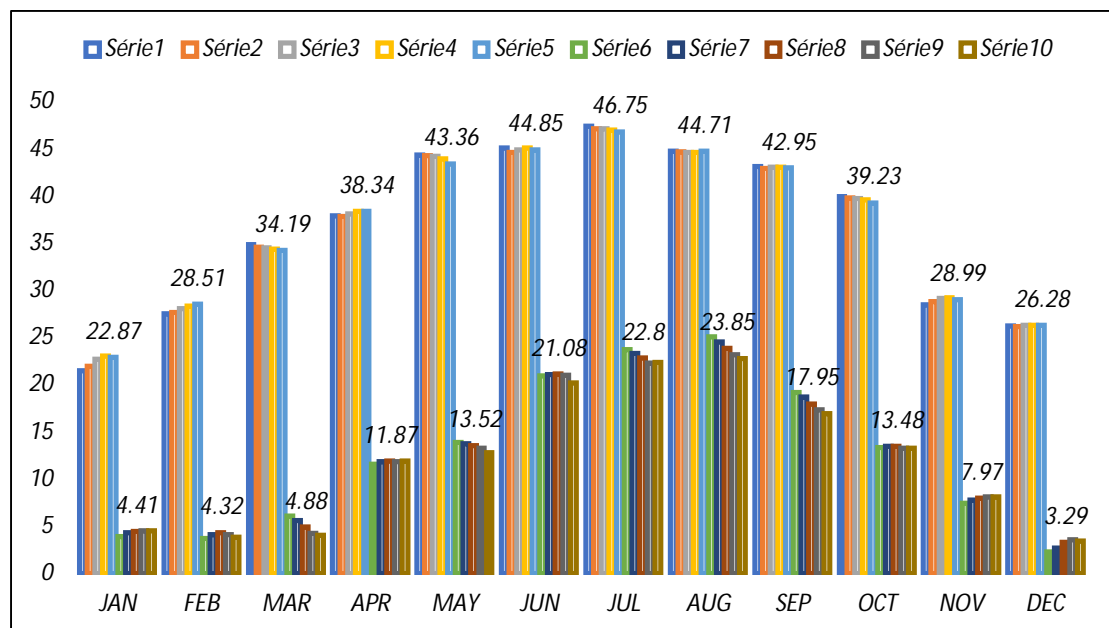


Figure 30: Température moyenne minimum maximum de la période (1981-2020).

Les valeurs de températures maximales sont représentées par les figures 30, 31,32 et 33. Celles-ci dépassent les moyennes annuelles de 36,89°C, 35,61°C, 36,49°C pour les trois périodes considérées : 2020 (d’avril à octobre), 2000 (d’avril à septembre) et 1981(de mai à octobre), respectivement.

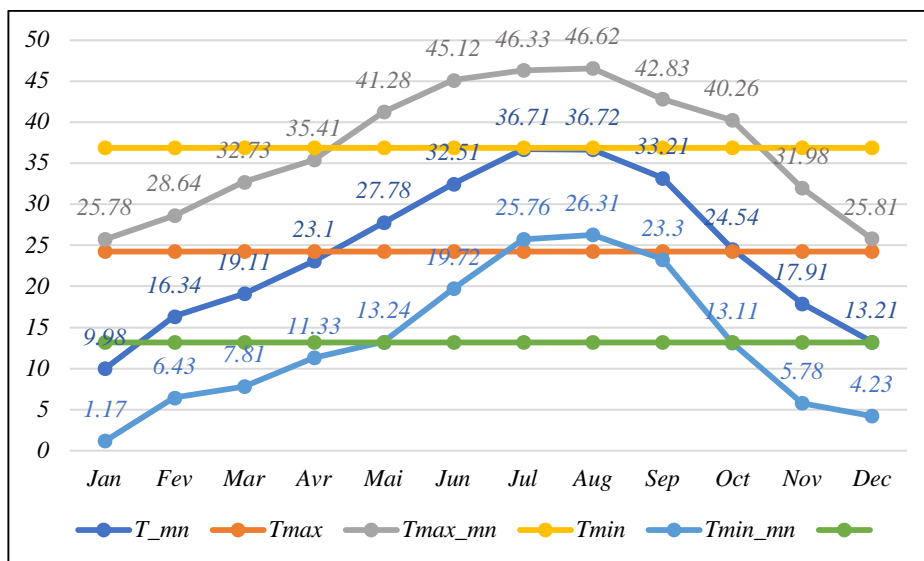


Figure 31: Température minimum maximum et moyenne de 2020.

Après avoir examiné ces données, il résulte que les diagrammes générés (fig.31, fig.32 et fig.33) à partir du jeu de données, présentent des moyennes de températures minimales relatives à notre zone d’intérêt et qui ont atteint les 13,18°C, 11,39°C et 12,73°C pour les trois périodes de l’étude : 1981, 2000 et 2020 respectivement. Ces dernières ont des taux de températures minimales inférieures aux moyennes minimales du janvier à avril et d’octobre à décembre.

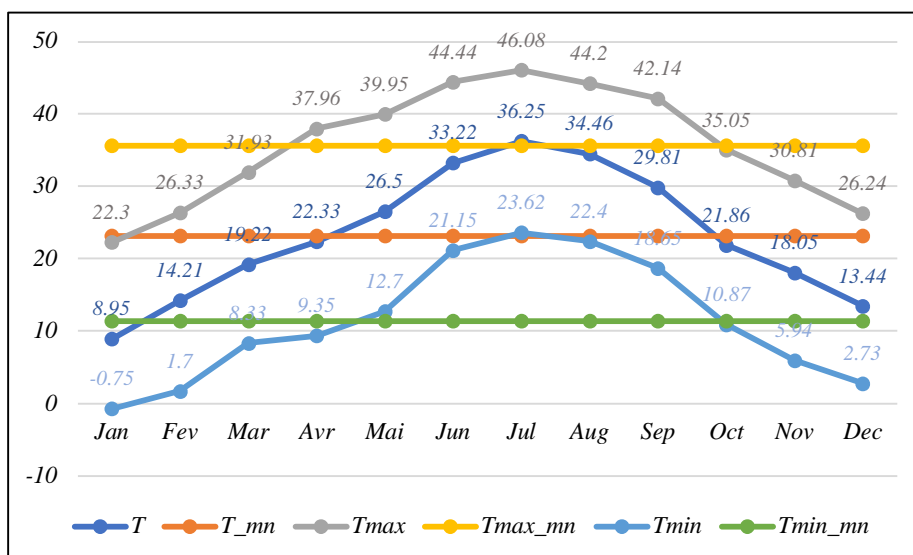


Figure 32: Température minimum maximum et moyenne de 2000.

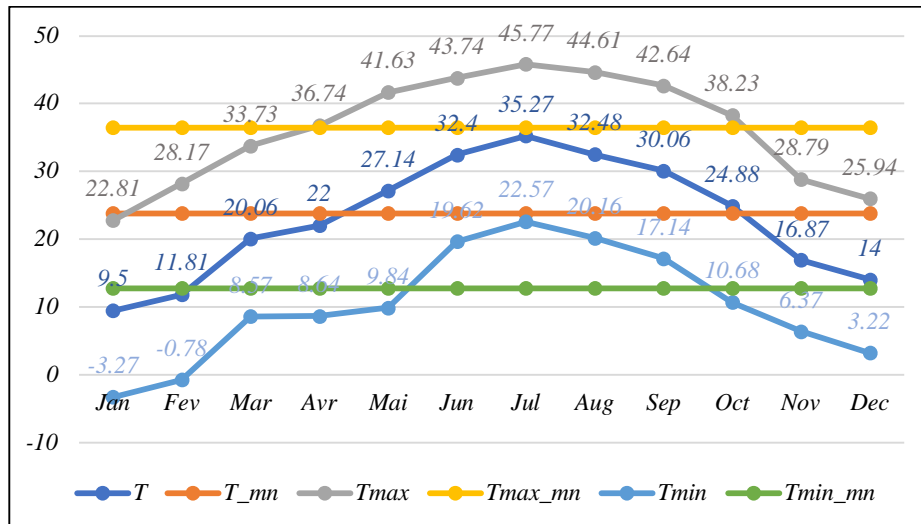


Figure 33: Température minimum maximum et moyenne de 1981.

3. Pluviométrie

Les précipitations sont considérées comme l'une des composantes hydrologiques les plus importantes qui ont un impact direct sur la recharge des eaux souterraines (Ahmadi *et al.*, 2020). L'alimentation des nappes est conditionnée souvent par la pluviométrie, qui représente sa source unique de recharge et de renouvellement. Les précipitations dans les zones sahariennes sont connues par leur rareté (une ou deux fois par ans) et notamment ces dernières années, où il a été enregistré une diminution en pluviométrie. Dans une zone à caractère climatique aride, les écoulements sont occasionnels, ils sont conditionnés par les fortes averses sur un court laps de temps (Mabrouk, 2007).

Etant donné que la zone d'intérêt ne dispose aucune station météorologique, un jeu de données universelles issues du site POWER NASA a été exploité afin d'établir une panoplie de cartes illustrant les variations pluviométriques relatives à notre zone et ceci du 1981 au 2020. La région considérée aperçoit un taux moyenne annuelle de précipitation ne dépassant pas les 50 mm/ans. Lorsque les affaissements et les dépressions sahariennes sont reliés à des masses d'air humide provenant de l'Atlantique ou de la Méditerranée, elles ont la capacité de provoquer des pluies (Merzougui *et al.*, 2021b).

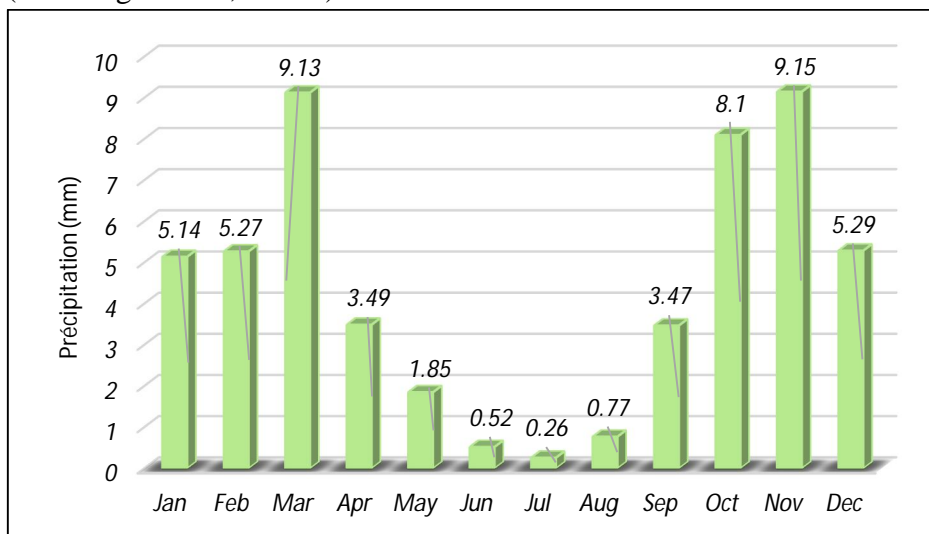


Figure 34: Variabilité moyenne mensuelle des précipitations (mm) au village de Tabelbala pour la période 1981-2021.

L'analyse et l'interprétation de différentes cartes de précipitation moyenne annuelle des deux périodes : 1981-2000, 2000-2022 générées à partir d'une série des données satellites POWER sur l'ensemble de la zone d'étude, ont permis de constater que le taux de précipitation varie de 35 à 60 mm/ans et de 38 à 56 mm/ans pour les deux périodes respectivement, ce taux (précipitation) s'abaisse graduellement en allant vers le SE (voir fig.39, fig.40 et fig.41). Lors de cette période, il a été remarqué aussi que les mois de décembre sont le plus pluvieux (précipitation maximale) de l'année avec 9.13mm alors que la valeur de précipitation minimale a été enregistrée au mois de juillet avec un taux très faible estimé de 0.26mm.

Tableau 3: Variabilité moyenne mensuelle des précipitations (mm) au village de Tabelbala de la période 1981-2021.

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
Précip	5.14	5.27	9.13	3.49	1.85	0.52	0.26	0.77	3.47	8.10	9.15	5.29	52.45

La figure si-dissous illustre une nette variabilité ce qui révèle une irrégularité du régime pluviométrique de la région ainsi une alternance remarquable entre les années sèches (correspondant aux années : 1981, 1983, 1984, 1986, 1992, 1997, 1998, 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2007, 2010, 2013 et du 2015 au 2020 dont $P <$ moyenne annuelle pluviométrique et humide) et les années humides (qui sont : 1982, 1985, 1987, 1988, 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 1996, 2002, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012 et 2014 dont $P >$ moyenne annuelle pluviométrique).

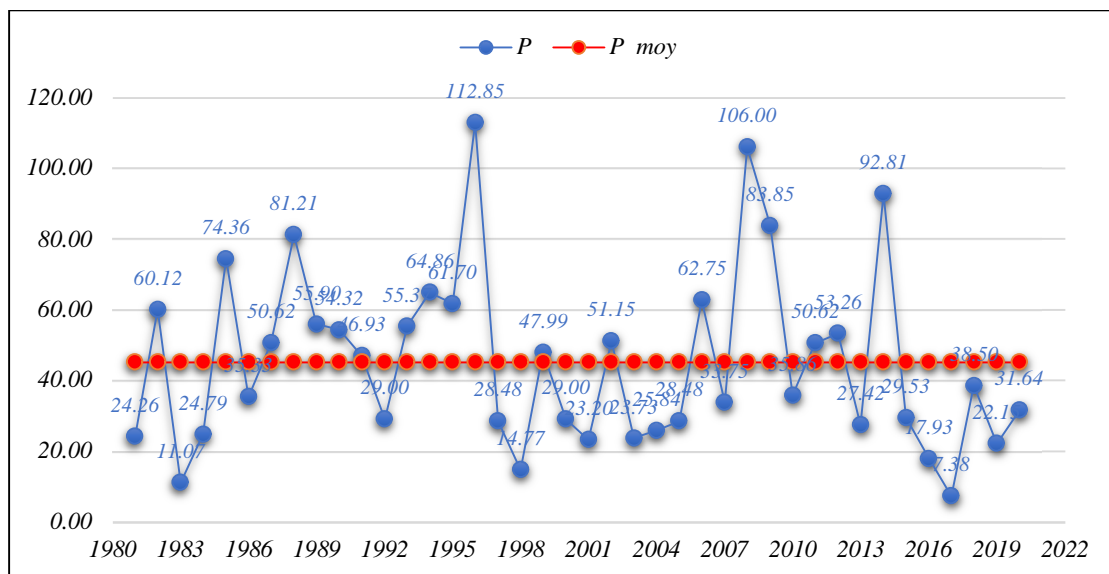


Figure 35: Variation interannuelle des précipitations de la région d'étude (Tabelbala).

En vue d'effectuer une analyse permettant de comprendre le comportement et le régime pluviométrique saisonnier de la région d'intérêt, un regroupement des mois a été mené conduisant à discriminer et mettre en évidence la saison la plus pluvieuse reflétant la période optimale de recharge des aquifères.

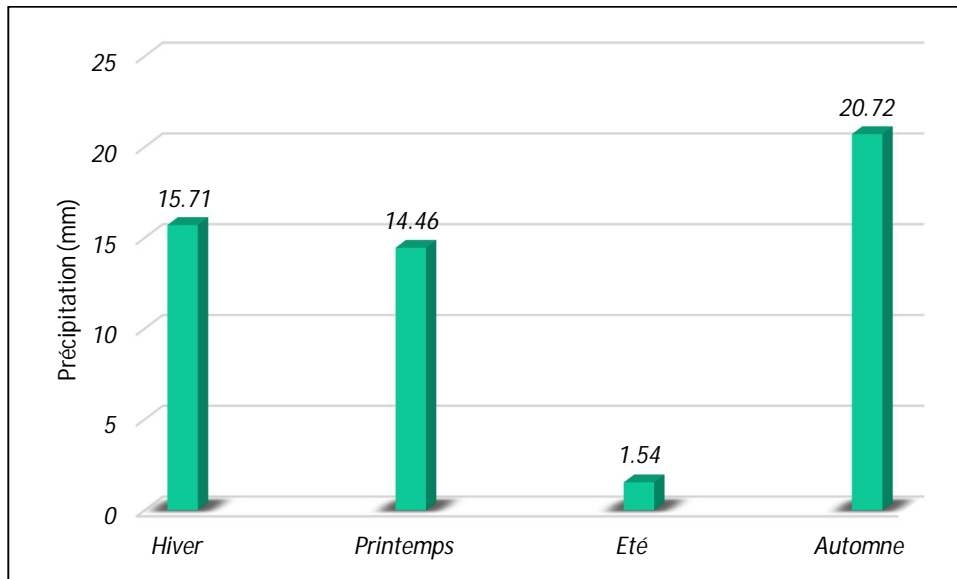


Figure 36: Variabilité saisonnière des précipitations (mm) au village de Tabelbala de la période 1981-2021.

Tableau 4: Variabilité saisonnière des précipitations au village de Tabelbala de la période 1981-2021.

	Hiver			Printemps			Eté			Automne		
	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
Précip Moy (mm)	15.71 mm			14.46 mm			1.54 mm			20.72 mm		

Sur la base de l’histogramme de variabilité de précipitation saisonnière (fig.36 et Tab.4), il a été constaté que la saison d’automne est considérée comme étant la saison la plus pluvieuse avec un taux de précipitation qui avoisine 6.91 mm, alors que la saison d’été est la saison la moins pluvieuse.

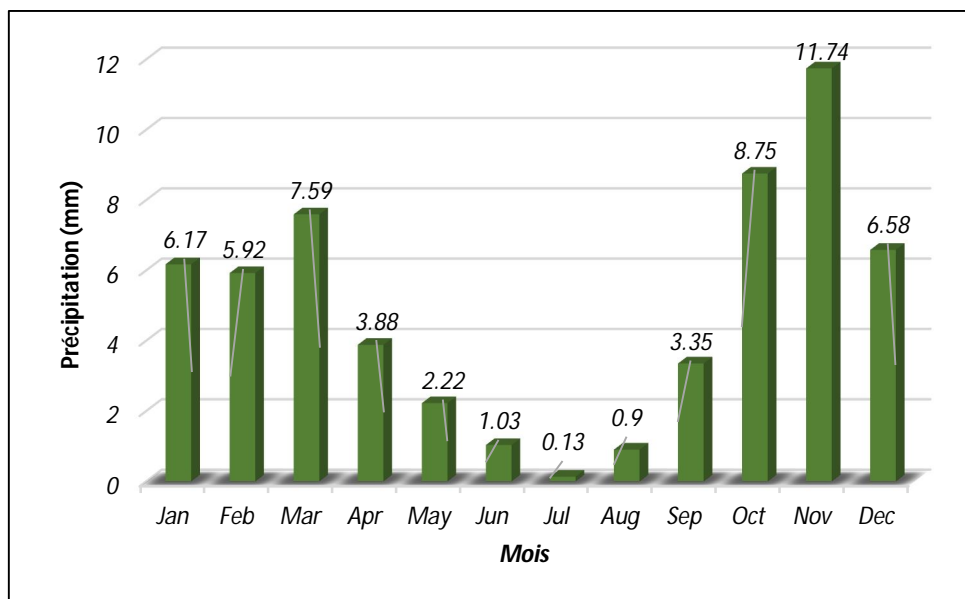


Figure 37: Variabilité moyenne mensuelle des précipitations (mm) au NW de la zone.

Tableau 5: Variabilité mensuelle des précipitations (mm) au village de Tabelbala de la période 1981-2021.

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
Précip	6.17	5.92	7.59	3.88	2.22	1.03	0.13	0.90	3.35	8.75	11.74	6.58	58.26

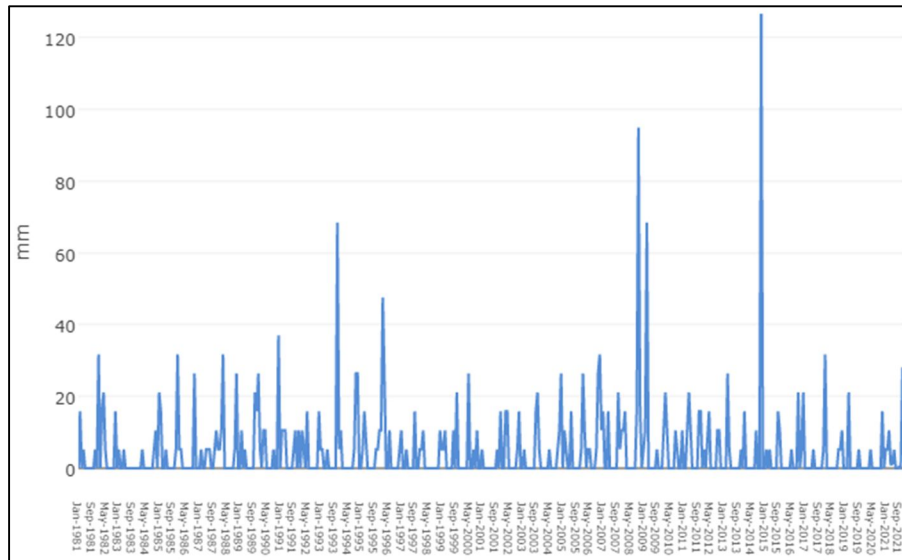


Figure 38: Variation interannuelle des précipitations de l'extrême NE de la zone d'étude pour la période 1981-2021.

Nous avons remarqué par ailleurs, une augmentation notable de précipitation de 5 mm en moyenne dans la région, en comparant les cartes de précipitations des deux périodes générées sur la base des données satellites avec celle établie par (Dubief, 1953b) (fig.39 et fig.40).

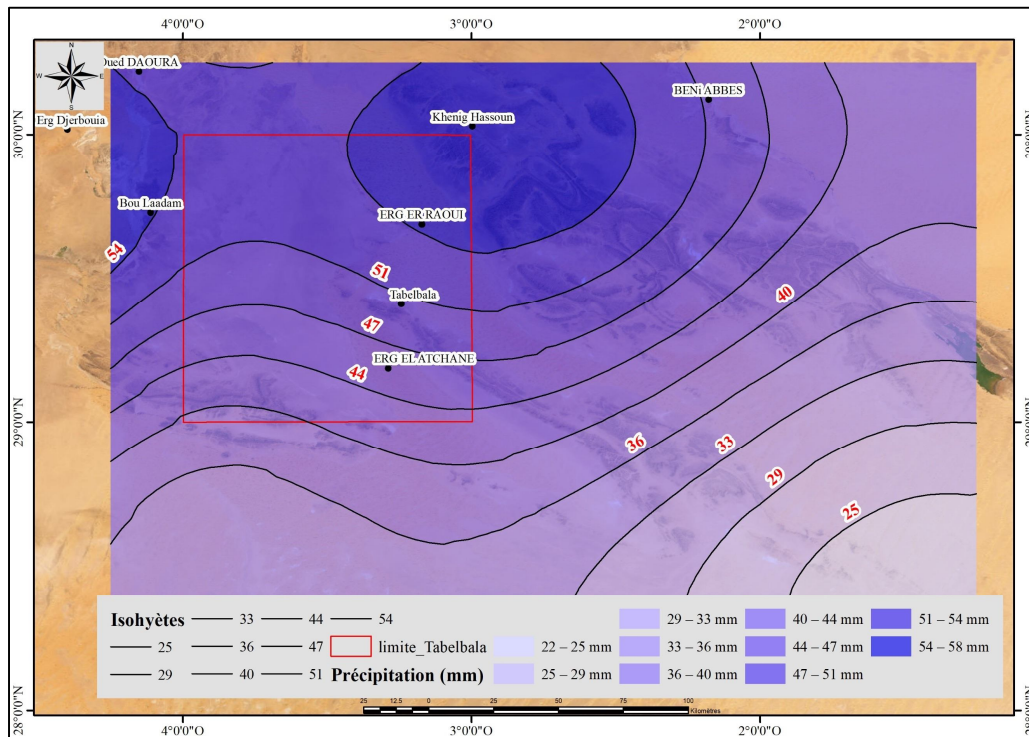


Figure 39: Précipitation moyenne annuelle de 1981 à 2000.

Une zonéographie de précipitation moyenne annuelle a été établie, illustrant la distribution spatiale des moyennes annuelles de pluviométrie. Il a été observé d'après les figures 39 et 40 que la précipitation atteint son maximum au nord-ouest de la région d'étude, tandis qu'elle diminue progressivement en se déplaçant vers le sud-est.

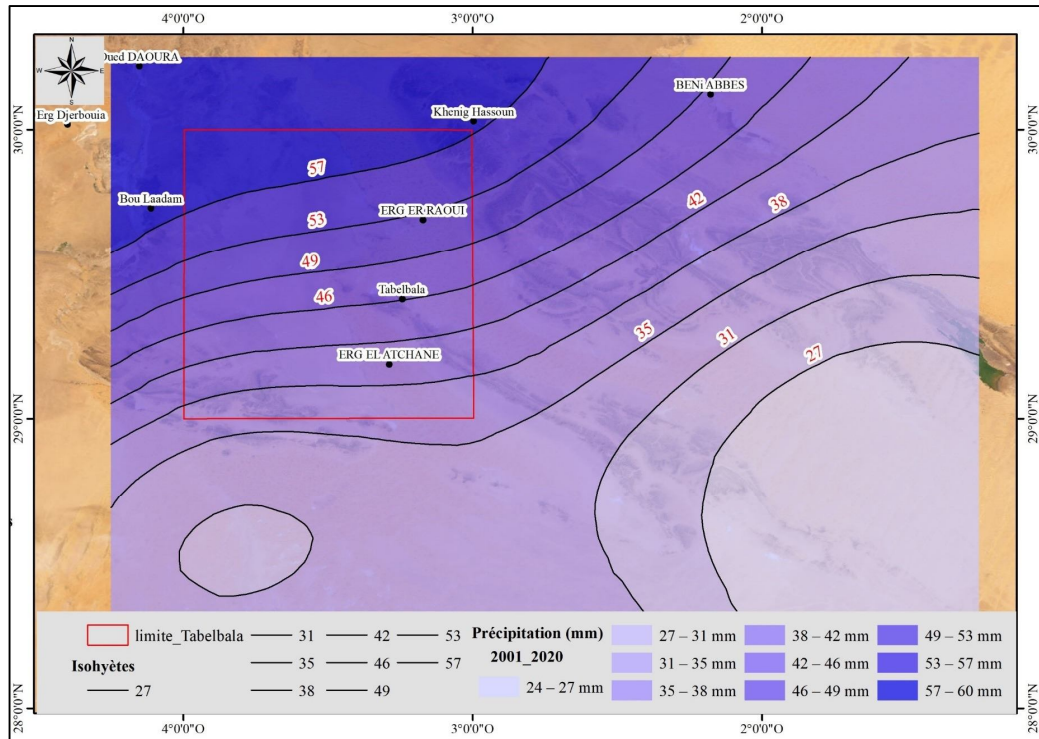


Figure 40: Précipitation moyenne annuelle du 2000 à 2022.

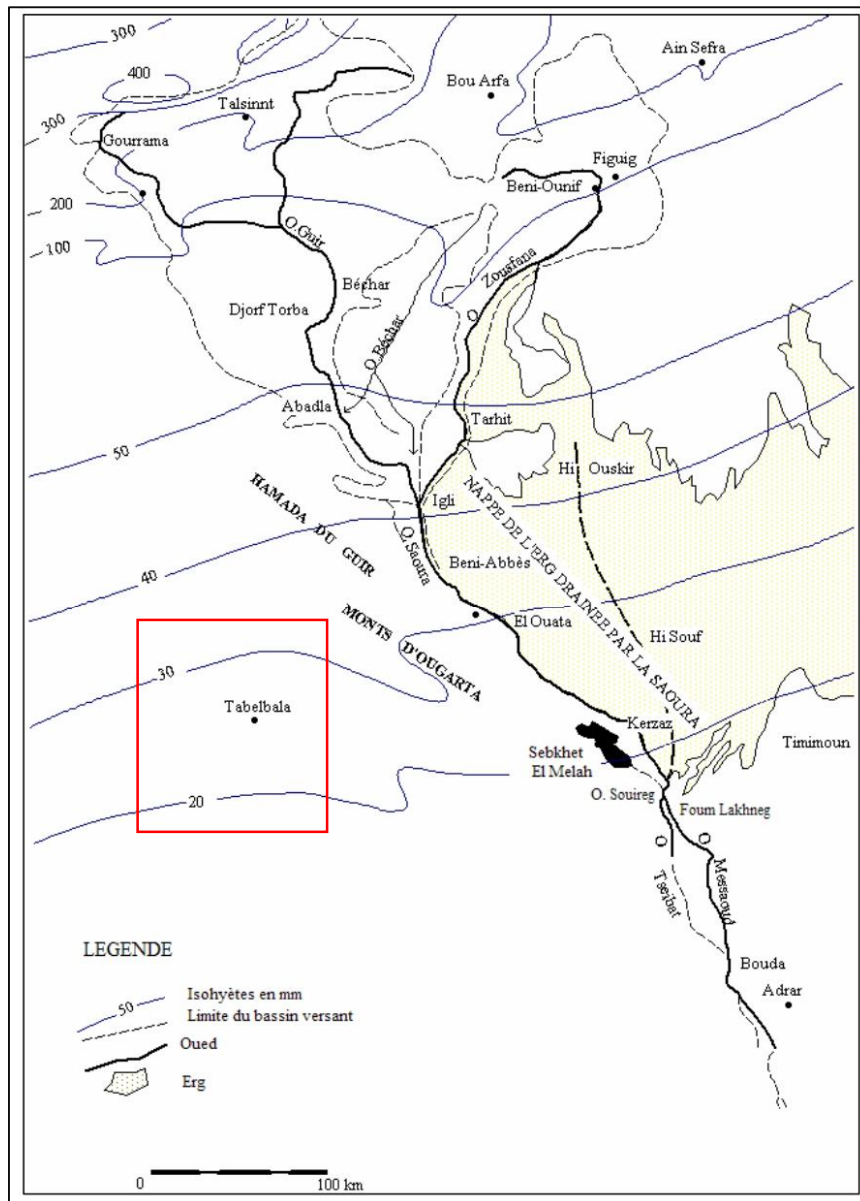


Figure 41: Pluviométrie relative au bassin de la Saoura et la partie ouest du Grand Erg Occidental (Dubief, 1953, modifiée).

4. Indice pluviométrique

L'indice pluviométrique annuel est un paramètre permettant de fournir des informations ayant conduit à la compréhension du régime pluviométrique d'une année bien déterminée. Il se traduit généralement par un déficit ou bien par un excédent de l'année considérée par comparaison à la période d'analyse choisie. Cet indice s'exprime généralement par la formule suivante :

$$IP = (xi - X) / \sigma \quad (2.2)$$

Dont : xi est le taux de la pluviométrie relative à l'année i ;

X Correspond à la pluviométrie moyenne interannuelle de la période d'analyse ;

σ Est l'écart type relatif à la pluviométrie annuelle de la période d'analyse ;

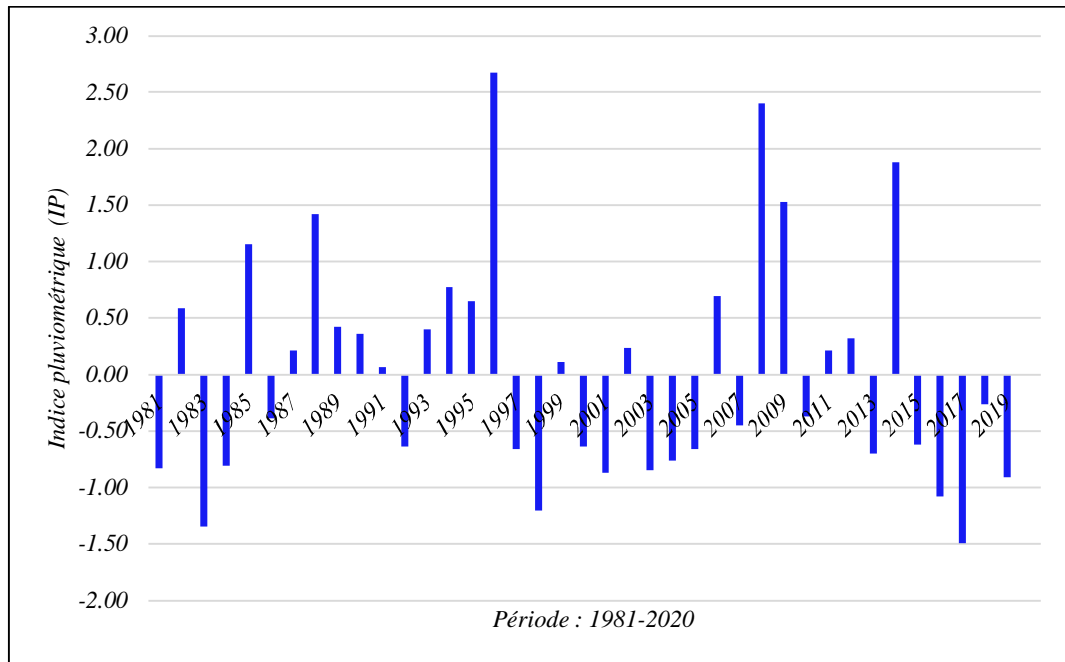


Figure 42: Indice pluviométrique interannuelle de Tabelbala de la période 1981-2020.

Il a été constaté d'après la figure 42 que l'indice pluviométrique varie entre -1.49 et 2.67. Une alternance de phases déficitaires et excédentaires a été observée dans la région étudiée. Les phases déficitaires ont été enregistrées durant les périodes mentionnées 1981-1984, 1997-2005 et 2013-2020 et qui ont connu des valeurs négatives minimales marquant un déficit assez élevé des totaux pluviométriques. Quant aux phases excédentaires, elles sont liées aux périodes 1987-1996 et 2008-2014 et qui sont marquées par un excédent où l'indice pluviométrique a atteint sa valeur maximale.

5. Humidité relative de l'air

L'humidité relative 'degré hygrométrique' est définie comme étant le ratio de la quantité réelle de vapeur d'eau effectivement présente dans l'air et la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir, à une température et une pression donnée. Cette valeur s'exprime en pourcentage (%).

Leurs mesures doivent être relevées dans des périodes bien précises dans la journée à 7h, 13h et à 18h, et ceci d'après (Seltzer, 1946). Généralement, le taux maximum d'humidité s'enregistre en saison hivernale au moment où les précipitations atteignent leurs maximums, tandis que les basses valeurs d'humidité s'observent en période estivale dont le cumul de précipitation atteint son minimum.

Une série des données d'humidité relative s'étend de 1981 à 2020 a été exploitée pour bien mener cette étude. Les taux de variabilité mensuelle de l'humidité de la région d'étude sont illustrés par les figures 43 et 44.

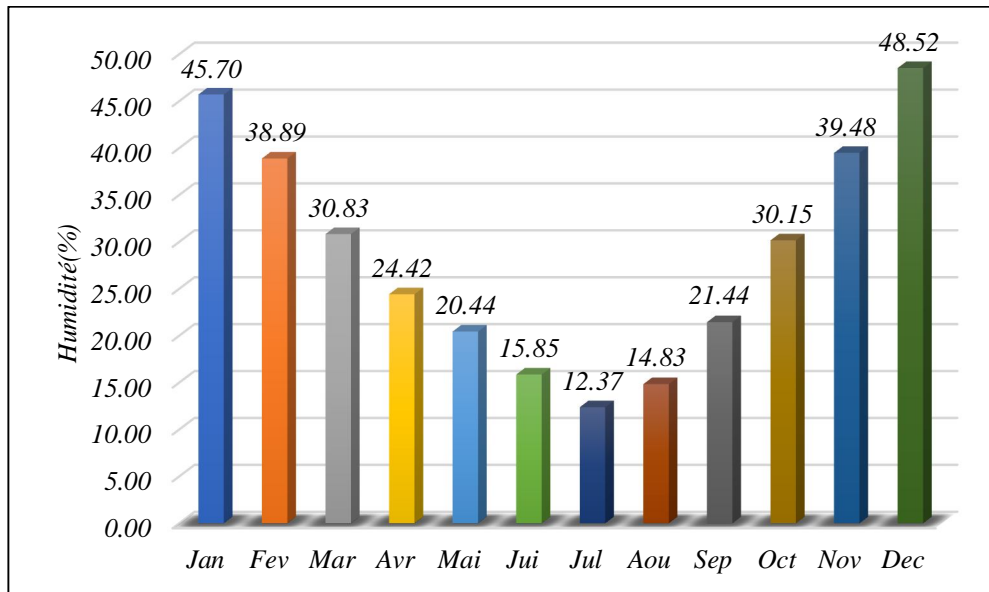


Figure 43: Variabilité mensuelle de l'humidité de la région d'étude (1981-2020).

La moyenne annuelle d'humidité varie de 27,28 à 30,29 %, et ceci d'après la carte de distribution spatiale de taux d'humidité relative de l'air (voir fig.44) qui s'exprime dans la plupart du temps en pourcentage (%). Les taux élevés des moyennes annuelles d'humidités ont été enregistrées au nord-est, ils s'abaissant graduellement vers le sud-ouest. Dans l'ensemble le taux d'humidité ne dépassant pas 50 % durant toute l'année. La valeur d'humidité correspond aux mois de janvier et décembre avec des taux de 47.70 et 48.52 % respectivement tandis que les basses valeurs d'humidités ont été enregistrées au mois d'aout avec 12.37 %.

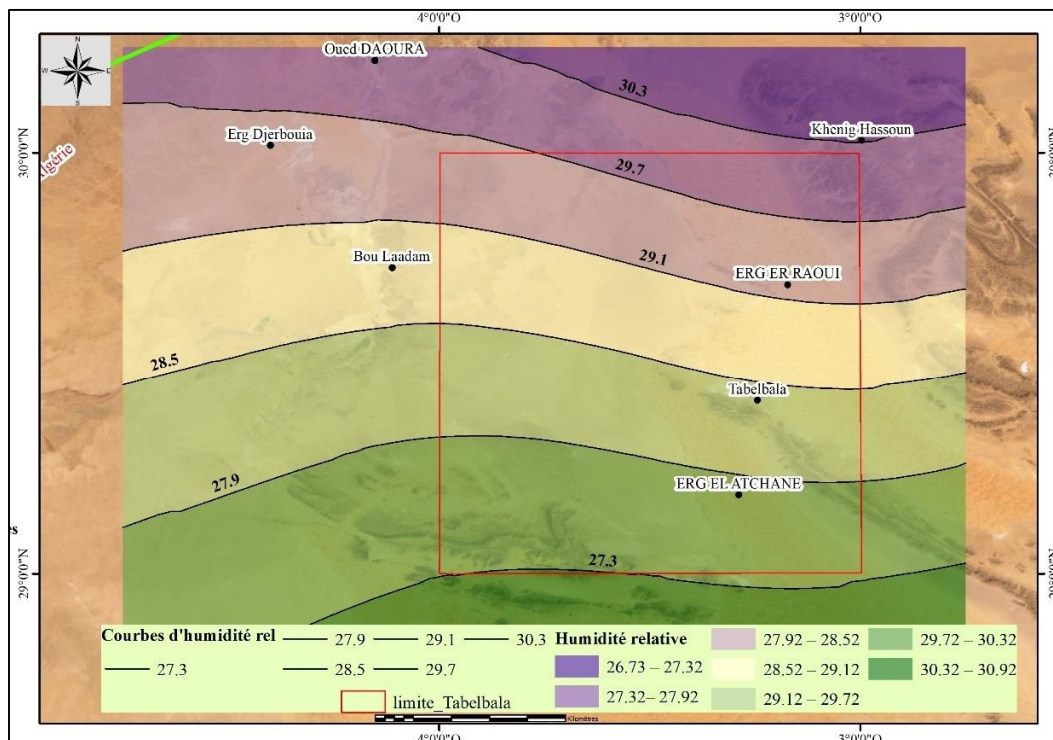


Figure 44: Variabilité moyenne annuelle de l'humidité de l'air de la région d'étude pour la période 1981-2020.

6. Vent

Le terme "vent" est défini comme étant le mouvement naturel d'une masse d'air dans une certaine direction (Tong, 2010). La carte de la distribution spatiale de vitesses et de directions du vent présentée en figure 45 montre les principales directions du vent ainsi que leurs vitesses en mètre par seconde. Des chroniques de vitesses et de directions sont disponibles à partir de 1981 jusqu'à 2020 sur le jeu de données fourni par la plateforme Power Nasa. Les données ont été téléchargées, elles seront ensuite traitées afin d'aboutir au résultat qui est la carte de variabilité de directions et de vitesses du vent relatives à notre site d'étude.

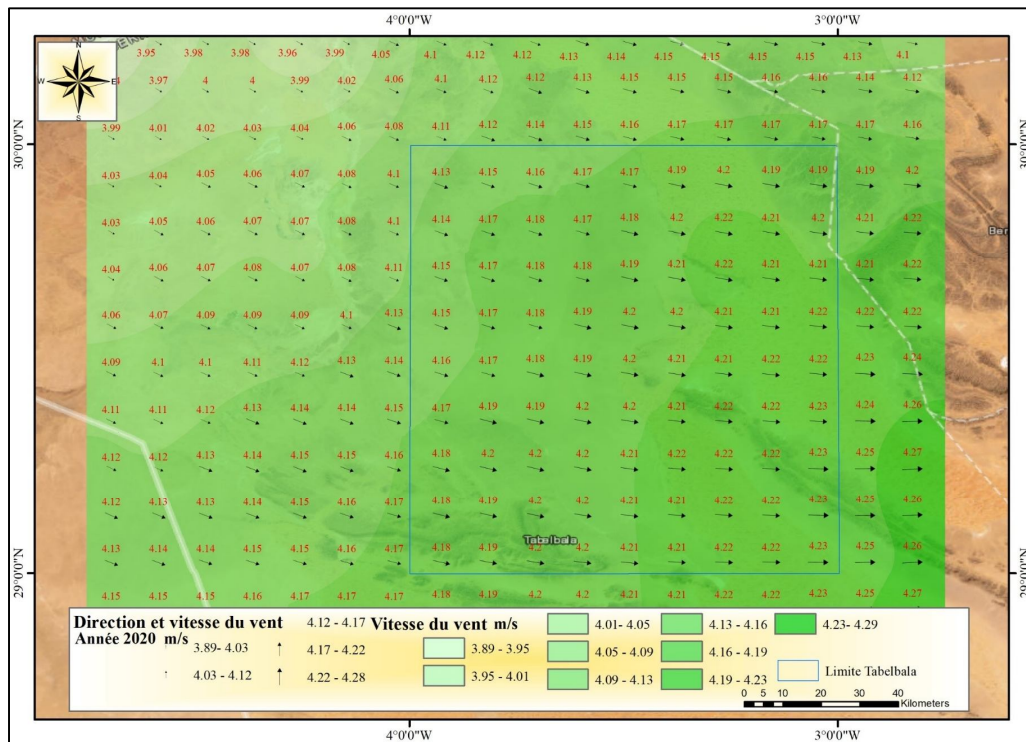


Figure 45: Vitesse et direction du vent de la zone d'étude (Année 2020).

Comme il a été indiqué dans la figure 45, la vitesse moyenne annuelle du vent à 2 m/s pour l'année 2020 peut être considérée comme homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, elle est 3 m/s. Elle dépasse la moyenne annuelle du mois de mars au mois de juillet. Il a été constaté aussi que les saisons d'hiver et d'automne sont marquées par des vitesses relativement inférieures à la vitesse moyenne à l'exception du mois d'octobre qui a connu une vitesse de 3.28 m/s.

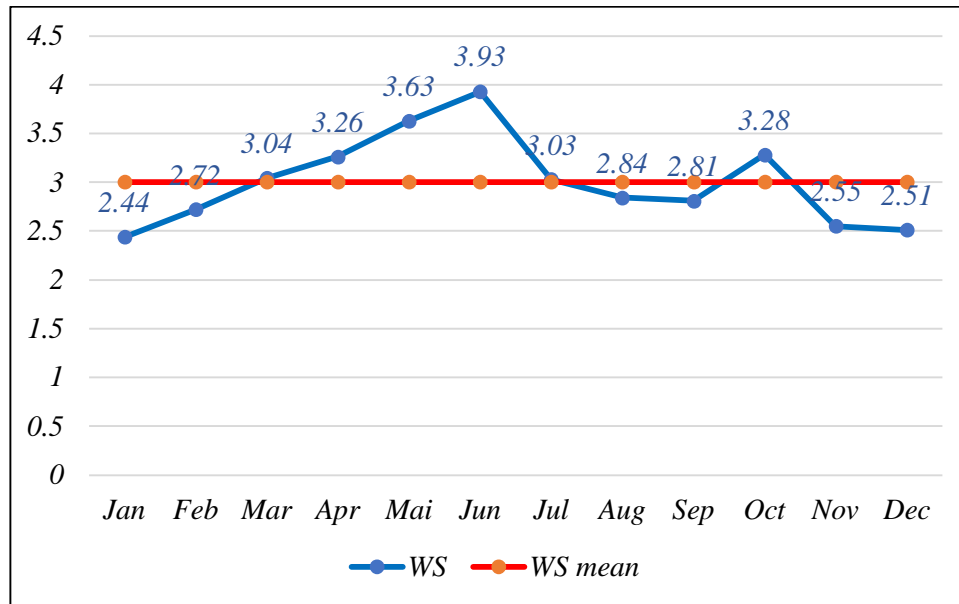


Figure 46: Vitesse moyenne mensuelle du vent pour l'année 2020.

7. Humidité du sol

L'humidité du sol correspond au stockage temporaire de l'eau dans la couche superficielle de la surface terrestre. En comparant cette entité avec la quantité d'eau disponible dans le monde, l'humidité du sol dans cette couche qui conditionne toutes les activités agricoles semble insignifiante. Elle affecte également de manière significative les taux des précipitations qui s'infiltrent, se ruissellent ou s'évaporent du sol.

Les données sur les conditions d'humidité du sol constituent un paramètre essentiel pour la prévision du rendement des cultures, la planification de l'irrigation, ainsi que pour diverses applications dans les domaines hydrologique, agricole et météorologique.

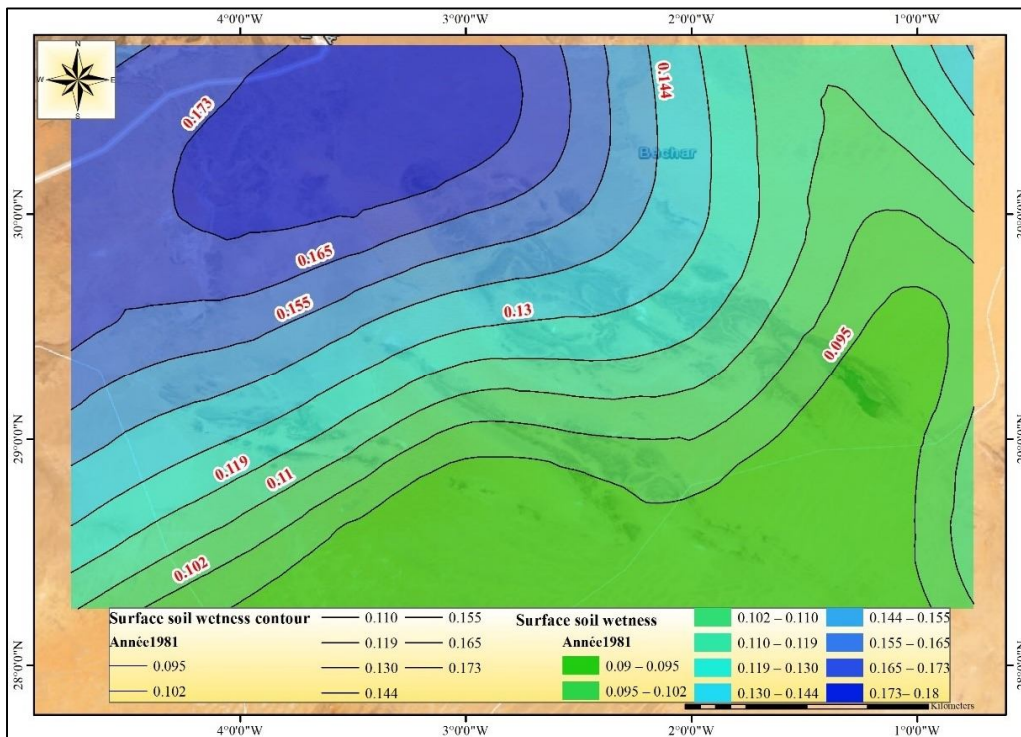


Figure 47: Distribution spatiale des valeurs mensuelles de l'humidité du sol à Tabelbala1981.

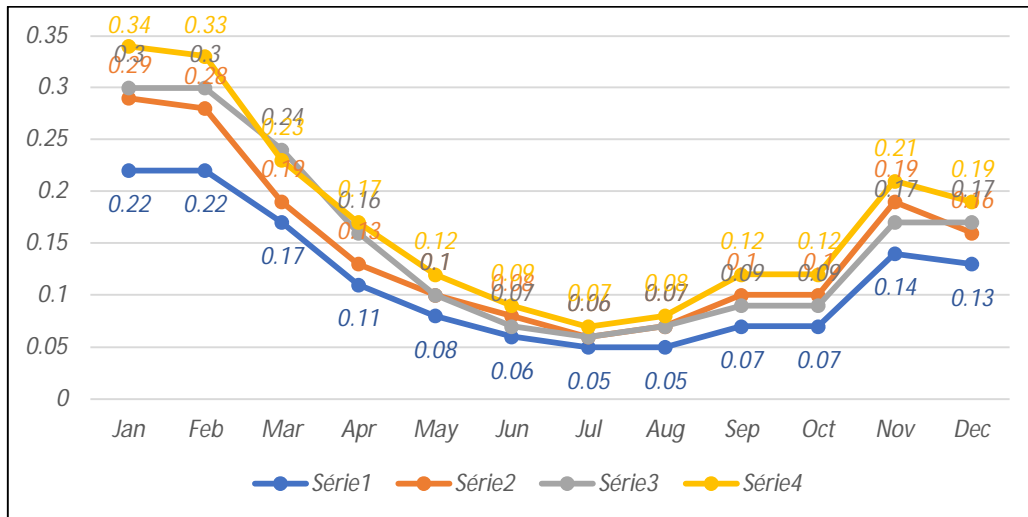


Figure 48: Variabilité mensuelle de l'humidité du sol à Tabelbala 1981.

Les méthodes de télédétection sont les mieux adaptées, car elles fournissent des moyens pratiques et rentables à leurs estimations. En ce qui concerne ce facteur dans la zone d'intérêt, les valeurs ont été reportées dans les figures 47, 48, 49, 50, 51 et 52 dont les taux d'humidité maximale ont été enregistrés en mois de janvier (0.34), novembre (0.2) et décembre (0.3) pour les années 1981, 2000, et 2020 respectivement.

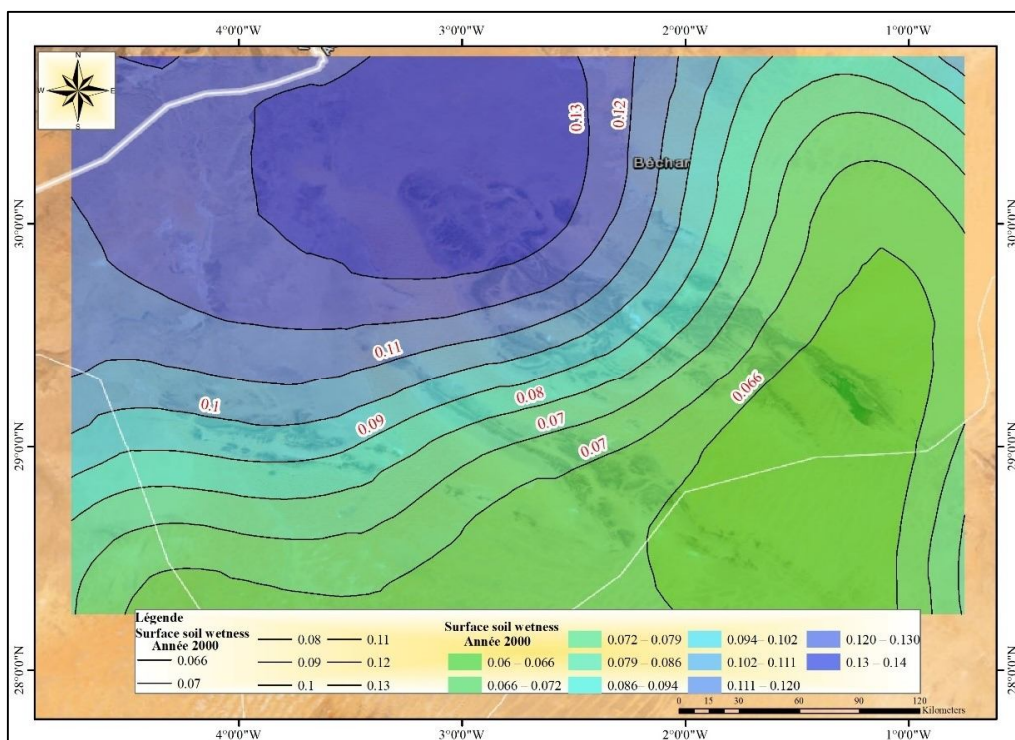


Figure 49: Distribution spatiale des valeurs mensuelles de l'humidité du sol à Tabelbala 2000.

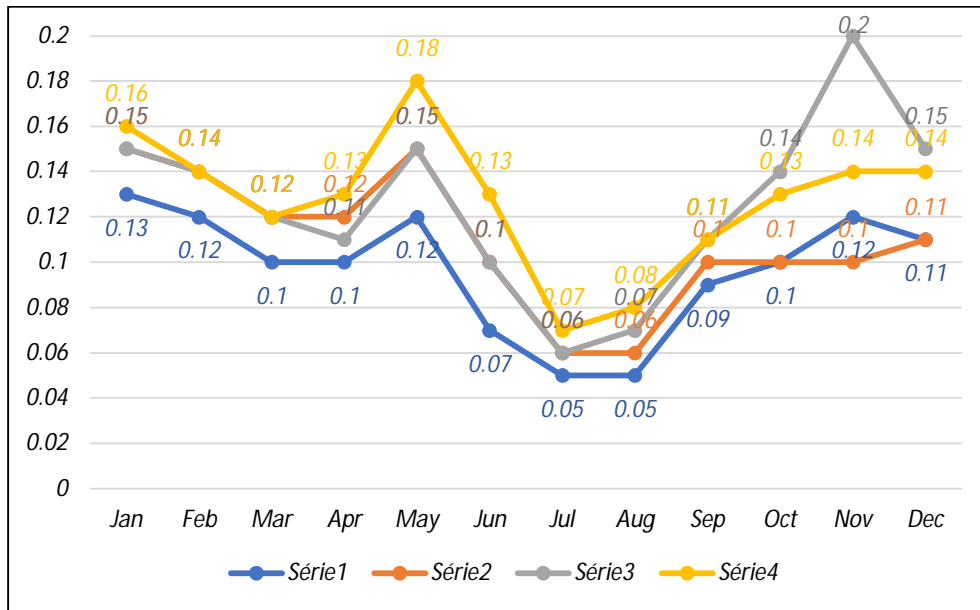


Figure 50: Variabilité mensuelle de l’humidité du sol à Tabelbala 2000.

Les figures traduisent clairement les variations correspondant aux valeurs d’humidité du sol mensuelles pour les trois périodes à l’échelle annuelle. Nous avons observé que le taux d’humidité augmente en allant vers le Nord-Ouest.

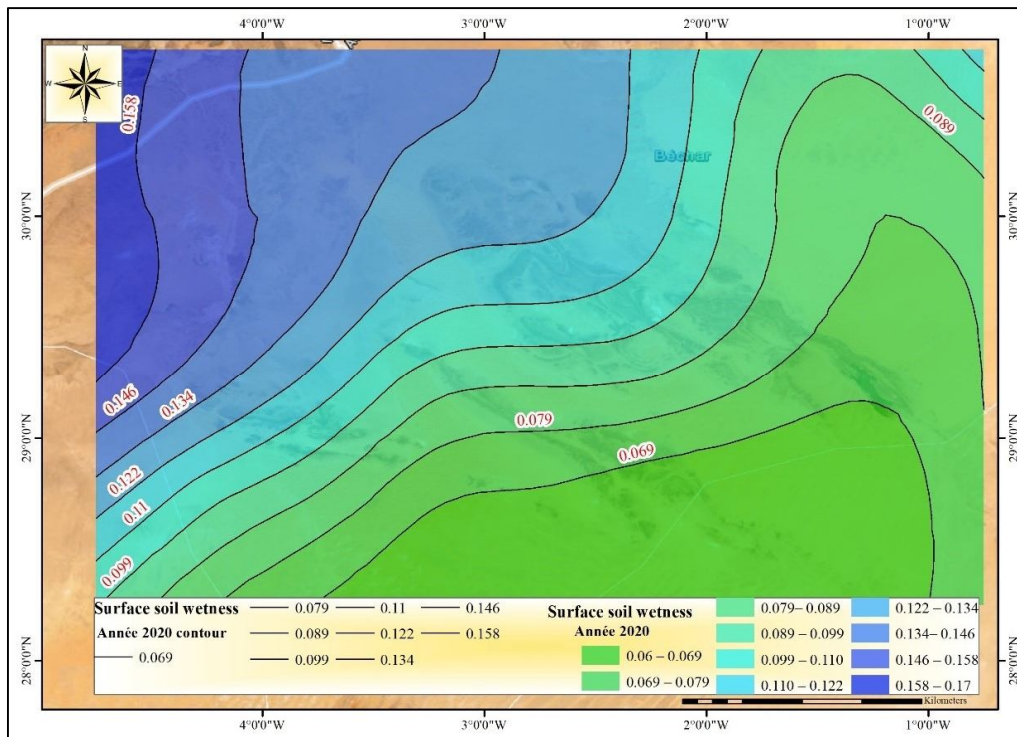


Figure 51: Distribution spatiale des valeurs mensuelles de l’humidité du sol à Tabelbala 2020.

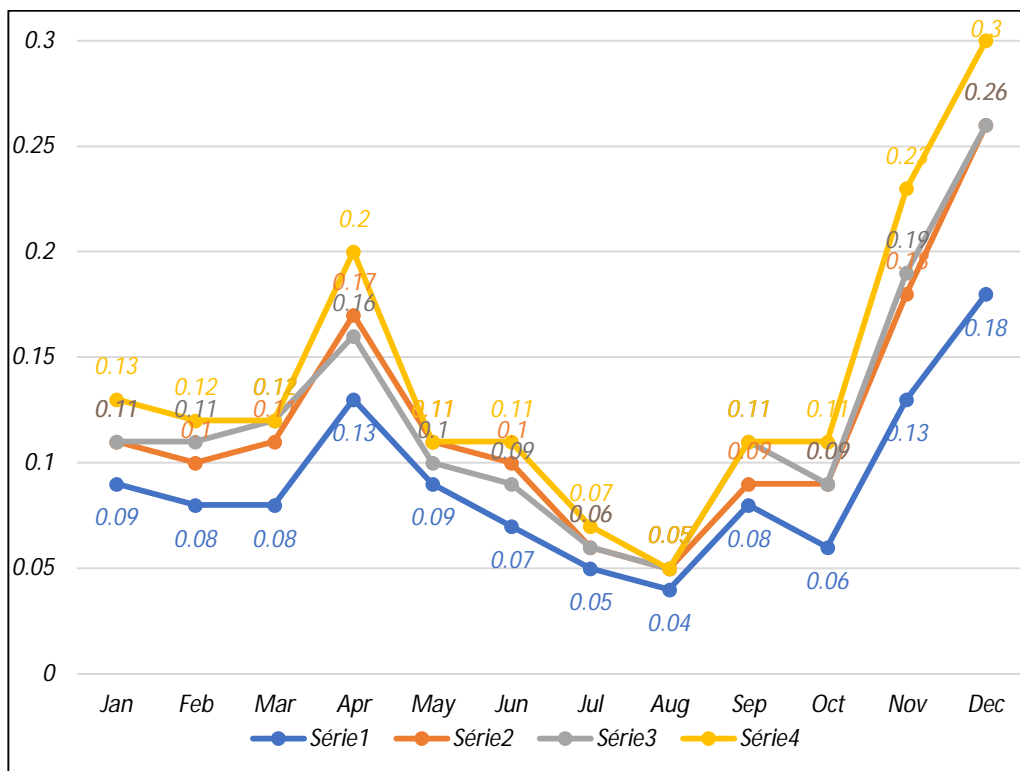


Figure 52: Variabilité mensuelle de l'humidité du sol à Tabelbala 2020.

8. L'évaporation

L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide est transformée en vapeur d'eau (vaporisation) et éliminée de la surface d'évaporation (élimination de la vapeur). L'eau s'évapore de diverses surfaces, telles que les lacs, les rivières, les chaussées, les sols et la végétation humide. Son estimation nécessite l'utilisation des méthodes qui se basent sur des variables climatiques.

Pour notre cas, l'estimation de l'évaporation potentielle a été faite suivant la méthode de Turc qui s'exprime comme suit :

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + (P/L)^2} \quad (2.3)$$

Dont L désigne le pouvoir évaporant et s'exprime $L = 300 + 25T + 0.05T^3$

En prenant $T = 24.26 \text{ }^\circ\text{C}$, et $P = 31.7 \text{ mm}$, pour la région de Tabelbala, on aura $L = 1619.9$ et $ETR = 33.41$.

La valeur d'ETR obtenue s'avère supérieure au taux de précipitation, dans ce cas, cette méthode est inapplicable.

Tableau 6: Variation d'évaporation de l'année de 2020 relative à la région de Tabelbala.

Paramètres	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°	33.21	24.54	17.91	13.21	9.98	16.34	19.11	23.1	27.78	32.51	36.71	36.72	24.26
$P(\text{mm})$	2.1	0.5	11.6	0.0	0.0	0.0	2.6	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	31.7
$ETP(\text{mm})$	94.9	55.3	23.1	12.0	11.1	15.9	32.5	50.8	76.0	112.3	137.2	127.0	748.1

Après avoir examiné les valeurs des données acquises dans la région d'étude, il a été constaté que le taux d'évaporation est estimé de 748.1 mm/an, avec un maximum de cette dernière qui a été enregistré en mois juillet avec un taux de 137.2 mm tandis que le taux minimal de cette dernière a été observé en mois de janvier avec une quantité de 11.1 mm. Il a été remarqué que la période ayant une haute valeur d'évaporation se coïncide et se superpose

parfaitement avec les périodes caractérisant avec des températures très élevées et des vitesses du vent assez importantes.

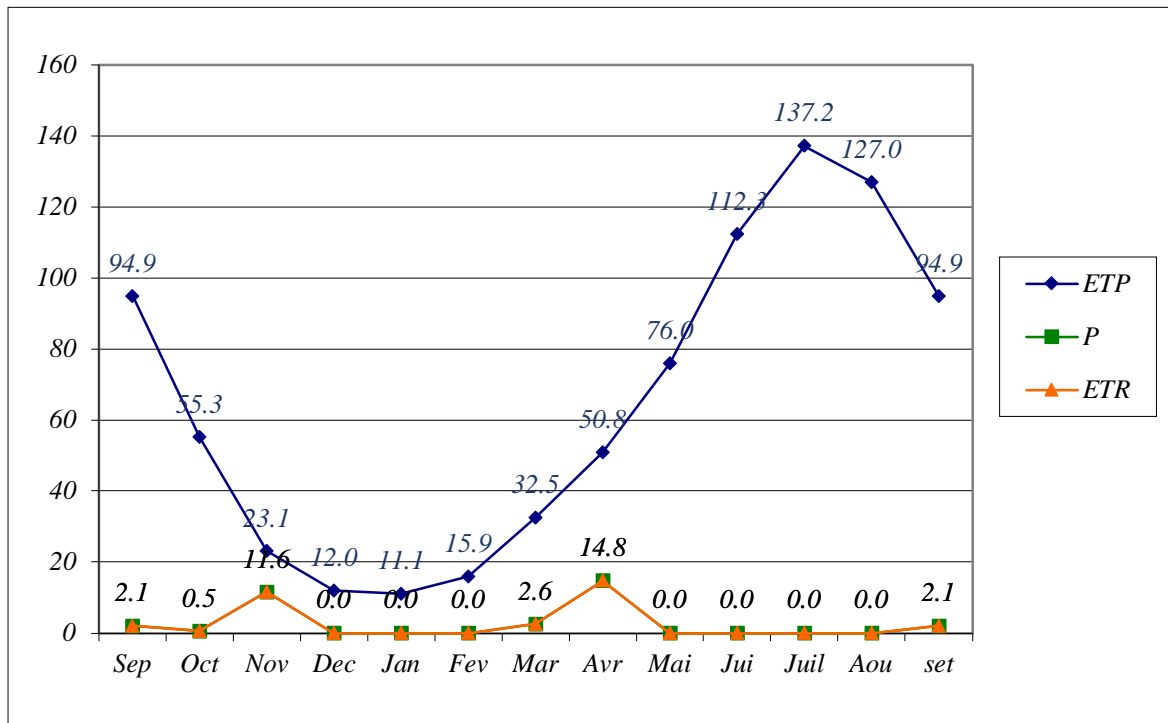


Figure 53: Taux d'évaporation mensuelle de la région de Tabelbala.

Les valeurs d'évaporation ont été représentées et spatialisées sous forme des cartes des trois périodes 1981, 2000 et 2020. En se basant sur la méthode de Turc, les valeurs d'évapotranspiration potentielle ont été calculées pour chaque mois pour les trois années considérées : 1981, 2000 et 2020.

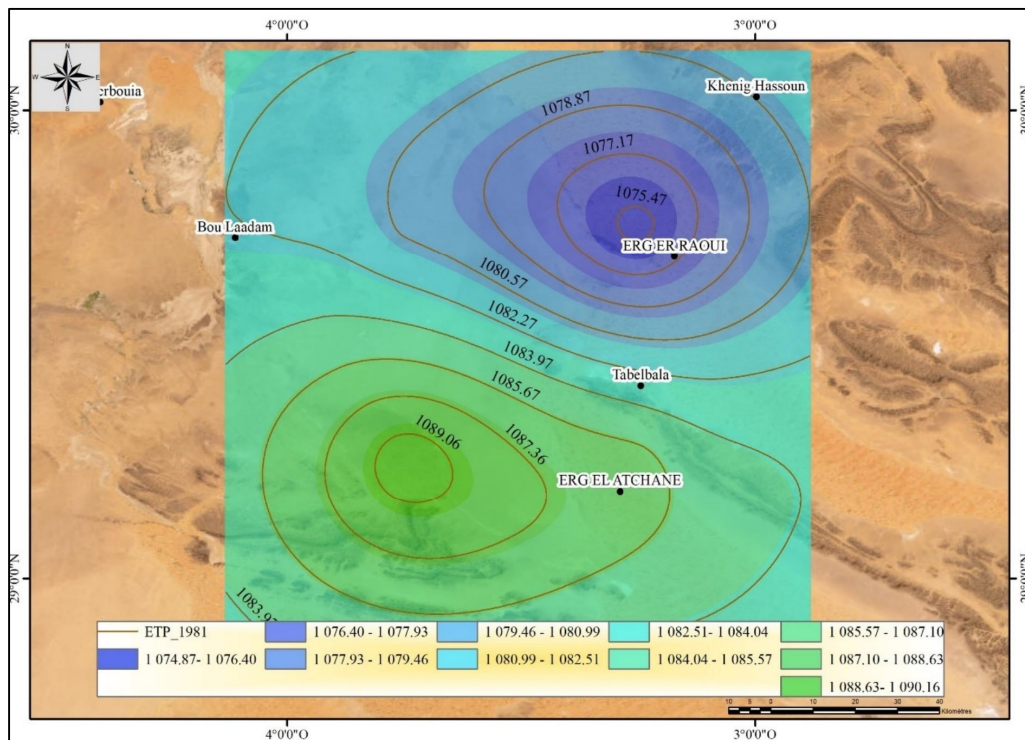


Figure 54: Répartition spatiale de l'ETP relative à l'année 1981.

Les représentations graphiques et le calcul d'évapotranspiration ont permis de confirmer l'hypothèse et la conclusion des travaux menés par (Mabrouk, 2007), qui considéraient que le taux d'évapotranspiration potentielle dépasse largement les quantités des précipitations dans les zones arides (Mabrouk, 2007). Les tableaux 7,8 et 9 illustrent une comparaison des différents taux d'ETP pour les trois périodes (1981, 200 et 2020) et qui ont confirmé ce qui a été conclu auparavant.

Tableau 7: Taux d'ETP mensuelle pour l'année 1981.

Param	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°	30.06	24.88	16.87	14	9.5	11.81	20.06	22	27.14	32.4	35.27	32.48	23.04
P(mm)	0	0	6.86	0	0	14.77	0	2.64	0	0	0	0	24.27
ETP(mm)	107.60	81.76	52.25	43.34	37.91	47.24	73.54	95.36	125.31	138.66	150.43	136.79	1090.19

Une augmentation progressive d'ETP a été observée dans la région dont le mois de juillet a connu la valeur d'ETP la plus élevée et qui dépasse les 150 mm pour les trois périodes, où le taux de l'ETP atteint son maximum dans ce mois tandis que le mois de janvier est caractérisé par les valeurs les plus basses de la série d'ETP, ne dépassant plus les 38 mm.

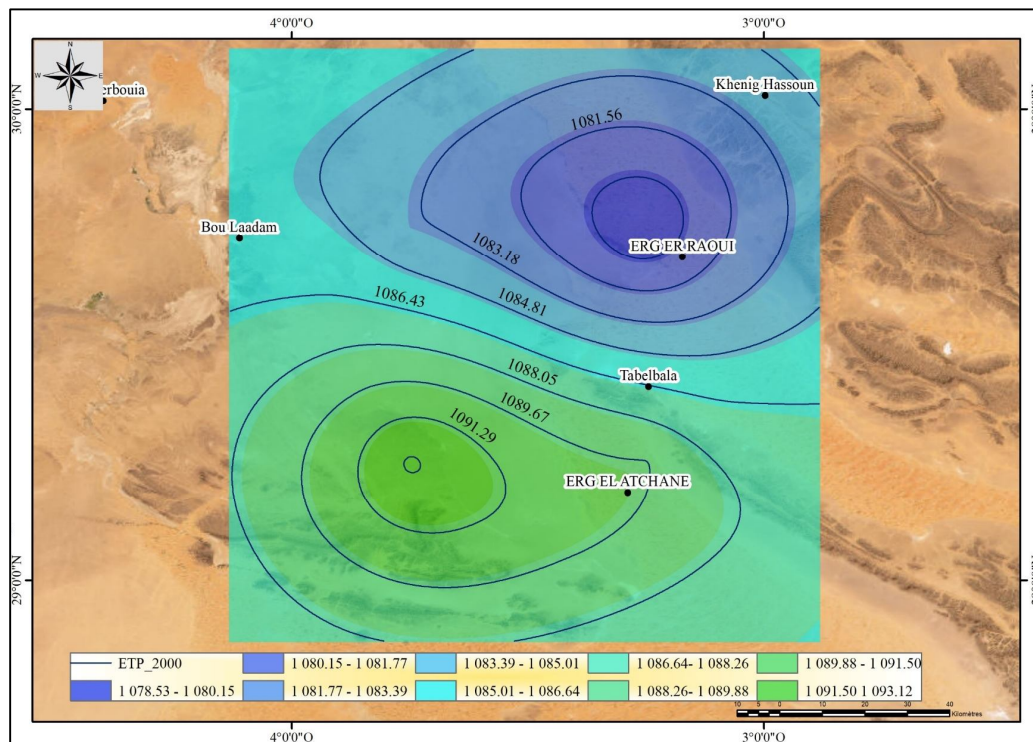


Figure 55: Répartition spatiale de l'ETP relative à l'année 2000.

L'évaporation est estimée de 1.5 à 2.3 mm/ans au Sahara Atlantique, alors qu'au Sahara algérien cette dernière est de l'ordre de 2.5 jusqu'à 5 mm/ans (Dubief, 1960b).

Tableau 8: Taux d'ETP mensuelle pour l'année 2000.

Param	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°	29.81	21.86	18.05	13.44	8.95	14.21	19.22	22.33	26.5	33.22	36.25	34.46	23.19
P(mm)	4.22	6.86	0	0	2.11	4.22	0	2.64	8.96	0	0	0	29.01
ETP(mm)	107.30	77.72	53.91	42.43	36.54	52.17	72.19	95.94	124.24	139.75	151.65	139.32	1093.15

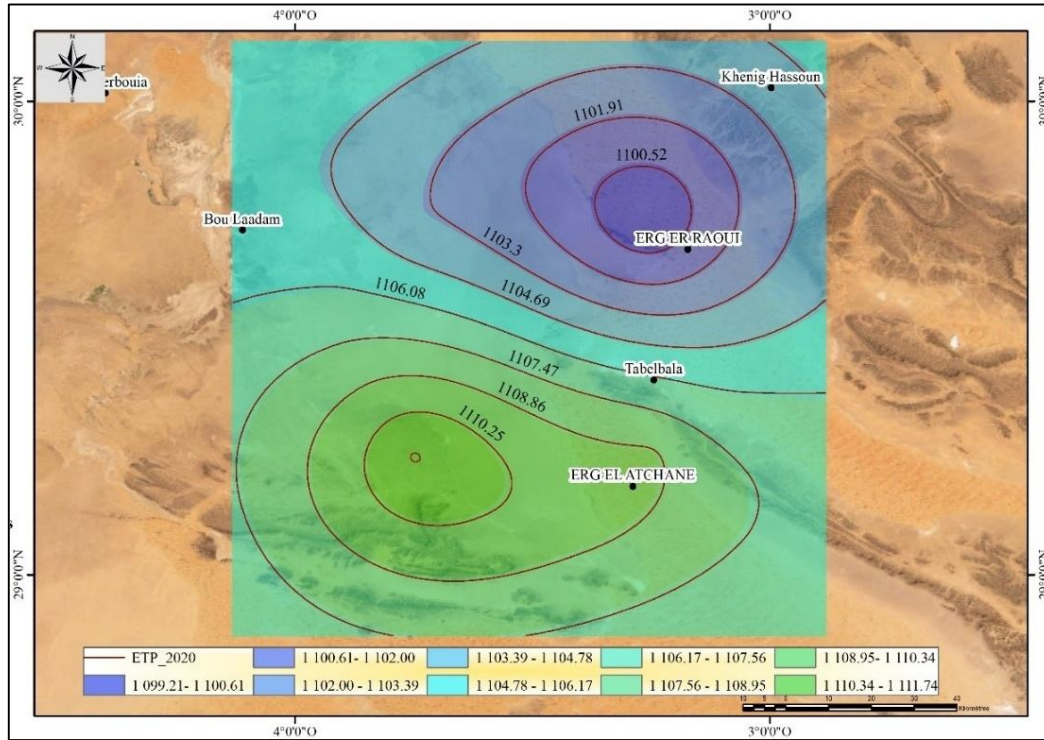


Figure 56: Répartition spatiale de l'ETP relative à l'année 2020.

Tableau 9: Taux d'ETP mensuelle pour l'année 2020.

Param	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°	33.21	24.54	17.91	13.21	9.98	16.34	19.11	23.1	27.78	32.51	36.71	36.72	242.6
P(mm)	2.11	0.53	11.6	0	0	0	2.64	14.77	0	0	0	0	31.65
ETP(mm)	111.11	81.34	53.72	42.04	39.06	55.91	72.00	97.24	126.34	138.80	152.21	141.9	1111.76

9. Evapotranspiration réelle ETR

L'ensemble du processus d'évaporation et de transpiration est appelé transpiration (Morel-Seytoux and Nimmo, 1999). L'estimation du bilan de l'eau se fait par l'utilisation de différentes méthodes développées à savoir (Turc, Thornthwaite, Coutagne etc) permettant le calcul du déficit d'écoulement. Vu la situation géographique de notre zone (zone hyperaride, P<50 mm), il a été constaté d'après les travaux antérieurs que l'estimation de ETR s'avère inefficace dont toutes les méthodes citées sont inapplicables ou inadaptées (Mabrouk, 2007, Merzougui, Rezzoug and Abderahmane, 2022b).

L'abaque conçu par (VERDEIL, 1988), correspond en effet à une approche permettant l'estimation de déficit d'écoulement qui se base sur les précipitations, particulièrement dans les zones arides et semi-arides. Il exploite des données de précipitation afin d'estimer le déficit en eau correspondant à la différence entre l'eau emmagasiner dans les sols et l'eau nécessaire pour

les besoins des plantes. Dans le cas de notre zone, l’abaque de Verdeil a donné une valeur de 29 mm de déficit d’écoulement.

10. Indice d’aridité

L’indice d’aridité ainsi que la classification du climat ont fait l’objet de nombreux travaux de recherche entrepris en climatologie. Les indices les plus utilisés sont ceux de De Martonne, et d’Emmanuel (SEMARI, 2016) permettant l’identification de la nature du climat régnant d’une région. En vue de caractériser le climat relatif à notre zone, nous avons calculé l’indice d’aridité (intensité de la sécheresse), de De Martonne et qui nous a indiqué que notre région est soumise à un climat hyperrapide où la précipitation est inférieure à l’évapotranspiration potentielle (fig.57). Cet indice s’exprime par l’équation suivante :

$$I = P / (T +10) \quad (2.4)$$

Avec : P désigne la précipitation totale annuelle (mm) ;

T correspond à la température moyenne annuelle (°C) ;

Tableau 10: Indice d’aridité calculé dans la région de Tabelbala.

ann	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	
I	0.75	1.91	0.34	0.79	2.32	1.12	1.54	2.53	1.73	1.65	1.49	0.93	1.75	
ann	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
I	2.00	1.90	3.50	0.86	0.44	1.46	0.89	0.68	1.54	0.72	0.79	0.86	1.91	
ann	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
I	1.03	3.28	2.58	1.06	1.56	1.65	0.84	2.81	0.91	0.54	0.22	1.19	0.67	0.94

Sont représentés dans le tableau 10, les résultats de calculs relatifs à l’indice d’aridité de la zone considérée.

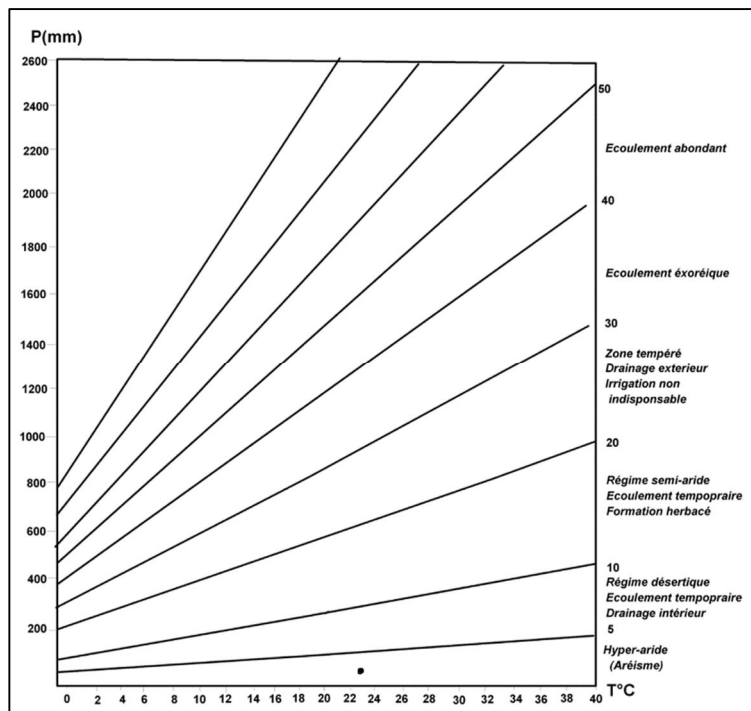


Figure 57: Abaque de l’indice d’aridité de DeMartonne (De.Martonne, 1925).

Le quotient pluviothermique d'(Emberger, 1955), définit la nature du bioclimat des régions méditerranéennes (fig.58). Il se calcule comme suit :

$$Q_2 = \frac{1000P}{\frac{M+m}{2}(M-m)} \quad (2.5)$$

Q_2 : correspond au quotient pluviothermique ;

P : est la précipitation moyenne annuelle (mm).

M : désigne la moyenne des maximas du mois le plus chaud en °Kelvin.

m : correspond à la moyenne des minima du mois le plus froid en °Kelvin.

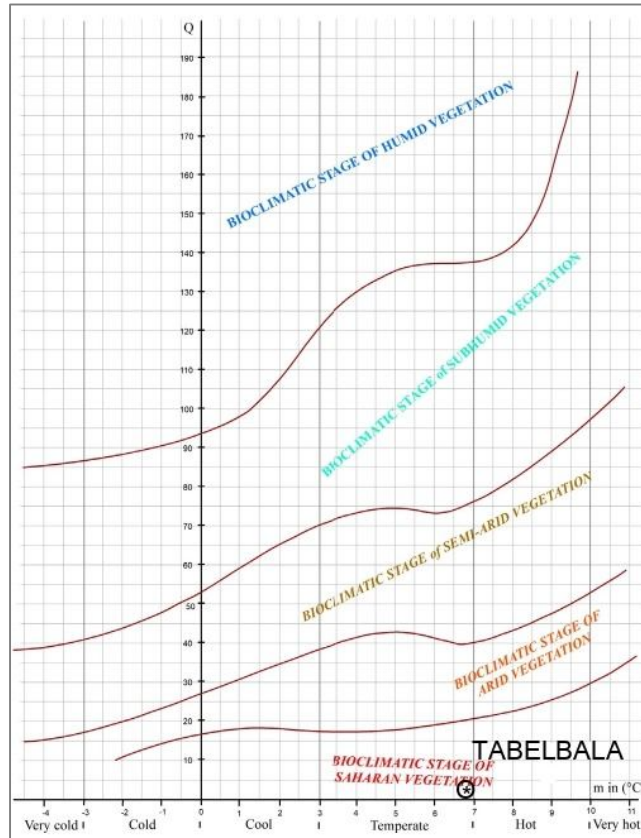


Figure 58: Quotient pluviothermique d'Emberger, 1955.

Une autre classification du climat a été proposée par (Bagnouls, 1953). Selon cette approche, un mois est considéré sec, lorsque le taux de cumul de pluviosité est inférieur ou égale au double de la température moyenne mensuelle :

$$(P \leq 2T) \quad (2.6)$$

Où P : correspond à la pluviosité totale mensuelle (mm) ;

T : est la température moyenne mensuelle (°C) ;

D'après le diagramme ombrothermique généré (fig.59), notre zone a connu une phase déficitaire tout au long de l'année, conformément au diagramme établi. Cette situation est en concordance avec l'étage climatique hyperaride relatif au secteur d'étude.

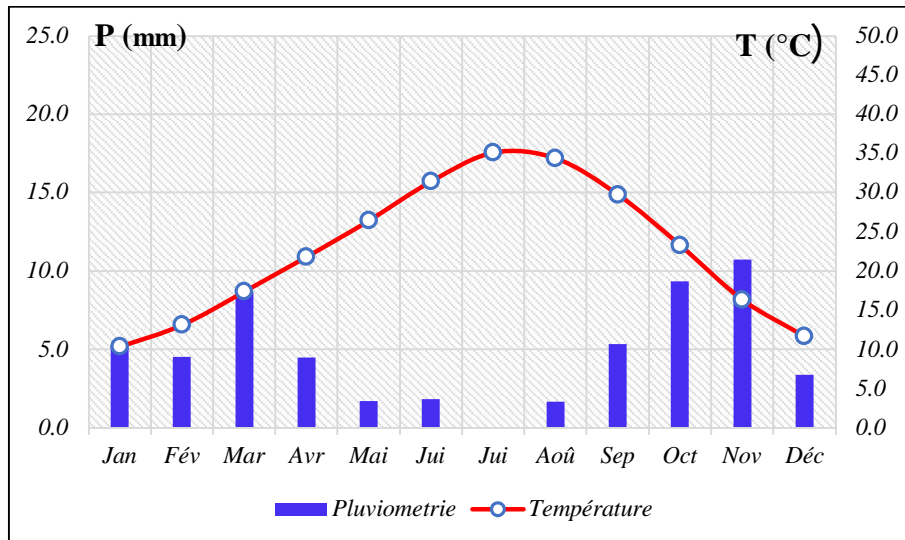


Figure 59: Diagramme ombrothermique de l'aire de l'étude.

11. Bilan hydrologique

C'est un paramètre permettant l'estimation de la répartition des précipitations entre les différentes actions du bilan à savoir l'évapotranspiration, l'infiltration et l'écoulement. Il s'exprime par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \quad (2.7)$$

Où P : désigne la précipitation moyenne annuelle (mm) ;

ETR : est l'évapotranspiration réelle (mm) ; I : correspond à l'infiltration (mm) ;

L'analyse de différents paramètres climatiques issus de données POWER, révèlent clairement les variations de ces derniers au cours du temps et dans l'espace et notamment celle de précipitation qui est inférieure à l'évapotranspiration ce qui rend le calcul du bilan hydrologique presque impossible. Il convient de souligner que la recharge naturelle des nappes de cette région se fait surtout par la pluie efficace, difficilement estimée par les méthodes classiques (faible pourcentage), par les crues exceptionnelles, par les apports latéraux entre nappes (la nappe de la Hamada est alimentée par la nappe de l'Erg et par la nappe cambro-ordovicienne), sans négliger l'existence des eaux fossiles.

III. Validation de l'ensemble de données POWER

Le jeu de données pluviométriques, issu de la plateforme POWER avec une taille de pixel de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ a été utilisé pour l'établissement de cartes des précipitations en raison de la rareté des stations de mesure disponible dans notre zone. L'applicabilité des données POWER dans la région d'étude a été déterminée en les comparant à l'ensemble des données de précipitations enregistrées par la station météorologique de Beni Abbès (135 km au NE de Tabelbala). La figure 60 montre une forte corrélation linéaire entre les données de précipitation mensuelles observées par la station météorologique de Beni Abbès et l'ensemble de données POWER, dont le coefficient de corrélation est estimé de $r^2 = 0.86$ ce qui traduit leur ressemblance et similitude. En se référant aussi aux travaux entrepris par (Dubief, 1953b) relatifs à la carte de précipitation du bassin de la Saoura et la partie Ouest du Grand Erg Occidental et qui a illustrée à son tour une forte cohérence de cette dernière avec ce qui a été obtenu via le jeu de donnée POWER (Jed *et al.*, 2022).

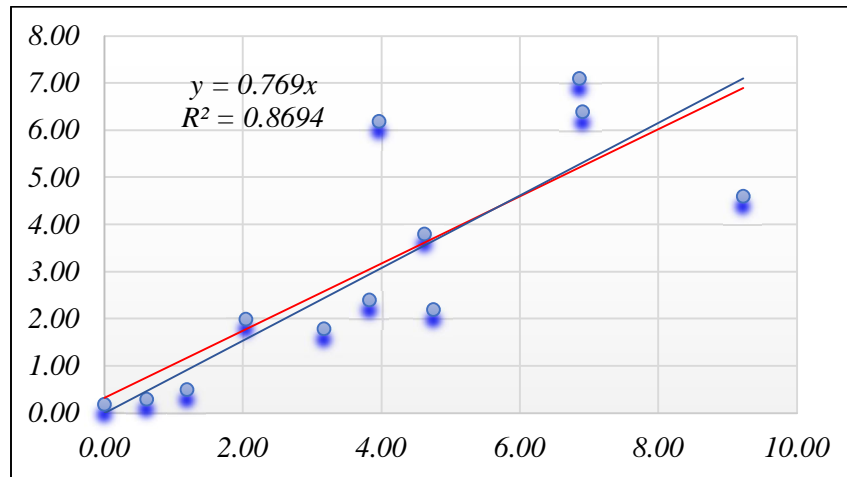


Figure 60: Corrélation linéaire entre les données de la station de Beni Abbès et celles de POWER.

IV. Conclusion

Le climat regroupe l'ensemble des phénomènes naturels (précipitation, température de l'air, humidité de l'air, pression atmosphérique, vents...) variant dans l'espace et dans le temps, agissant d'une manière directe sur le renouvellement et la recharge des eaux souterraines de la région de Tabelbala. Dans cette partie, une synthèse hydroclimatologique a été effectuée sur une série d'observations allant de 1983 à 2023. Elle traite en détail les différents aspects climatologiques afin de caractériser le type de climat de la région considérée et d'estimer la probabilité d'alimentation des nappes à travers les précipitations, et ceci bien sûr par l'exploitation des données POWER. Cette dernière nous a donné l'opportunité d'introduire les sources d'information climatologique universelle en raison de l'absence totale des stations météorologiques dans la région d'étude et qui nous a poussés à utiliser une source alternative.

Dans les travaux d'investigation des ressources hydriques, les conditions climatiques sont des paramètres indispensables pour une telle étude, elles doivent d'être prise en considération afin de mieux cerner les aires de potentialité et de recharge. En effet, les conditions climatiques disponibles pour notre recherche sont considérées satisfaisantes afin de déterminer et d'identifier les éléments climatiques et hydrologiques de la zone d'étude.

Les paramètres climatologiques sont propres à chaque endroit et à travers cette partie, nous avons constaté une variabilité climatique dans le temps et dans l'espace dans notre zone qui s'est traduite par une variabilité de température (légère augmentation progressive), de précipitation (moyenne mensuelle/annuelle reste faible et insuffisante pour l'alimentation des nappes aquifères), d'humidité relative de l'air, d'humidité du sol et de la direction et vitesse du vent, et ceci bien sûr par l'exploitation des jeux de données prévenants de la plateforme GEE (Google Earth Engine) et/ou d'autres sites qui fournissent de l'information météorologique gratuitement aux publiques. Selon la synthèse réalisée, la zone d'étude s'insère dans un étage bioclimatique hyperaride, caractérisé par une variabilité de précipitations, qui diminue du Nord au sud, ainsi qu'une longue période de sécheresse s'étendant sur toute l'année, entraînant une l'exploitation excessive des nappes. Les paramètres climatiques fondamentaux, sur lesquels est basée notre étude, ont été établis et analysés, mettant en évidence leur influencent directe sur le potentiel en eau souterraine.

Chapitre III

Géologie

I. Introduction

Faisant partie de la plateforme saharienne occidentale, la chaîne de l'Ougarta présente une structure géologique remarquable caractérisée par des affleurements paléozoïques. Elle se manifeste sur environ 450 km de longueur et près de 200 km de largeur, avec une orientation nord-ouest/sud-est. Son contexte géologique est complexe, témoignant d'une évolution tectonique et sédimentaire significative (Hamdidouche, 2009).

Cette fameuse chaîne est constituée principalement d'un ensemble de structures plissées, en particulier les faisceaux de la Saoura et de la Daoura (fig.61). Ces structures sont généralement recouvertes de matériaux quaternaires, dont l'épaisseur diminue progressivement en direction de l'Anti-Atlas marocain (Collomb and Donzeau, 1974, Fabre, 1976c, Donzeau, Fabre, and others, 1981, Ait-Kaci and others, 1990, Hervouet and Duée, 1996).

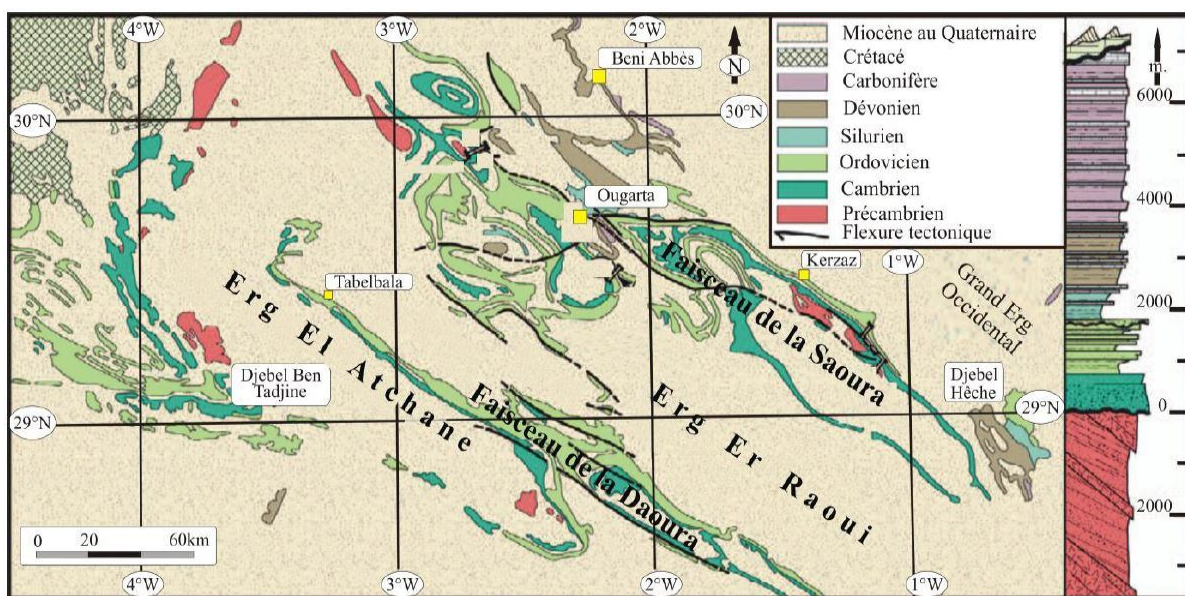


Figure 61: Carte géologique de la chaîne de l'Ougarta et colonne synthétique (Chikhaoui and Donzeau, 1972), (Ghienne et al., 2007) (modifiée).

Certains auteurs considèrent que cette entité géologique correspond à une dépression formée le long d'une ancienne zone de suture, faisant partie de la zone instable de l'Afrique centrale (Bessole, 1977). Cette structure marque la zone d'interférence entre deux entités géologiques distinctes : le Craton ouest-africain et le Bouclier Toureg (fig.62). Cette ligne de suture s'étend particulièrement de l'Anti-Atlas jusqu'au bassin du Bourkina Fasso, en traversant la bordure occidentale du Hoggar ainsi que l'Adrar des Iforas (Fabre *et al.*, 1982).

Notre zone d'étude s'inscrit dans un contexte géologique et géomorphologique connu sous le nom du faisceau de la Daoura (fig.61). Au cours du Protérozoïque (étage structural inférieur), du Primaire (étage structural moyen), et du Tertiaire (étage structural supérieur), cette zone a été occupée par des formations volcano-sédimentaires et magmatiques, comprenant des volcanites basiques neutres et acides, ainsi que des tufs et des grauwackes. Ces formations sont recouvertes par des dépôts sédimentaires détritiques et carbonatés, incluant des faciès gréseux, gréso-argileux et gréso-carbonatés. Le sous-étage inférieur de la zone se distingue par une structure disloquée et une diversité lithologique et métallogénique. Il présente également un

degré élevé de transformation diagenétique, suivi de dépôts cénozoïques de genèse variée, formés au cours de l'étage structural supérieur.

La région de Tabelbala s'étend sur une superficie d'environ 1000 km², offrant une diversité de paysage désertique, comprenant des dunes, de relief, ainsi que des plateaux de Regs et de Hamadas. Elle correspond à une zone d'erg (vaste étendue de dunes) et de reliefs orientés selon la direction ougartienne (nord-ouest, sud-est). Au nord, elle est limitée par le plateau de Kem Kem, au sud par l'Erg Chech et l'Iguidi, tandis qu'à l'est et à l'ouest, elle délimite respectivement par les monts de l'Ougarta et la Hamada du Dra.

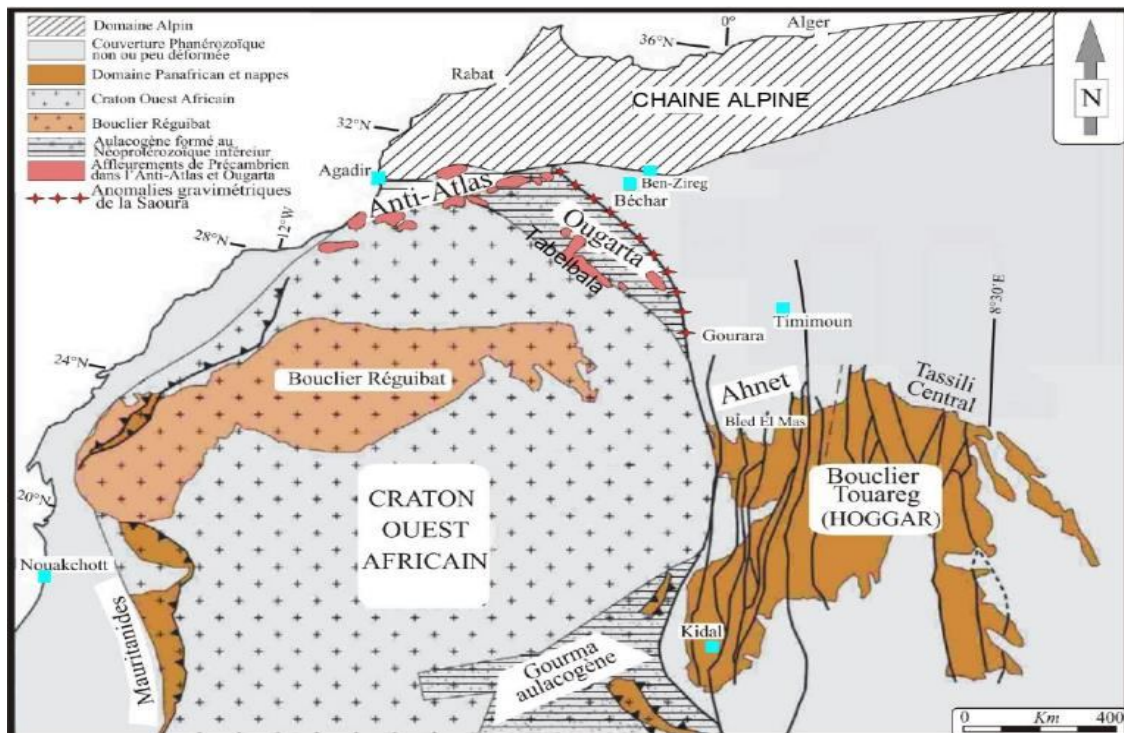


Figure 62: Carte schématique illustrant le contexte régional du Craton ouest-africain, l'Anti-Atlas et la chaîne de l'Ougarta (Ennih and Liégeois, 2001) (modifiée).

Ces structures paléozoïques se sont formées à la suite d'une série de collisions entre le Craton ouest-africain et le Bouclier Toureg (Hamdidouche, 2009). Elles sont principalement constituées de matériaux variés datant du Précambrien, du Primaire, du Tertiaire et du Quaternaire.

Le Kahal Tabelbala, également connu localement sous le nom de Lakhel, est une structure linéaire orientée nord-ouest/sud-est. Elle est séparée par deux entités géomorphologiques majeures : l'Erg Er Raoui au nord-est et l'Erg El Atchane au sud-ouest. Cette chaîne montagneuse abrite plusieurs sommets notamment le Dj Tadmoust (712 m), le Dj Belkasssem (713 m), le Dj Smaine (715 m) et le Dj Manaà (710 m). Ces reliefs sont constitués de formations géologiques datant du Cambrien et de l'Ordovicien, situés approximités de Sebkhass et d'Ergs tels que Erg Er Raoui, Erg El Atchane et Erg Atimine.

II. Travaux antérieurs

La chaîne de l'Ougarta constitue l'une des entités géologiques les plus importantes au Sahara Nord-occidental. Elle est principalement constituée de roches paléozoïques qui reposent

d'une manière discordante sur le socle précambrien, formant ainsi une épaisse couverture sédimentaire.

Un nombre important de travaux de reconnaissances géologiques et minières ont été effectués dans cette région, en raison de son importance stratégique sur le plan géologique, abritant de nombreux sites de minéralisation (potentiel minéral assez important). Parmi les premiers travaux ceux de :

- E. F. Gautier (1903), E. Haug (1903) et F. Reg (1914) ont été les premiers auteurs qui ont initié d'importants travaux de reconnaissances géologiques et stratigraphiques qui ont contribué à la compréhension de la stratigraphie de différentes formations présentes dans les monts de l'Ougarta, tout en ouvrant la voie à de nombreuses compagnes et travaux ultérieurs.
- Entre 1924 et 1933, N. Menchikoff a joué un rôle assez important dans le développement des connaissances géologiques du Sahara algérien. Il a élaboré une échelle stratigraphique détaillée pour l'ère Paléozoïque de la région, et a attribué des faciès dans le faisceau de la Daoura à l'Ordovicien. Il a également apporté, des précisions d'ordre stratigraphique et paléontologique dans la même zone. En 1930, l'auteur a réalisé un nombre important de levés cartographiques. De plus, il a signalé pour la première fois la présence de rhyolite à Bet Touaris, Guettara et BoukBaissat. Par la suite, l'auteur a poursuivi et renforcé ses recherches de reconnaissances géologiques en créant un Centre de Recherches Géologiques et Scientifiques à Beni Abbes en 1943, dédié particulièrement à l'étude du Sahara algérien.
- Dix ans plus tard, A. Poueyto (1951) a entrepris une étude dans le même contexte, portant sur l'étude des terrains paléozoïques de la Daoura. Cette dernière a été suivie par la tenue du 19^{ème} Congrès Géologique International. Lors de ce congrès, ALIMEN et al (1952), ont présenté un aperçu du contexte stratigraphique, structural et paléontologique de la Saoura ainsi que de la chaîne de l'Ougarta. Ces résultats ont ensuite été publiés dans la monographie régionale de N. Menchikoff. Un nombre important de travaux ont été réalisés par différents auteurs, mettant en relief l'aspect lithostratigraphique des dépôts de l'Ordovicien, du Silurien et du Dévonien (D. Lemaitre, 1952). Ces travaux ont été suivis par l'édition d'une monographie dédiée particulièrement à la Stratigraphie du Sahara-Occidental, synthétisant tous les événements géologiques du Paléozoïque au Quaternaire (Choubert, 1952).
- Un groupe de recherche minière faisant partie du Service des Mines, dirigé par Martinovsky (1942) et Deleau (1949), a entamé des travaux d'investigation minière dans la région de Ben Tadjine. Ces travaux ont permis de mettre en évidence la présence de la minéralisation cuprifère (minerais de cuivre).
- Les Travaux de Menchikoff (1949) ont permis d'identifier différents points de minéralisation cuprifère dans la chaîne de l'Ougarta. De plus, ces travaux ont mis en évidence la présence de différents filons de quartz traversant le noyau cambrien qui constitue l'encaissant des principaux indices tels que la mine de Ben Tadjine, Tacroum, Guelb en Nhas, Oued I Maada. Au cours de la même année, la région de Tabelbala et la chaîne de l'Ougarta ont été vivement recommandées pour renforcer les activités de recherche minière dans ces régions sous la direction de Deleau (1949). Ces

recommandations reflètent l'importance de ces régions en termes d'abondance et de variabilité minérales (potentiel minier important).

- Lors de la création du Bureau de Recherche Minière d'Algérie (BRMA) dans les années 1950, une stratégie de recherche minière a été mise en œuvre à travers le territoire national, y compris le Sahara algérien, dans le but d'identifier les gisements minéraux potentiels et évaluer leur impact socio-économique.
- En 1952, la carte géologique au 1/500000 de la Hamada de Guir (feuilles d'Ougarta et de Tabelbala) a été publiée par Meyendorff et Pouyeto, mettant en évidence les structures en plis synclinaux suivant la direction nord-ouest sud-est. De plus, de la carte de Kerzaz au 1/500000 incluant une description détaillée de la stratigraphie et la tectonique, a également été éditée cette année-là.
- Dans la même année, un levé géologique mettant en exergue les grandes subdivisions lithostratigraphiques a été établi entre le Touat et Tabelbala par Meyendorff (1952).
- Avec l'émergence et le développement des techniques d'acquisition des photographies aériennes (photogrammétrie) pendant la Seconde Guerre Mondiale, un grand nombre de levés topographiques, de compagnie de restitution et de compléments ont été réalisés.
- Entre 1976 et 1987, un projet des travaux de recherche systématique a été initié dans la chaîne de l'Ougarta rentrant dans le cadre de la collaboration algéro-soviétique et algéopolonaise. Dans ce contexte, la SONAREM et l'EREM ont entrepris des travaux de recherche minière et qui ont abouti à l'établissement des levés et des cartes géologiques au 1/200 000 couvrant toute la chaîne montagneuse. Au cours de cette mission, un inventaire complet des ressources minérales métalliques et non métalliques de la région a été réalisé pour servir aux futurs travaux de prospection et d'exploitation.
- Entre 1971 et 1974, une équipe de recherche de l'Université d'Alger dirigée par M. Chikhaoui, M. Donzeau et autres a réalisé des travaux de cartographie géologiques dans la chaîne d'Ougarta. Ces travaux ont abouti à l'établissement des cartes géologiques à l'échelle 1/200 000 de des feuilles de l'Ougarta (NH-30-X), Oglat Mohammed (NH-30-IV), Tabelbala (NH-30-IX), Ben-Zohra (NH-30-III).
- Dans le cadre de sa thèse de doctorat de troisième cycle, Donzeau (1971) étudia les caractéristiques structurales du Paléozoïque inférieur. Son étude a révélé deux phases de plissement majeures, orientées nord-est sud-ouest et N-S, qui ont entraîné des déformations significatives dans la région étudiée.
- Entre 1986 et 1987, Bouima et Remichi ont mené des recherches pour leur thèse de doctorat de troisième cycle. Bouima s'est concentré sur la minéralisation stratiforme de Rahmani, tandis que Remichi a étudié les minéralisations cuprifères du précambrien du Damrane. Dans le cadre de ces recherches, Remichi a identifié deux types génétiques de minéralisation distincts. Le premier type, associé aux basaltes alcalins, présente des caractéristiques de minéralisation lacustre. Le deuxième type, quant à lui, est lié étroitement au le magmatisme calco alcalin présentant des caractéristiques andines.
- Suite à divers travaux systématiques, certains auteurs ont poursuivi leurs travaux de recherches conduisant à la détection et à la mise en évidence de nouveaux sites de minéralisation dans des secteurs qui ont été jugés potentiels tels que la feuille de Hassi Chaamba et qui renferme de la minéralisation cuprifère selon les travaux de Riffault 1988.

De plus, une abondance de barytine avec une réserve estimée à environ 6 millions de tonnes de BaSo₄. Entre 1978 et 1983, d'autres chercheurs, tels que Ivasko (1978-1979), Chempelev (1982) et Corev (1983), ont également mis en lumière de nouveaux indices de minéralisation, notamment des occurrences l'Uranium et le Torium dans des niveaux de l'Ordovicien inférieur

- Entre 1981 et 1985, des travaux menés par l'équipe de recherche polonaise dirigée par Preidl ont qualifié le massif de Demrane (Preidl & Derkasz, 1985) et Kahal Tabelbala (Preidl et Bousmaha, 1985), des zones potentielles pour la minéralisation cuprifère.
- L'ensemble de travaux repris par Paulo & Waysprych de 1985 à 1988, portant sur le manganèse de Djebel Guettara, ont confirmé les estimations des réserves établies en 1955, par les travaux du BRMA.
- De nombreux chercheurs se sont penchés sur une analyse approfondie des diverses caractéristiques sédimentologiques du Cambro-Ordovicien, tels que Arbey (1962, 1966, 1968, 1971, 1979 et 1985), Gomez et al (1963), Aït Kaci (1990).
- L'étude menée par Yahiaoui Abderrahmane (1992), apporte une contribution significative à la compréhension du comportement hydrogéologique de la plaine de Tabelbala.

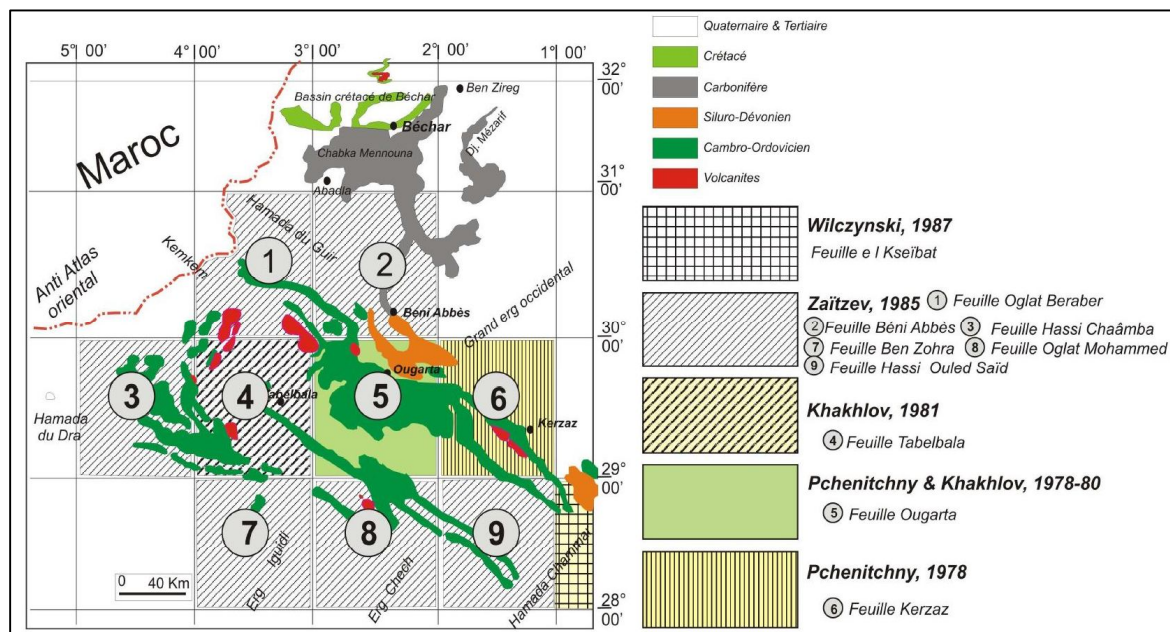


Figure 63: Travaux de recherche systématique dans la chaîne de l'Ouagarta (Mekkaoui, 2015).

- De nombreux travaux d'envergure nationale ont été dirigés par Mekkaoui et ses collaborateurs durant la période allant de 1992 à 1998, visant une prospection stratégique de l'argent et du cuivre dans la région en question (fig.63).
- Des chercheurs géologues de différentes universités algériennes, tels qu'Ait Ouali, Nadjari (2006), Bouima et Mekkaoui, (2003) ; Graine et Mekkaoui, (2006), Nedjari, et al, (2007), et Ouali Mehadji et al, (2006-2012) ont entamé une campagne de recherches géologiques. Cette campagne a abouti par la suite à l'apparition d'un nombre significatif de thèses et d'articles scientifiques, enrichissant nos données sur l'aspect stratigraphique, paléontologique et tectonique et sur Sahara Nord occidental.

- En 2010, Tazroute Khadidja a entrepris une étude, mettant principalement l'accent sur la métallogénie et la géodynamique du massif de Boukais et des monts de l'Ougarta (Bechar, Sud-ouest de l'Algérie).
- Les chercheurs Ouali et Abbache (2012, 2020), ont effectué des études très poussées sur le Silurien et le Devonien. Leurs travaux se sont focalisés particulièrement sur ces périodes spécifiques afin de mieux comprendre les événements et les caractéristiques géologiques produites à cette époque.
- *Les Travaux géophysiques* : une étude géophysique par prospection électrique a été menée dans la région de Bou Laadam (Tabelbala), 2008. Cette initiative était principalement réalisée par l'entreprise algérienne (EURL BEREGH).

III. Géologie de la zone d'étude

Suivant une direction connue sous le nom de 'Ougartienne', la zone d'étude est caractérisée par une série d'anticlinaux et de synclinaux étendus (Menchikoff, 1930b). L'ensemble des formations litho-stratigraphique de la région est principalement constitué de dépôts sédimentaires datant du Cambrien et de l'Ordovicien, ainsi que des dépôts du Quaternaire comprenant des alluvions, des éboulis, des dépôts torrentiels et éoliens, ces derniers étant les plus répondus dans la région (fig.64). En revanche, les formations du Protérozoïque supérieur et du Néogène sont beaucoup moins développées, tandis que l'extension du Silurien demeure relativement limitée.

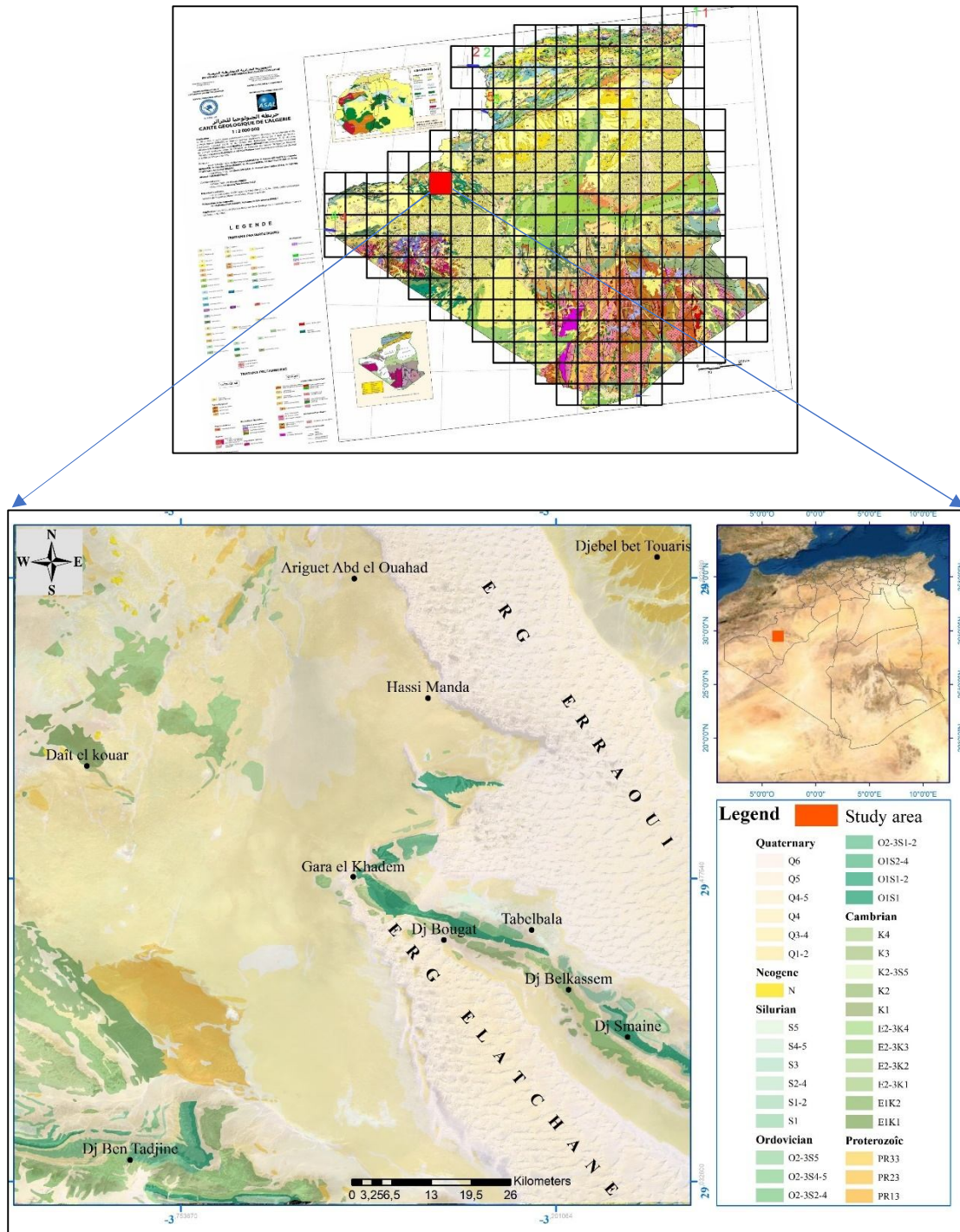


Figure 64: Carte géologique de Tabelbala au 1/200 000 (N° NH-30-IX).

1. Protérozoïque

Dans le massif et l'Oued Demrane, au nord-ouest du Djebel Bet-Touaris, ainsi qu'au nord-ouest de la Hamada de Daoura et à l'est de la pointe orientale de Djebel Ben Tadjine, s'est mis en place le socle précambrien constitué principalement de série 'volcano-sédimentaire' (Dostal *et al.*, 2002). Ce cortège se compose de roches volcano-sédimentaires, de volcanites basiques et neutres, ainsi que de roches volcaniques acides, qui ont été façonnées par l'action des cours d'eau et des d'érosion différentielle, créant des fenêtres d'érosion ouvertes. Les terrains protérozoïques dans cette région se subdivisent en trois séries distinctes :

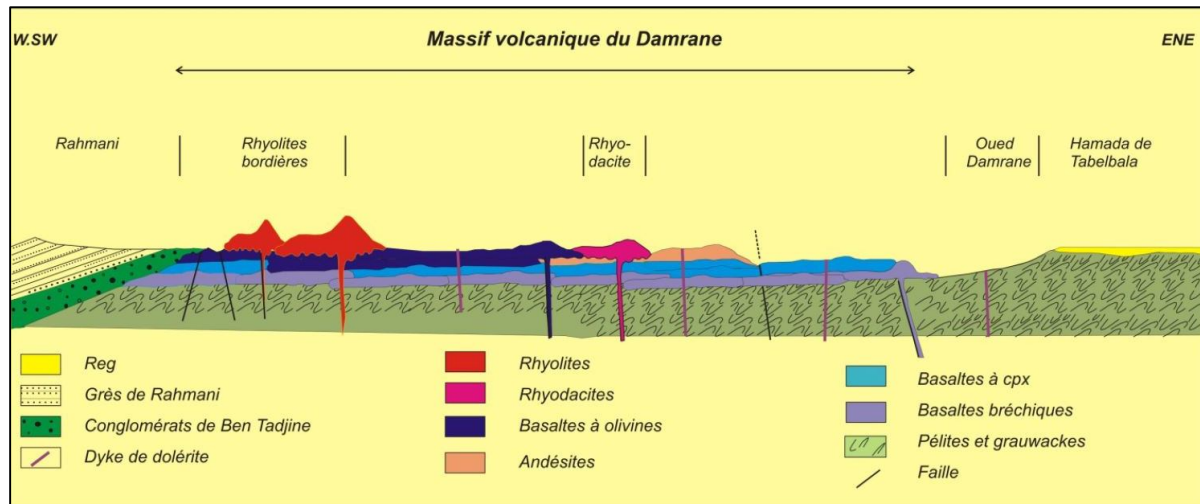


Figure 65: Coupe géologique schématique dans le massif de Damrane (Mekkaoui, 2015).

1.1 Série de roches volcano-sédimentaires

Dans la partie nord de la chaîne montagneuse de Dramane, s'individualisent de petits affleurements isolés de roches de couleur gris-brun et gris-vert formant la série des roches volcano-sédimentaires (PR13). Ces affleurements comprennent des roches siliceuses, des dolérites, des porphyrites andésitiques et diabasiques, ainsi que des grès polygènes et aleurolitiques, des grauwwackes et des conglomérats présentant de petites lacunes. De plus, des tufs altérés lithoclastiques qui ont subi une schistification avec ces minéraux.

1.2 Série de roches volcaniques basiques et neutres

Au cœur de la chaîne montagneuse de Damrane, sont observés des formations de porphyrites diabasiques et basaltiques (renfermant parfois de l'olivine), ainsi que des basaltes à augite et amygdale, des andésito-basaltiques, des porphyrites andésitiques et d'épidosite. Cependant, les andésito-dacites et les tufs porphyriques andésitiques sont présents d'une manière très limitée.

Le contact entre les formations volcaniques basaltiques et les formations volcaniques acides n'est pas toujours bien défini. En général, la zone la plus fortement érodée de l'édifice volcanique de Damrane est souvent caractérisée par une prédominance de roches volcaniques de base (fig.65).

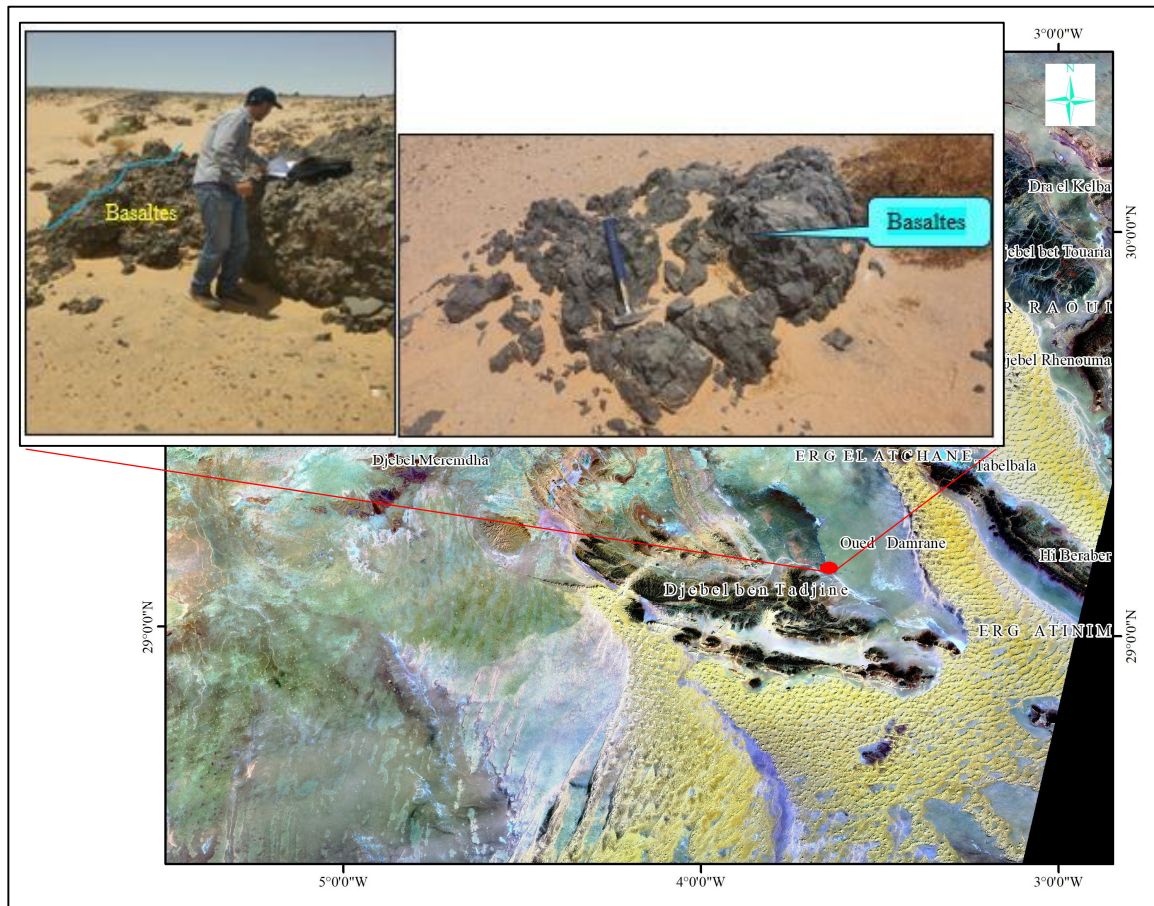


Figure 66: Planche photographique illustrant les Roches volcaniques basiques et neutres.

1.3 Série de roches volcaniques acides

Au niveau de la structure anticlinale de Damrane, et à Djebel Bet-Touaris, se manifestent des roches volcaniques acides aux couleurs variées telles que le gris rosâtre, le lilas, le brun et parfois le rouge vif. Ces roches présentent souvent des structures porphyriques et sont généralement massives dans leur texture affleurante. Dans certaines structures, des fissures de clivages ont été identifiées, et des formes structurales en plis couchés ont été mises en évidence.

Des ignimbrites à porphyres rhyolitiques, à porphyres liparitiques, rarement des dacites, des liparito-dacites, et des tufs de porphyres dacitiques se sont développés dans le massif de Damrane. Un cortège lithologique composé d'ignimbrites, de liparitiques, de laves clastiques liparitiques et parfois les tufs cristalloclastiques liparitiques constituent la majorité des petits affleurements de roches effusives dans la partie nord-ouest de feuille de Tabelbala (fig.66).

2. Couverture sédimentaire paléozoïque

Du Cambrien inférieur au Silurien s'étend la série paléozoïque de la région considérée. Cette série est distinguée par un développement notable, principalement marqué par une abondance des terrains détritiques, avec une proportion moindre de terrains carbonatés.

2.1 Cambrien

Dans la région de Tabelbala, les sédiments du Cambrien présentent des similitudes marquées avec les formations équivalentes de Kerzaz. Ces terrains, attribués au Cambrien, reposent en discordance sur les formations volcano-sédimentaires du Protérozoïque. La limite inférieure de la série est marquée par la présence de conglomérats rouges, tandis que la limite

teinte plus blanchâtre à leur sommet. A leur base, nous observons la présence d'un petit conglomérat renfermant des dreikenters dans la Sebka El Mellah. Il est important de noter qu'une rupture lithologique et granulométrique nette a été observée entre la limite supérieure de cette formation et la formation qui la surmonte (Gomez Silva, Pacaud and Wiel, 1963), (Ait-Kaci and others, 1990).

b) *Cambrien supérieur*

Cette série, d'une épaisseur d'environ 800 m, est connue particulièrement par la présence d'un cortège lithologique appelé le 'complexe des quartzites d'Aïn Néchéa'. Elle affleure principalement le long des flancs des synclinaux de Kahal Tabelbala et de Ben-Tadjine, et formée essentiellement par des grès quartzitiques et des quartzites.

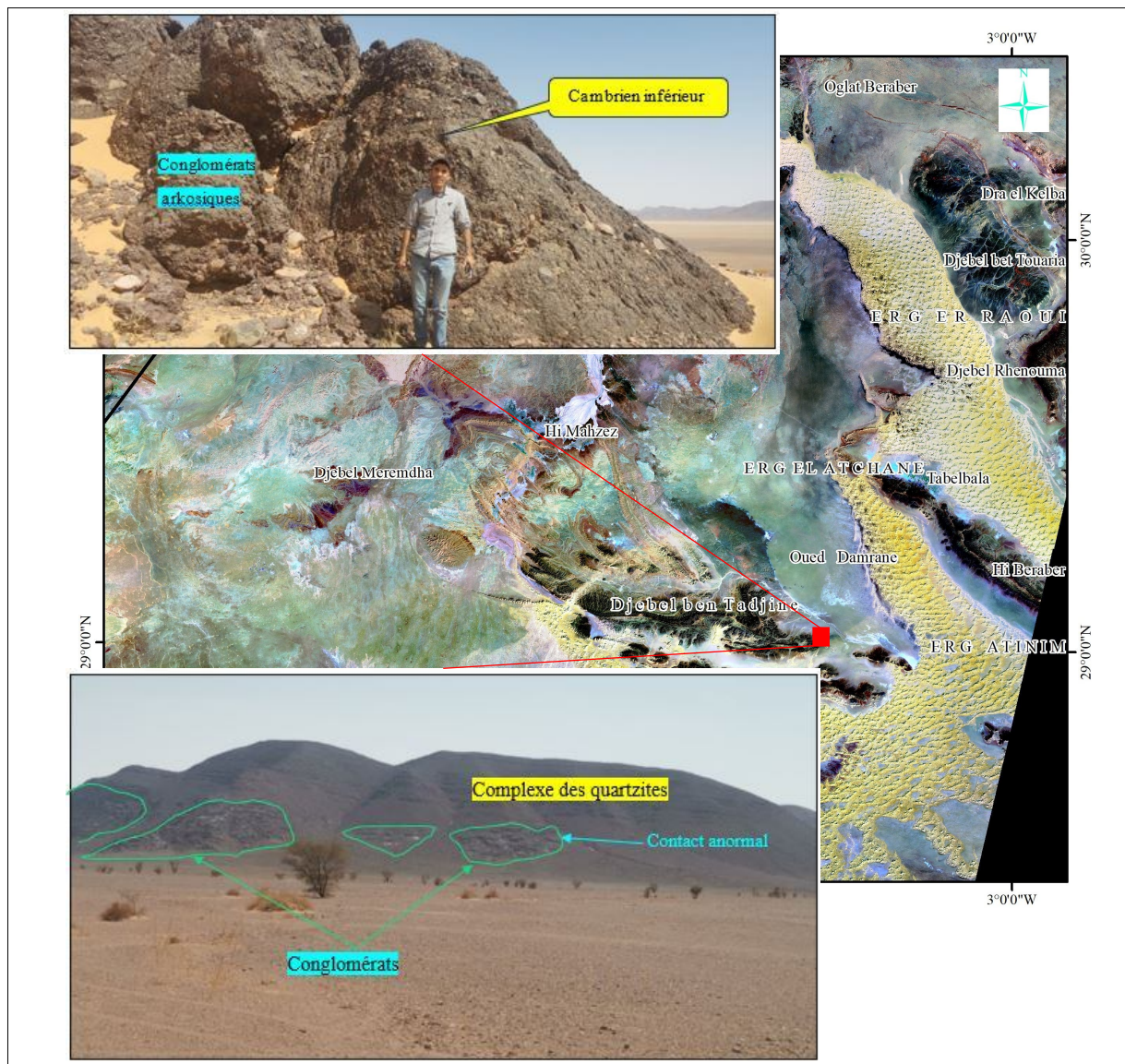


Figure 68: Planche photographique illustrant les conglomérats arkosiques de Demrane et le Cambrien supérieur.

Ce complexe géologique se distingue par une stratification oblique, structurée en dalles avec des couches intercalées de grès argileux sous forme de plaquettes. De plus, des empreintes des lingules ont également été découvertes dans les barres de quartzites.

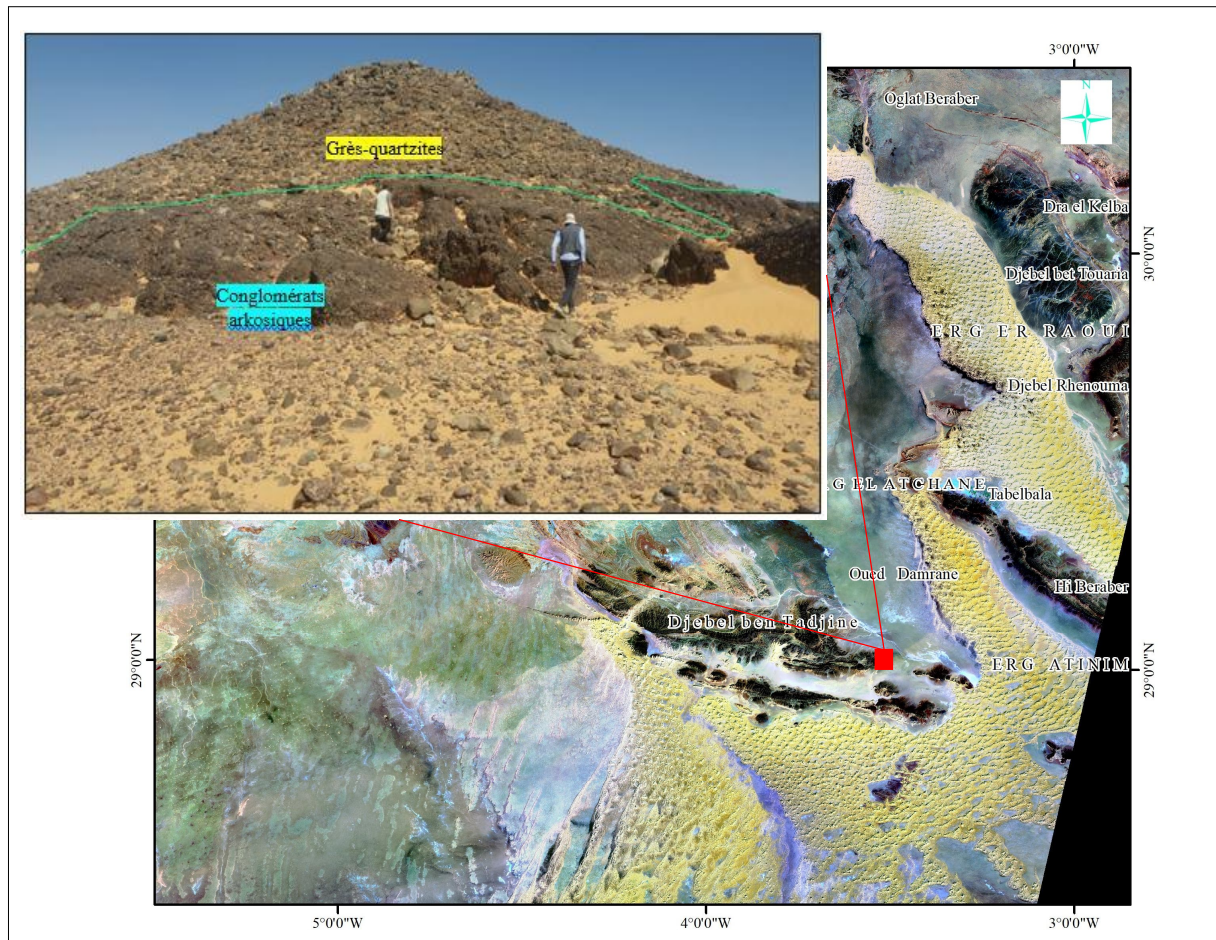


Figure 69: Planche photographique illustrant les grès-quartzites et les conglomérats arkosiques de Demrane.

2.2 Ordovicien

Au Sahara algérien, l'Ordovicien est principalement représenté par des formations détritiques à dominance gréseuses. Ces sédiments revêtent un intérêt significatif, étant les mieux étudiés dans la chaîne de l'Ougarta. Du point de vue lithologique, les formations ordoviciennes sont relativement uniformes. Il convient de noter que la puissance des terrains ordoviciens augmente en se rapprochant de la dépression marginale. L'Ordovicien est très répondu dans cette région, formant l'ossature de la chaîne (noyau des synclinaux de Ben-Tadjine et de Kahal-Tabelbala). Il se compose principalement de cinq formations géologiques (Gomes Silva, Pacaud and Wiel, 1963) d'une épaisseur allant de 1150 à 1250 m, surmontant en discordance la formation d'Aïn Néchéa. Ces formations sont principalement constituées de matériaux silico-clastiques avec parfois des occurrences carbonatées (Fabre, 2005).

a) Ordovicien inférieur

- La formation de Foum Tineslem est une unité géologique d'une épaisseur moyenne de 130 m. Elle est constituée principalement d'une assise inférieure argilo-gréseuse formée de grès glauconieux de couleur verdâtre et des argiles silteuses. Cette couche est surmontée par une autre assise argileuse micacée (membre supérieur) qui compose de calcaire noduleux contenant de lithoclastes silteux. Au-dessus se manifestent des schistes argileux avec de nombreuses intercalations de siltstones (Ghienne *et al.*, 2007, Hammad, 2016).

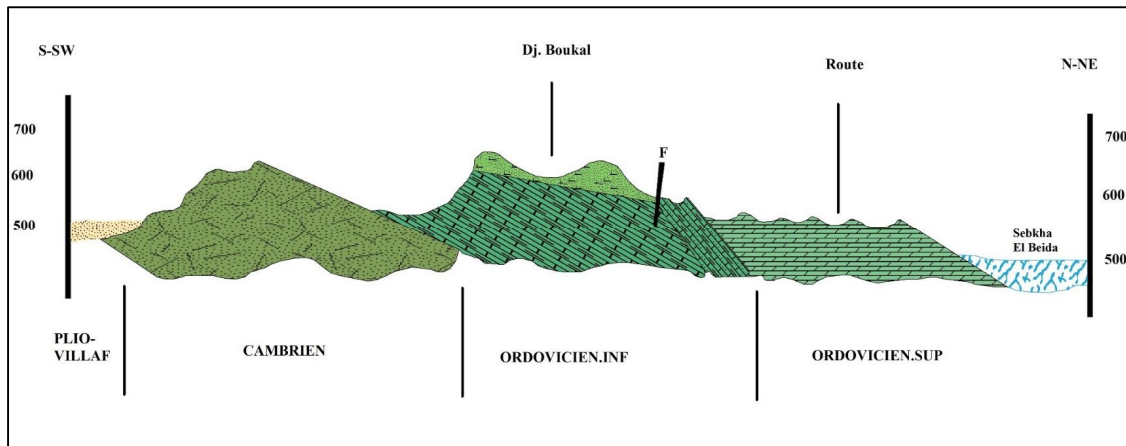


Figure 70: Première coupe géologique de Kahal Tabelbala (Passant par Dj Boukhal), échelle 1:21000ième (Yahiaoui, 1992c), modifiée.

- La formation de Kheneg El Aatène s'étend sur une puissance d'environ 110 mètres, dans sa partie inférieure, et repose en discordance sur les dépôts sédimentaires de Fountineslem. Cette formation est formée essentiellement de grès ferrugineux qui se débitent en plaquettes ou en bancs bien individualisés au sommet formant de quartzites ainsi que de conglomérats associés aux lingules et aux oolites ferrugineuses. Quant au membre supérieur de la formation, qui atteint une épaisseur pouvant aller jusqu'à 90 mètres, il se caractérise par une série de quartzites surmontés par des bancs de tigelites en dalles épaisses. Cependant, un horizon de minerai de fer à oolites chloriteuses a été identifié au sommet de ce membre.
- La formation de Foum Ez Zeidiya se compose de trois membres distincts. Un membre inférieur d'une épaisseur environ de 80 mètres, est essentiellement constitué d'argiles vertes et violacées de texture schisteuse. Un membre moyen d'une épaisseur environ de 100 mètres, composé de grès micacés en plaquettes de teinte gris verdâtre, et renfermant des lits lenticulaires de calcaires gréseux contenant des fossiles. Quant au membre supérieur, il s'étalant sur 60 mètres, et composé d'argiles vertes, de grès fins et de siltes argileux renfermant des lentilles calcaires.

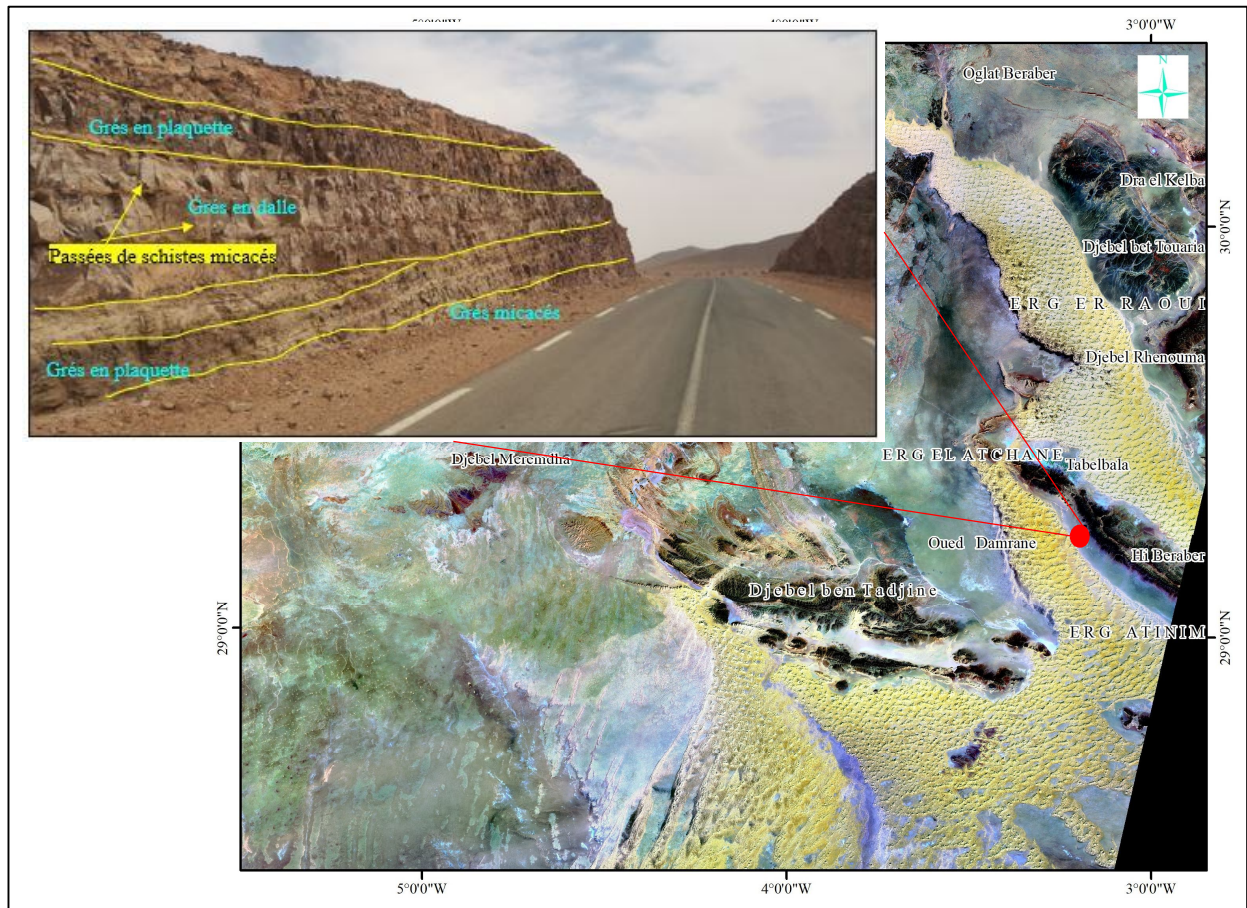


Figure 71: Planche photographique illustrant l'Ordovicien inférieur.

b) Ordovicien supérieur

Dans le territoire considéré, les terrains sédimentaires de l'Ordovicien supérieur sont relativement peu développés. Ils se manifestent principalement sous forme de petits affleurements et de pointements, notamment au village de Tabelbala, au nord-est de Djebel Smaïn et au cœur du synclinal de Ben-Tadjine. Ils se composent de :

- Formation de Bou-M'Haoud d'une épaisseur variant de 10 à 220 mètres, est une entité géologique constituée de deux membres distincts. Le membre inférieur est particulièrement composé des grès ferrugineux gris et gris brunâtre, surmontées par des bancs gréseux renfermant d'oolites et des niveaux d'argiles rouges. Le membre supérieur, à dominance argilo-gréseux, est constitué de grès en plaquettes recouvertes d'une croûte ferrugineuse, accompagnés des niveaux de conglomérats, des silts et des d'argiles.

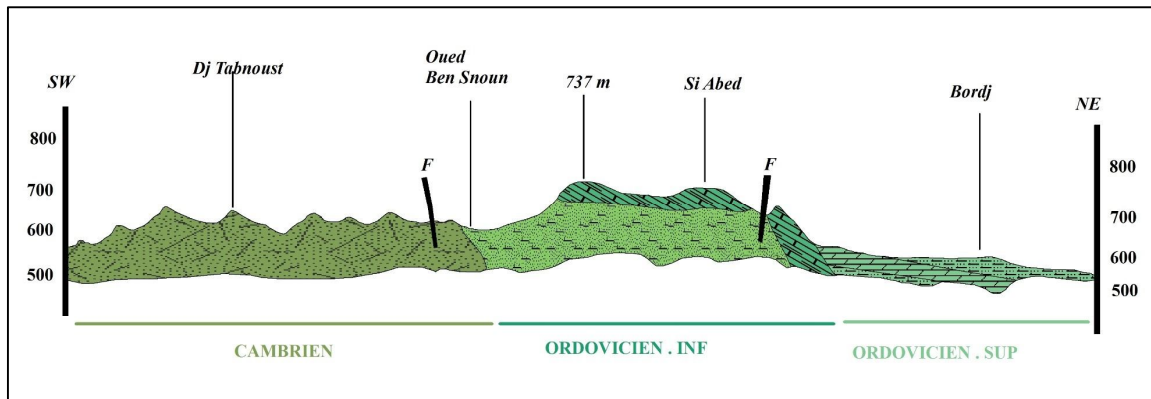


Figure 72: Deuxième coupe géologique de Kahal Tabelbala (passant par Si Abed et Bordj), échelle : 21000ième (Yahiaoui, 1992c), modifiée.

- Formation de Djebel Serraf s'étalant sur une puissance de 10 à 200 mètres environ, et se compose de trois membres distincts. Un membre inférieur constitué par des barres grésos-quartzitiques renfermant de stratifications obliques, avec des lentilles conglomératiques identifiées à sa base. Un membre moyen essentiellement argileux, avec des graviers épars. Quant au membre supérieur, il est représenté par des lentilles de quartzites micro-conglomératiques surmontant un matériel gréseux de couleur jaunâtre.

2.3 Silurien

Les sédiments argileux du Silurien ne sont pas bien visibles à Tabelbala qu'au niveau d'une série dite 'formation de Ouled Ali, qui a subi une forte érosion. Cette série constituée d'argile carbonatée, de schistes argileux gris-bleuâtre, présentant des structures feuilletées, fortement kaolinisés, de calcaires marneux ainsi que du grès micacé à grains moyens, en plaquettes minces. Les argiles noires schisteuses (black shale) sont considérées comme étant l'importante roche mère en Afrique du Nord (Macgregor, 1996, Boote, Clark-Lowes and Traut, 1998). Elles renferment du matériel silto-gréseux et une faune riche en graptolites (Legrand, 1998). Il convient de noter que les argiles du Silurien, en tant que roches mères (elle est considérée comme étant un substratum imperméable aux aquifères), ainsi qu'elles servent de bonne couverture pour les réservoirs gréseux du Cambro-Ordovicien. L'épaisseur de ces sédiments varie considérablement et atteint jusqu'à 1250 mètres à certains endroits.

3. Cénozoïque

Les dépôts sédimentaires néogènes sont largement répartis dans la région considérée, prenant la forme de vastes dépressions à surface plane qui comblent également les cuvettes infra-montagneuses. Ces dépôts néogènes se manifestent principalement sous formes géomorphologiques tabulaires avec une légère inclinaison vers le sud, notamment la Hamada du Guir et du Draa, ainsi que la Daoura. Ces formations, d'origine continentale lacustre, reposent en discordance sur le Paléozoïque et sont parfois recouvertes parfois par des lambeaux carbonatés (E. Roche, 1973).

3.1 Néogène

Il s'agit principalement d'un complexe détritique continental appelé 'Torba' composé principalement de sables argileux se présentant en lentilles, de conglomérats, et de niveaux sableux attribués au néogène (Conrad, 1969a, M. A. Roche, 1973).

La dalle hamadienne est généralement calcaire, parfois dolomitique, renfermant des grains de quartz détritiques. Ces terrains carbonatés sont partiellement karstifiés dans la région du Daïa, et ont subi des processus de silicifications à différentes périodes jusqu'au Quaternaire (Fabre, 1976d, Fabre, 2005). Au contact des formations paléozoïques des monts de l'Ougarta, la partie méridionale de la Hamada du Guir s'amincit progressivement du nord vers le sud. Une partie de celle-ci est reliée à la Hamada de la Daoura par l'intermédiaire des substratums de l'Erg Er Raoui.

3.2 Quaternaire

Dans les dépressions inter-montagneuses, les dépôts quaternaires sont très répondus, se manifestent principalement sous forme de terrasses alluviales, des encroutements calcaires gypseux des Ergs, ainsi que parfois sous forme de sommets de petites Hamadas et de dépôts alluvionnaires le long des Oueds et des Sebkhas (Mabrouk, 2007). Cette variabilité des terrains métriques est le résultat d'un cycle climatique irrégulier (pluvieux -arides) de cette époque et qui a connu un climat sec accompagné d'une pluviosité saisonnière (Fabre, 1976d), suivi d'une sédimentation fluviale calme.

3.3 Quaternaire ancien

Entre Djebel Kahal-Tabelbala et le massif de Ben-Tadjine s'étendent sur une puissance de 15 à 20 mètres, les dépôts du Quaternaire ancien formant des dépressions planes. Ces sédiments constituent la petite Hamada qui se localise, plus bas que la Hamada néogène. Ces dépôts sont constitués d'éboulis, de dépôts colluvio-torrentiels et torrentiels comprenant des dépôts sableux à galets, sablo-argileux, galets et argiles de hautes terrasses ainsi que des cônes de déjection présentant une coloration brune, brun-foncé et brun-rosâtre. A Erg Er Raoui, ces dépôts sont substitués par des sédiments de type lacustre à faune de Characées et d'Ostracodes (Menchikoff, 1952, Conrad, 1969c).



Figure 73: Planche photographique illustrant les dépôts sablo-argileux, sableux à galets, galets et argiles.

3.4 Quaternaire moyen

Les terrains du Quaternaire moyen se manifestent principalement à la base Djebels Ben Tadjine, Kahal Tabelbala, et Bet Touaris sous forme d'alluvions et d'éboulis. Ces dépôts comprennent de sables à galets, des matériaux grossiers argileux formant des cônes de déjection, ainsi que des galets et de limons constituant les basses terrasses.

3.5 Quaternaire moyen -supérieur

Les dépôts du Quaternaire moyen supérieur, d'une épaisseur qui varie entre 3 à 5 mètres, se composent de sédiments torrentiels. Ils renferment d'éléments anguleux ainsi que de matériaux sablo-argileux, et dans une moindre mesure, des matériaux détritiques grossiers provenant des cônes de déjection associés aux grandes vallées fluviales. Ces dépôts sont principalement observés au flanc nord-est de l'Erg Er Raoui, à la base des Djebels Kahal Tabelbala et Ben-Tadjine, ainsi qu'au nord-ouest de la zone d'étude.

3.6 Quaternaire supérieur

Les terrains du Quaternaire supérieur, qui affleurent sur une petite étendue avec une épaisseur de 2 à 4 mètres, sont formés par des dépôts alluvio-colluviaux et lacustres provenant des Oueds Damrane, Moussine et Saheb Rhsal, ainsi que des lacs temporaires comme ceux situés au niveau des puits de Khataam, Hoga et Aech. Ces dépôts sont principalement constitués d'un ensemble de roches détritiques, comprenant de sables, des cailloux roulés, des limons et des argiles gypsifères.

3.7 Quaternaire actuel

Au cœur de la zone considérée, notamment à Erg Er Raoui et Erg El Atchane, se développent des dépôts éoliens datant du Quaternaire récent. Certains de ces dépôts forment des dunes atteignant une hauteur de 150 à 200 mètres.

L'entité de Erg Er Raoui présente plusieurs points d'un substratum incliné vers le Sud, composé de matériaux fluvio-lacustres. Cette disposition confère à l'Erg une structure caractéristique, notamment dans sa partie méridionale, connue sous le nom de structure des Gours. Les parties nord et sud de l'Erg sont principalement constituées de sables rouges bien développés, en particulier dans la région de Sebkhath El Malah, où ils forment les sables de Mkilta (Chavaillon, 1965). Des petites buttes-témoins d'une hauteur d'un à deux mètres sont visibles à l'intérieur et aux extrémités de l'Erg, principalement constituées par de sables fins jaunâtres. Par ailleurs, une coupe réalisée au niveau de Hassi Zertem, au nord de Tabelbala, a révélé que les formations traversées sont principalement constituées de sables très fins consolidés de couleur verte, intercalées de calcaires gréseux d'une épaisseur environ 30 cm.

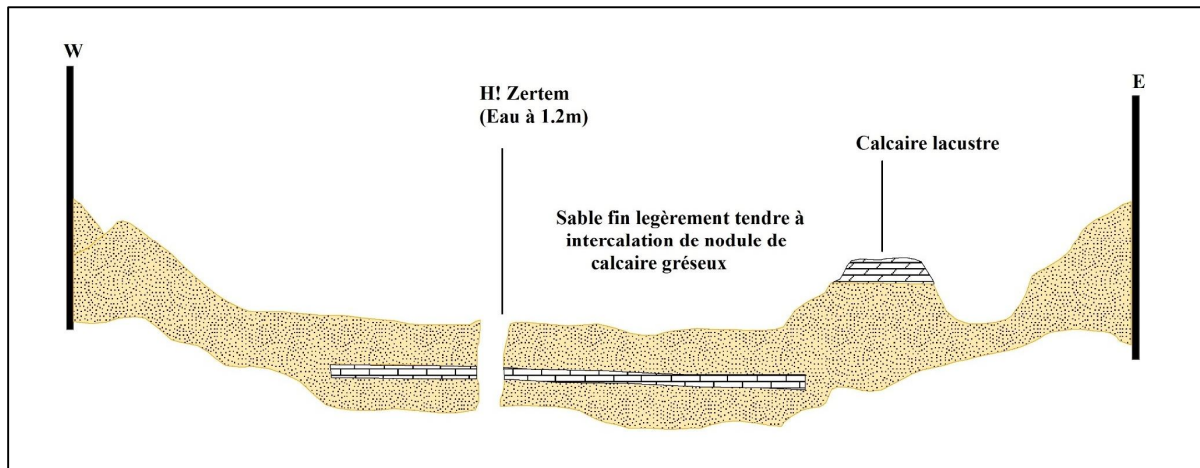


Figure 74: Coupe et profil de Hi Zertem (Erg Er Raoui) (Yahiaoui, 1992c), modifié.

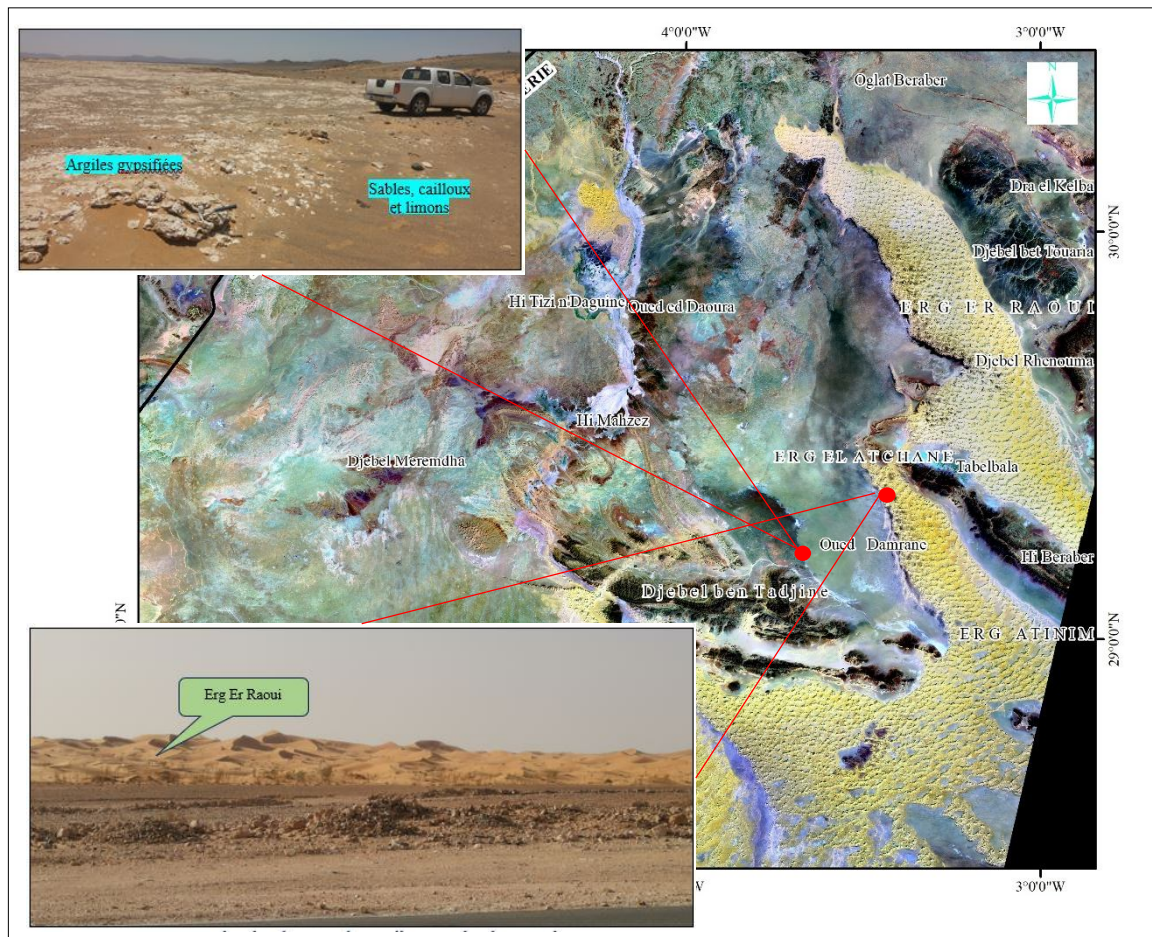


Figure 75: Planche photographique illustrant les dépôts d'argiles gypsifères, sables, cailloux roulés, limons et des dépôts éoliens.

IV. Contexte tectonique

Le territoire d'étude, faisant partie de la plateforme africaine et situé dans une zone mobile subsidente à la jonction du craton ouest-africain, et se particularise par un contexte structural et tectonique un complexe résultant des événements tectoniques qui l'ont affecté au fil du temps (Mekkaoui, 2015). L'ensemble des différents travaux menés dans cette zone, révèlent que ses

structures sont particulièrement marquées par de déformations plicatives et cassantes, avec la présence d'une panoplie d'anticlinaux et synclinaux orientés selon une direction principale nord-ouest sud-est. Ces structures sont accompagnées d'un ensemble d'accidents et de failles conjuguées.

Il est important de noter que chaque cycle géologique altère l'état des cycles antérieurs. L'ensemble des sédiments déposés au cours de ces cycles récents masque partiellement les dépôts les plus anciens, et chaque formation montagneuse déforme et brise en partie les structures préexistantes, tandis que les configurations structurales antérieures influencent la formation de nouvelles structures.

1. Tectonique panafricaine

1.1 Tectoniques plicatives

De nombreuses structures ont été identifiées, en particulier celles qui affectent les séries volcano-sédimentaires du Protérozoïque supérieur. Ces entités structurales sont principalement localisées à Sebkhat El Melah et montrent une orientation sud-est nord-ouest.

1.2 Tectoniques cassantes

Les travaux de compagnes d'aéromagnétisme ont mis en lumière l'existence de différentes familles de failles dans la région. La première famille de failles anciennes a subi une tectogenèse distensive de direction nord-ouest, entraînant la mise en contact de compartiment de socle de nature différente (Bouima, 1986). Ces structures découpent les différentes formations précambriennes en blocs abaissés et élevés, avec des déplacements verticaux significatifs. La deuxième famille de faille est associée aux failles de socle transversal orienté nord-est, qui se forment à la faveur de la courbure du bord relatif au craton (sillon marginal) dans le territoire étudié (Bouima, 1986). Lors de la tectogenèse panafricaine cassante, deux types de dykes se sont formés. Le premier type concerne les dykes de basalte à olivine et de microdiorites correspondant au volcanisme intermédiaire et basique contemporain aux dépôts de la Sebkhat El Mellah. Le deuxième type correspond aux dykes rhyolitiques et andésitiques accompagnés d'une bréchification de l'ensemble de formations encaissantes.

2. Tectonique hercynienne

Le contexte structural de l'ensemble de la zone étudiée est le produit de la tectogenèse hercynienne, qui s'est particulièrement manifestée par les structures plicatives et cassantes. Ces processus ont joué un rôle majeur dans la configuration structurale actuelle de la région.

2.1 Tectoniques plicatives

Dans la région considérée, un ensemble de déformations et de structures plicatives significatives a été identifié. Ces structures se distinguent par leurs périodes de formation variées, leurs dimensions différentes et leurs caractéristiques morphologiques spécifiques. Trois anticlinoriaux orientés nord-ouest sud-est ont été délimités principalement par d'importantes failles du socle de même direction :

Anticlinorium de Kahal Tabelbala (Sud Ougartien)

Cette structure majeure comprend plusieurs entités structurales, notamment le synclinal et l'anticlinal d'Oglat Mohamed, le synclinal du Kahal Tabelbala, l'anticlinal de Erg El Atimin -Oued Demrane, le synclinal de Ben Tadjine, ainsi que l'anticlinal de Ben Zohra.

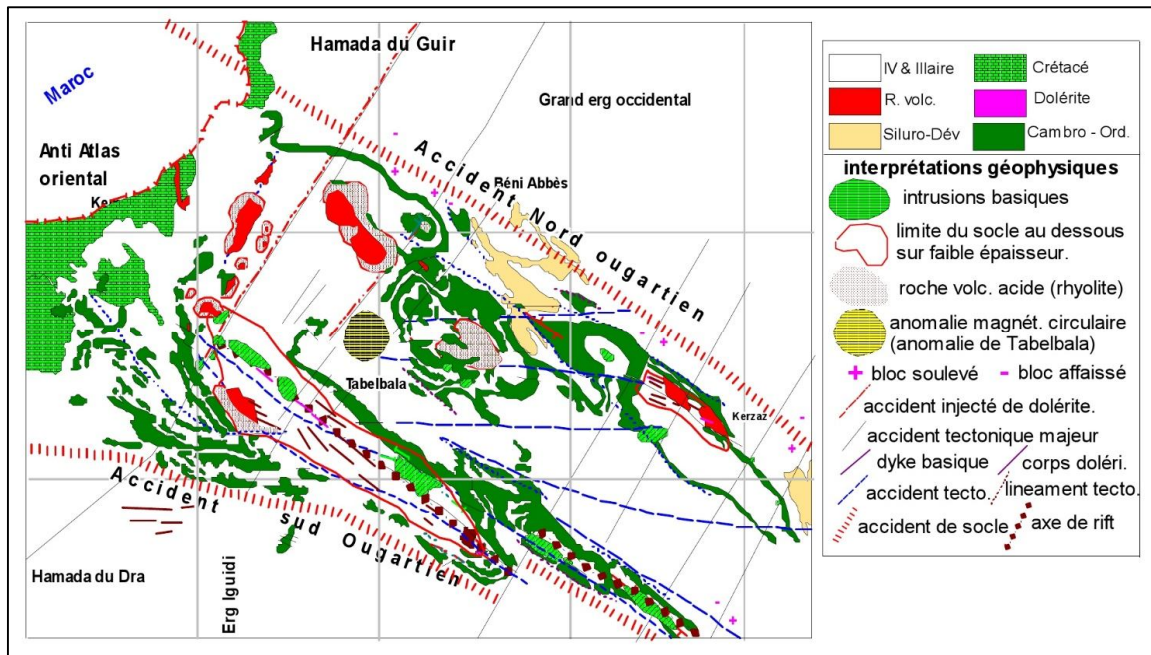


Figure 76: Esquisse structurale des monts de l'Ougarta ((*ORGM, 2001*) inédit).

Anticlinorium de Ougartien (anticlinorium central)

Cette structure se distingue par une bande relativement large, avec de flancs à pendage faible (environ 30° à 35°), correspondant à un bombement de socle selon les levés aéromagnétiques réalisés dans la région. Il s'agit d'un ensemble de structures comprenant des anticlinaux et des synclinaux (Menchikoff, 1930b), avec la présence des failles transverses orientées E-O à ENE-OSO.

Deux modèles d'interprétation structurale ont été proposés par (Donzeau, Fabre, and others, 1981, Donzeau, Fabre, and others, 1981). Le premier modèle suggère que cette structure résulte d'une tectogenèse orientée nord-est sud-ouest, conduisant à la formation d'une série de plis Ouagartiens. Le deuxième modèle est responsable à la mise en place des plis transverses à cette structure. Selon (Khokhlov et al, 1981), il existe un système de déformation en une seule phase, avec deux directions correspondent au jeu des blocs du socle, engendré par un décrochement senestre. Ce dernier a débuté avec un pendage de 50° lors de la première phase, pour atteindre 90° à l'Hercynien.

Anticlinorium de Kerzaz

Il est principalement constitué d'un ensemble d'anticlinaux comprenant Djebel Zeghamra, la Sebkhah d'El Mellah, et Djebel Kahla (fig.76). Les plis orientés nord-ouest sud-est sont majoritairement serrés ce qui entraîne des décollements et des chevauchements. Cette structure est délimitée au nord-est par la fameuse faille bordière qui sépare la chaîne de la plateforme formée lors de l'orogénèse panafricaine. Le serrage qui a donné naissance aux plis Ougartiens a conduit à l'apparition de certains faciès spécifiques, tels que les rhyolites de Betouaris et Bou Kbissat, ainsi que les schistosités grossières de fracture.

2.2 Tectoniques cassantes

Un ensemble de structures faillées a été identifié dans la région, se distinguant particulièrement par leur âge et leur orientation relative.

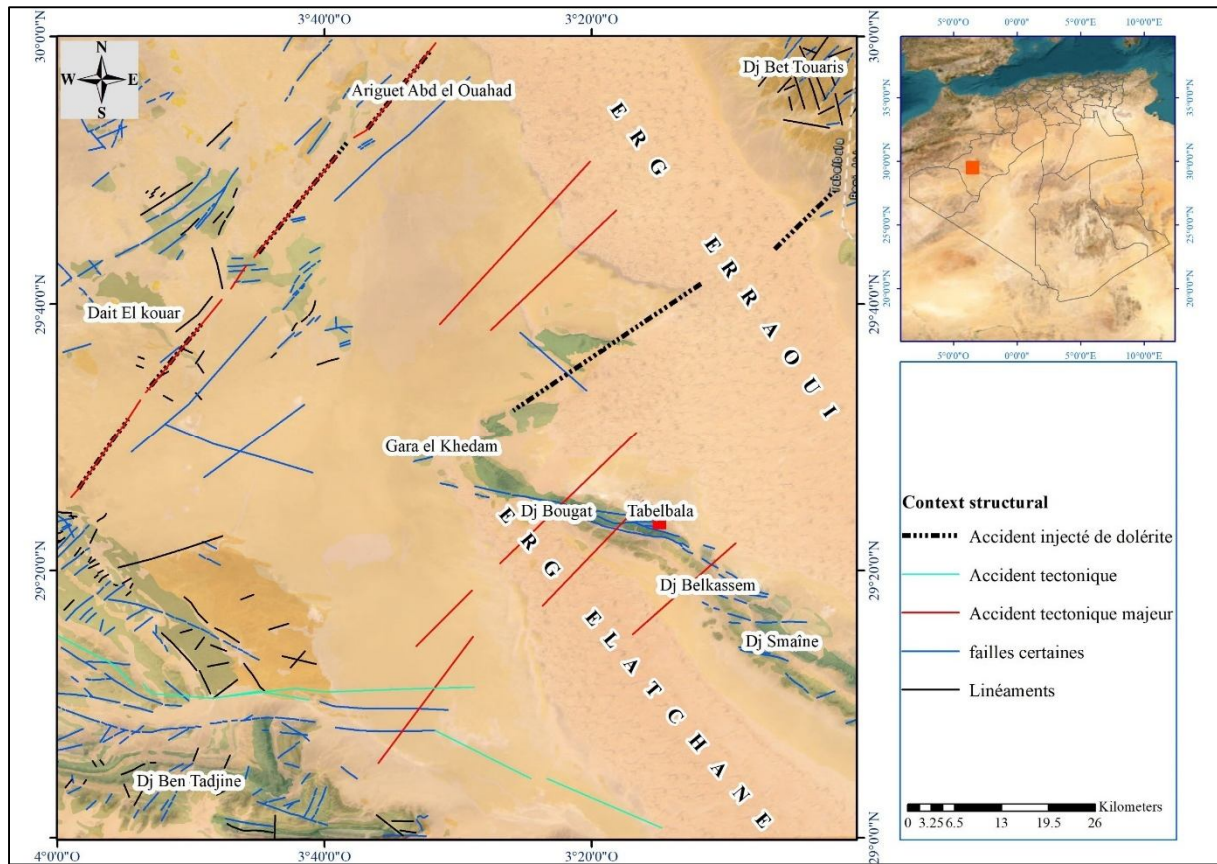


Figure 77: Réseau de fracturation de la zone d'étude.

Failles redressées de direction NE

Ce type de faille a été principalement mis en évidence dans la partie nord-ouest de la zone étudiée et caractérise principalement le réseau d'accident affectant la structure de Kahal Tabelbala d'origine panafricaine. Ces failles se sont formées à la transition entre le Protérozoïque tardif et le début du Cambrien. Elles sont étroitement associées à une zone de faille profonde et puissante, qui s'étend sur plusieurs dizaines de Kilomètres avec une orientation entre 210° à 230°, une inclinaison de 30° à 50° et une épaisseur de 15 à 20 km, notamment au mont Toumiat (fig.77). Ces structures faillées ont exercé une influence déterminante dans l'évolution et l'activité tectonique de la région tout au long de son histoire géologique.

Les données du levé magnétique aéroporté ont montré que ces structures faillées, orientées NE délimitent des blocs dans le socle cristallin et se distinguent par une profonde mise en place.

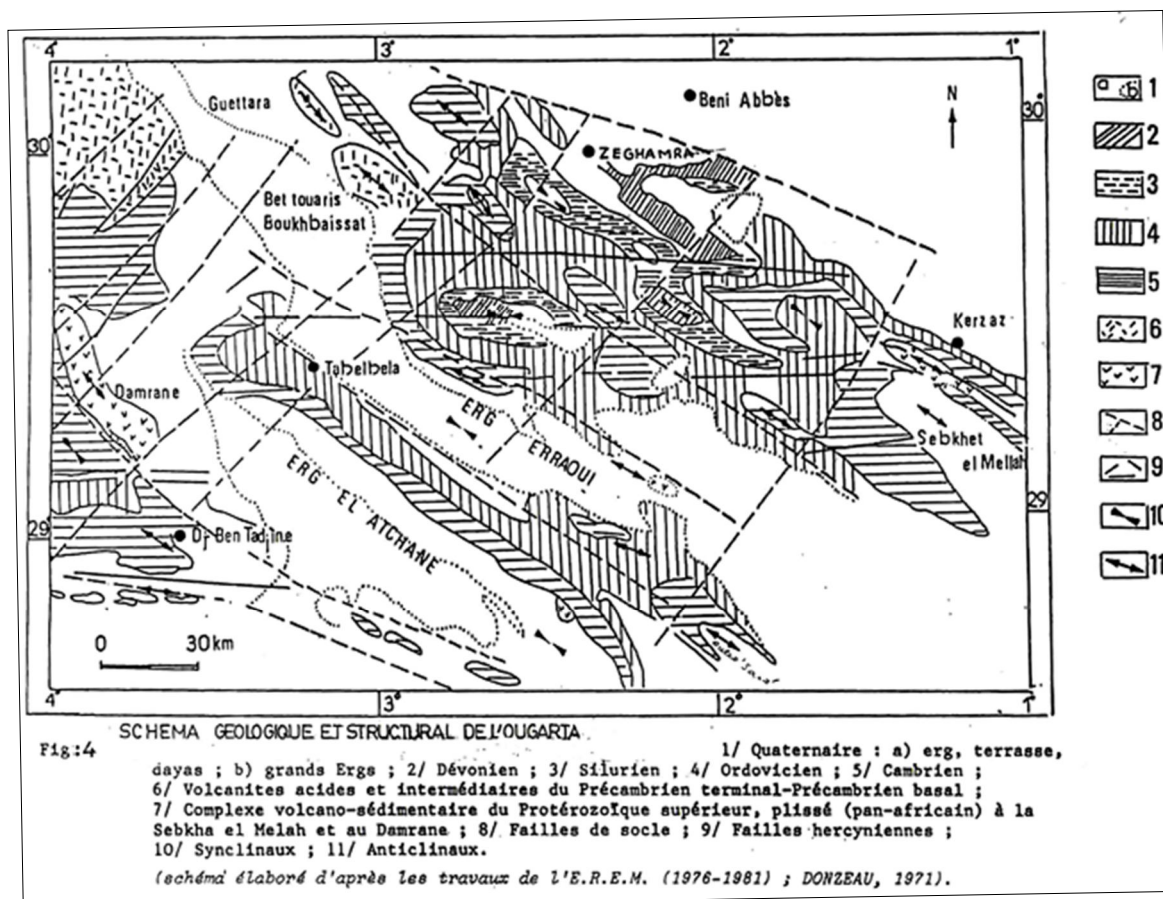


Figure 78 : Esquisse tectonique, schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta (Donzeau, 1972).

Failles à pendage faible (synorogéniques) sur les flancs des structures plicatives hercyniennes.

Ce type d'accidents a été particulièrement observé sur le flanc sud-ouest de la structure de Kahal-Tabelbala, ainsi que sur le flanc nord-est du synclinal de Ben-Tadjine (au nord de Djebel Moussine et Rahmani-I et II). Dans notre zone, ce type d'accident est essentiellement développé sur les flancs des plis ayant une orientation nord-ouest. Il s'accompagne de zone de brechification, de ferruginisation et de zones de cataclases, parfois atteignant une épaisseur jusqu'à 150 mètres. Le développement des veinules de quartz et du quartz carbonaté, contenant une minéralisation en blende et galène, a été observé en surface et dans les sondages réalisés au niveau de l'indice Rahmani II. Les limites de ces zones se particularisent par une concentration notable en plomb (Pb), zinc (Zn), molybdène (Mo) et tungstène (W). Par ailleurs, un réseau de cisaillement un plus important que les failles de direction nord-ouest, a été mis en évidence au niveau de roche du Cambro-Ordovicien. Ce réseau se localise principalement dans les roches rigides telles que les quartzites et les grès-quartzites, formant des fractures croisées d'une taille comprise entre 0,5 et 1,5 mètre, accompagnées d'une bréchification intense, de la ferruginisation et de la présence de quartz de basse température mal cristallisé.

Accidents de direction E-W environ

La mise en place d'une série de failles sublatitudinales peut être directement liée à la phase la plus tardive de la tectogenèse hercynienne (éventuellement alpine). Ces structures sont facilement reconnaissables et identifiables sur les images satellites, car elles recoupent pratiquement toutes les structures cassantes et plissées connues dans la région. Ces accidents

sont souvent associés à une minéralisation filonienne à cuivre. La zone faillée orientée est-ouest au niveau de Saheb El Rhsal est particulièrement intéressante, car elle perturbe la configuration globale de la structure synclinale de Ben-Tadjine.

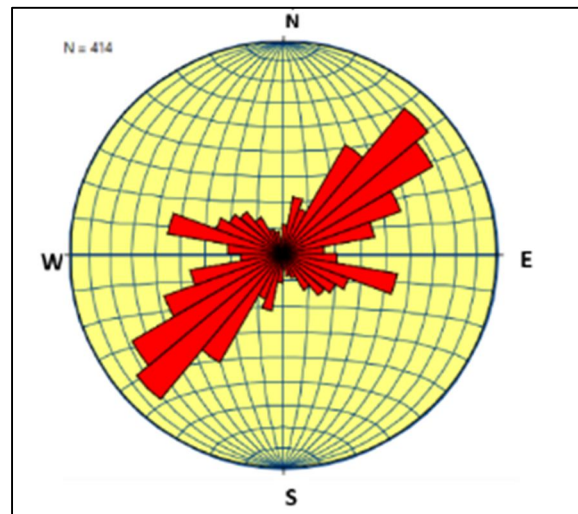


Figure 79: Rosace directionnelle de direction des structures affectant la zone d'étude.

D'une manière générale, environ de 866 failles, fracture et linéament ont été identifiés à partir d'images interprétatives, de cartes géologiques existantes et des travaux antérieurs (fig.79). Ces failles et linéaments structuraux peuvent être directement observés lorsqu'il s'agit de failles visibles (faille matérialisée facilement repérable sur l'image). Elles peuvent également être interprétées et déduites de manière indirecte à partir d'anomalie telles que des ruptures dans le réseau hydrographique, des variations radiométriques ou des changements de pente.

V. Minéralisations

Dans le territoire étudié, des indices de minéraux ferreux, non ferreux, nobles et de substances utiles non métalliques ont été identifiés (fig.80). Ces indices sont principalement concentrés dans la moitié ouest du périmètre en question, particulièrement dans la région du Djebel Ben-Tadjine, et dans les zones où se trouve la faille profonde de direction nord-est. La plupart de ces indices ont été découverts lors des travaux réalisés par l'équipe d'Ougarta dans les années 1979-1980. Parmi les plus intéressants figurent les indices de cuivre de type stratiforme avec de minéraux accessoires tels que l'argent (Ag) et le bismuth (Bi), trouvés à Rahmani et Laadjel (fig.80). Ces indices se trouvent dans la partie sud-ouest de la feuille Tabelbala, le long des flancs d'une seule structure synclinale. Il est important de noter que le développement de ces gisements du grès cuprifères ne se limite pas à ces deux sites. Les indices qui sont spatialement et génétiquement liés à la zone de la faille profonde nord-est présentent également un grand intérêt. Cette zone s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres et contrôle la répartition de la plupart des indices hydrothermaux riches en métaux rares, notamment le cuivre et les polymétaux.

Les indices de minéralisation de ce type se trouvent concentrés dans la moitié nord-ouest de la région, en relation avec la partie centrale de la faille. Bien que ces indices et points de minéralisation n'aient pas encore été confirmés comme ayant une valeur pratique avérée, ils suscitent l'espoir de découvrir à l'avenir des gisements plus importants dans cette région. Les substances utiles non métalliques sont représentées par la baryte et les argiles kaoliniques.

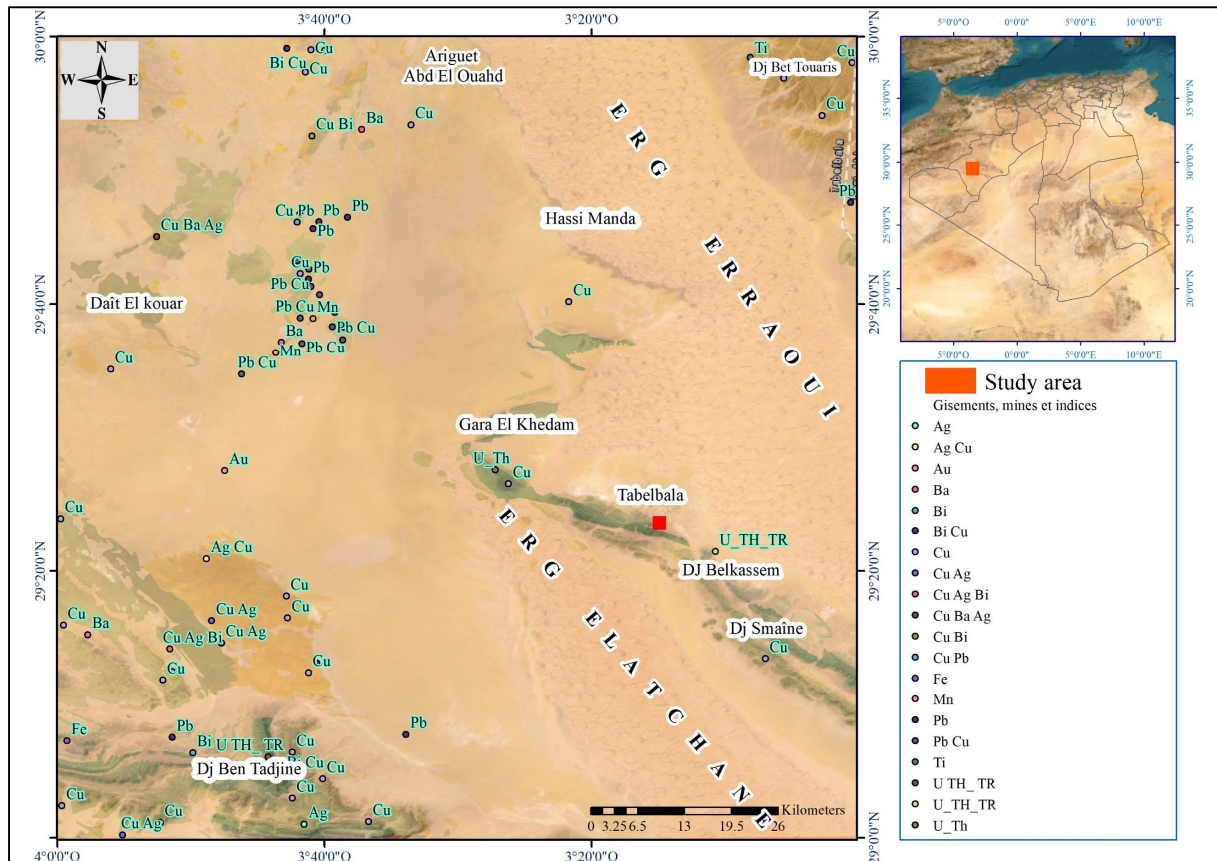


Figure 80: Répartition spatiale de la minéralisation (gisement, mine et indice) relative à la région de Tabelbala.

VI. Conclusion

L'étude géologique et structurale dans la région d'étude a révélé la présence de diverses formations lithostratigraphiques. Celles-ci comprennent des terrains volcano-sédimentaires, attribuées au Protérozoïque, de quartzite, grès quartzitiques et conglomérats rouges du Cambro-Ordovicien. Le silurien est majoritairement argileux, tandis que le néogène est caractérisé par des dépôts détritiques. Le Quaternaire est la formation la plus répandue dans la région, se manifeste par des encroutements calcaires, de roches détritiques composées de sables, cailloux roulés, limons et argiles gypsifères. Ces terrains sont traversés par un réseau de faille et de fracture, principalement orientées nord-est/sud-ouest, ayant un impact significatif sur la circulation des eaux souterraines. Ces structures pourraient agir comme des drains, permettant aux eaux de s'écouler le long des fractures ou bien des zones d'alimentation, ce qui pourraient conduire à l'émergence de sources à la surface.

Chapitre IV

Hydrogéologie

I. Introduction

Cette section se consacre à l'étude des aquifères et nappes associées aux différentes formations géologiques de la région considérée (description hydrogéologique), dans une optique d'analyse hydrogéologique détaillée. Ce travail vise à effectuer une identification et une délimitation des principaux champs de captage d'eau souterraine, tout en mettant en relief les caractéristiques distinctes ainsi que les structures hydrogéologiques spécifiques qui influencent la variabilité et la dynamique de ces ressources. Ces descriptions s'appuient particulièrement sur les données initiales provenant de forages et de sondages effectués, ainsi que sur les travaux antérieurs menés par de différents auteurs tels que (Yahiaoui, 1992c, Schoeller, 1945, Combes, 1966) et autres.

Dans la région de Tabelbala, l'eau joue un rôle stratégique dans le développement, en raison de sa rareté et d'un cycle naturel instable et perturbé (Boudjadja, Messahel and Pauc, 2003). Face à cette limitation ainsi qu'à la nécessité de répondre aux besoins croissants en qualité et en quantité, il est temps de concevoir des solutions adaptées intégrant divers priorités et objectifs.

A l'instar des régions sahariennes, cette région souffre d'un manque notable de travaux hydrogéologiques approfondis, malgré l'existence des étendues géologiques abritant des aquifères productifs. Cette carence d'investigation exhaustive rend la connaissance de ressource en eau souterraine largement insuffisante à ce jour. En effet, aucune étude hydrogéologique complète n'a encore couvert l'ensemble de la zone, limitant ainsi la compréhension de la disponibilité ainsi que la répartition des ressources hydriques souterraines.

En ce qui concerne les ressources en eau superficielle, elles sont presque inexistantes, et se limitent particulièrement à quelques dépressions naturelles et sebkhas. Dans ce contexte, il devient indispensable, d'acquérir une compréhension approfondit des systèmes aquifères présents dans la région, ainsi qu'une quantification précise des ressources en eau souterraine par rapport au besoin, et ceci afin d'adopter et de développer une stratégie vers une utilisation rationnelle et efficace de cette ressource précieuse.

Les principales ressources en eau dans la région sont les eaux souterraines des nappes de Tabelbala et de Erg Er Raoui. Ces ressources proviennent des formations de la chaîne l'Ougarta et les formations hamadiennes, notamment à travers l'Oued Berraber, au sud-ouest, dont les eaux de crue s'infiltrent dans les dunes de l'erg Er Raoui.

La dalle hamadienne est susceptible de comporter des karsts constellés de Dayas, qui agissent comme des dolines. L'eau de pluie s'écoule le long du Hamada et se collecte dans les Dayas, où une grande partie s'évapore et le reste s'infiltré (Merzougui *et al.*, 2021b).

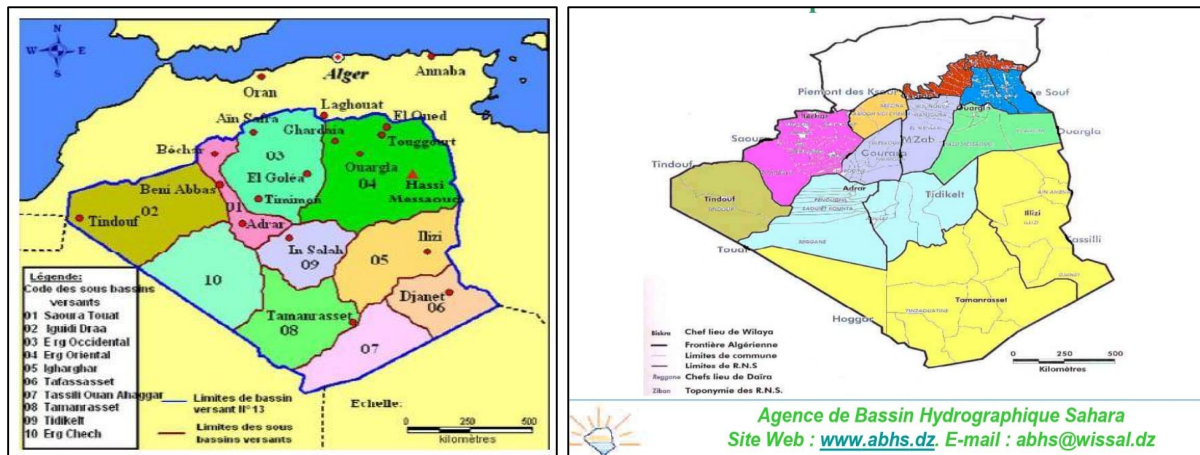


Figure 81 : Carte des bassins hydrographiques du Sahara algérien (ABH).

1. Bilan de l’eau dans la région

Les bilans réalisés par les services techniques du ministère des Ressources en Eau (DRE.W.Beni Abbès) mettent en évidence que, selon l’Office national des statistiques (ONS), la population la région de Tabelbala était estimée à 5448 habitants en 2008. D’après les estimations fournies par la Direction de la Planification et de l’Aménagement du Territoire (DPAT), cette population a enregistré un taux de croissance annuel significatif de 1.44 % passerait à 6656 habitants en 2024. Cela entraine une demande en eau potable croissante estimée à 493588 m³/ans.

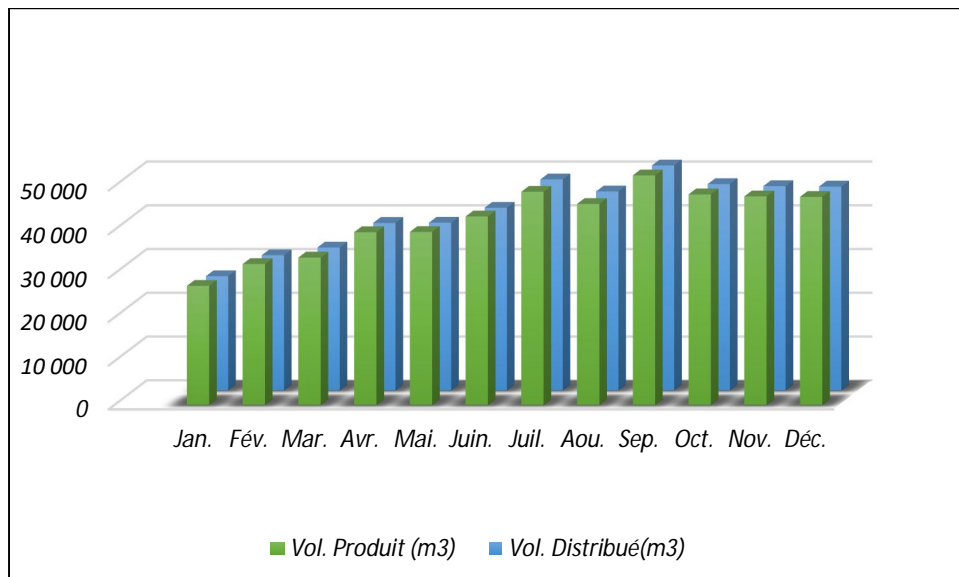


Figure 82: Bilan de l’eau dans la région ((DRE. Beni Abbès.2024).

La distribution de l’eau dans cette région est globalement efficace, avec une couverture complète des 6665 habitants et un ratio élevé de volume distribué par rapport au volume produit (0.96 à 1.99). La production et la distribution varient selon les saisons (fig.82), atteignant leur maximum en mois de septembre (fig.83) avec 52457 m³, produisent et 51408 m³ distribués, et leur minimum en mois de janvier avec 27199 m³ produits (tab.11). La dotation en eau suit cette tendance, oscillant entre 132 et 263 litres par habitant et par jour (supérieure au seuil recommandé par l’OMS (Human Rights Council, 2021), avec une hausse notable en été, qui est probablement due à l’augmentation de la demande liée aux températures accrues.

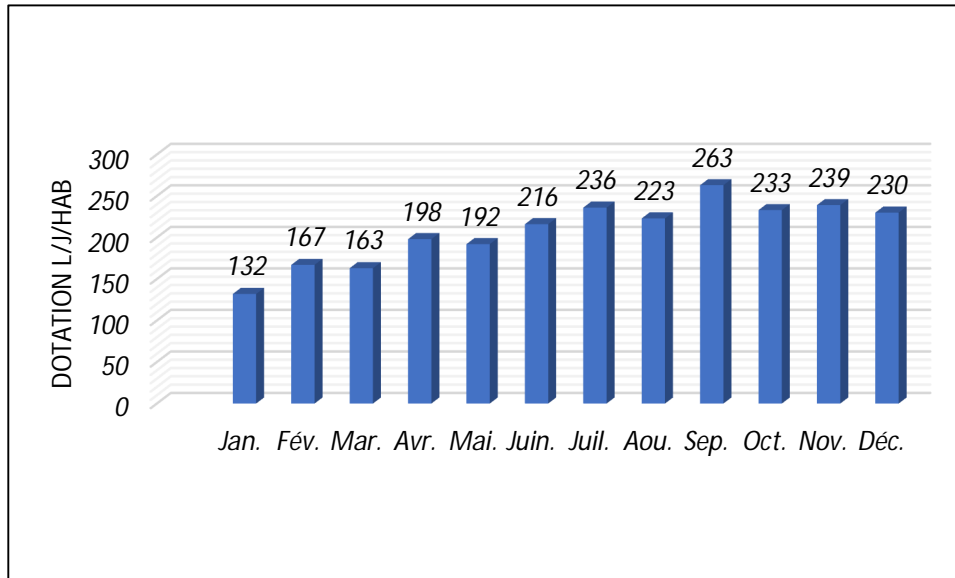


Figure 83: Volume d'eau distribué (dotation) l/j/hab (DRE. Beni Abbès.2024).

Dans le tableau ci-dessous (Tab11) sont répertoriés les volumes d'eau produits et distribués dans la commune de Tabelbala pour l'année 2024.

Tableau 11: Statistique des volumes d'eau distribués et produits pour Tabelbala (DRE. Beni Abbès.2024).

Mois	Comm.	Pop. Totale	Pop. desservie	Vol. Produit m3	Vol. Distribué m3	Vol dist/Vol prod	Dotation l/j/hab
Jan.	Tabelbala	6 656	6 656	27 199	26 111	0.96	132
Fév.				32 184	30 897	0.96	167
Mar.				33 678	32 668	0.97	163
Avr.				39 464	38 280	0.97	198
Mai.				39 535	38 330	0.97	192
Juin.				43 066	41 753	0.97	216
Juil.				48 705	48 218	0.99	236
Aou.				45 942	45 483	0.99	223
Sep.				52 457	51 408	0.98	263
Oct.				48 110	47 148	0.98	233
Nov.				47 649	46 696	0.98	239
Déc.				47 547	46 596	0.98	230

II. Différents Aquifères de la région d'étude

La région d'étude fait partie d'un bassin abritant plusieurs formations aquifères réparties sur différents niveaux stratigraphiques, allant du Cambro-Ordovicien au quaternaire, et se distingue principalement par leur nature, leur puissance et leur qualité. Divers aquifères ont été identifiés tels que l'aquifère du Cambro-Ordovicien, l'aquifère de la Hammada de la Daoura, l'aquifère de la nappe de l'Erg Er Raoui et l'aquifère de la nappe de Tabelbala. Chacun de ces aquifères présentant des caractéristiques en termes de composition et du potentiel hydrique.

1. Aquifère du Cambro-Ordovicien

Aucune étude hydrogéologique n'a été réalisée dans cette zone jusqu'à présent. Les formations cambro-ordoviciennes n'ont fait l'objet ni de forages ni de puits hydrogéologique à l'exception du forage de Boulaadam à une profondeur de 80 m ayant donné 2.1 l/s, ainsi que des travaux de l'Office de Recherche Géologique et Minière (ORGM), liés à l'exploration et à la recherche minière, en particulier pour le cuivre (compagne 2024). Lors de ces travaux, des nappes d'eau souterraine ont été traversées (identifiées par hasard) atteignant les formations cambro-ordoviciennes à des profondeurs comprises entre 172 et 180 mètres. Ces découvertes pourraient constituer un point de départ pour une étude hydrogéologique actualisée visant à estimer les ressources hydriques souterraines du Cambro-Ordovicien.

Compte tenu de la nature lithologique de différentes formations primaires du synclinal de Kahal Tabelbala, les faciès perméables tels que les grès et les quartzites, fortement fracturés et diaclasés (perméabilité s'interstice et de fissure), pourraient constituer de formations aquifères potentielles (formations qualifiées d'être un bon réservoir susceptible d'emmagasiner une nappe). Ces structures permettent probablement la circulation d'eau le long des fractures et diaclases. Ces formations pourraient ainsi représenter un intérêt pratique considérable en termes de réserve d'eau, bien que cette hypothèse soit basée sur une analogie avec les formations cambro-ordoviciennes des monts de l'Ougarta (région de Zeghamra), déjà identifiées comme aquifères potentiels avec des débits entre faible à moyen, étant donné le manque de donnée et d'investigation hydrogéologique dans la région.

Les différentes compagnes de prélèvement menées dans la région de l'Ougarta, ont révélé que la température de l'eau, lorsqu'elle jaillit en surface, atteint 34 °C. Cette température relativement élevée suggère, une circulation des eaux en profondeur, probablement lente en raison de la nature de différentes formations géologiques traversées et des échanges thermiques qui s'y produisent. L'eau de cet aquifère présente un faciès chloruré sodique.

Les analyses isotopiques des eaux effectuées ont confirmé la présence d'un volume significatif d'eau fossile.

Les éléments structuraux, morphologiques, ainsi que l'histoire climatologique de la région sont des indicateurs importants du potentiel en matière d'eau souterraine (aquifère). La présence d'impluvium aux extrémités de l'Erg, combinée aux variations climatiques durant le quaternaire ancien et moyen renforce cette hypothèse.

Le synclinal de Kahal Tabelbala présente un nombre significatif d'horizons avec des épaisseurs importantes avant d'atteindre les couches potentiellement aquifères. En raison des caractéristiques hydrogéologiques défavorables (faciès imperméables ou de très faible perméabilité) de l'Ordovicien supérieur, et notamment la présence de faciès argileux imperméables, il est fortement probable qu'un volume d'eau considérable soit emmagasiné dans les grès blancs, les grès rouges ainsi que dans les quartzites de l'Ordovicien inférieur.

Ces formations pourraient potentiellement donner lieu à un artésianisme, si ces couches étaient soumises par des travaux d'exploration ou d'exploitation tels que des forages ou des puits.

2. Hamada de la Daoura

La Hamada de la Daoura, avec ses vastes dimensions (50 km de long et de 40 Km de large), est entourée par des entités géologiques diverses. Elle est bordée au nord et à l'est par Erg Er

Raoui et la Hamada de Guir, au sud par la structure de Dramane et Dj Ben Tadjine, quant à l'est et à l'ouest respectivement par Erg El Atcthane et Oued Daoura. Malgré l'étendue de cette unité géomorphologique, aucune infrastructure d'approvisionnement en eau (point d'eau) n'a été réalisée dans cette région, à l'exception d'un forage de 40 m de profondeur, réalisé par la commune de Tabelbala. Ce forage, situé à environ 85 km au nord-ouest du village de Tabelbala et à 19 km au nord d'Oued Daoura, n'a malheureusement révélé aucune présence d'eau. Par ailleurs, les formations traversées sont principalement constituées d'argiles rouges kaoliniques. Ces caractéristiques géologiques de la Hamada de la Daoura pourraient jouer un rôle clé dans la dynamique des eaux souterraines de la région. Il est possible que la Hamada de la Daoura agisse comme une barrière ou une couche imperméable, limitant la circulation des eaux souterraines et séparant potentiellement la nappe d'Erg Er Raoui.

Dans la région de Hamaguir, cette nappe est exploitée par des forages avec des débits atteignant 4 l/s, comme l'indique la carte des hydroisohypses. Par analogie, il est fort probable que la Hamada de la Daoura présente également un système hydrogéologique, bien que celui-ci puisse être non cohérent et potentiellement complexe. Cette région, bien qu'elle ait révélé des résultats négatifs avec le forage stérile (40 m de profondeur), ne peut pas être considérée comme totalement dépourvue de ressource en eau.

3. Nappe de l'Erg Er Raoui

La nappe de l'Erg Er Raoui, s'étendant sur une vaste superficie d'environ 10000 km², et est drainée par l'Oued Et Tseibat (Conrad, 1969a) dans sa partie sud-est. Celui-ci se déverse ensuite dans l'Oued Massaoud qui constitue le prolongement de l'Oued Saoura vers le sud. Cette entité aquifère, d'une superficie environ 3000 km², s'étale sur 30 km de large dans sa partie septentrionale et s'étire sur 100 km de longueur, selon une orientation nord-sud. Elle est la plus sollicitée pour répondre aux besoins et satisfaire la demande en eau potable et en irrigation dans la plaine de Tabelbala, et elle alimente également d'autres puits et forages situant à H¹ Hameida, H¹ Zriguet, H¹ kheil, H¹ Manda, H¹ etc. La Sebka d'El Bieda est considérée comme l'un des exutoires de cette nappe, car la structure de Kahal Tabelbala agit comme une barrière, faisant remonter la nappe par le processus d'évaporation dans ladite Sebka.

4. Aquifère de la nappe de Tabelbala

L'aquifère de la nappe de Tabelbala s'étale sur environ 80 km², situé entre l'Erg Er Raoui et la structure de Kahal Tabelbala, et constitue l'un des principaux exutoires de la nappe de l'Erg Er Raoui. Elle est associée à diverses formations géologiques comprenant des grès tendres, des grès calcaires, des calcaires lacustres et des conglomérats. Cette nappe est libre ayant une circulation des eaux de type interstitiel.

Dans la plaine de Tabelbala, la fracturation est peu spectaculaire en raison de l'âge relativement récent des formations géologiques qui n'ont été affectées que par les phases tectoniques ultérieures.

Un nombre significatif de forages et de puits ont été réalisés dans cette plaine pour capter la nappe en question, utilisés à la fois pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation. Ces points d'eau ont largement contribué à la délimitation de l'aquifère de la nappe de Tabelbala.

III. Inventaire des points d'eau

Un recensement exhaustif des divers points d'eau tels les forages, les puits et les sources existant dans la région d'intérêt a été réalisé (fig.84). L'inventaire complet de ces points d'eau a été effectué pour fournir une vision globale de l'étude dans sa totalité, en tenant compte bien sur des endroits où il était possible et accessible de mener des prélèvements.



Figure 84: Puits équipés de pompes et bouchons fermés.

La plupart des points d'eau répertoriés sont des puits localisés principalement autour du chef-lieu de la Daïra de Tabelbala (fig.85). Ils sont utilisés essentiellement pour l'irrigation ainsi que pour l'approvisionnement en eau potable de la population. Selon l'inventaire réalisé par l'ANRH en 2014, et 2018, plus de 223 puits et forages ont été recensés, avec des p(m)Isopiézedeurs variant de 10 à 110 m.

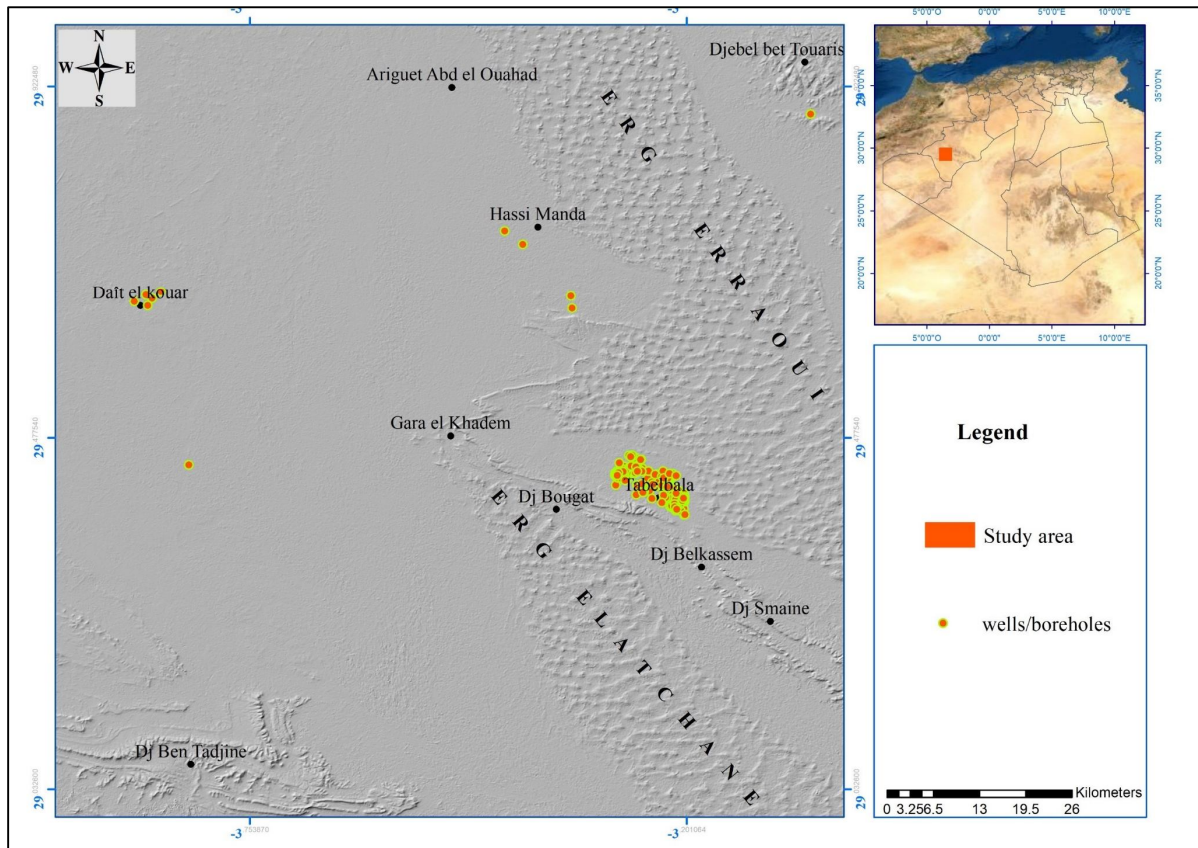


Figure 85: Distribution spatiale des différents points d'eau et forages.

En vue de vérifier la localisation spatiale (emplacement), mesurer et évaluer les paramètres hydrogéologiques tels que le niveau statique, le niveau dynamique, le champ captant, l'utilisation de l'eau, le débit, la température et la conductivité, une bonne partie des points d'eau de la zone d'étude a été visitée. Toutes les informations recueillies sur le terrain ainsi que des données bibliographiques ont été consignées dans un fichier récapitulatif. Il a été constaté que les points d'eau inventoriés se trouvent pour la plupart dans le village de Tabelbala.

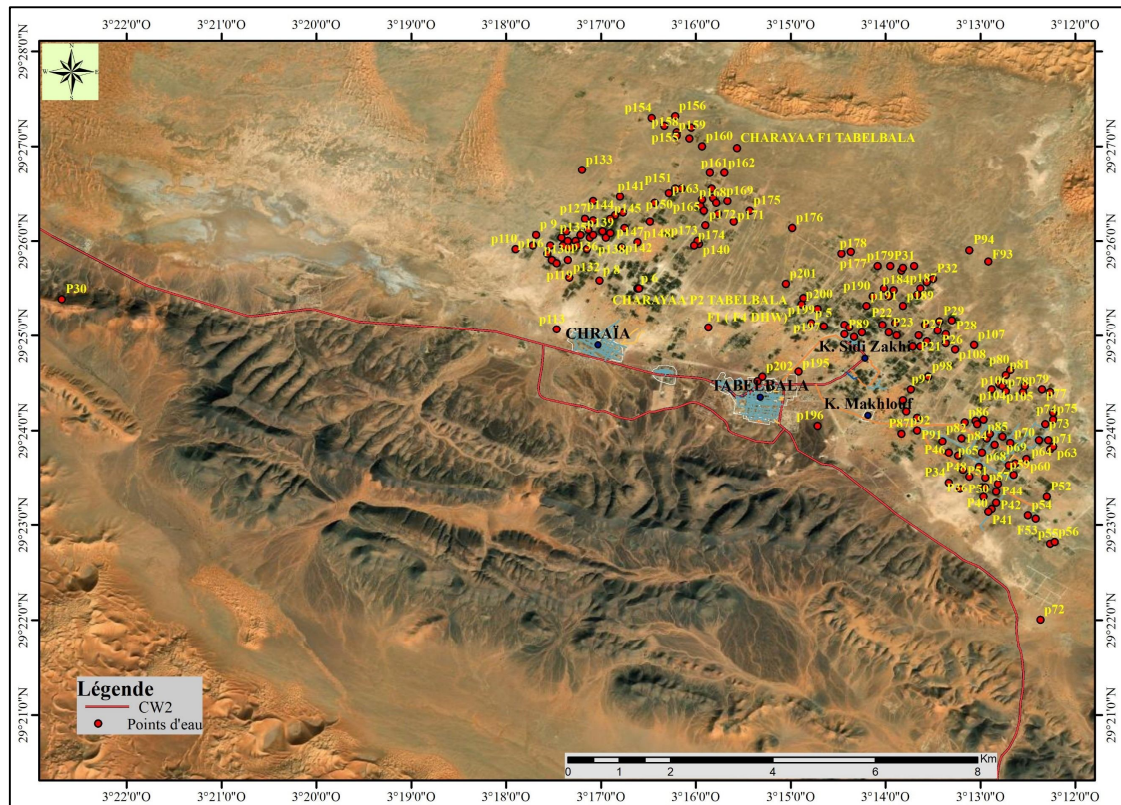


Figure 86: Points d'eau et forages du village de Tabelbala (mars 2014).

Globalement, le captage des nappes se réalise principalement à travers des puits et des forages, qui sont clairement concentrés au niveau des agglomérations (fig.86), et ce pour leur approvisionnement et leur besoin quotidien.

1. Piézométrie (niveau d'eau)

En utilisant une sonde électrique, des mesures précises du niveau statique ou dynamique relatif aux points d'eau ont été prises avec une précision centimétrique pour les points d'eau de la région étudiée. Cependant, il a été observé que le niveau statique varie de 3.55 à 19.2 m de profondeur dans la zone investiguée. Pour certains forages et puits, il n'était pas possible de mesurer le niveau statique en raison d'exploitation et de pompage continu. Dans ces cas, nous avons donc pris des mesures relatives au niveau dynamique à la place.

L'élaboration de cartes piézométriques en hydrogéologie constitue une étape fondamentale, permettant d'acquérir des informations essentielles sur le comportement hydrogéologique de l'aquifère. Ces cartes permettent également de visualiser l'allure de la surface piézométrique y compris l'espacement et la forme des isopièzes. Les variations relatives aux fluctuations des niveaux piézométriques dépendent des conditions d'alimentation de la nappe et son exploitation ; en général, plus la nappe est sollicitée plus le niveau piézométrique diminue. Dans le cas de la plaine de Tabelbala, le niveau piézométrique varie entre de 493 et 523 mètres traduisant une variabilité spatiale marquée au sein de l'aquifère (fig.87). Le gradient hydraulique général est orienté du nord/nord-est vers le sud/sud-ouest, indiquant des zones de recharge situées dans les secteurs septentrionaux, où les charges hydrauliques sont les plus élevées (≥ 516 m), et des zones de décharge au sud, caractérisées par des niveaux plus faibles (≤ 500 m).

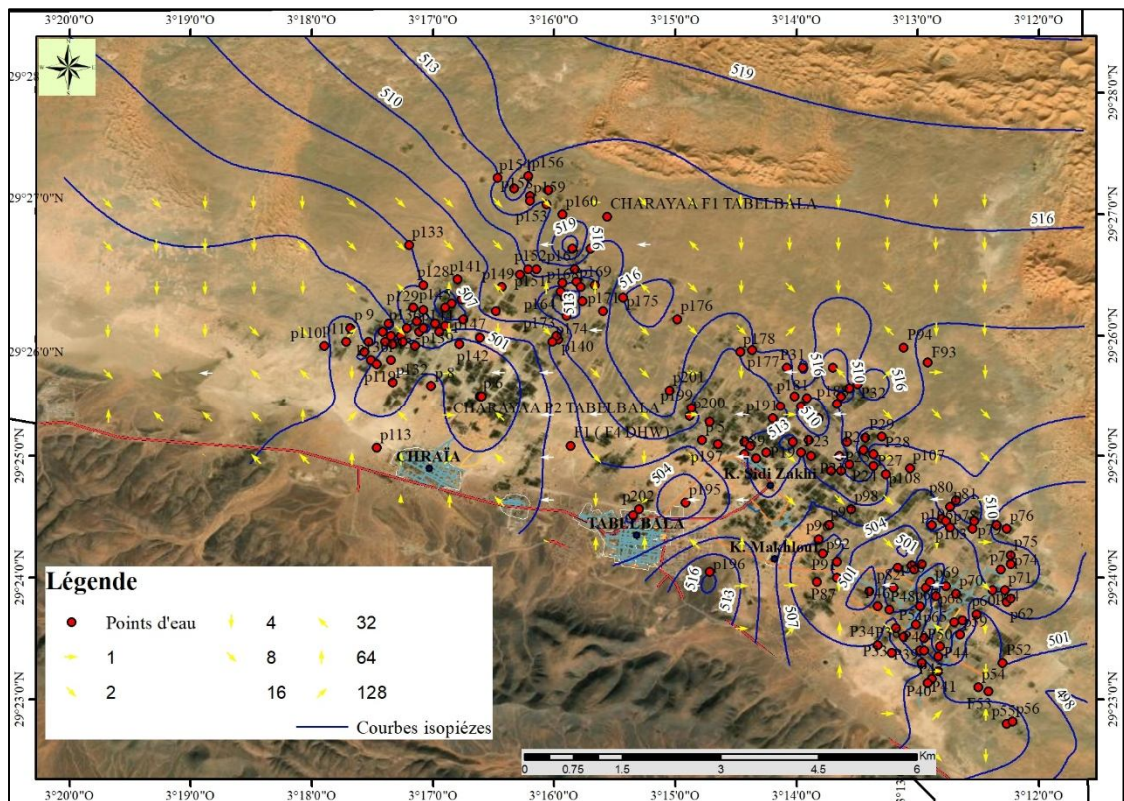


Figure 87: Distribution spatiale de la surface piézométrique (mars 2014).

En mars 2014, lors de la période de haute eau, une campagne piézométrique a été menée, sur la base de la répartition de différents points d'eau dans la région.

Cette campagne a spécifiquement permis d'établir et de dresser la carte piézométrique du groupe de forages du village de Tabelbala, comprenant 189 points d'eau sur les 207 forages existants. À partir de cette carte (fig.87), des axes de drainage souterrain, (lignes de courant piézométrique) ont été identifiés en utilisant l'extraction automatique assistée par ArcMap (ArcGIS) suivant la direction de flux des eaux souterraines.

L'analyse et l'observation détaillées de la carté piézométrique générée révèlent que dans l'ensemble, le sens d'écoulement souterrain (alimentation de la nappe) se dirige du nord-ouest et nord-est vers le sud, où les courbes iso-pièzes sont espacées. Celui indique que dans cette zone, le gradient hydraulique est faible, ce qui se traduit par un espacement important entre les courbes iso-pièzes sur la carte piézométrique. En revanche, une surexploitation de la nappe est observée au nord du Chraïa (piézomètre à 500 m) et au sud-est de Ksar Makhlouf (piézomètre à 500 m), où l'écoulement converge vers le même point. Cela se traduit par la présence d'une dépression piézométrique caractérisée par un ensemble de courbes iso-pièze relativement serrée, exprimant également que le gradient hydraulique relatif à cette zone est élevé, l'écoulement est rapide et la transmissivité de la nappe est faible.

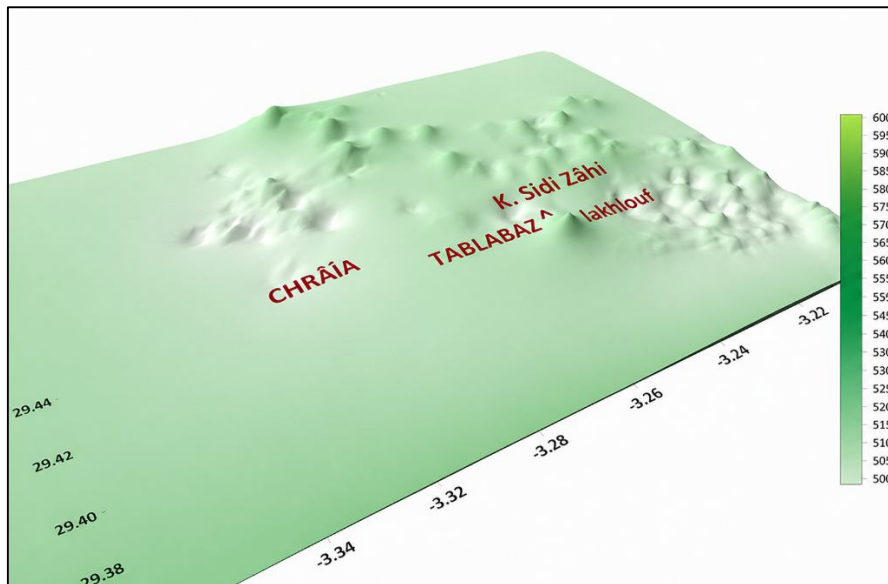


Figure 88: Schématisation en 3 dimensions.

Sur la carte piézométrique, des courbes isopièzes ont été observées au sud-ouest de Ksar Makhlouf et au nord de Tabelbala, correspondant généralement à des zones de protubérance ou de dépressions (fig.88). Les zones de protubérance indiquent une anomalie probablement due à la présence de zones d'alimentation locale, d'une forte perméabilité et/ou à l'irrégularité d'un substratum imperméable. En revanche, les dépressions se forment en raison de l'exploitation excessive des nappes.

Par ailleurs, la carte piézométrique générée montre des courbes ayant des circonférences variables, dessinant des lignes de courant convergentes à divergentes, caractéristiques observées généralement dans les plaines alluviales (fig.90). Cela indique un écoulement hétérogène, typique d'un aquifère à nappe radiale présentant souvent un profil parabolique notamment au nord-ouest.

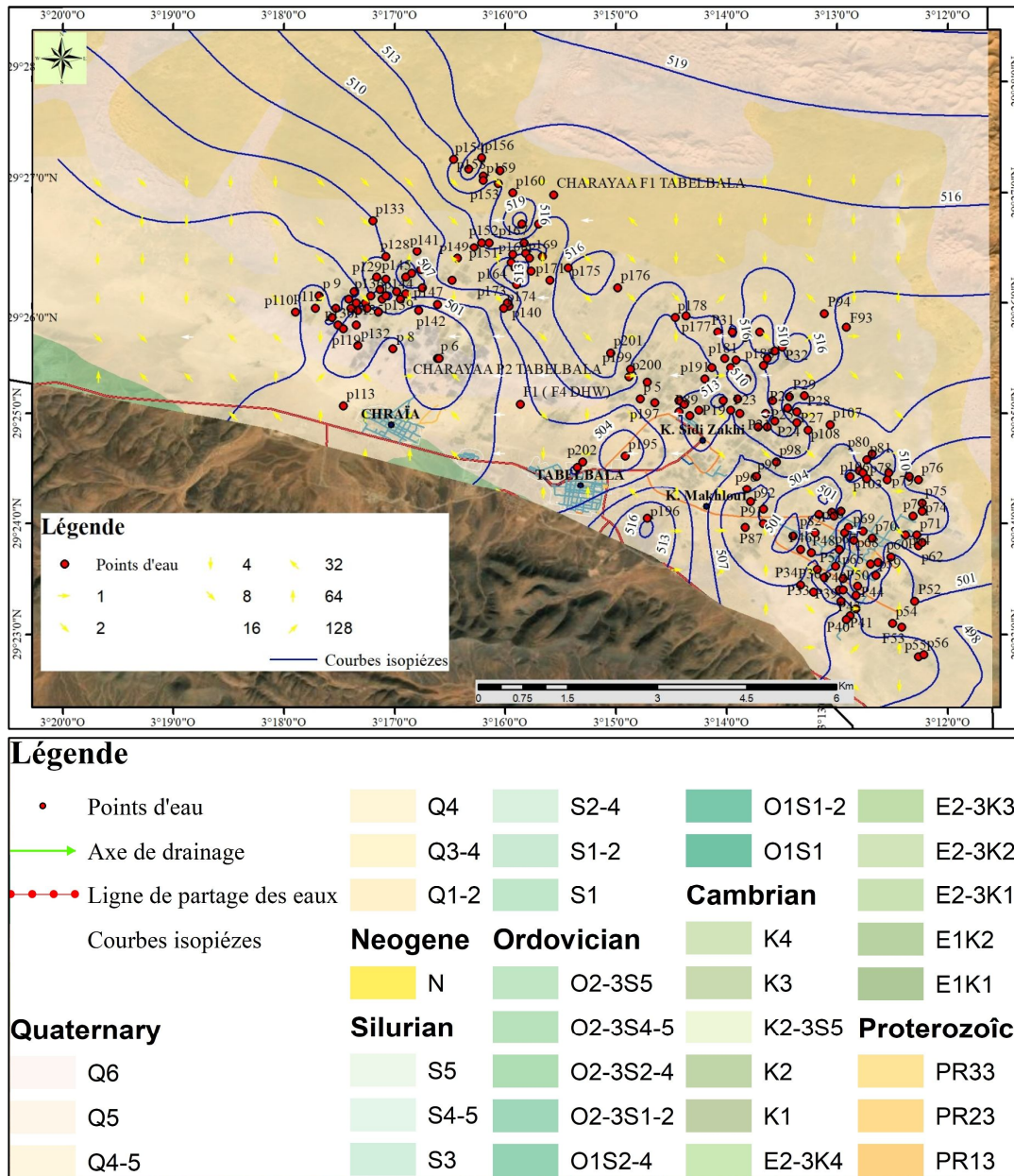


Figure 89: Carte hydrogéologique de Tabelbala.

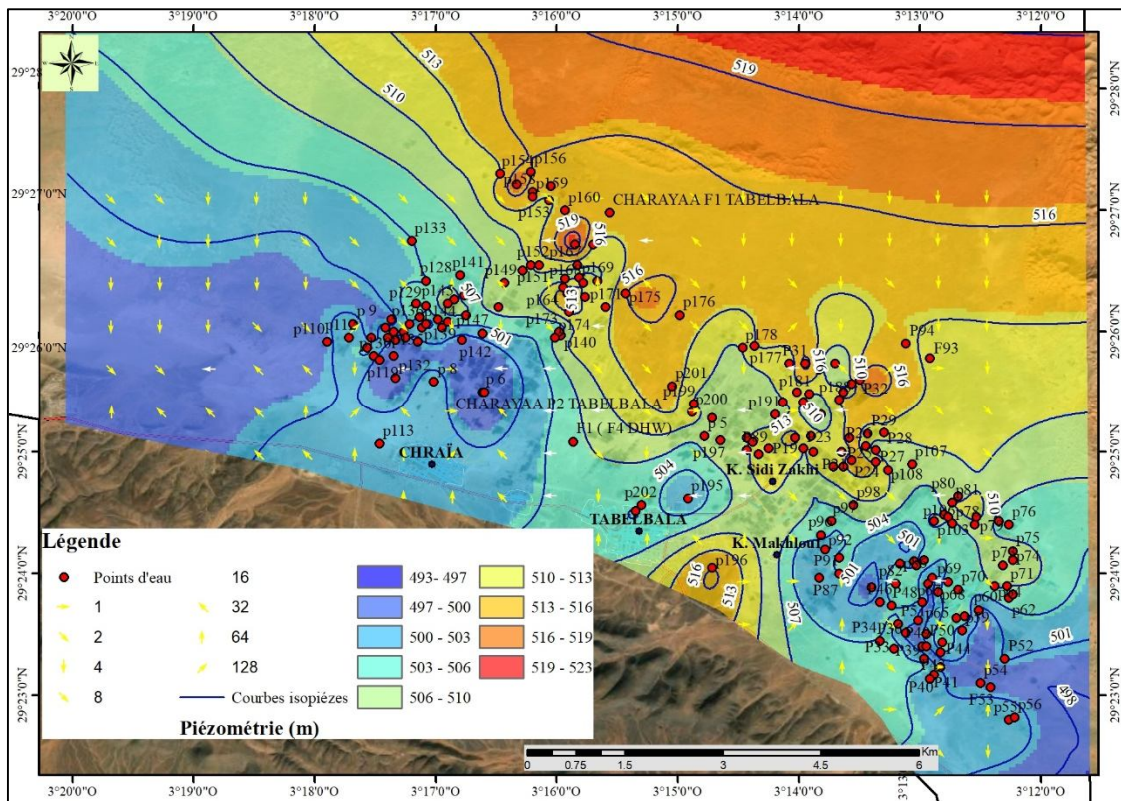


Figure 90: Piézométrie du village de Tabelbala.

L’analyse morphométrique de la carte piézométrique générée révèle une décroissance des valeurs piézométriques en se dirigeant vers le village de Tabelbala, vers Chraïa et au sud-est de Ksar Makhlouf (fig.89, fig.90). L’observation détaillée des courbes hydro-isohypses montre qu’elles sont un peu serrées à l’Ouest (un fort gradient hydraulique et une faible perméabilité) et que l’espacement entre les courbes augmente vers la structure de Kahal Tabelbala.

Le gradient hydraulique (pente de la surface piézométrique) s’exprime par la formule suivante :

$$i = \Delta h / l \quad (1)$$

Où : *i* signifie le gradient hydraulique

Δh représente la différence d’altitude en mètre

l est la distance entre les isopièzes exprimées en mètre

Tableau 12 : Gradient hydraulique de la région de Tabelbala

	Distance (<i>l</i>)	$\Delta h(m)$	G. hydraulique (<i>i</i>)
Nord-Est	1500 m	$\Delta h = 519-516=3$ m	$i = 0.002$ (0.2 %)
Centre	400 m	$\Delta h = 514-511=3$ m	$i = 0.0075$ (0.75 %)
Nord-Ouest	1650 m	$\Delta h = 503-500=3$ m	$i = 0.0018$ (0.18 %)

La carte piézométrique montre un gradient hydraulique globalement faible sur la plaine de Tabelbala, caractérisé par des isopièzes espacées et un écoulement lent des eaux souterraines. Au niveau du village de Tabelbala, à Ksar Makhlouf et à Chraïa, sa valeur est légèrement plus élevée, estimé à 0.0075 %. Vers l’ouest, le gradient diminue (0.0018 %) fortement indiquant

des zones favorables au stockage d'eau. Entre Sidi Zekri et Ksar Makhlouf, le gradient décroît vers le sud et le sud-ouest, suivant la direction générale d'écoulement de la nappe. (tab.12). Il est important de noter que l'implantation des forages d'eau dans ces zones à faible gradient pourrait certainement générer des débits importants.

2. Zone d'alimentation

En plus des infiltrations directes des eaux des précipitations, les nappes de différents aquifères de notre zone sont alimentées principalement par des eaux provenant de la Hamada de Guir qui les draine ainsi que par les écoulements superficiels issus des monts de l'Ougarta.

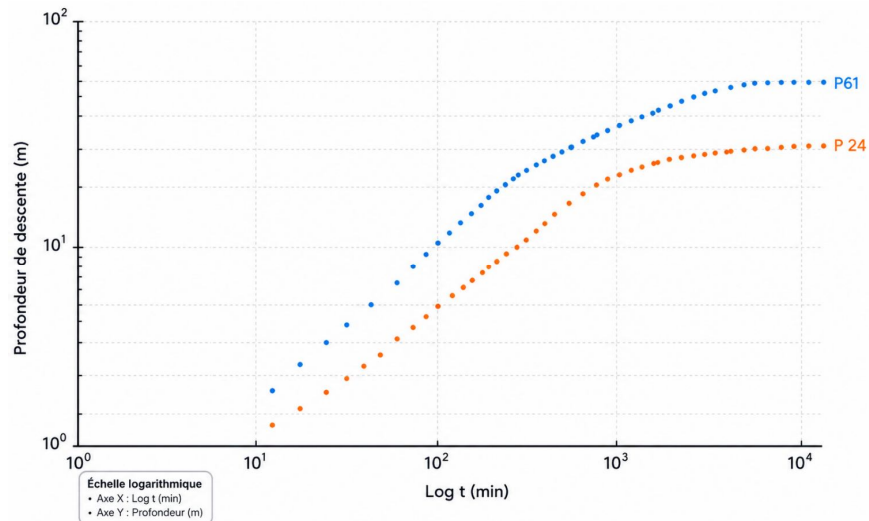
3. Caractéristique hydrodynamique

En ce qui concerne les caractéristiques hydrodynamiques de la zone d'étude, nous ne disposons que quelques données provenant des essais de pompages réalisés sur divers ouvrages, menés par (Yahiaoui, 1992c et M. Chino, 1965), sur quelques puits (p61 et p24). Par ailleurs, ces essais n'ont porté que sur des portions spécifiques de l'aquifère, avec des zones très localisées. Les paramètres hydrodynamiques évalués lors de ces campagnes concernent la transmissivité, le débit, et le rabattement. En ce qui concerne ces paramètres, il n'a pas été possible d'établir des cartes isochrones de débit et de transmissivité en raison de la grande disparité des données. Le premier puits est situé au nord-est, était destiné à l'alimentation en eau potable du village de Tabelbala ainsi qu'à l'irrigation. Le deuxième est localisé à Ksar Chraïa qui est devenu abandonné. Ces données ont été obtenues à partir des essais de pompage d'une durée de 24 heures (fig.91). En utilisant la méthode logarithmique de (Jacob, 1947), les courbes d'essai de pompages ont été analysés et interprétés.

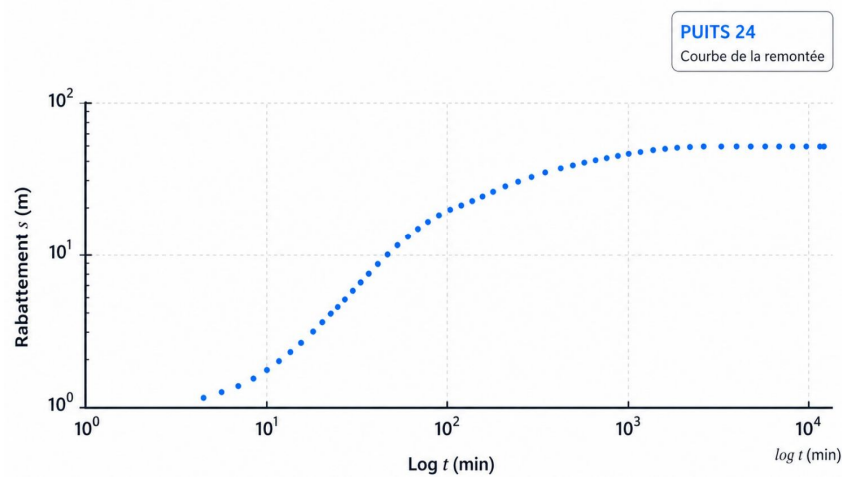
Tableau 13: Valeurs de transmissivités des puits (p61 et p24) dans la plaine de Tabelbala.

N° Puits	Transmissivité (m ² /s)	Décente		Remontée
		Débit (l/s)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)
P61 (SW. K Makhlouf)	T1=0.319*10 ⁻⁴	Q1=6.46	S1=5.72	T1=2.18*10 ⁻⁴
	T2=0.572*10 ⁻⁴	Q2=9	S2=8.165	T2=0.677*10 ⁻⁴
	T3=2.10*10 ⁻⁴	Q3=9.45	S3=9	T3=0.362*10 ⁻⁴
P24 (Chraïa)	T1=1.12*10 ⁻³	Q=11.11	-----	-----
	T2=1.7*10 ⁻³			

Les essais effectués dans la plaine de Tabelbala ont conduit d'évaluer le taux de la transmissivité. Il a été observé que cette valeur varie entre les deux forages. Dans l'ensemble, la transmissivité assez bonne, ce qui traduit de bonnes propriétés conductrices relatives à la plaine considérée. En effet, elle atteint 1.12*10⁻³ m²/s dans les dépôts quaternaires supérieurs moyens (Q4-5) constitués de galets, sables et argiles, puis diminue progressivement dans les formations de dépôts quaternaires moyens (Q5) composés de limons et de sables cailloutis, atteignant 2.18*10⁻⁴ m²/s (tab.13). Cette variabilité est principalement due aux changements lithologiques rencontrés.



(a)



(b)

Figure 91: (a) courbe de descente (p61 et p24), (b) courbe de remontée (p24)
(Yahiaoui, 1992c) (M. Chino, 1965).

Quant aux valeurs de coefficient d'emmagasinement, elles sont de l'ordre de 10^{-3} , reflétant la porosité efficace de notre l'aquifère. Ces valeurs indiquent l'existence d'un drainage entre l'aquifère superposé du Cambro-Ordovicien et confirme la présence d'un milieu semi-captif. Malheureusement, en raison de l'indisponibilité totale ou partielle des données concernant les caractéristiques hydrodynamiques, il n'a pas été possible de produire des cartes de transmissivité, de débit et de coefficient d'emmagasinement.

4. Épaisseur de la zone non saturée

L'épaisseur de la zone non saturée est un paramètre physique essentiel dans l'expression de la vulnérabilité à la pollution des nappes. Cette dernière a été obtenue en soustrayant la profondeur de la surface piézométrique à la surface topographique, ce qui donne une indication de l'épaisseur des terrains non saturés au-dessus des nappes phréatiques libres. Les épaisseurs les plus importantes ralentissent la propagation des polluants vers la nappe, tandis que les tranches d'épaisseur moins importantes entraînent une infiltration rapide du polluant et par conséquent, une dégradation importante de qualité pourrait affecter les eaux de ces nappes.

Cette entité représente une zone où l'eau est en mouvement à la fois vers la profondeur et vers la surface, généralement sous forme d'humidité.

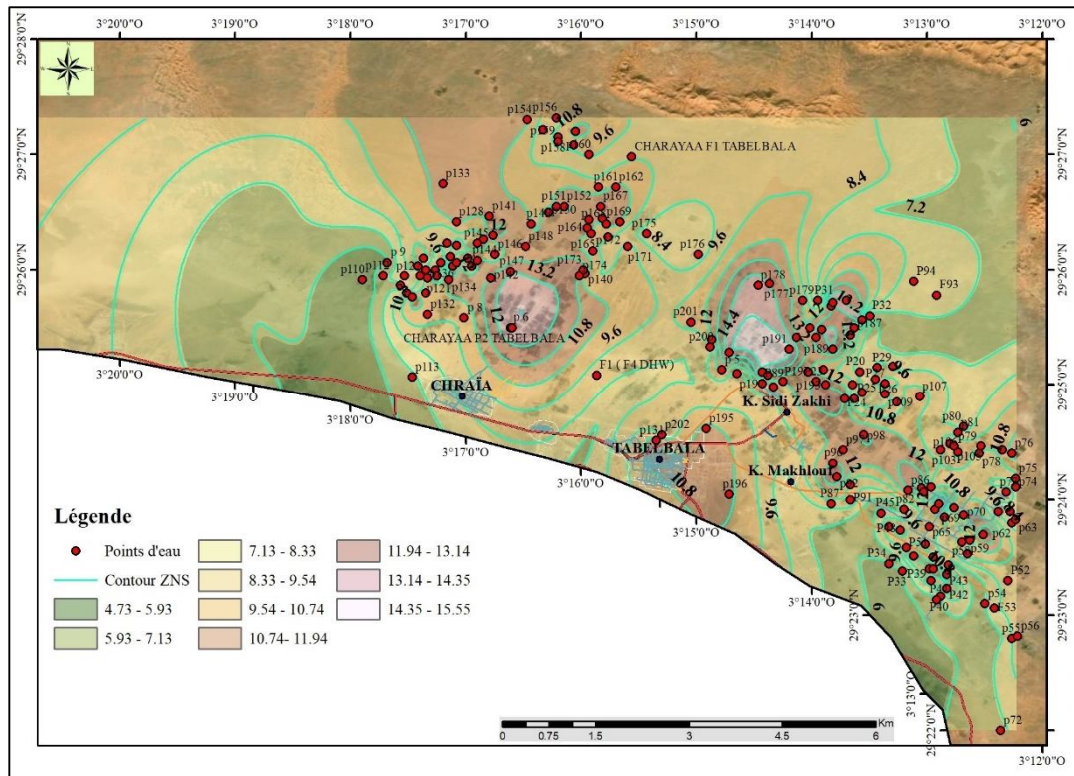


Figure 92: Épaisseur de la zone non saturée.

D’après la carte des courbes d’égal épaisseur établie pour la plaine de Tabelbala (fig.92), les valeurs d’épaisseur varient de 5 à 15 mètres. Ces dernières diminuent en allant vers le sud (moins de 4.5 mètres), avec une tendance à devenir plus en plus mince à l’extrême sud. En revanche, ces valeurs augmentent progressivement en se dirigeant vers Chraïa, Tabelbala, Ksar Makhlouf et Zidi Zekri où nous constatons une épaisseur maximale de 15 mètres. Du fait de cette l’importante épaisseur (supérieur à 15 mètres) de la zone non saturée, le risque de pollution est moins important dans ces zones.

5. Épaisseur de la zone saturée

En utilisant les données piézométriques et du substratum disponible, une carte d’égal épaisseurs de la zone saturée pour la plaine de Tabelbala a été dressée (fig.93). Cette dernière révèle la répartition spatiale de la zone saturée en trois intervalles bien distincts : dans le nord-est et le sud-ouest, les épaisseurs variant de 0 à 10 mètres. Les zones centrales de Tabelbala, Ksar Makhlouf, Chraïa et Ksar Sidi Zakhi présentent des épaisseurs de 10 à 20 mètres, tandis que des valeurs de 20 à 50 mètres ont été observées à l’est de Chraïa et Sidi Zakhi (dans une zone allongée orientée nord-sud) ainsi qu’au sud de Ksar Makhlouf.

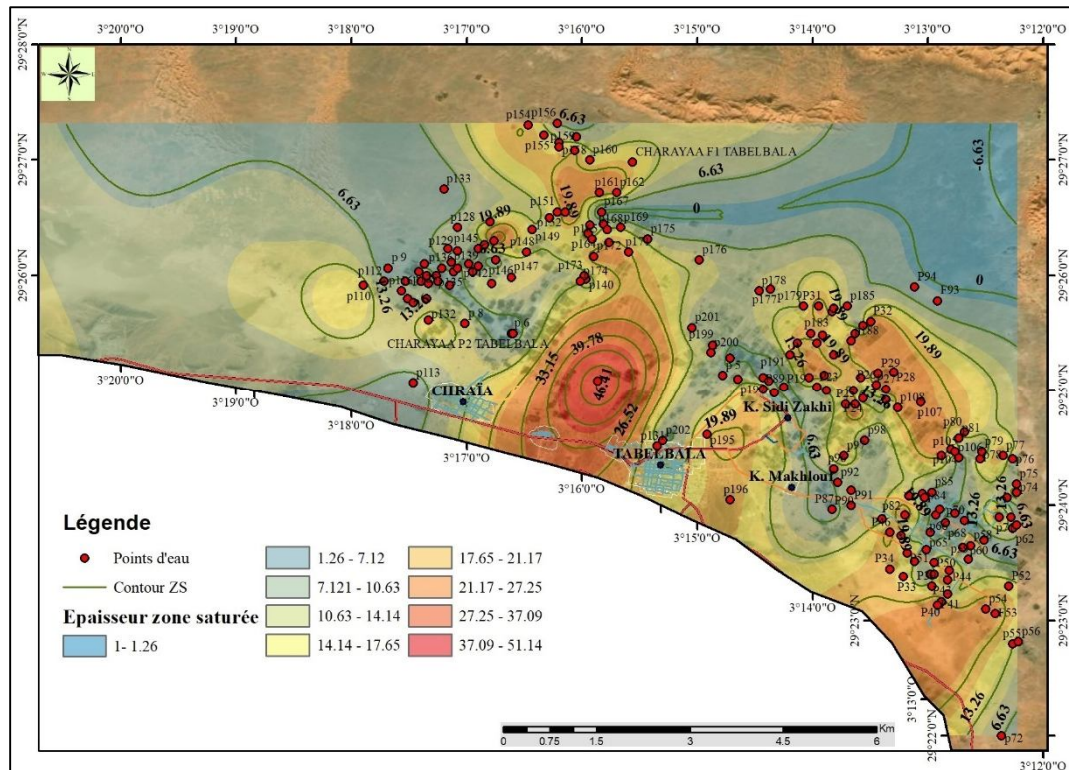


Figure 93: Épaisseur de la zone saturée.

IV. Conclusion

Les aquifères souterrains de la région de Tabelbala représentent une ressource stratégique d’approvisionnement en eau, nécessitant une gestion, une exploitation ainsi une préservation méticuleuse. L’investigation hydrogéologique menée dans notre zone d’étude a permis l’identification ainsi la caractérisation de différents aquifères et leurs propriétés hydrodynamiques distinctes.

L’aquifère Cambro-Ordovicien (aquifère du socle) de notre secteur est identifié, par analogie aux formations aquifères du Cambro-Ordovicien de Beni Abbès. Il s’agit d’une série de formations constituant des grès, de quartzites et de schistes avec des épaisseurs variées. L’alimentation de cet aquifère se fait à la faveur des eaux de la Hamada de Guir qui le draine, par le l’écoulement superficiel provenant des monts de l’Ougarta.

Ensuite, au centre du territoire d’étude se localise le plus important aquifère quaternaire (Aquifère de la nappe de Tabelbala), qui est un réservoir significatif pour l’approvisionnement en eau destiné particulièrement à la consommation humaine (nappe très sollicitée) ainsi qu’à l’irrigation (eau de bonne qualité). Cette nappe est alimentée par les écoulements souterrains et de surface qui s’infiltrent dans les terrains perméables provenant du Nord et notamment la Hamada de Guir et le grand Erg occident, par le biais des crues d’Oued Daoura. Au nord-est se manifeste la nappe de l’Erg Er Raoui avec des réserves importantes méconnues, qui n’est pas exploitée en raison de l’inaccessibilité due à l’Erg.

Chapitre V

Géophysique

I. Introduction

Dans les régions Sahariennes, l'évaluation, la gestion et la préservation des ressources hydriques souterraines sont devenues des priorités essentielles et des sujets d'actualité en constante évolution (Makanda, Nzama and Kanyerere, 2022). Cette évolution découle particulièrement des avancées des techniques de recherche et d'investigation dans les domaines des ressources en eau et des géosciences.

L'utilisation des méthodes géophysiques, notamment les techniques électriques, revêt une importance fondamentale pour une gestion durable et efficace des aquifères (Gupta *et al.*, 2013) en particulier en Algérie. La visualisation géospatiale en 3D (cross-section) des aquifères, basée sur les données géophysiques, représente une approche permettant de cartographier et de modéliser les caractéristiques géologiques, structurales, géométriques (comme les limites (toit et mure) et les épaisseurs des couches)) et hydrogéologiques des nappes aquifères, tout en surveillant leur exploitation (Hamdi and Goïta, 2023).

L'intégration de la méthode d'investigation géoélectrique dans le contexte de la prospection géophysique offrira une compréhension approfondie de la région de Boulaadam, et permettra une modélisation plus précise de ses ressources hydriques. Cette approche permettra non seulement d'identifier les caractéristiques spécifiques des aquifères de la région, mais aussi de mieux comprendre leur fonctionnement hydrodynamique.

Dans cette partie, nous allons présenter quelques résultats d'analyses et d'interprétations géophysiques appliquées à l'hydrogéologie (ANRH 2008), en utilisant notamment les méthodes électriques, dans la région de Boulaadam (fig.94). Cette approche est largement utilisée dans les investigations hydrogéologiques (Guerin *et al.*, 2004), car elle permet d'acquérir des informations utiles sur la résistivité et la conductivité, des paramètres très sensibles aux variations lithologiques et aux quantités d'eaux qu'elles emmagasinent (McNeill and Labson, 1991). Les variations spatiales et temporelles des propriétés physiques du sol, telles que la résistivité électrique, la densité et la vitesse de propagation des ondes, sont quantifiables grâce aux techniques géophysiques (Keary and Brooks, 1984). Ces mesures, effectuées par des géophysiciens, visent à obtenir des images qui reflètent le contexte géologique et hydrogéologique de la région considérée.

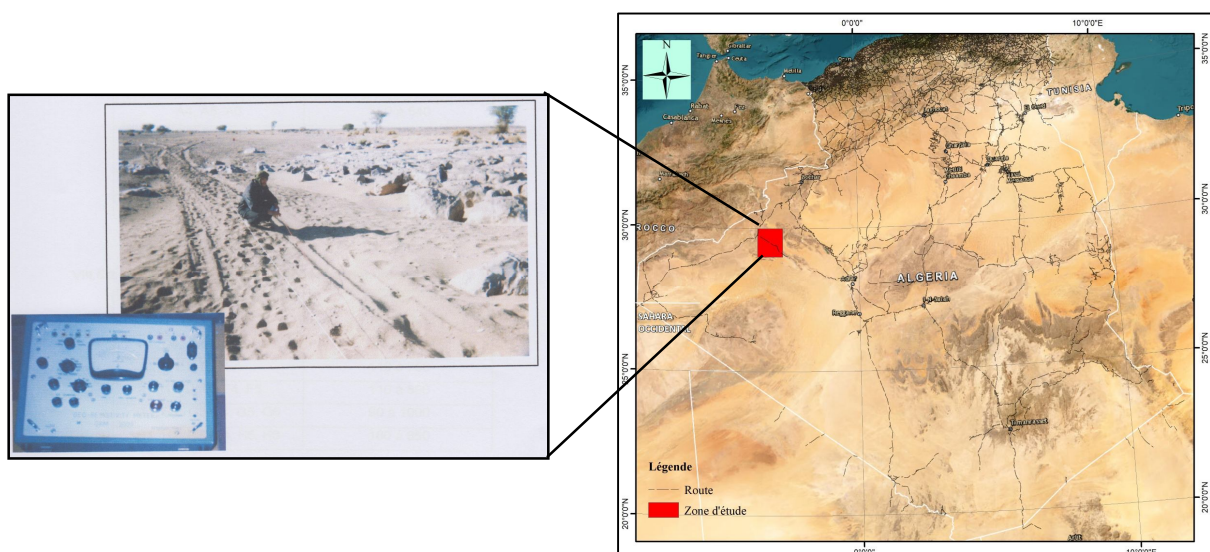


Figure 94: Démarches de mesure géophysique adoptée sur terrain (ANRH 2008).

La structure complexe de la région d'étude, en particulier à Kahal Tabelbala, combiné à l'absence totale ou partielle des études géologiques et tectoniques détaillées, ainsi qu'au manque des données hydrogéologiques tels que les forages profonds atteignant le substratum, constituent des obstacles majeurs rendant l'analyse et l'étude hydrogéologique plus ardues. Ces facteurs limitent également l'efficacité de la prospection géophysique dans cette région (Chalikakis, 2006).

Afin de mieux appréhender la nature, l'épaisseur et la géométrie du système aquifère de la région de Boulaadam, ainsi que d'identifier et de délimiter les zones propices à l'implantation de forages et des puits pouvant servir à l'approvisionnement en eau potable dans la région de Boulaadam, nous avons repris et réinterprété les données issues la campagne géophysique réalisée du 30 mars au 15 avril 2008, par le bureau d'étude BEREGH (ANRH 2008). Cette investigation s'est focalisée sur une zone située à 15 km au sud-est de Boulaadam, faisant partie de la wilaya de Beni Abbés.

La zone concernée est une zone d'intérêt majeur pour l'exploitation des eaux souterraines. Elle est limitée approximativement par les latitudes Nord $29^{\circ} 34'$ à $29^{\circ} 43'N$ et les longitudes Ouest $3^{\circ} 54'$ à $4^{\circ} 04'W$, couvrant une superficie d'environ 185 km^2 (fig.94). Cette région se caractérise par des structures tabulaires, et des altitudes variant de 500 à 585 mètres.

Les principaux objectifs de cette campagne consistaient d'une part à l'identification de la géométrie, de l'épaisseur et de la structure tectonique des aquifères du grès Cambro-Ordovicien (épaisseurs, profondeurs, natures), ainsi que de mettre en évidence les différentes formations perméables du grès Cambro-Ordovicien et du calcaire lacustre de Néogène. D'autre part, de délimiter les zones propices à l'implantation des forages à gros débit (forages productifs).

Le traitement, l'interprétation et l'analyse spatiale des données jouent un rôle important dans de nombreux domaines, notamment pour la diffusion et la communication de métadonnées, ainsi que pour la visualisation et la mise en œuvre des processus de gestion et de protection à travers l'utilisation des cartes thématiques (Zeroual *et al.*, 2020).

Le problème inverse de la modélisation en prospection électrique est connu pour sa complexité due à sa non-linéarité. Il est important de noter que les valeurs de résistivités mesurées ne dépendent pas de manière linéaire de résistivité réelle, ce qui nécessite une étude paramétrique pour identifier les différents paramètres influençant les mesures. L'approche d'inversion des moindres carrés est une technique classique, mais performante et très utile pour l'inversion des résistivités tridimensionnelle. En introduisant un ensemble de données volumineux, cette méthode permet de reconstruire la distribution relative des valeurs de résistivité réelle.

1. Technique de mesure adoptée

La technique de mesure par sondages électriques verticaux utilisée dans cette investigation (fig.95) implique l'injection d'un courant électrique continu dans le sol à l'aide de deux électrodes en acier inoxydable, ainsi que la mesure de la différence de potentiel entre les bornes de deux autres électrodes en cuivre (Capellier, 2000, Hami *et al.*, 2017). Ce dispositif constitue un quadripôle renfermant un ampèremètre dédié particulièrement à l'estimation du courant électrique et un voltmètre consacré à l'évaluation de la différence du potentiel (Zeroual *et al.*, 2020). Cependant, la méthode consiste à rapprocher les quatre électrodes AMNB à des distances

spécifiques afin d'établir par la suite des profils ainsi que de cartes de résistivité apparente. Cette approche permet d'estimer la différence de potentiel ΔV et le courant électrique injecté et récupéré dans le sol (Dubois and Gvishiani, 2013). Il existe plusieurs modèles de mesure, parmi les plus connus figure celui de Wenner où toutes les électrodes sont équidistantes ($AM=MN=NB=AB/3$), tandis que le dispositif de Schlumberger se caractérise par une distance MN très réduite par rapport à la distance AB, d'une manière générale, cette distance MN est définie par le rapport suivant : $4 \leq AB/MN \leq 20$.

Dispositifs		Prof. d'investigation		Pouvoir de résolution
		Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner		0.11L	0.17L	1/2.25
Schlumberger		0.125L	0.19L	1/2.45
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L	1/3.45
Pôle-Pôle		0.35L		1/8.4

Figure 95: Principaux dispositifs en prospection géoélectriques (dipôle-dipôle, Wenner et Wenner Schlumberger)¹⁶.

En méthode électrique, le potentiel mesuré en un point M, dû à une source de courant localisé en un point A, est particulièrement égal au potentiel mesuré au niveau du point A, en raison d'une source de courant ayant une même intensité qui se localise au point M (Marescot and Loke, 2004).

Le potentiel aux points M et N sont exprimés par l'Eq (5.1).

$$V_M = \rho_l / 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad V_N = \rho_l / 2\pi \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (5.1)$$

La différence du potentiel (ΔV) aux points M et N est donnée par la formule :

$$\Delta V = V_M - V_N = \rho_l / 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (5.2)$$

Où : $\rho = (k * dV) / I \quad (5.3)$

Avec $k = \pi * (AM * AN) / MN \quad (5.4)$

La résistivité apparente se calcule par la formule suivante :

$$\rho_a = (k * \Delta V) / I_{AB} \quad (5.5)$$

Où k : est le facteur géométrique (en mètres) qui ne dépend que de la relation des électrodes et s'exprime par l'Eq. (5.4).

ΔV : Correspond à la différence du potentiel mesurée entre les électrodes MN.

I_{AB} : est l'intensité du courant électrique circulant dans le circuit AB.

En représentant les résistivités apparentes en fonction de la demi-distance entre les électrodes ($AB/2$) sur un diagramme bilogarithmique, nous obtenons une courbe caractéristique

¹⁶ « h ps://slideplayer.fr/slide/1140539/ ».

du sondage électrique effectuée. Cette dernière constitue la base des méthodes d'interprétation, permettant la reconstitution d'un modèle géoélectrique du sous-sol. Ce modèle présenté sous forme de coupe, où chaque formation géologique est définie par son épaisseur et sa résistivité réelle, traduisant la variabilité lithologique et hydrogéologique du terrain investigué.

La conductivité longitudinale (LC ou S) est donnée par la formule Eq (5.6)

$$LC = S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \dots \quad (5.6)$$

La résistivité longitudinale (LR ou ρ_l) est calculée selon l'équation suivante :

$$\rho_l = LR = \frac{H}{S} \dots \dots \dots (5.7), \quad H = \sum_{i=1}^n h_i \dots \dots \dots (5.8)$$

Où : h_i : correspond à la profondeur jusqu'à la couche géoélectrique inférieure (m), H ; est l'épaisseur totale de la couche (mesuré le long du profil pour chaque formation lithologique).

La résistivité transversale (RTT, ρ_t) est donnée par l'Eq. (5.9 et 5.10)

$$\rho_t = TTR = \frac{T}{H} \quad (5.9)$$

$$T = \sum_{i=1}^n h_i * \rho_i \quad (5.10)$$

Le coefficient d'anisotropie électrique (λ) et la moyenne quadratique (RMS resistivity) sont donnés par les équations Eq. (5.11) et (5.12)

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = \sqrt{\frac{TTR}{LR}} \quad (5.11)$$

$$RMS = \rho_m = \sqrt{\rho_t * \rho_l} = \sqrt{(TTR * LR)} \quad (5.12)$$

L'exploitation de données de cette campagne à l'aide des techniques géomatiques 3D, notamment avec le logiciel d'aide à la modélisation hydrogéologique 3D 'LeapForg Geo 5.0' ont permis d'effectuer une analyse et une représentation visuelle tridimensionnelle de l'aquifère en question. Ce logiciel exploite la technique volumique implicite 3D à partir de données multisources issues du modèle géologique intégré, afin de résoudre les problèmes d'interconnectivité et de corrélation entre l'hydrogéologie, la géophysique et l'aspect structural.

Lors de la réalisation de cette étude, un total 60 sondages électriques (avec une distance de AB = 2000 mètres) a été effectué. Ces sondages ont été répartis sur 8 profils, permettant d'acquérir des données électriques significatives et représentatives de la région étudiée. Leur répartition est schématisée dans les figures 96 et 97.

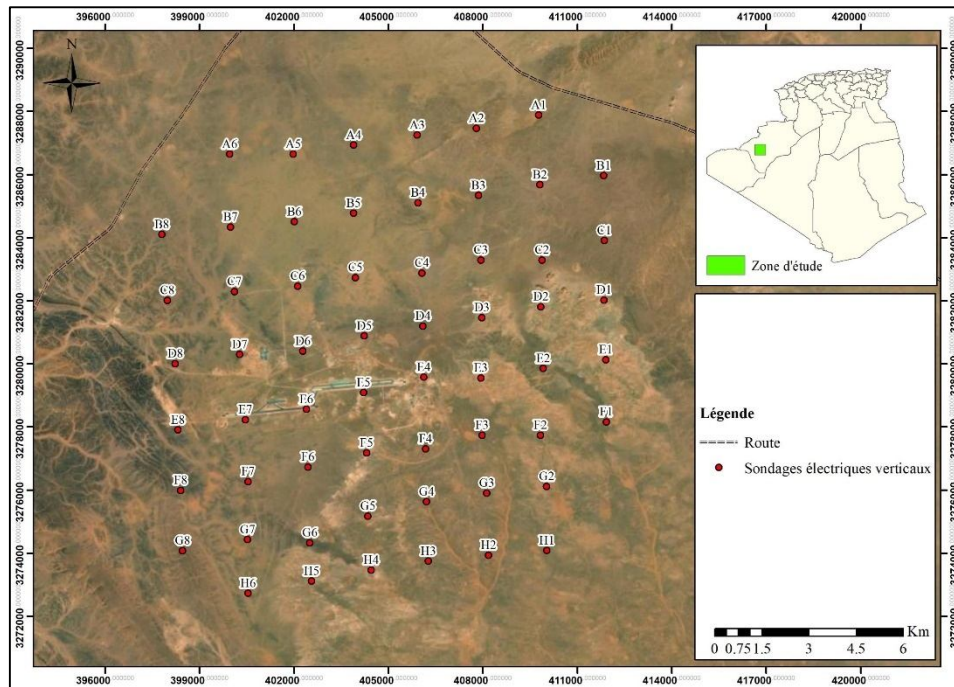


Figure 96: Distribution spatiale des sondages électriques verticaux.

La zone étudiée se distingue principalement par la présence des grès ainsi que des quartzites datant du Cambro-Ordovicien (fig.98). Ces formations se caractérisent principalement par une porosité interstitielle significative et une perméabilité élevée. Des chenaux ont également été observées, indiquant de changement de facies avec un écoulement allant du nord-ouest vers le sud-est.

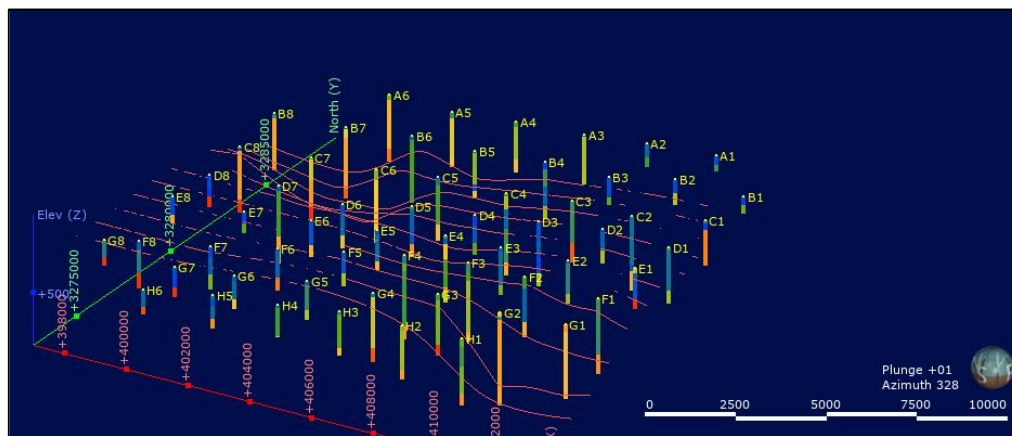


Figure 97: Localisation des différents sondages électriques de la région de Boulaadam.

L'identification de différents paramètres caractéristiques de cet aquifère a été effectuée à partir des données issues d'un forage réalisé en 1964 (M0-3), à une profondeur de 80 mètres. Les coordonnées géographiques de ce forage sont : latitude 29°39' et longitude 3°54'. Les informations recueillies lors de cette opération de forage constituent une source potentiellement précieuse pour l'étude des Hamadas et des diverses formations géologiques.

La zone considérée, faisant partie de la zone la plateforme saharienne, présente une structure générale relativement stable du point de vue structural. Elle est caractérisée particulièrement par un socle antécambrien métamorphique, de formations paléozoïques plissées de manière variable, et une couverture subhorizontale de dépôts tertiaires ainsi que de

vastes zones quaternaires. L'étendue stratigraphique du Paléozoïque ainsi que son épaisseur varient considérablement dans cette région.

L'ensemble géologique est marqué particulièrement par un ensemble de plis et une érosion significative, avec des caractéristiques spécifiques variant selon les différentes zones tectoniques présentes. En particulier, dans la région de Tabelbala, les sédiments paléozoïques fortement érodés atteindraient en moyenne une épaisseur de 1500 mètres. Nous avons observé également une présence peu développée de formations tertiaires discordantes par rapport au Paléozoïque.

II. Lithostratigraphie

Dans notre zone d'étude, la succession stratigraphique et lithologique est relativement simple. Elle peut être distinguée de la base au sommet, la succession lithostratigraphique suivante :

1. Cambro-Ordovicien

A la base de la série paléozoïque se trouve un ensemble détritique, transgressif et discordant sur le socle précambrien. Cet ensemble se compose principalement de conglomérats, de grès grossiers et des arkoses à la base, ainsi que des argiles vertes plus ou moins gréseuses. En remontant vers la partie supérieure de cet ensemble, nous rencontrons des grès rouges micacés présentant une stratification entrecroisée, suivis par un ensemble de grès quartziques (fig.98). La puissance totale de cette succession détritique est d'environ 1500 mètres.

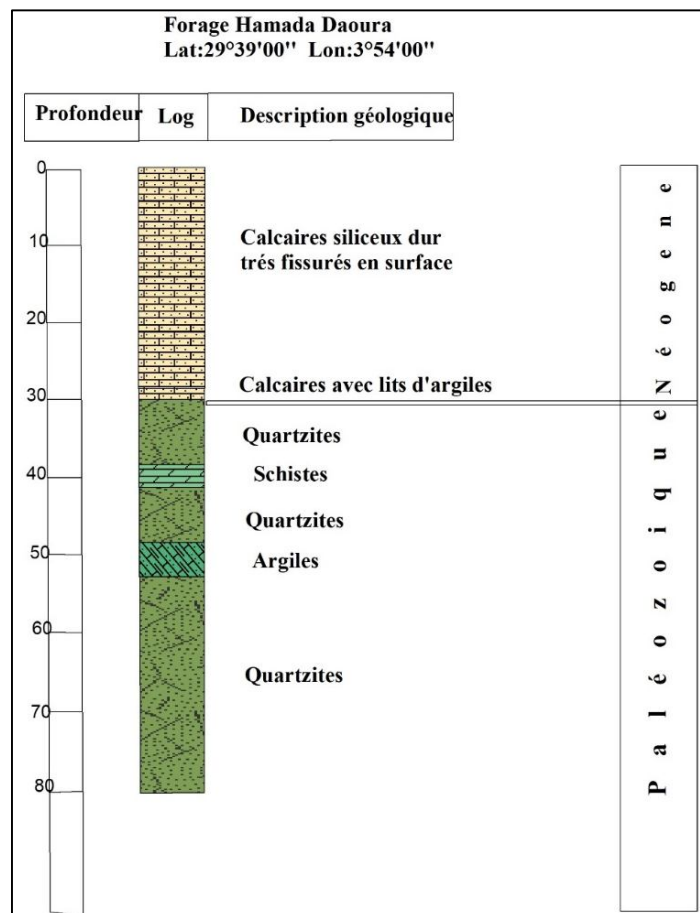


Figure 98: Log lithostratigraphique du forage M0-3 (ANRH 2008).

2. Tertiaire continental (néogène)

Les terrains continentaux hammadiens paléogènes et néogènes sont largement présents dans le secteur d'étude. Ils se caractérisent essentiellement par de vastes plateaux désertiques et pierreux. Ces dépôts sont principalement d'origine fluviatile ou fluvio-lacustres, composé essentiellement de matériaux détritiques tels que les sédiments déposés par les rivières et les lacs (fig.98). Ils sont généralement pauvres en fossiles et en document paléontologique, ce qui rend leur datation précise difficile. Certains chercheurs ont daté ces dépôts de l'Eocène, tandis que d'autres les ont attribués du Miocène.

Dans la région d'étude, une couche relativement mince de dépôts continentaux appartient du Tertiaire continental peu épais (environ 30 mètres) affleure largement et repose en discordance sur la série paléozoïque qui a été pénéplanée au cours d'une longue période prolongée, s'étendant du Permien au Néogène.

La description lithologique du Tertiaire continental a été établie grâce aux travaux de synthèse antérieurs. Cette Hammada est matérialisée par deux unités lithostratigraphiques principales : la Torba et la dalle Hammadienne (fig.99). La base est formée particulièrement d'un conglomérat contenant de très gros galets non roulés, souvent encrustés de silice. Au-dessus de ce conglomérat se trouve une formation détritique appelée Torba. Ensuite, une première dalle néogène se manifeste, suivie d'une deuxième formation Torba. Après la deuxième Torba, une deuxième dalle néogène affleure. Au-dessus de cette deuxième dalle néogène, se développe une troisième formation Torba. En fin, la séquence se termine par une troisième dalle néogène.

3. Quaternaire (les Ergs)

Le Quaternaire dans la région se compose principalement d'alluvions et de colluvions, occupant généralement les zones basses. Ces formations se caractérisent par des surfaces sensiblement horizontales, et sont souvent recouvertes de débris généralement éoliens, avec une granulométrie variable.

Les résultats de l'étude lithostratigraphique effectués dans le secteur étudié ont mis en évidence que les formations sensibles d'être aquifères et présentant un intérêt hydrogéologique sont essentiellement les grès cambro-ordoviciens poreux et les calcaires lacustres de Néogène.

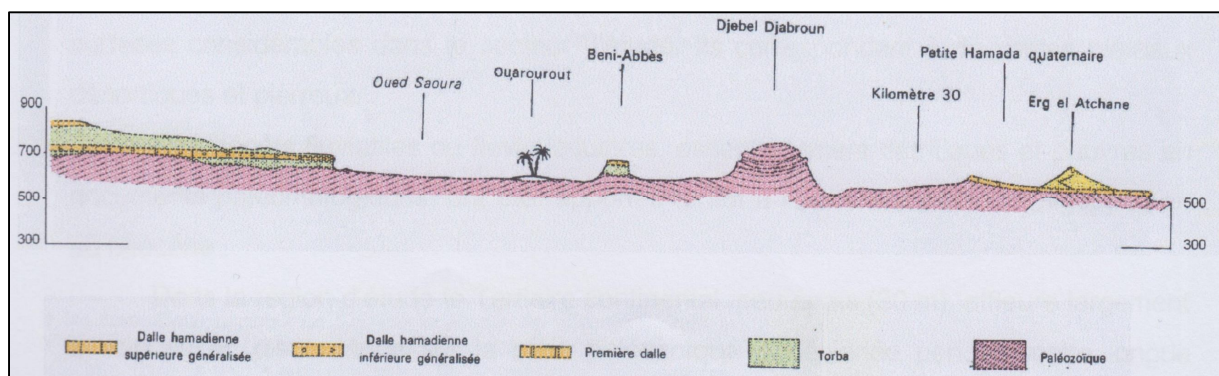


Figure 99 : Coupe schématique NNE-SSW des Hamadas tertiaires (ANRH 2008).

Etalonnage à l'aide des sondages paramétriques

L'échelle de résistivité réelle relative aux différentes formations géologiques a été établie en se basant particulièrement sur les sondages paramétriques réalisés en surface. Les

valeurs de résistivités issues de sondages paramétriques sont répertoriées dans les tableaux 14 et 15 :

Tableau 14: Résistivité de différentes formations géologiques de la région de Boulaadam (ANRH 2008).

Résistivité de la formation de l'Erg quaternaire (Alluvion et colluvion).	
Sondage paramétrique	Résistivité (Ohm.m)
A4, A5, A6	360 à 540m
B6, B7, B8	170 à 570
C5, C7, C8	85 à 840
D5, D6, D7, D8	129 à 540
G7, G8	120 à 470
Résistivité des calcaires néogène	
Sondage paramétrique	Résistivité (Ohm.m)
D1, D2, D3, D4	66 à 380
E1, E3, E4	110 à 750
F1, F2, F3, F4, F5	110 à 590
G1, G2, G3, G4, G5, G6	90 à 1000
H1, H2, H3, H4, H5, H6,	180 à 850
Résistivité des formations grès Cambro-Ordoviciennes	
Sondage paramétrique	Résistivité (Ohm.m)
A1, A2	170 à 180
B1, B2, B3, B4	61 à 290
E8	180

Le sondage électrique E1, situé aux coordonnées x : 411902 m, y : 3280129 m, à une distance d'environ un kilomètre du forage M0-3, (x : 3280342 m et y : 412892 m), aurait traversé, selon la courbe théorique du modèle des résistivités calculées, quatre formations géologiques distinctes (tab.15). Le premier niveau identifié en surface correspond aux calcaires lacustres éocènes des Hammadas, caractérisés par une résistivité de 750 Ohm.m et une épaisseur de 2 mètres (fig. 100).

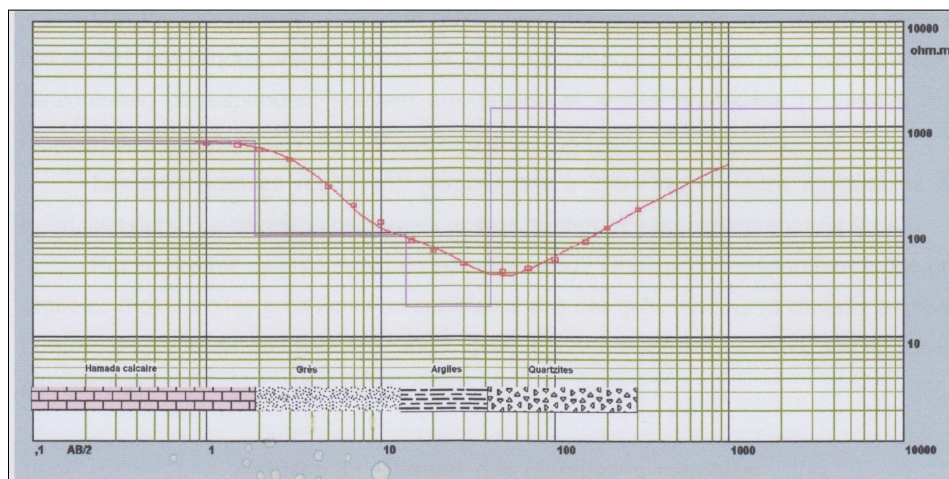


Figure 100: Courbe théorique du modèle de résistivité du sondage E1 (ANRH 2008).

Ce niveau repose sur un terrain gréseux plus ou moins argileux du Cambro-Ordovicien, présentant une résistivité de 95 Ohm.m et une épaisseur de 14 mètres. En dessous, apparaît une formation argileuse du Cambro-Ordovicien, d'une épaisseur de 29 mètres et d'une résistivité d'environ 19 Ohm.m. Enfin, la formation la plus profonde correspond aux quartzites du

Cambro-Ordovicien, constituant un substratum très résistant, avec une résistivité de 1500 Ohm.m, atteint à une profondeur de 43 mètres (fig. 100).

Tableau 15: Résultats du modèle du SEV étalon E1 près du forage M0-3 (ANRH 2008).

Résistivité (Ohm.m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)		
750	2	2	Néogène	Hammada Calcaire
95	14	16	Cambro-	Grès +/- argileux
19	29	43	Ordovicien	Argiles
1500	-	-		Quartzites

III. Echelle de résistivité adoptée

L'analyse et l'interprétation des divers sondages électriques réalisés dans la région d'étude mettent en évidence une grande variabilité de résistivités électriques (tab.16). Les valeurs de résistivités les plus basses (de 9 à 78 Ohm.m) sont généralement associées aux argiles gréseuses du Cambro-Ordovicien. En revanche, les valeurs de résistivités élevées (supérieures à 300 Ohm.m) correspondent aux quartzites durs, aux calcaires hammadiens ainsi qu'aux Ergs quaternaires probablement très secs. Les valeurs intermédiaires (de 70 à 300 Ohm.m) caractérisent quant à elles les grès argileux, les argiles gréseuses ou sableuses, ainsi que les grès tendres à ciment argileux. Cette échelle de résistivité a été conçue en se basant sur les données recueillies lors des sondages électriques.

Tableau 16: Gamme de résistivités adoptées (ANRH 2008) .

Formations	Age	Résistivité (Ohm.m)
Erg	Quaternaire	120 à 840
Hammadas calcaires	Eocène	70 à 1000
Argiles et argiles gréseuses	Paléozoïque	9 à 78
Grès humide	Paléozoïque	80 à 110
Grès sec	Paléozoïque	160 à 300
Quartzites		180 à 2000

Les attributions de résistivité reflètent la caractérisation des différents niveaux déterminés par l'interprétation des sondages électriques, en se basant sur le paramètre de résistivité. Cependant, il est important de noter que ce découpage ne signifie pas nécessairement que les formations géologiques sont composées uniquement de grès ou quartzite purs ou argile pure. En réalité, ces formations pourraient être souvent gréseuses et font partie d'une séquence comprenant des alternances d'argiles, d'argiles gréseuses et grès argileux.

IV. Interprétation des mesures de la prospection électrique

Pour faciliter la compréhension de notre zone, les résultats de l'analyse et de l'interprétation de données géophysique sont majoritairement présentés sous forme de cartes et coupes géoélectriques (fig.101). Ces illustrations mettent en évidence les variations des taux de résistivités de diverses formations géologiques.

1. Interprétation des coupes géoélectriques

Afin de simplifier l'interprétation ainsi que l'élaboration de l'ensemble de coupes géoélectriques, il a été convenu de regrouper les différentes variabilités lithologiques de notre zone en cinq principaux groupes, en fonction de l'échelle de résistivité. Ces groupes ont été répertoriés dans un tableau illustrant les différentes plages de résistivité correspondant à chaque groupe.

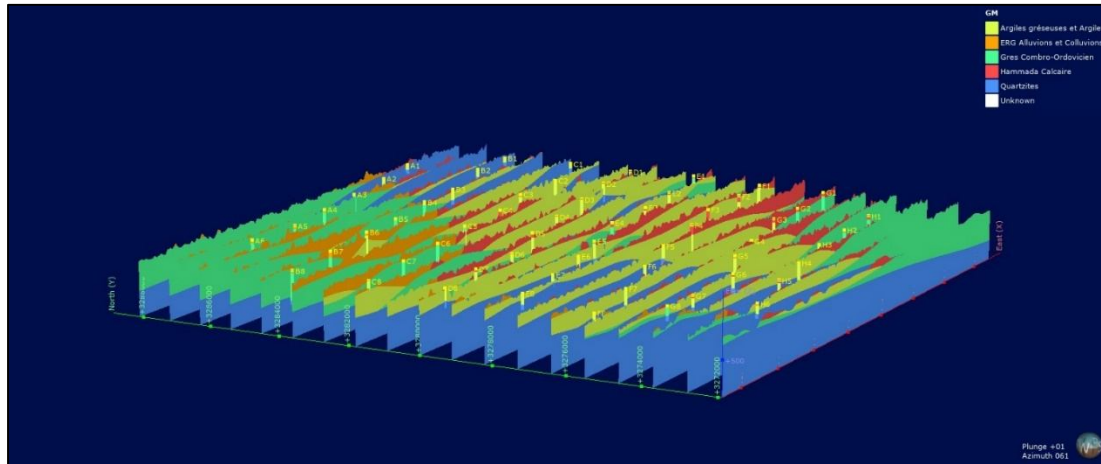


Figure 101: Schéma illustrant les différentes coupes géoélectriques.

1.1 Coupe géoélectrique B

Les coupes géoélectriques A et B, réalisées dans la partie nord du secteur étude avec une orientation ouest-est, illustrent un substratum continu et très résistant, avec une résistivité allant jusqu'à 1200 Ohm.m (fig.102). Ce substratum correspond principalement aux quartzites du Cambro-Ordovicien. Toutefois, il est important de noter que ce substratum révèle une remontée vers l'Est.

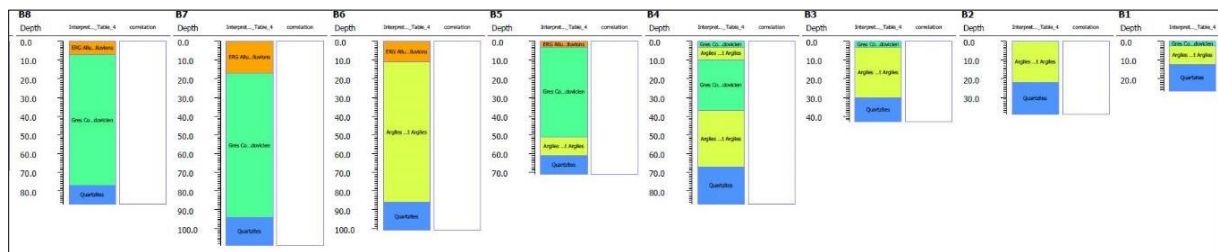


Figure 102: Corrélation entre les différents sondages électriques du profil B.

Les autres ensembles géoélectriques présentent une homogénéité relative, étant principalement composés d'argiles plus ou moins gréseuses, qui évoluent progressivement en grès. Du point de vue hydrogéologique, le profil A apparaît plus prometteur que le profil B, en particulier le sondage électrique A6. Toutefois, il convient de noter que les zones situées entre les sondages électriques A3, A4 et A5 présentent également des intersections significatives, qui pourraient indiquer des potentialités intéressantes dans ces secteurs.

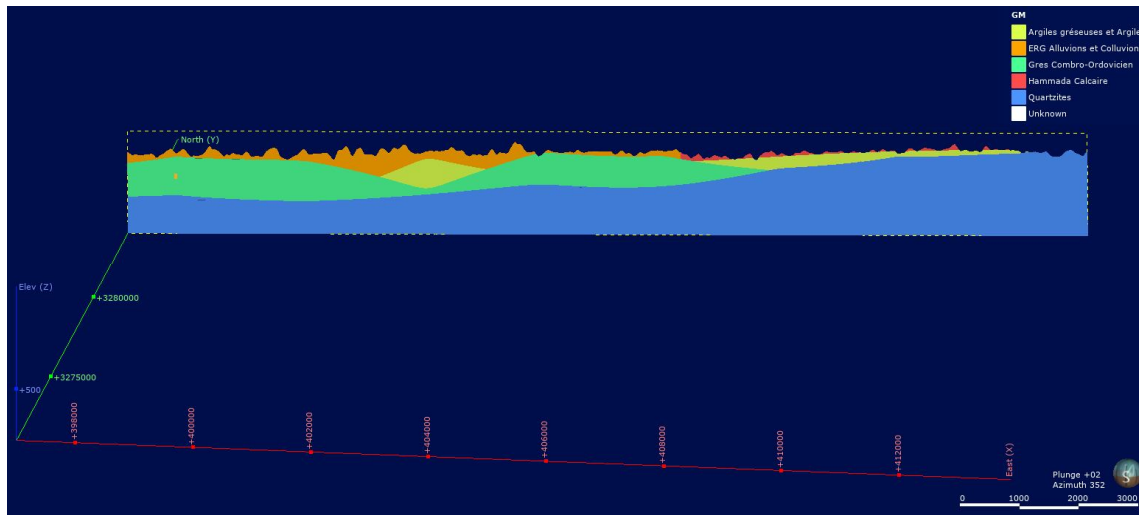


Figure 103: Coupes géoélectriques B.

1.2 Coupe géoélectrique C

Les coupes géoélectriques récemment réalisées révèlent des formations similaires à celles observées dans les coupes précédentes. Cependant, les résistivités les plus élevées sont attribuées au substratum quartzitique. Par ailleurs, une prédominance significative a été observée dans le sondage électrique C1 à C5 pour le profil C, suggérant des caractéristiques géologiques distinctes dans cette zone (fig.104). En revanche, l'ensemble du profil D se distingue par une composition complètement argileuse, traduisant l'homogénéité de cet tarié du site.

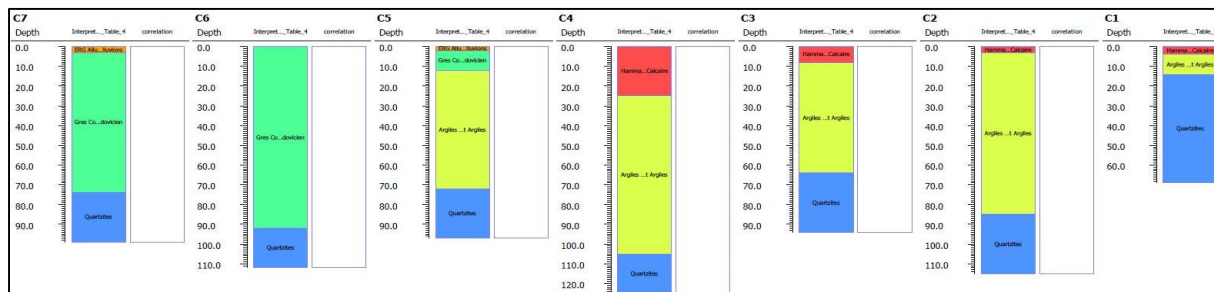


Figure 104: Corrélation entre les différents sondages électriques du profil C.

1.3 Coupe géoélectrique E

Ces coupes géoélectriques illustrent également la présence un substratum quartzitique onduleux. Cependant, la principale caractéristique qui ressort de ces deux coupes est la prédominance des argiles et leur amincissement par endroits (fig.105).

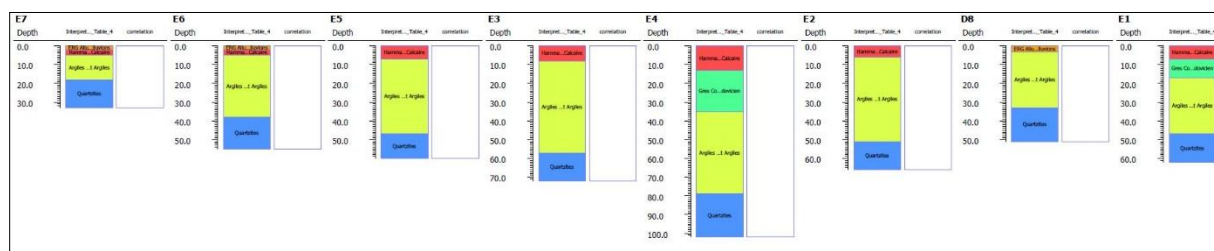


Figure 105: Corrélation entre les différents sondages électriques du profil E.

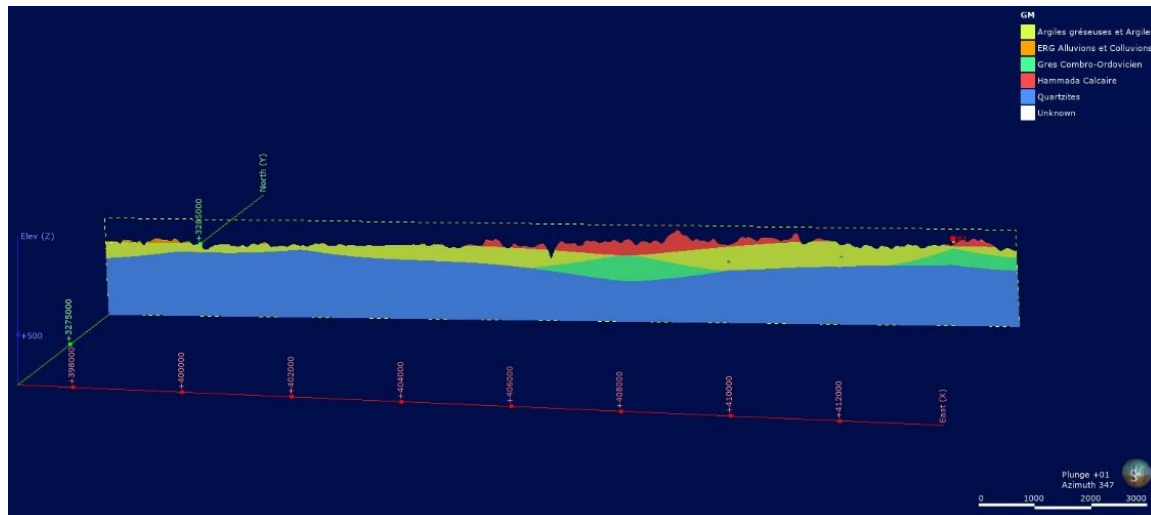


Figure 106: Coupes géoélectriques E.

Ces formations conductrices sont généralement composées d’argiles et sont surmontées par une mince couche de dalle calcaire du Néogène peu développée (fig.106).

1.4 Coupe géoélectrique G

Les différentes coupes géoélectriques réalisées dans la partie sud d secteur d’étude confirment la monotonie du substratum quartzitique avec une remontée, cette fois-ci dans la partie ouest. Cette remontée entraîne une réduction significative des épaisseurs des formations sus-jacentes, en particulier les couches des argiles (fig.107 et fig.108).

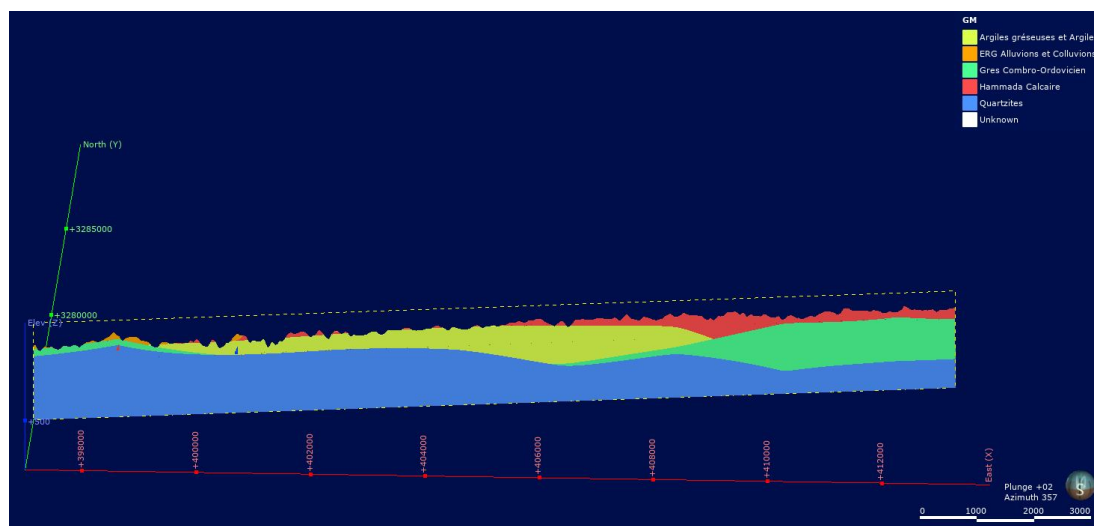


Figure 107: Coupes géoélectriques G.

L’analyse et l’interprétation de diverses coupes géoélectriques réalisées dans le secteur d’étude suggèrent que le Cambro-Ordovicien ne présente qu’une faible potentialité aquifère. Cet aquifère ne peut être continu que par les grès, mais avec des épaisseurs catégoriquement réduites.

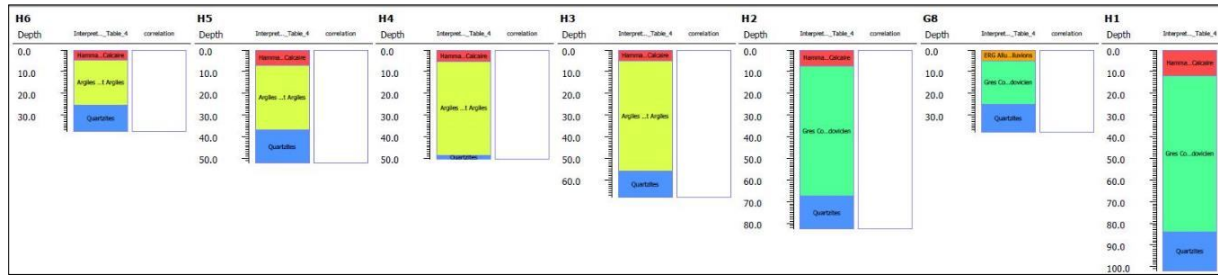


Figure 108: Corrélation entre les différents sondages électriques du profil H.

2. Interprétation des cartes de résistivités apparentes

2.1 Carte de résistivité apparente (AB/2 = 40 m)

La carte de résistivité apparente le long de la ligne AB/2 = 40 m (fig.109), permet de caractériser les différentes formations superficielles non saturées de l’Erg quaternaire et de la Hammada néogène, à une profondeur comprise entre 10 et 15 mètres. Cette carte a montré aussi qu’il existe une large gamme de résistivité dont les valeurs de résistivité importante allant de 100 à 240 Ohm.m, observée au sud-est, correspondant particulièrement au calcaire néogène dur. Au nord-ouest, les valeurs élevées sont attribuées aux alluvions et colluvions quaternaires. Par ailleurs, les formations conductrices sont caractérisées par des valeurs de résistivités inférieures à 60 Ohm.m.

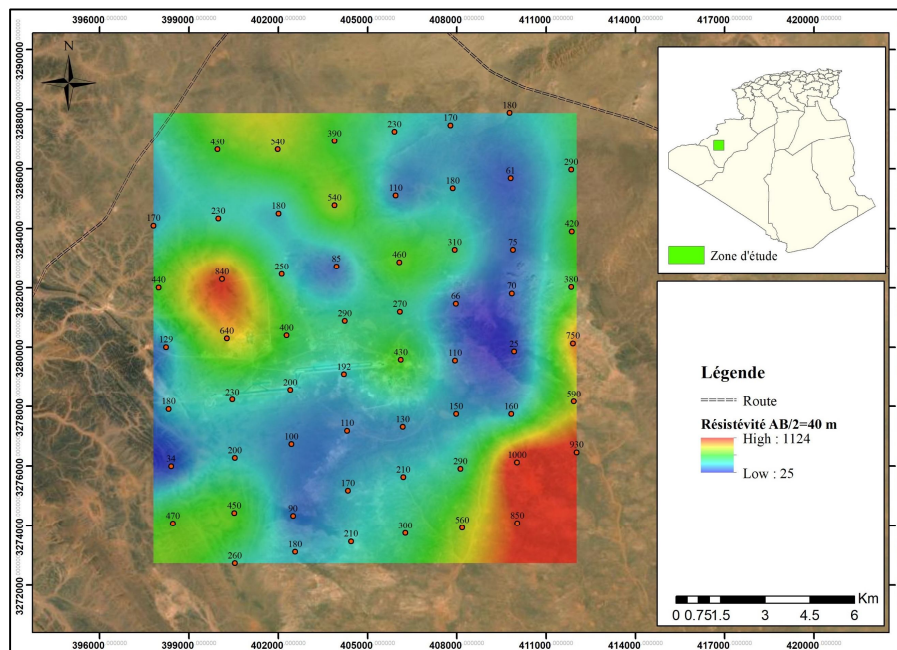


Figure 109: Carte d’isorésistivité pour distance interélectrodes AB/2=40, en utilisant Schlumberger.

2.2 Carte de résistivité apparente (AB/2 = 200 m)

L’examen attentif de la carte de résistivité le long de la ligne AB/2 = 200 m (fig. 110), traduit l’existence de plages de résistivités distinctes. La première plage est résistante, caractérisée par des valeurs supérieures à 140 Ohm.m, particulièrement observée au niveau des profils A, B et C. Cette augmentation de résistivité pourrait être attribuée à l’influence de la remontée du substratum quartzique du Cambro-Ordovicien. Quant à la deuxième plage, elle est un peu moins

importante, et concerne principalement les formations gréseuses et argiles gréseuses du Paléozoïque.

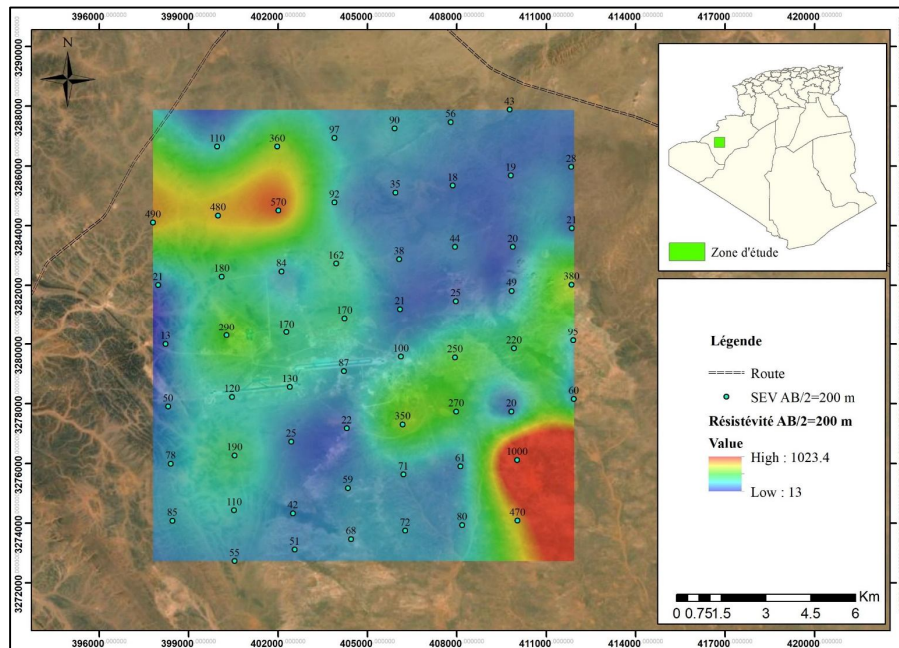


Figure 110: Carte d'isoresistivité pour distance interélectrodes $AB/2 = 200$, en utilisant Schlumberger.

2.3 Carte de résistivité apparente ($AB/2 = 300$ m)

La carte de résistivité apparente (fig.111), avec une profondeur d'investigation environ de 120 m, illustre principalement la présence des courbes de résistivités apparentes similaires à la carte précédente. Par ailleurs, des plages de résistivité alternativement plus ou moins élevées ont été observées par rapport à la ligne $AB/2 = 200$ m. Cela suggère ainsi une influence plus marquée du substratum quartzitique sur les propriétés électriques des différentes formations géologiques.

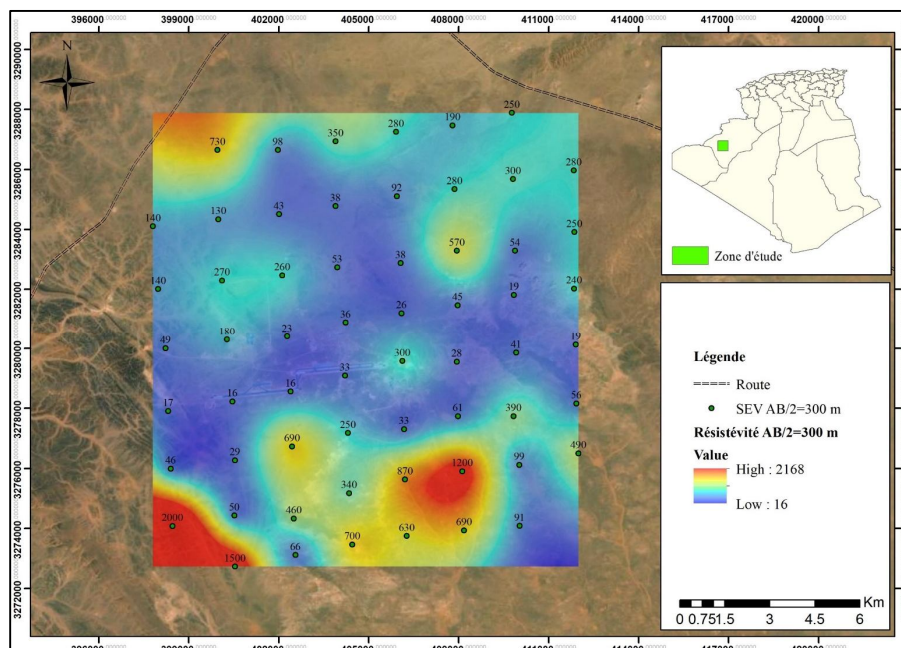


Figure 111 : Carte d'isoresistivité pour distance interélectrodes $AB/2=300$,

en utilisant Schlumberger Dipôle-Dipôle.

2.4 Carte de résistivité apparente ($AB/2 = 600$ m)

La carte d'isoresistivité apparente (fig.112) met en évidence des valeurs de résistivité correspondant au substratum résistant du Cambro-Ordovicien, principalement constitué par des quartzites durs compacts. Deux zones présentant de résistivités significatives ont été identifiées sur cette carte. La première se localise spécifiquement au nord-ouest entre les sondages B5 et C7, avec des résistivités allant de 350 et 600 Ohm.m. Quant à la deuxième zone, elle est la plus résistante, et située au sud-ouest, au niveau de sondage G8, avec une résistivité de 800 Ohm.m.

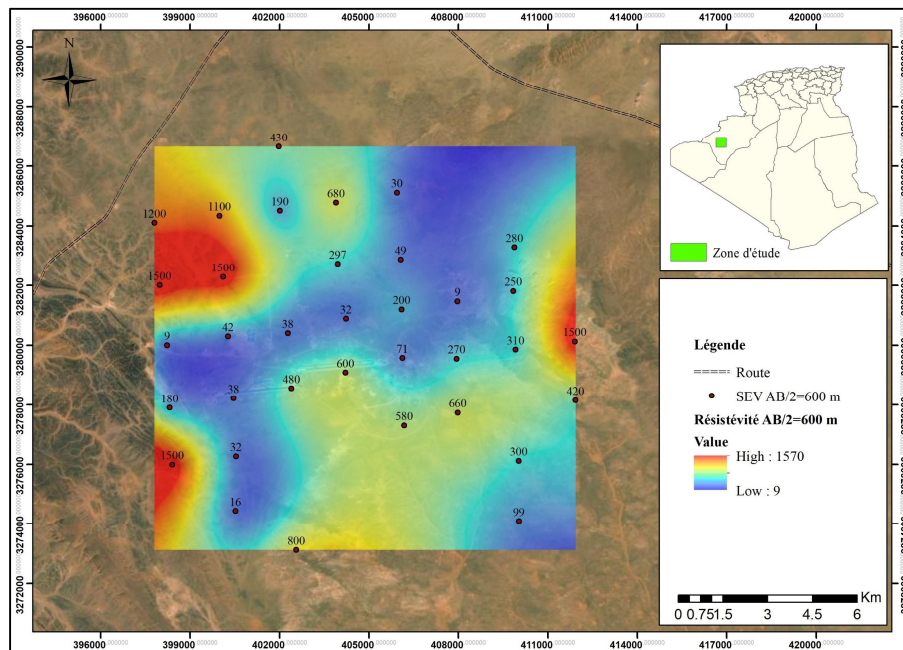


Figure 112: Carte d'isoresistivité pour distance interélectrodes $AB/2 = 600$, en utilisant Schlumberger.

3. Carte d'isopaches des grès Cambro-Ordovicien

Les grès Cambro-Ordovicien de la région se manifestent sous forme de pointements isolés avec des extensions spatiales relativement réduites. Cependant, la carte d'isopaches de grès établis révèle une variation notable des épaisseurs, directement liées à la structure géomorphologique du substratum paléozoïque. Les des épaisseurs variant ainsi de 10 à 80 mètres. En outre, les épaisseurs les moins importantes se trouvent particulièrement au niveau des ondulations les plus hautes du substratum, tandis que les épaisseurs les plus importantes se trouvent au niveau des ondulations les plus basses.

4. Carte de résistance transversale

La carte ainsi réalisée (fig.113) révèle de valeurs de résistances transversales variant de de 10^3 et $14 \cdot 10^3$ Ohm.m. Cependant, l'horizon aquifère de la zone considérée est constitué par des grès et qui présentent des valeurs de résistivités comprises en 70 à 300 Ohm.m. En outre, les zones présentant de résistivités transversales faibles sont dues principalement à la faible épaisseur de l'aquifère.

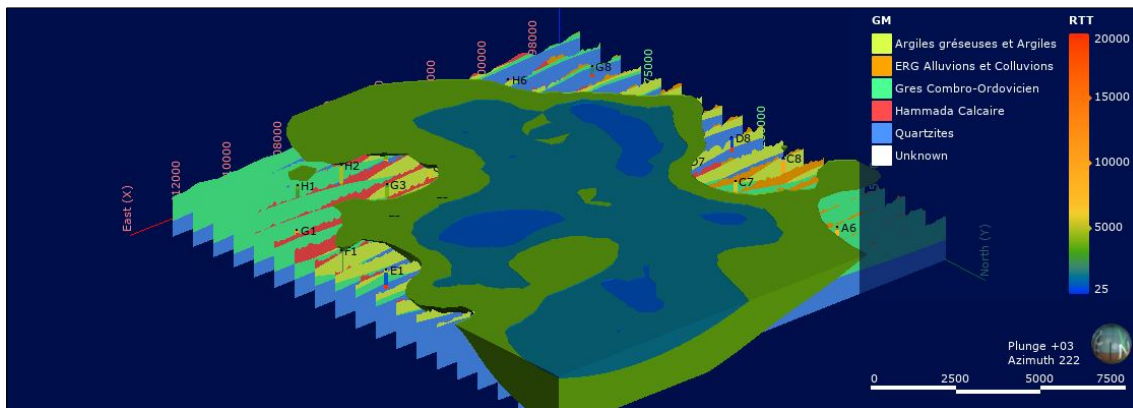


Figure 113: Carte illustrant la résistance transversale.

5. Carte du substratum

Dans la zone d'étude, une entité de résistivité importante allant jusqu'à 2000 Ohm.m, correspond à un horizon résistant (fig.114). Cet horizon est composé principalement d'un faciès quartzitique d'âge Cambro-Ordovicien (Paléozoïque). La carte du substratum révèle que celui-ci se trouve à une faible profondeur et présente une structure ondulée orientée nord-est sud-ouest.

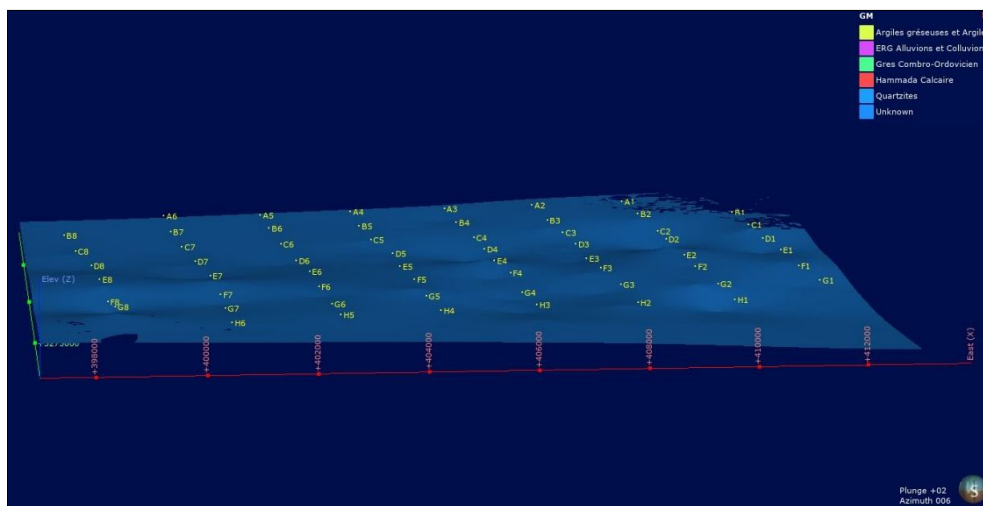


Figure 114: Carte du toit du substratum.

6. Carte d'implantation de forage proposé

En tenant compte des données lithologiques, structurales et des résultats de l'étude géophysique, une zone appropriée pour l'implantation d'un forage de reconnaissance a été identifiée (tab.17). Ce forage est proposé à une profondeur d'environ 100 mètres, et le choix s'est porté sur le point Fp1 situé aux coordonnées géographiques x : 400000 m et y : 3286433 m correspondant au forage électrique A6.

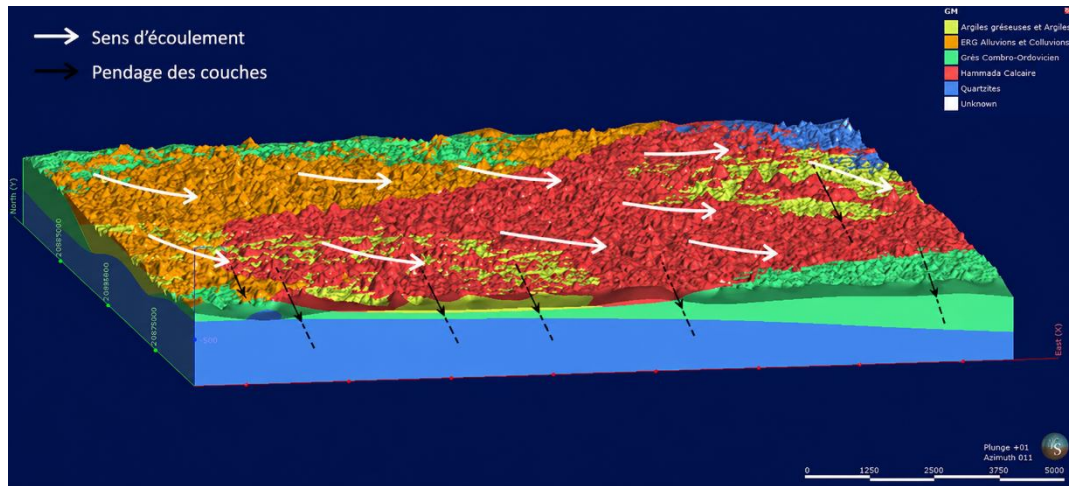


Figure 116: Modélisation explicite par sondages électriques verticaux de la région de Boulaadam.

V. Conclusion

La présente étude vise à établir une analyse géophysique par sondage électrique dans la région de Boualam afin d'identifier les différentes formations qui pourraient constituer des aquifères dans la région, ainsi que de comprendre leurs comportements, leurs caractéristiques physiques telles que la conductivité et la résistivité, les épaisseurs des couches et leurs profondeurs. Le secteur en question faisant partie de la plateforme saharienne. Il s'agit d'une structure monoclinale relativement stable. Ce secteur constitue un bassin sédimentaire subsident rempli par de terrains paléozoïques plus ou moins plissés, avec une couverture horizontale de terrains tertiaires surmontés par de vastes zones quaternaires. Cette investigation a permis de mettre en évidence des formations détritiques localisées entre 0 à 150 mètres de profondeur. Les résultats de l'analyse et l'interprétation des données géophysiques ont mis en évidence clairement l'extension réduite des grès du Cambro-Ordovicien. Cependant, les différentes coupes géoélectriques ont révélé la présence des trois horizons distincts. Le premier horizon non saturé, est caractérisé par les calcaires hammadiens de l'Eocène et les Ergs quaternaires, avec une résistivité allant de 70 à 1000 Ohm.m. Ensuite, un horizon médian d'une épaisseur de 40 à 130 m, renfermant des argiles du Cambro-Ordovicien, avec une résistivité variant de 9 à 78 Ohm.m, ainsi que des grès d'une extension réduite, avec une résistivité allant de 80 à 300 Ohm.m. Quant au dernier horizon, il s'agit d'un substratum résistant peu profond, composé de quartzites du Cambro-Ordovicien (Paléozoïque), d'une résistivité oscille entre 180 à 2000 Ohm.m.

L'exploitation des données géospatiales provenant de sources multiples telles que l'imagerie satellite, la topographie, l'hydrographie ainsi que les données de forages et puits, permet d'acquérir de connaissances détaillées des systèmes aquifères modélisés et de réaliser une cartographie qualitative et quantitative des eaux souterraines de la région d'étudiée. Cependant, l'intégration de ces données complémentaires permet de renforcer la crédibilité des modèles utilisés, notamment lorsque la géologie présente une complexité spatiale et que les limites des couches sont difficiles ou impossibles à corrélérer entre les différents points d'eau. Il serait essentiel d'avoir un volume significatif de données qui permet de caractériser le sous-sol en 3D. Cela d'améliore la compréhension du système aquifère de de mieux évaluer le potentiel hydrique de la zone en question.

Chapitre VI
Cartographie
hydrogéologique

I. Introduction

L'hydrogéologie et l'exploitation minière constituent des secteurs stratégiques et essentiels pour la région de Tabelbala. La mise en évidence d'un grand nombre d'indices de minéralisation a conduit au lancement d'opérations minières dans cette zone (SONAREM, 1978). Parallèlement, l'exploration des ressources en eaux souterraines s'est intensifiée. Ainsi, plusieurs organismes tels que l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Office National de Recherches Géologiques et Minières (ORGM), ainsi que d'autres institutions, ont déployé des efforts considérables pour étudier cette région. Leurs travaux comprennent des investigations approfondies, de forages et de sondages géologiques réalisés dans le cadre de recherches minières et hydrauliques, visant à mieux comprendre les ressources disponibles de la région et leur potentiel d'exploitation. L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) a mené des forages hydrauliques dans cette zone depuis un certain temps, nécessitant une mise à jour régulière des informations concernant les failles, les fractures, et autres accidents.

Dans cette section deux objectifs principaux sont visés. Le premier consiste à mettre à jour de manière détaillée les connaissances géoscientifiques existantes sur la région de Tabelbala, en fournissant des informations actuelles et précises sur les structures géologiques qui la caractérisent. Une attention particulière est accordée sur l'identification et l'analyse des structures tectoniques, notamment les failles et les linéaments. Tandis que le second objectif vise à introduire différentes approches méthodologiques spécifiques pour la réalisation d'une cartographie hydrogéologique détaillée. Ces approches diversifiées englobent des approches prédictives (Fr et AHP) ainsi que des techniques avancées d'apprentissage automatique (NN, RF, SVM), offrant des outils performants pour évaluer avec précision les sites potentiels, en tenant en considération les particularités géographiques et environnementales de la région étudiée. De nombreux techniques de traitement d'images sont appliqués afin d'extraire des informations structurales telles que les failles et les linéaments à partir de données de télédétection radar (Sentinel 1) et optiques (Sentinel 2, Landsat8 Oli) couvrant la région de Tabelbala.

1. Matériels utilisés

Dans le cadre de cette étude, une variété de logiciels SIG et de traitement d'images ont été utilisés et qui ont permis de visualiser, d'éditer, de traiter et d'analyser des données géospatiales provenant de diverses sources. Les logiciels, Envi et Erdas Imagine ont été employés pour le traitement des données satellitaires, par le biais de compositions colorées, de rapports de bandes, d'analyse en composantes principales et de filtrages. Ces processus se sont avérés essentiels pour la mise à jour des unités lithologiques, l'extraction des linéaments et l'élaboration de la carte d'occupation des sols. Par ailleurs, les logiciels ArcGIS et ArcGIS pro, ont servi à générer diverses couches d'information telles que la carte de densité de drainage, la carte des classes de pente, la carte des classes d'élévation et la carte d'indice d'humidité topographique (TWI). De plus, la plateforme Google Colab (Colaboratory) a été exploitée pour concevoir des codes de différents algorithmes d'apprentissage automatique utilisé dans ce travail.

En fin, le logiciel Stéreonet a été utilisé pour l'élaboration de la rosace représentant l'orientation des linéaments.

II. Extraction du réseau linéaire (Failles, fractures et dykes)

L'avènement de la technologie spatiale a bouleversé la cartographie tectonique et structurale à l'échelle mondiale, principalement grâce au potentiel cartographique de l'imagerie spatiale (Elmahdy, Ali and Mohamed, 2021, Kamal El-Din *et al.*, 2021, Panagiotakis and Kokinou, 2014). Cette technologie a considérablement contribué de manière significative à l'actualisation et la mise à jour des caractéristiques structurales des régions, permettant une compréhension des processus tectoniques. De telles applications sont des composantes essentielles dans des domaines tels que l'investigation hydrogéologique ou l'exploration minière. Les différents travaux menés par l'utilisation des techniques spatiales ont démontré l'importance, l'efficacité et la performance de la télédétection et des SIG dans la cartographie structurale, en particulier pour l'identification des linéaments et d'autres structures géologiques (Scanvic, 1983, Deroin *et al.*, 1991, Gomez, 2004).

Dans ce contexte (Hobbs, 1904a) est reconnu comme le pionnier ayant entrepris, entre 1904 et 1912, la détermination des structures linéaires visibles dans le paysage. Ces structures comprenaient les rides, les crêtes, les limites des partages des eaux ou rivages, les limites linéaires de formations géologiques, les lignes d'affleurement, les lignes visibles de fractures ou des zones de brèches de failles, ainsi que des vallées et des ravins.

Afin de réaliser une interprétation morphostructurale qualitative optimale, ce travail suit les différentes étapes méthodologiques définies par (Rivereau and Fontanel, 1976):

- L'étape d'identification structurale consiste à attribuer d'une interprétation géologique aux structures linéaires telles que les failles, les fractures, linéaments, en fonction de leurs caractéristiques. Cette étape permet de déterminer si l'origine géologique de ces structures qu'elle soit certaine, probable ou seulement possible. Selon (Rivereau and Fontanel, 1976), les linéaments peuvent être classés en quatre catégories distinctes : (i) les linéaments évidents qui correspondent aux failles et aux fractures clairement identifiées ; (ii) les linéaments probables, associés à la morphologie du terrain, à l'hydrographie et à la végétation ; (iii) les linéaments douteux se caractérisent par un seul élément de preuve (segment isolé du réseau hydrographique) ; et (iv) les linéaments rejetés, qui sont des structures linéaires associées à des activités humaines telles que les routes, les chemins de fer ou les tranchées.
- L'étape d'hiérarchisation structurale dont elle implique la hiérarchisation des structures linéaire en identifiant les relations entre les linéaments et les différents types de déformations tectoniques (compression, tension, décrochement).
- Enfin, l'étape d'identification des provinces géologique consiste à discriminer les provinces géologiques afin de définir le système cohérent de fracturation de chaque unité géologique. L'analyse tectonique met également en évidence les liens entre les mouvements orogéniques et le processus de sédimentation. Il s'agit précisément d'effectuer une étude géologique approfondie de la région, afin de délimiter les provinces géologiques homogènes, et de cartographier les linéaments présents.

Dans ce cadre, cette section a pour objectif l'extraction et la cartographie des linéaments de la région de Tabelbala. Cette démarche repose sur l'interprétation et de l'analyse de données satellites, complétée par une analyse statistique et une comparaison avec données de terrain. L'approche adoptée se concentre initialement sur la compréhension l'aspect structurel de la

zone d'étude, en comparant les linéaments identifiés à partir des images satellites aux résultats des travaux tectoniques et structuraux effectués auparavant. Dans un second temps, l'étude vise à analyser la relation entre les linéaments et le réseau hydrographique de la région. Cette analyse a pour but d'orienter efficacement l'exécution des travaux de forage et de faciliter l'exploration minière rapide.

Les résultats montrent que la méthode adoptée permet une excellente discrimination et extraction des linéaments dans la région étudiée. Le réseau linéamentaire obtenu à partir de l'imagerie satellite présente des orientations similaires à celles précédemment identifiées dans les recherches antérieures. Ces structures se manifestent par des réseaux de linéaments denses, correspondant à des zones ayant un réseau de drainage primaire et secondaire matérialisé à Oued Demrane, Dj Bet Touaris, Dj Ben Tadjine, Dait El Kouar, et Maanda. Ces structures pourraient contribuer significativement au potentiel aquifère et réservoir de la formation de Tabelbala, notamment celles d'âge quaternaire.

L'étude structurale de la région de Tabelbala a débuté par l'interprétation d'images optiques Landsat8 (OLI), Sentinel 2, Sentinel 1, ainsi que du modèle numérique de terrain (MNT) (fig.117). Cela a permis de créer des spatio-cartes du réseau linéamentaire qui a servi par la suite aux vérifications de terrain et l'exécution de divers modèles appliqués dans notre investigation de la potentialité en eau souterraine. Les linéaments ainsi identifiés correspondent à différents types de phénomènes, dont le plus important est la reconnaissance des structures géologiques linéaires à partir des données spatiales. Celle-ci dépend fortement de la résolution spectrale et spatiale du satellite, ainsi que de sa capacité à identifier les variations subtiles de réflectances associées à ces phénomènes géologiques (De Sève, Desjardins and Toutin, 1994).

En conséquence, deux techniques ont été adoptées dans ce projet de thèse, pour l'extraction du réseau linéamentaire. La première est une technique automatique basée sur un ensemble numérique appliqué sur des images satellites. Elle a été choisie en raison de sa capacité à standardiser l'analyse de divers types d'images, facilitant ainsi l'identification de toutes les structures linéaires. Tandis que la seconde est une technique manuelle classique reposant sur l'expérience et les connaissances du photo-interprète.

La photo-interprétation est une application courante de la télédétection et constitue une approche analogique qui la différencie des autres méthodes visant l'analyse et l'interprétation des données spatiales (Provencher and Dubois, 2007).

En utilisant l'algorithme "Line module" de PCA Géomatica (tab.18), il est possible d'extraire toutes les structures linéaires, y compris celles d'origine géologique, à partir des données spatiales telles que les images optiques, radar et/ou Mnt. Ce processus nécessite une série de traitement ayant des paramètres prédéfinis (Geomatics, 2018, Villalta Echeverria *et al.*, 2022).

RADI [Rayon du filtre (*Filter radius*) : 10] : représente le petit niveau de détail qui va être détecté dans l'image d'entrée. En d'autres termes, ce paramètre établit la longueur minimale permettant à une structure linéaire être détectées. La valeur attribuée au RADI dépend particulièrement de la résolution de l'image et de l'échelle cartographique. Pour notre cas d'étude, la résolution du TPI est de 10 m, et l'échelle cartographique est de 1/50 000, faisant que toute structure inférieure à 500 m ne sera pas détectée (Chuvieco, 1991). En pratique cette valeur est définie en unité de pixel, ce qui correspond à une valeur RADI de 40 pixels (tab.18).

Les paramètres **GTHR** [seuil de gradient de contour (*Edge Gradient Threshold*) : 100] et **LTHR** [Seuil de longueur de courbe (*Curve Length Threshold*) : 5] influencent directement la longueur et le nombre des structures linéaires. Le GTHR est responsable de la détection des contours sur l'image suivant des seuils prédéfinis (Villalta Echeverria *et al.*, 2022). Cette valeur représente le minimum (en termes d'intensité) à partir duquel les changements entre deux niveaux ayant un contraste élevé seront détectés. Dans notre cas la valeur de GTHR est maintenue à 100, conformément à la valeur suggérée par le programme. Pour ce qui est de la valeur attribuée au paramètre LTHR, elle est extraite par le module LINE, et représente la longueur minimale des lignes (tab.18).

FTHR [Seuil d'ajustement de ligne (*Line Fitting Threshold*) : 30]: ce paramètre influence la précision des extractions linéaires et est maintenu à sa valeur standard (Hashim *et al.*, 2013).

ATHR [Seuil de différence angulaire (*Angular Difference Threshold*) : 35] : ce dernier influence la connexion des structures linéaires et représente l'angle maximal (en degré) entre les segments à relier. Si l'angle entre deux segments ne dépasse pas cette valeur maximale, une liaison sera établie entre eux. Dans le cas contraire, les segments vont être séparés, générant ainsi des vecteurs plus courts.

DTHR [Seuil de distance de liaison (*Linking Distance Threshold*) : 20] : Il détermine la séparation entre les lignes. Dans le cas où la distance qui sépare deux segments ne dépasse pas la valeur maximale préconisée du paramètre, les segments sont reliés pour générer une ligne plus longue. Dans notre processus, une valeur de 40 pixels correspond à la longueur minimale détectée lors de l'analyse, a été assignée au paramètre DTHR (tab.18).

Les paramètres suscités permettent l'extraction et l'interprétation des structures linéaires en vue de produire la carte de fracturation de la zone d'étude. Ainsi, le tableau recense l'ensemble des valeurs adoptées lors du processus d'extraction automatique des linéaments pour notre zone d'étude :

Tableau 18 : Valeurs des paramètres du 'Line module' de Geomatica.

Paramètres	Valeurs par défaut	Valeur suggérée
RADI	10	400
GTHR	100	*100
LTHR	30	80
FTHR	3	3
ATHR	30	35
DTHR	20	40

$$|S| = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (6.1)$$

Où S est la valeur de la force du bord. En outre, la direction du bord est déterminée par l'équation (6.2) en utilisant le masque des gradients dans les directions x et y .

$$\theta = \tan^{-1} S_x/S_y \quad (6.2)$$

Après l'application des seuils spécifiés lors de l'étape de paramétrages (LTHR, FTHR, ATHR, et DTHR), le bruit présent dans les images satellites est éliminé, et les contours sont déterminés pour générer une image binaire.

Une fois cette procédure est effectuée, nous procédons alors à la cartographie et la validation des linéaments en deux étapes principales :

- Elimination des structures linéaires avec un outil de géotraitement afin d'éliminer les structures linéaires non géologiques extraites par le logiciel Geomatica, telles que les routes, les pistes, les limites de plantation (El-Sawy *et al.*, 2016). Cela permet donc de se concentrer uniquement sur les structures ayant un intérêt géologique.
- Interprétation multicritère qui implique la collecte des informations provenant du modèle numérique de terrain, des travaux antérieurs et des missions de terrain. Les structures linéaires identifiées présentent des longueurs significatives et correspondent à des alignements de drainage et de la végétation, tout en coïncidant avec des ruptures de pente.

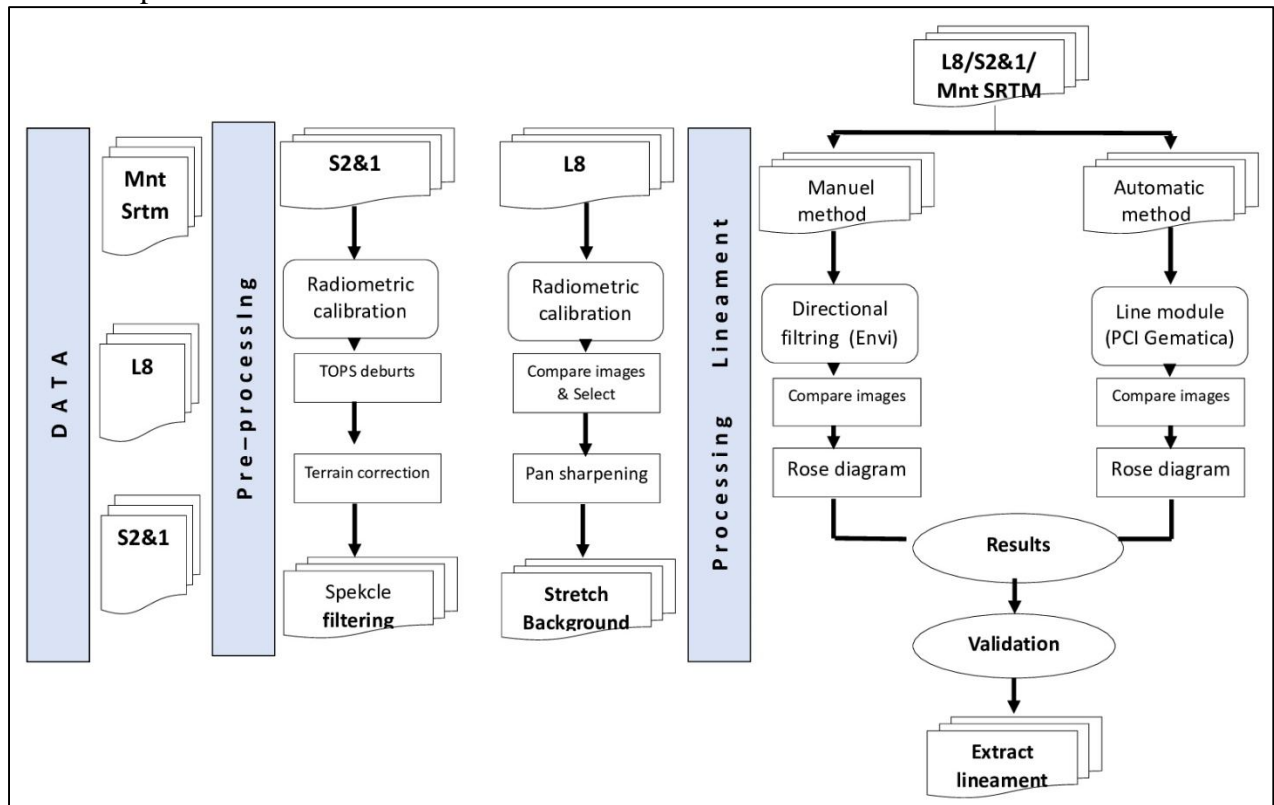


Figure 117: Organigramme de la méthode proposée pour la mise en évidence du réseau de fracturation.

Il est à noter que le modèle numérique de terrain a été analysé à l'aide de l'Indice de Position Topographique (TPI) avec une taille de cellule de 10*10 (fig.118 (f)). Le TPI est défini comme un masque qui évalue la position de chaque pixel par rapport aux pixels voisins. L'indice génère une accentuation de relief d'une donnée, facilitant la reconnaissance et l'identification des caractéristiques morphostructurales (Weiss, 2001). Le modèle TPI a été obtenu en utilisant l'équation suivante :

$$TPI = (Dem_{mean} - Dem_{min}) / (Dem_{max} - Dem_{mean}) \quad (6.3)$$

Où Dem_{mean} , Dem_{max} et Dem_{min} représentent respectivement les valeurs moyennes, maximales et minimales du modèle numérique de terrain (Mnt). Ces couches rasters ont été générées avec un masque de dimension 10*10, dont la taille de pixel est pratiquement identique à celles de l'image originale. Chacune de ces images a été obtenue à l'aide de l'outil "Focal Statistic" d'ArcGis.

En raison de la morphologie de terrain de notre zone d'étude, ainsi que de sa superficie dépassant les 1000 km², des segments de 1000 m ne sont pas représentatifs, et peuvent être

III. Les principaux facteurs influençant la potentialité

1. Lithologie

Dans les travaux d'évaluation des eaux souterraines, la lithologie est considérée l'un des aspects les plus importants pour déterminer la perméabilité des différentes formations. La région de Tabelbala fait partie de la dépression marginale (intracratonique) de la plate-forme ouest-africaine selon des études antérieures (Kurek and Preidl, 1987, Ennih and Liégeois, 2001). Elle se compose de ce fait de diverses unités géologiques, notamment les formations volcano-sédimentaires du Protérozoïque (étage structural inférieur), de dépôts sédimentaires tels que des grès, des grès-argile et des grès-carbonate du Paléozoïque (étage structural moyen), ainsi que de dépôts cénozoïques de genèse diverse (Menchikoff, 1930c).

L'étage structural inférieur de la région est représenté par plusieurs composantes dont des volcanites basiques et neutres, des tufs, des grauwackes et des volcanites acides. Quant à l'étage structural moyen, il est formé de roches paléozoïques (Mekkaoui, Remaci-Bénaouda and Graïne-Tazerout, 2017).

De plus, les dépôts quaternaires comprenant de sable, du limon et des alluvions, occupent une part importante de zone d'étude. Dans ce travail, cela est illustré par l'attribution d'une valeur de poids important à ces formations quaternaires en raison de leurs caractéristiques favorables à l'infiltration. Les formations les plus anciennes, liées au Protérozoïque, se composent particulièrement de rhyolite, d'ignimbrite, de porphyre dacitique, de grès, de basalte, de basalte andésitique, de tufs andésitiques, de tufs de porphyre andésitique, de grauwackes et de conglomérat. Ces dernières, possèdent une faible capacité d'infiltration, ce qui justifie l'attribution d'un poids moins important aux formations qui les renferment.

Il est à signaler également que les sédiments du Cambrien, de l'Ordovicien ainsi que les dépôts quaternaires tels que les alluvions, les dépôts torrentiels et éoliens, sont les plus répondus dans cette région, tandis que le Silurien se caractérise par une extension relativement limitée.

2. Densité du réseau linéamentaire

Les structures linéaires sont des caractéristiques linéaires droites qui se manifestent sur la surface de la terre comme des lignes de paysage significatives (Hobbs, 1904b). Les linéaments, quant à eux, servent d'indicateurs pour repérer une zone de faiblesse dans les roches mères et se définissent comme des structures curvilignes ou linéaires visibles sur la surface de la Terre. La densité des linéaments revêt une grande importance dans la délimitation des aires prometteuses en eaux souterraines, car une densité élevée de linéaments est généralement associée à une productivité accrue des eaux souterraines (Hatefi and Ekhtesasi, 2016). Cette densité est calculée à l'aide de l'équation suivante (Mandal et al., 2016).

$$(LD) = \sum_{i=1}^n Li/S \quad (6.4)$$

où LD représente la densité du réseau linéamentaire, Li définit la longueur des linéaments, i est le nombre de linéaments et S signifie l'unité de surface.

Dans cette étude, les linéaments sont identifiés et cartographiés en utilisant deux sources principales : les cartes géologiques à l'échelle 1/200 000 et les données satellitaires. Leur longueur varie de 0,12 à 24,79 km, et leurs directions sont interprétées en utilisant des diagrammes Stréonets. Par ailleurs, les résultats montrent que la majorité des linéaments sont orientés selon la direction NE-SW.

Dans la région étudiée, la densité du réseau linéaire varie de 0 à 0.00083 Km/Km², et a été regroupée en cinq classes : 0-0.00017, 0.00017-0.00034, 0.00034-0.00051, 0.00051-0.00068, 0.00068-0.00085. Les pourcentages respectifs de chaque classe par rapport à la densité totale du réseau linéaire sont : 80.15 %, 13.62 %, 4.56 %, 1.26 %, 0.38 %.

En outre, la zone présentant la densité plus élevée du réseau linéaire (0.00068-0.00085 Km/Km²) correspond aux zones à fort potentiel en eau souterraine, tandis que des aires ayant une densité plus faible (0-0.00017 Km/Km²) sont associées à un potentiel moins élevé.

Enfin, l'analyse statistique directionnelle des différents linéaments révèle deux directions préférentielles, principalement NE-SW et NW-SE. Ces directions sont confirmées par l'histogramme des fréquences relatives (fig.79), qui met en évidence les mêmes classes linéaires.

3. Densité du réseau hydrographique

Le réseau de drainage est élaboré et mis à jour à l'aide des données DEM (SRTM) ainsi que des images satellites Landsat8 (OLI) et Sentinel 2, puis hiérarchisé jusqu'au cinquième ordre. Une fois le réseau hydrographique établi, la carte de densité de drainage peut être établie. Celle-ci joue un rôle essentiel dans l'évaluation du potentiel des eaux souterraines, étant donné que la densité de drainage est inversement proportionnelle à la perméabilité (Shekhar and Pandey, 2015). La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale des cours d'eau et la superficie totale de la région d'intérêt (Yeh *et al.*, 2016), comme le montre l'équation (6.5) :

$$DD = L/S \quad (6.5)$$

où DD définit la densité de drainage, L est la longueur du cours d'eau et S représente l'unité de surface (Tarboton *et al.*, 1992).

Les zones présentant un fort potentiel en eaux souterraines sont souvent caractérisées par un taux d'infiltration élevé ainsi que par un réseau de drainage peu dense et faiblement développé (Dinesh Kumar, Gopinath and Seralathan, 2007). Par conséquent, la valeur de poids la plus faible est attribuée à la densité de drainage la plus élevée et vice versa. Comme illustré dans la figure, la région de Tabelbala possède une gamme étendue de valeurs de densité, variant de 0 à 0,0012 Km/Km².

4. Pente

Dans les travaux d'investigation des ressources hydriques, la pente constitue un facteur qui influence directement la rétention d'eau et le taux d'infiltration (Tanvir Rahman, Rahman and Majumder, 2012).

Dans la région de Tabelbala, et plus précisément dans les zones de Dait El Kouar, Ariguët Abd el Ouahad et Hassi Maanda, la pente est très faible, voire quasiment plate (0-3°). En revanche, elle varie entre 6 et 50° sur le versant droit, notamment au niveau de Djebel bet Touaris, Erg Erraoui, Erg El Alatchane, Gara El Khadem, Djebel Bougat, Djebel Belkassam, Djebel Smaïne et Djebel Ben Tadjine.

Ces résultats sont en adéquation avec la topographie du terrain, où les zones de collines et les reliefs d'altitude moyenne à élevée sont généralement associées à un faible taux d'infiltration, tandis que les zones de plaines démontrent une infiltration élevée (Thapa *et al.*, 2017a). La carte des pentes est générée sur la base de la résolution spatiale Dem SRTM-30 m. Dans la région d'étude, une priorité plus élevée est accordée aux zones de plaine, tandis que les

zones d'altitudes élevées ou modérément élevées ont une faible priorité. Cinq classes de pente sont caractérisées : 0°-3°, 3°-6°, 6°-12°, 12°-25°, 25°-50° (fig.119).

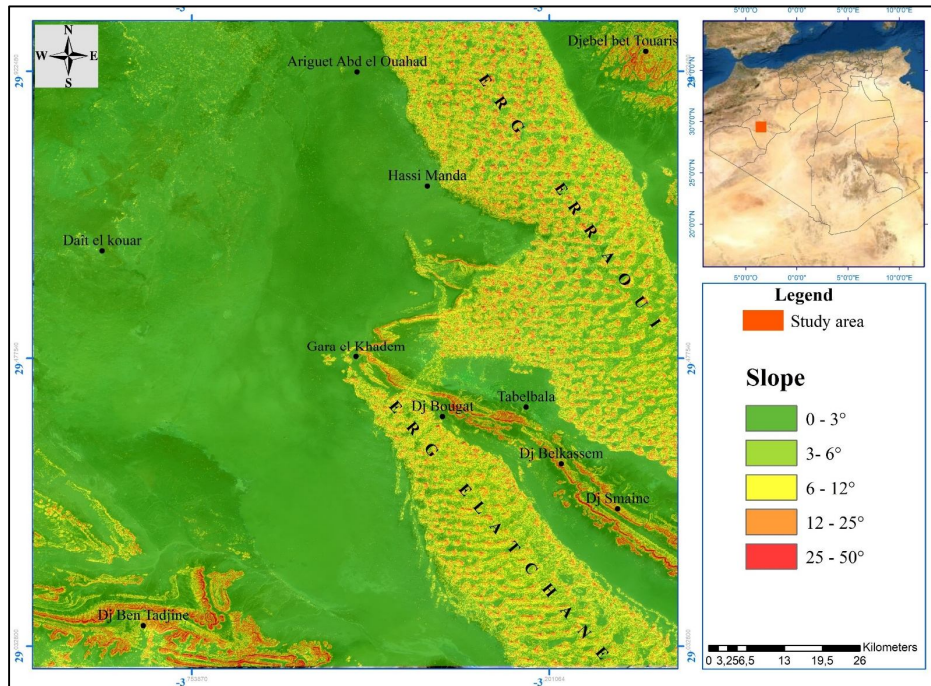


Figure 119: Carte des pentes de Tabelbala.

5. Elévation

Le facteur d'élévation est un paramètre important pour l'estimation des ressources hydriques. En général, les zones de plaine sont caractérisées par un taux d'infiltration élevé et une rétention prolongée des eaux favorisant la recharge des nappes souterraines. En revanche, sur les pentes raides, la surface de ruissellement est assez importante alors que le taux d'infiltration est assez faible (Adeyeye, Ikpokonte and Arabi, 2019). Dans notre région, la valeur de l'élévation varie de 398 à 909 m (au-dessus du niveau moyen de la mer).

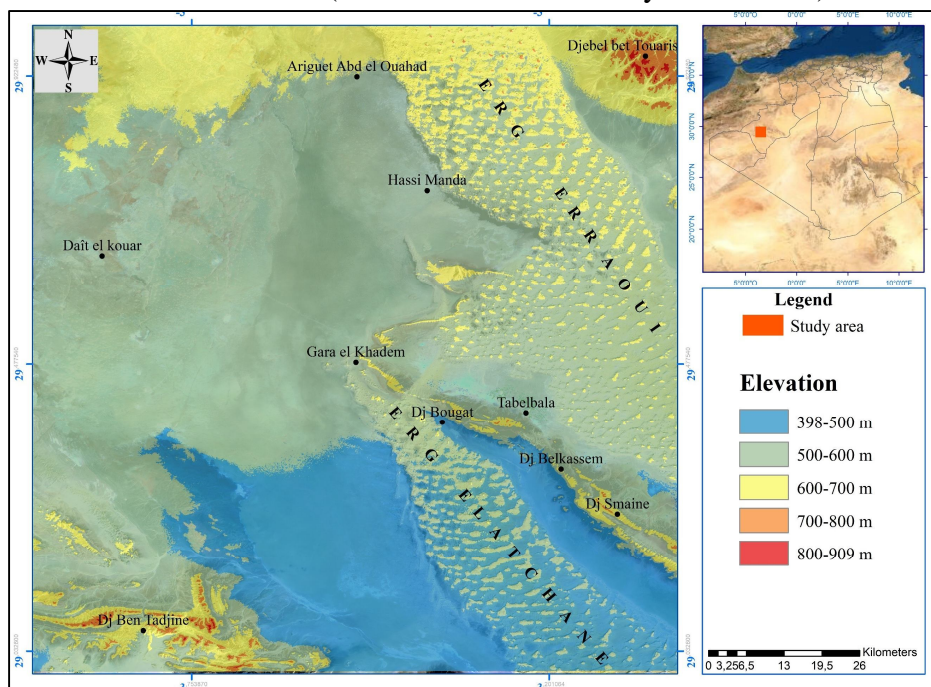


Figure 120: Carte d'élévation de Tabelbala.

Les valeurs d'élévation ont été subdivisées en cinq catégories conformément aux autres des facteurs d'influence. Il s'agit des classes suivantes : 398-500 m (20,20 %), 500-600 m (64,34 %), 600-700 m (14,52 %), 700-800 m (0,84 %), 800-909 m (0,07 %) respectivement (fig.120).

6. Occupation du sol

L'occupation du sol représente l'un des facteurs les plus déterminants dans la prospection hydrogéologique, car elle exerce une influence directe sur les paramètres hydrologiques essentiels, tels que le ruissellement de surface, l'infiltration et l'évapotranspiration (Jasrotia, Kumar and Singh, 2016, Thapa *et al.*, 2017a, Berhanu and Hatiye, 2020). Dans la zone d'étude, l'occupation du sol (Fig.121) met en évidence les classes suivantes : zones de ruissellement (35,01 %), Oued (0,27 %), zones reg et Hamada (27,65 %), relief (10,26 %), Erg 26,56 %), voile sableux (0,002 %), dépôts sableux (0,13 %), zones agricoles (0,106 %) et habitations (0,008 %).

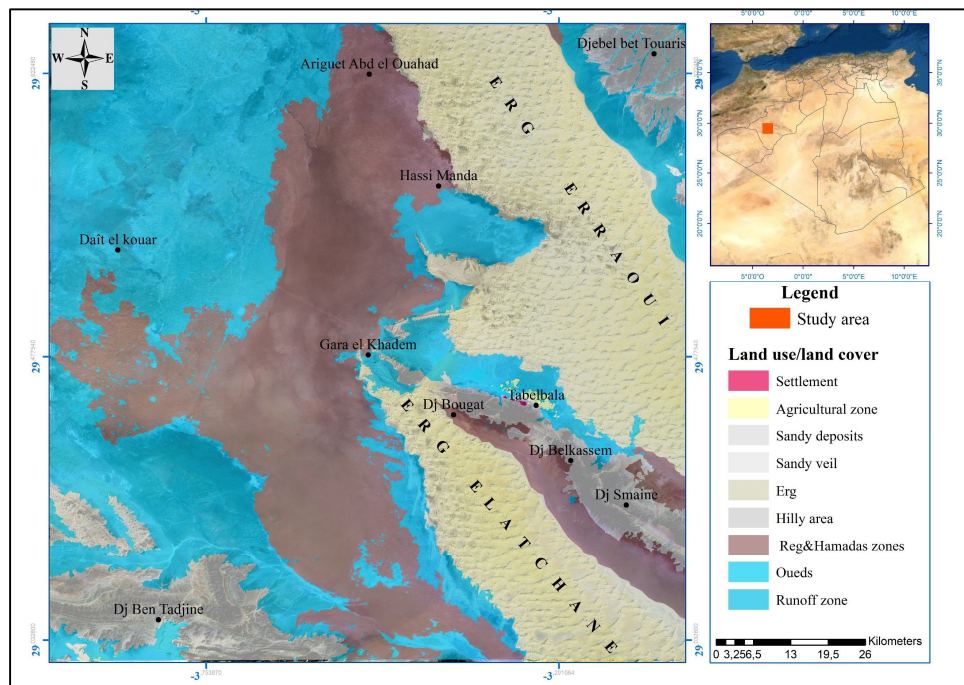


Figure 121: Carte d'occupation du sol de la région de Tabelbala.

L'ordre d'importance est reporté dans le tableau (tab.19) où les zones de ruissellement et les oueds représentent les catégories présentant les pourcentages les plus élevés, soulignant leur importance dans les processus hydrologiques de la région. En revanche, les agglomérations et le relief présentent les pourcentages les plus faibles.

Tableau 19: Répartition des classes d'occupation du sol de la région d'étude

Classes	Pourcentage (%)	Superficie (ha)
Zones de ruissèlement	35,01 %	374 000 ha
Zones de reg et Hamada	27,65 %	296 367 ha
Zones d'Erg	26,56 %	284 771 ha
Zones de relief	10,26 %	100 333 ha
Oued	0,27 %	2826 ha
Dépôts sableux	0,13 %	1484 ha
Zones agricoles	0,106 %	1141 ha
Voiles sableux	0,002 %	94 ha
Zones urbaines	0,008 %	30 ha

7. Indice d'humidité topographique

La topographie est reconnue pour son impact sur divers processus hydrologiques notamment la perméabilité, l'infiltration, le ruissellement et la productivité des terres. Afin d'évaluer la quantité des eaux souterraines infiltrées de la zone d'étude (Kousalya *et al.*, 2012, Nithya *et al.*, 2019), il est nécessaire de prendre en considération, l'indice TWI, qui permet de modéliser les conditions topographiques influençant ces processus. Cet indice est élaboré en fonction des paramètres topographiques tels que la pente et l'accumulation des écoulements.

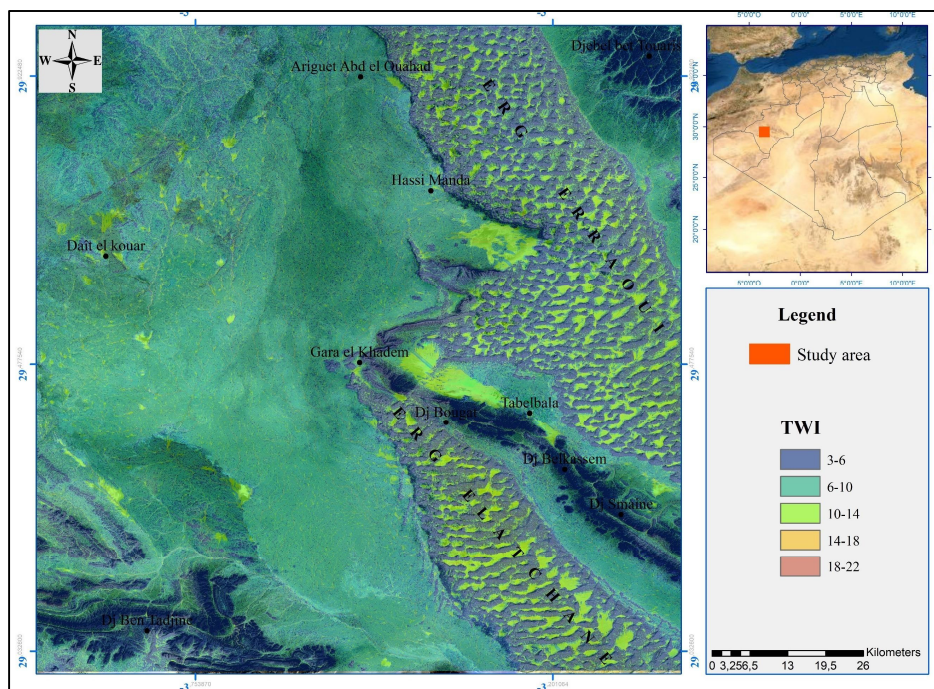


Figure 122: Carte d'indice d'humidité topographique de la zone d'étude.

En exploitant l'environnement du Système d'Information géographique (SIG), l'indice d'humidité topographique a été utilisé pour estimer le flux hydrologique dans le bassin versant (Vadrevu, Eaturu and Badarinath, 2006), (Bevan and Lake, 2016). L'indice d'humidité topographique se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$TWI = \ln \alpha / \beta \quad (6.6)$$

où α est la pente de la zone étudiée et β représente le gradient topographique.

Un poids conséquent est accordé à des valeurs élevées de l'indice d'humidité topographique. La distribution spatiale de ces taux d'humidité topographique de la zone étudiée varie de 3 à 22 (Fig.122). Aussi, l'interprétation visuelle de la carte TWI révèle que les sites élevés à moyens, propices à l'humidité, se situent le long des cours d'eau, des oueds, des zones de ruissellement, et des zones agricoles. En revanche, les zones sèches sont situées dans les zones Reg et Hamada, Erg, voile sableux, et dépôts.

IV. Méthodes d'évaluation de la potentialité hydrique et applications

Les méthodes d'identification des sites potentiels en eaux souterraines se répartissent en plusieurs catégories, chacune ayant ses spécificités et ses avantages. Les méthodes classiques reposent principalement sur des approches géologiques (formations et structures favorables), hydrogéologiques (caractéristiques des nappes phréatiques) et géophysiques (résistivité électrique). Les méthodes prédictives (modèles empiriques, hydrogéologiques et modèles SIG), quant à elles, exploitent des modèles mathématiques et statistiques basés sur des données spatiales et environnementales, intégrées dans un système d'information géographique (SIG). Tandis les approches basées sur l'apprentissage automatique (SIG et machine Learning) utilisent des algorithmes avancés (RF, NN, SVM et autres), combinant souvent des données issues des méthodes classiques, afférant ainsi des résultats plus fiables et adaptables à différents contextes.

Malgré les nombreux travaux menés et les approches employées, la détermination des zones du potentiel hydrique dans les régions arides demeure entourée d'incertitude. Cela souligne l'importance de recourir à des techniques variées pour améliorer la fiabilité des estimations de ressources hydriques.

Cette réflexion, développée dans le cadre de ce travail de thèse, propose des approches d'analyse spatiale visant à améliorer l'estimation et à fournir une évaluation plus précise du potentiel hydrique. Ces approches reposent particulièrement sur des paramètres déterminant ce potentiel, leur degré d'influence ainsi que sur les relations éventuelles entre eux. Chaque paramètre est étudié individuellement, avant que l'ensemble des facteurs ne soit intégré et compilé afin de générer une carte de potentialité de la zone étudiée.

Un Système d'Information géographique (SIG) est un ensemble de concepts, techniques, principes, outils, instruments et données à référence spatiale, utilisée pour acquérir, stocker, transformer, analyser, modéliser, stimuler et cartographier les phénomènes et les processus répartis dans l'espace géographique (Theriault, 1996).

La plupart des projets de SIG reposent sur l'intégration des données spatiales provenant de sources diverses. L'objectif est de décrire et d'analyser d'éventuelles interactions, d'effectuer des prédictions à l'aide des modèles SIG et de fournir un support aux décideurs. En substance, un modèle SIG peut être considéré comme un processus consistant à combiner un ensemble de données cartographique d'entrée (input data) avec une fonction de traitement pour générer des données cartographiques de sortie (output data).

$$\text{Carte de sortie} = f(\text{deux cartes d'entrée ou plus}) \quad (6.7)$$

La fonction "f" peut prendre diverses formes, et les relations qu'elle exprime peuvent être soit basées sur une compréhension théorique des principes physiques et chimiques, soit empiriques, issue des observations de données, ou encore une combinaison de théorie et d'empirisme.

Tableau 20: Classification des principaux modèles utilisés en géologie ((Harbaugh and Bonham-Carter, 1970).

Class	Type of Relationship	Example	
		Field of Application	Model
Theoretical	Physical/chemical principles	Groundwater flow	Equations of motion
Hybrid	Semi-empirical	Sediment transport	Transport equations
Empirical	Heuristic or statistical	Mineral prediction	Statistical regression

Dans la catégorie théorique, les modèles d'écoulement des fluides basés sur les différences finies ou d'éléments finis reposent sur des équations de mouvement dérivées de principes mécaniques. Ces modèles sont largement utilisés dans des domaines tels que l'écoulement des eaux souterraines, la circulation océanique et atmosphérique, ainsi que d'autres applications similaires (Omar *et al.*, 2019, Jamin *et al.*, 2020).

Par ailleurs, les modèles semi-empiriques sont fréquemment employés dans divers domaines des géosciences (tab.20), notamment pour l'estimation des ressources, les modèles le processus de pente, et les simulations de sédimentation. L'application ce type de modèle, permet de cartographier le potentiel hydrique en fonction un ensemble spécifique de paramètres d'entrée.

Les modèles prédictifs du potentiel minéral, qui reposent sur des relations statistiques ou heuristiques, constituent des exemples typiques de processus empiriques. Les principes physiques et chimiques régissant la formation des gisements minéraux sont souvent trop complexes pour être directement modélisés à partir d'une théorie mathématique. Par conséquent, la prédiction des gisements minéraux repose principalement sur des relations empiriques, complétées par des modèles descriptifs de gisement.

Cette partie de la thèse évoque et examine plusieurs modèles permettant de combiner divers paramètres entre eux, et qui peuvent être implantés dans un environnement SIG pour la modélisation et la cartographie.

La mise en œuvre d'une base de données géospatiale (SIG) pour le village de Tabelbala et ses environs, dans le but d'identifier les zones à potentiel hydrique, et d'évaluer les ressources en eaux souterraines, constitue une opportunité majeure. Une telle base permettrait d'équiper cette région d'un outil performant et capable de renseigner convenablement les décideurs sur les thématiques d'intérêt. Elle pourrait également produire une cartographie ciblée présentant les résultats de consultation et d'analyse spatiale. La conception de cette base de données repose sur l'exploitation des diverses données intrinsèque et extrinsèques contribuent à la détermination des zones de potentialité hydrique. Le recours aux SIG est devenu une nécessité ces dernières décennies, et notamment en ce qui concerne les opérations de modélisation. En effet, compte tenu de la complexité des différentes méthodes de prospection et d'investigation des ressources en eaux souterraines, telles que les méthodes de prospection classiques, les levés géophysiques et hydrogéologiques, la cartographie des affleurements et les diagraphies, le recours aux SIG s'avère indispensable pour assurer une analyse intégrée et efficace de l'ensemble de ces données.

Dans ce contexte, l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) est largement utilisée pour l'élaboration des cartes de prospection des eaux souterraines (Kim, 2020, Rahmati *et al.*, 2015).

Elle est également employée dans le cadre de cette étude. En effet, sept couches thématiques ont été préparées : la lithologie, la densité de drainage, la densité de linéaments, la pente, l'élévation, l'indice d'humidité topographique, et l'occupation du sol. Ces cartes ont été élaborées à partir du traitement, de l'analyse et de l'interprétation d'images satellites. Afin de mettre en évidence les caractéristiques géologiques (informations lithologiques et structurales) et mettre à jour la carte géologique de la région à l'échelle 1/200 000, diverses techniques de traitement d'images numériques ont été appliquées notamment : la composition en fausses couleurs des images Landsat8 OLI (Bands : 7, 5, 4) et Sentinel 2 (Bands : 8, 4 et 3), les rapports de bandes des images Landsat8 OLI (7/3, 5/2, 4/7) et l'analyse en composantes principales de ces mêmes images (Landsat8 OLI).

L'utilité de ces informations est largement reconnue comme un outil efficace pour la discrimination lithologique, en particulier dans les zones arides (Scanvic, 1997, Prost, 1994, Prost, 2013, Nemmour-Zekiri and Oulebsir, 2020).

Dans le but d'extraire et de mettre en évidence le réseau linéaire et les discontinuités structurales (dykes, failles, linéaments et fractures), des filtres directionnels sont appliqués sur les images Landsat8 OLI (Bands : 7, 5 et 4) et Sentinel 2 (Bands : 8, 4 et 3), ayant des résolutions spatiales et spectrales adaptées. Dans notre zone d'étude, un total de 414 linéaments sont extraits à l'aide de l'outil d'extraction semi-automatique, selon différentes directions N0°, N45°, N90° et N135° (Rencz and Ryerson, 1999, Nemmour-Zekiri and Oulebsir, 2020).

Enfin, pour la modélisation du terrain complexe de Tabelbala, un type particulier de données raster (MNT) a été intégré dans notre système SIG. Les facteurs d'influences, tels que la densité de drainage, la pente, l'élévation et l'indice d'humidité topographique, ont été générés automatiquement à partir du modèle numérique d'élévation, obtenu à travers de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), avec une résolution spatiale de 30 mètres.

1. Rapport de fréquence (Fr)

L'approche du rapport de fréquence (Fr) est une méthode statistique bivariée largement utilisée dans l'analyse et la cartographie des ressources et des risques naturels. Dans ce contexte, elle permet d'évaluer et d'estimer la probabilité des relations entre les variables dépendantes et indépendantes, en lien avec les zones de potentialité en eaux souterraines (Balamurugan *et al.*, 2020, Boughariou *et al.*, 2021, Guru, Seshan and Bera, 2017a).

Dans la méthodologie proposée, le rapport de fréquence (Fr) repose principalement sur l'association entre les points d'eau et les facteurs d'influences abordées précédemment. Concrètement, il consiste à calculer le rapport entre le nombre de forages situés dans une classe spécifique de facteurs d'influence et la superficie correspondante, en relation avec le nombre total des points d'eau et la superficie totale du facteur conditionnant (Lee and Pradhan, 2007).

Pour reprendre la définition du Fr, les facteurs d'influences impliqués dans la détermination, des eaux souterraines, sont traités comme des variables indépendantes, tandis que les données provenant de points d'eau (forages et puits) sont considérées comme des variables dépendantes (tab.21).

Tableau 21: Distribution spatiale et la pondération de chaque paramètre calculé par la méthode Fr.

	Obj_ID	Val	Count	%	Code	TWI		11881301		
Géol	1	1	298416	2.51	PR33		1	3855760	56.77	Very low
	2	2	155740	1.31	K3		2	6792105	602.24	Low
	3	3	3302213	27.73	Q6		3	1127815	1252.74	Moderate
	4	4	4002422	33.61	Q1-2		4	90028	577.36	High
	5	5	257553	2.16	Q3-4		5	15593	0.13	Very high
	6	6	189469	1.59	E2-3K4	Drai		11881301		
	7	7	202311	1.70	E2-3K3		1	3532161	29.59	Very low
	8	8	2237942	18.79	Q4-5		2	2670035	22.37	Low
	9	9	25896	0.22	E1K2		3	3762544	31.52	Moderate
	10	10	85147	0.71	K2		4	1830914	15.34	High
	11	11	114461	0.96	K4		5	141040	1.18	Very high
	12	12	1315	0.01	K1	Linéa		11936694		
	13	13	274186	2.30	Q5		1	7947378	66.36	Very low
	14	14	731	0.01	PR13		2	1699950	14.19	Low
	15	15	159982	1.34	E1K1		3	1357888	11.34	Moderate
	16	16	60267	0.51	O2-3S4-5		4	753066	6.29	High
	17	17	4415	0.04	E2-3K2		5	218566	1.82	Very high
	18	18	6568	0.06	E2-3K1	Elév		11976848		
	19	19	205969	1.73	PR23		1	2403849	20.21	398m-500m
	20	20	104008	0.87	O1S1-2		2	7653671	64.34	500m-600m
	21	21	4292	0.04	O2-3S2-4		3	1727565	14.52	600m-700m
	22	22	10220	0.09	N		4	100808	0.85	700m-800m
	23	23	10730	0.09	S1		5	9246	0.08	800m-909m
	24	24	43421	0.36	S1-2	LU/LC		11895139		
	25	25	3590	0.03	S2-4		1	32374	0.27	Oueds
	26	26	14375	0.12	O1S2-4		2	15573	0.13	Accumulation sableuse
	27	27	42913	0.36	O1S1		3	3288473	27.65	Zones de reg et Hmada
	28	28	7307	0.06	S5		4	294	0.00	Voiles sableux
	29	29	9002	0.08	Q4		5	1040	0.01	Agglomération
	30	30	53683	0.45	O2-3S1-2		6	12677	0.11	Zones agricoles
	31	31	4574	0.04	O2-3S5		7	4163064	35.00	Zones de ruissellements
	32	32	1073	0.01	S4-5		8	1221086	10.27	Relief
	33	33	2078	0.02	S3		9	3160768	26.57	Erg

Le rapport de fréquence est exprimé de la manière suivante :

$$Fr = (W/BW) / (P/TP) \quad (\text{Guru, Seshan and Bera, 2017b}) \quad (6.8)$$

où W désigne le nombre des pixels représentant les points d'eau dans chaque classe de facteur d'influence ; BW représente le nombre total des pixels correspondant des points d'eau (forages et puits) dans la zone d'étude ; P est le nombre de pixels de chaque classe pour chaque facteur d'influence ; TP est le nombre total de pixels dans la zone d'étude.

A l'aide de la formule (1), l'indice de potentiel global (GPI) est calculé comme suit :

$$GPI = Fr_1 + Fr_2 + Fr_3 + \dots + Fr_n \quad (1) \quad (\text{Kordestani et al., 2019}) \quad (6.9)$$

où Fr désigne le poids final pour chaque paramètre, et $GWPZ_{fr}$ est estimé en fonction de valeurs de GPI, basée sur le rapport de fréquence de chaque paramètre déterminant la potentialité. Le $GWPZ_{fr}$ est calculé conformément à la formule suivante (Kumar, Gautam and Kumar, 2014).

$$GWPZ_{fr} = \sum (Litfr) + (LDfr) + (LU\&LCfr) + (DDfr) + (Sfr) + (Efr) + (TWIfr) \quad (6.10)$$

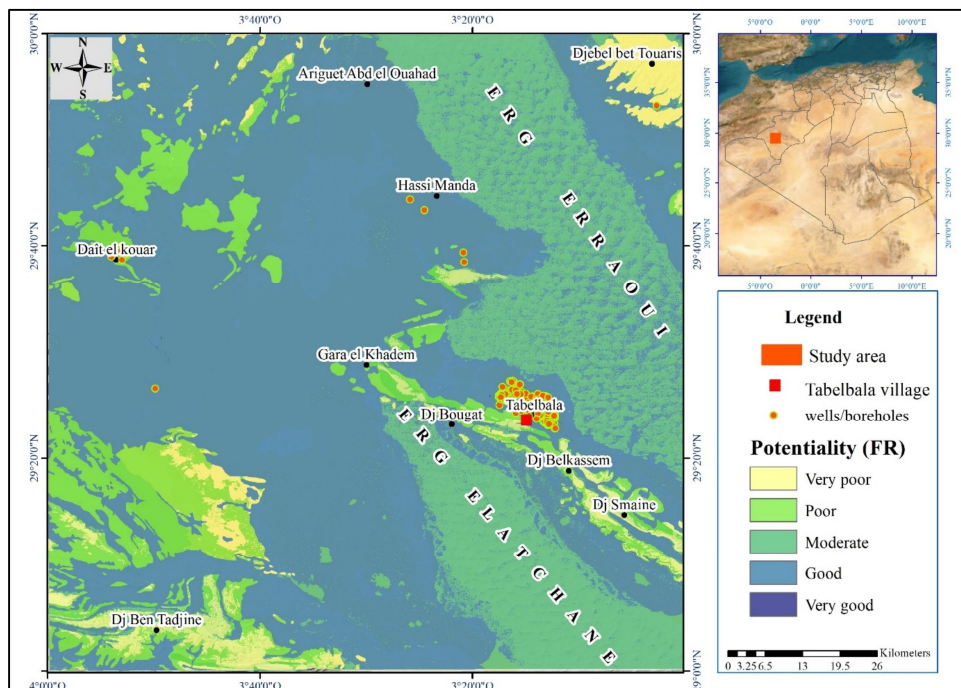


Figure 123: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (Fr).

2. Analyse multicritère hiérarchique (AHP) et interprétation

La méthode d'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP), développée par (Saaty, 1980), est devenue l'une des techniques les plus couramment utilisées en raison de sa simplicité et de son efficacité. Elle consiste principalement à calculer les poids de pondération et les taux des facteurs conditionnant la potentialité, en fonction de leur hiérarchisation selon leur importance dans l'établissement de résultat (Kousalya et al., 2012, EL ABIDINE and ABDELMANSOUR, 2019).

La technique AHP permet de réduire la complexité des problèmes, de déterminer les priorités (Punniyamoorthy, Mathiyalagan and Lakshmi, 2012), de planifier et d'optimiser les ressources, facilitant ainsi la prise de décision. Afin d'améliorer la précision et la fiabilité des résultats, l'attribution des poids aux facteurs d'influences de la potentialité est basée dans cette étude sur plusieurs paramètres notamment : les jugements empiriques des experts, les

connaissances acquises, les différents travaux antérieurs menés et l'expérience sur le terrain (Tab.1).

La matrice de jugement est construite en comparant les facteurs deux à deux, en s'appuyant sur l'échelle de neuf (9) niveaux, conformément à la méthode de comparaison par paires développées par Saaty en 2003. (Saaty, 2003) (Tab.23).

Tableau 22: Poids des facteurs intervenant et leur classification.

Fact	Classe	Note	Poids	Note normale	Poids normalisé	Fact	Classe	Note	Poids	Note normal	Poids normalisé
Lit	Quaternaire	5	38.9	0.294	11.441	DD	Très faible	5	8.7	0.333	2.900
	Néogène	4		0.235	9.153		Faible	4		0.267	2.320
	Silurien	3		0.176	6.865		Modérée	3		0.200	1.740
	Ordovicien	2		0.118	4.576		Forte	2		0.133	1.160
	Cambrien	2		0.118	4.576		Très forte	1		0.067	0.580
LD	Protérozoïque	1		0.059	2.288	S	0°-3°	5	5.3	0.333	1.767
	Très faible	1	23.7	0.067	1.580		3°-6°	4		0.267	1.413
	Faible	2		0.133	3.160		6°-12°	3		0.200	1.060
	Modérée	3		0.200	4.740		12°-25°	2		0.133	0.707
	Forte	4		0.267	6.320		25°-50°	1		0.067	0.353
LULC	Très forte	5		0.333	7.900	E	398 m-500 m	5	4.9	0.333	1.633
	Zone de ruissèlement	5	15.4	0.192	2.962		500 m-600 m	4		0.267	1.307
	Accumulations sableuses	4		0.154	2.369		600 m-700 m	3		0.200	0.980
	Voiles sableux	3		0.115	1.777		700 m-800 m	2		0.133	0.653
	Zone d'Erg	2		0.077	1.185		800 m-909 m	1		0.067	0.327
TWI	Relief	1		0.038	0.592	TWI	03-06	1	3.1	0.067	0.207
	Oueds	5		0.192	2.962		06-10	2		0.133	0.413
	Agglomérations	1		0.038	0.592		10-14	3		0.200	0.620
	Zone agricole	4		0.154	2.369		14-18	4		0.267	0.827
	Zones de Reg & Hamada	1		0.038	0.592		18-22	5		0.333	1.033

Tableau 23: Matrice de comparaison par paires des critères intervenants (Ahp).

	Lit	LD	LULC	DD	S	E	TWI
Lit	1.00	2.00	3.00	4.00	6.00	7.00	9.00
LD	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	7.00
LULC	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
DD	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
S	0.17	0.25	0.33	0.50	1.00	1.00	2.00
E	0.14	0.20	0.25	0.33	1.00	1.00	2.00
TWI	0.11	0.14	0.20	0.25	0.50	0.50	1.00

Tableau 24: Matrice de comparaison par paires et poids normalisés des critères intervenants (Ahp).

	Lit	LD	LULC	DD	S	E	TWI	Norm Weight
Lit	0.399	0.451	0.411	0.360	0.342	0.325	0.300	0.370
LD	0.199	0.225	0.274	0.270	0.228	0.232	0.233	0.237
LULC	0.133	0.113	0.137	0.180	0.171	0.186	0.166	0.155
DD	0.099	0.075	0.068	0.090	0.114	0.139	0.133	0.103
S	0.066	0.056	0.045	0.045	0.057	0.046	0.066	0.054
E	0.057	0.045	0.034	0.030	0.057	0.046	0.066	0.048
TWI	0.044	0.032	0.027	0.022	0.028	0.023	0.033	0.030
Sum	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tableau 25: Nombre de facteurs (n), valeur propre de la matrice de jugement (λ_{max}), indice de cohérence aléatoire (RI), Rapport de consistance (CR) et Indice de consistance (CI) de différentes couches considérées

Themes	N	λ_{max}	CI	RI	CR
Lithologie (Lit)	6	6.277	0.109	1.24	0.088
Lineament density (LD)	5	4.73	0.01	1.12	0.01
Land use/land cover (LULC)	9	9.58	0.13	1.45	0.09
Drainage density (DD)	5	5.27	0.06	1.12	0.059
Slope (S)	5	5.25	0.103	1.12	0.092
Élévation (E)	5	5.22	0.10	1.12	0.08
Topographic wetness index (TWI)	5	5.22	0.08	1.12	0.075

Plusieurs étapes consécutives sont effectuées pour calculer le ratio de cohérence (CR) et évaluer les poids normalisés :

(1) Conception de la matrice de comparaison par paires :

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & P_{3n} \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

où P_n est la $n^{\text{ième}}$ unité d'indicateur et P_{nn} représente le facteur de la matrice de jugement.

(2) Calcul du poids normalisé :

$$W_n = GM_n / \sum_{n=1}^N GM_n \quad (6.12)$$

où W représente le vecteur de poids et GM_n est la moyenne géométrique relative à la $i^{\text{ième}}$ ligne.

(3) Calcul de la cohérence du jugement

$$CR = CI / RCI \quad (6.13)$$

où CR désigne le rapport de cohérence, CI représente l'indice de cohérence et RCI est l'indice de cohérence aléatoire de la classification de (Saaty, 1990). Dans notre étude, la valeur de l'ICR dépend du nombre de paramètres, il est estimé à 1,32.

(4) L'indice de cohérence (indice de consistance) est calculé à l'aide de l'équation (6.14) :

$$CI = (\lambda_{max} - N) / (N - 1) \quad (6.14)$$

où λ signifie la valeur propre de la matrice de jugement, calculée en utilisant l'équation (15).

(5) Vecteur propre de la matrice X :

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i W)_n}{N * W} \quad (6.15)$$

Les poids attribués ainsi que les valeurs de la matrice de comparaison sont reportés dans les tableaux 6,7 et 8.

Les rapports de cohérence (CR) relatifs aux comparaisons par paires étaient inférieurs à 0,1 ce qui confirme la cohérence des jugements. Les valeurs de λ_{max} et les valeurs de CR des critères CI et RI sont résumées dans le tableau 25.

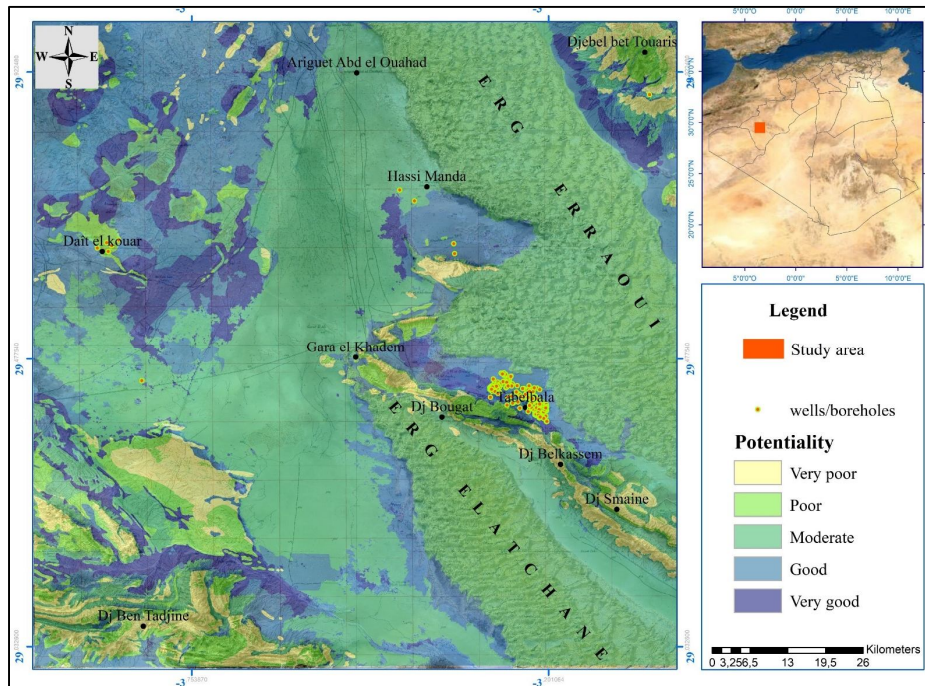


Figure 124: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (AHP).

La cartographie du potentiel des eaux souterraines repose essentiellement sur la superposition d'indices pondérés, comme mentionné dans la littérature. Cette approche repose sur des jugements humains ainsi que sur la combinaison de plusieurs cartes thématiques (Boobalan and Gurugnanam, 2016). Dans le cas de l'identification des zones potentielles de la région de Tabelbala, une approche multicritère a été adoptée après avoir attribué les poids et les taux correspondants aux différents facteurs de contrôle. Le GWPZ est calculé conformément à l'équation (6.16) (Das and Pal, 2019) :

$$GWPZ = \sum_i^n (Litw * Litr) + (LDw * LDr) + (LU\&LCw * LU\&LCr) + (DDw * DDr) + (Sw * Sr) + (Ew * Er) + (TWIw * TWIr) \quad (6.16)$$

où *GWPZ* : zones potentielles en eaux souterraines, *r* : cote, *w* : poids de pondération des facteurs conditionnant, *Lit* : lithologie, *LD* : densité du réseau linéaire, *LULC* : occupation du sol, *DD* : densité du réseau de drainage, *S* : pente, *E* : élévation et *TWI* : indice d'humidité topographique.

3. Apprentissage automatique

Le machine Learning ou l'apprentissage automatique, est une branche de l'intelligence artificielle qui exploite des approches mathématiques et statistiques pour permettre à des algorithmes d'apprendre à effectuer une tâche précise à partir des données quelconques (Baker *et al.*, 2019, Tapeh and Naser, 2023). L'objectif est d'améliorer les performances tout en limitant le besoin d'instruction de la part d'un utilisateur (Mehrotra, 2019).

Ce domaine couvre la conception, l'analyse, l'optimisation, le développement et la mise en œuvre des techniques permettant d'extraire des informations utiles des données.

Les méthodes basées sur *le machine Learning* sont pour la plupart des algorithmes supervisés qui s'exécutent en deux étapes. La première étape consiste à estimer un modèle à partir d'un ensemble de données, appelées observations ou données d'entraînement. Ce dernier connu sous le nom d'apprentissage s'effectue avant l'utilisation pratique du modèle. Elle a pour objectif d'identifier les relations linéaires et non linéaires entre les observations en entrée ainsi qu'un ensemble de données en sortie qui leur correspondent. Il est conséquent nécessaire de fournir à l'algorithme d'apprentissage des annotations indiquant les résultats que l'on souhaite obtenir. La seconde étape correspond à la mise en production : une fois le modèle établi, de nouvelles données peuvent être traitées pour obtenir les résultats attendus pour la tâche définie. Il s'agit de l'étape de test.

En pratique, certains systèmes peuvent continuer à apprendre après leur mise en production, à condition qu'ils disposent d'un mécanisme permettant d'évaluer la qualité des résultats générés.

La gestion des ressources hydriques souterraines est une tâche complexe qui exige une compréhension détaillée et approfondie de nombreux paramètres hydrologiques essentiels, en particulier la nature de formations géologiques, les unités hydrogéologiques, l'occupation du sol et le changement climatique (Amanambu *et al.*, 2020).

Cependant, les variations non linéaires de ces données rendent difficile d'établir un schéma précis, pour la gestion efficace des eaux souterraines (Tahmasebi, 2023, Osman *et al.*, 2022). Il devient donc indispensable d'introduire des techniques modernes liées à l'ingénierie artificielle (IA). De nombreux travaux menés dans le domaine de la prospection et de l'investigation de ressources en eaux souterraines ont exploité l'analyse décisionnelle multicritère (Mittra and Roy, 2023) avec des méthodes d'apprentissage automatique (Elmahdy, Ali and Mohamed, 2021) en vue d'évaluer la potentialité ainsi que d'identifier la qualité et la quantité en eaux souterraines. Elles ont pour avantage de traiter un volume important de données multidimensionnelles et complexes (Hai *et al.*, 2020, Beyaztas *et al.*, 2019).

Cependant, les données existantes, et notamment celles de terrain sont souvent limitées, particulièrement dans les pays en développement où les ressources en données sont insuffisantes rendant l'application de ces modèles et leur validation est une action un peu difficile (Fashae *et al.*, 2014). Afin d'améliorer les performances et surmonter certaines limitations de l'IA dans la gestion des eaux souterraines (Jiang *et al.*, 2017), des approches

combinant différentes techniques de Machine Learning avec de modèles conventionnels, classiques, physiques ou encore les connaissances des experts spécialisés ont suscité ces dernières années un intérêt croissant (Oliveira *et al.*, 2018).

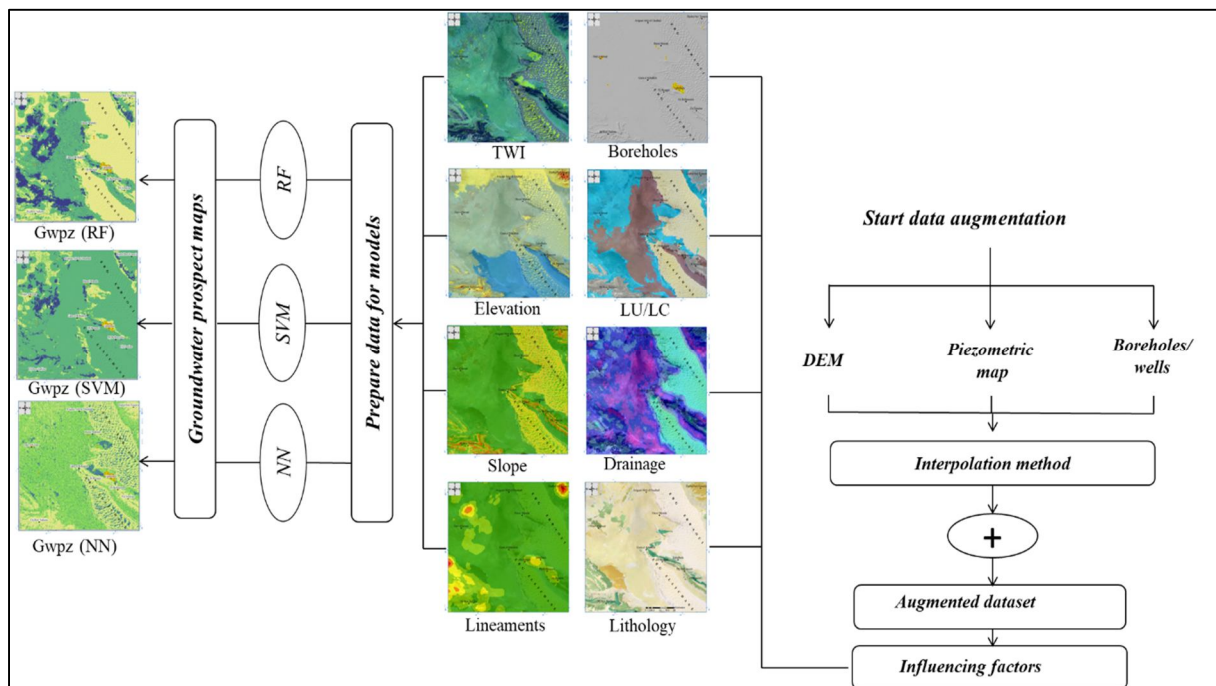


Figure 125: Différents algorithmes d'apprentissage automatique utilisés (SVM, NN, RF).

À titre d'exemple, un modèle d'intelligence artificielle (NN) pourrait être combiné avec un modèle physique (tel que les processus d'écoulement et de transport), pour évaluer la potentialité en eau souterraine (Adnan *et al.*, 2020). Cette approche hybride permet de pallier aux limitations liées à la rareté des données, l'interprétabilité du modèle et aux incertitudes (Nourani and Mousavi, 2016). Plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique tels que la Machine à Vecteurs de Support (SVM), le Réseau de Neurones artificiel (ANN), la forêt aléatoire (RF), l'Optimisation Multi-Objectifs (MOA), le système d'Inférence floue (FIS) sont également appliqués pour l'évaluation des ressources hydriques avec des résultats prometteurs.

3.1 Forêt aléatoire (Random Forest (RF))

La forêt aléatoire (RF) est une technique d'apprentissage d'ensemble très populaire, développée par (Breiman, 2001). Cet algorithme, conçu particulièrement pour la classification supervisée, est largement utilisé pour l'analyse des sols, ainsi que l'évaluation des ressources hydriques, ressources minérales, occupation du sol...etc. Le RF est adapté aussi bien pour la régression que pour les regroupements (classification) et permet l'identification d'interaction complexe entre variables (Belgiu and Drăguț, 2016).

Cette dernière s'articule principalement sur la création, à travers divers processus, d'une multitude de modèles d'apprentissage binaires appelés arbres de décisions (AD).

Ces derniers sont définis comme une représentation hiérarchique de la structure de données (fig.126) sous forme de séquences de tests en vue de la prédiction d'un résultat ou d'une classe (Ravi *et al.*, 2016). Ces tests s'effectuent au niveau des éléments de l'arbre de décision (AD) appelés nœuds, et qui se divise en trois catégories : un nœud racine qui accueille

les données d'entrée, un nœud interne qui fournit une décision déterminant la structure de l'arborescence qui suit, et un nœud terminal ou feuil qui renvoie la décision finale de l'AD. Le résultat du RF est déterminé par la combinaison des prédictions de plusieurs AD en une décision unique. Pour ce faire, deux principes distincts d'apprentissage d'ensemble peuvent être adoptés : le 'bagging' et le 'boosting'.

Le bagging consiste à générer plusieurs arborescences à partir des sous-échantillons aléatoires de la donnée d'entrée. Ces échantillons ont soumis un principe de remplacement : c'est-à-dire qu'il peut avoir des éléments répétitifs entre eux. Ainsi chaque AD traite une partie du problème et l'ensemble des décisions sont combinés en sortie de l'algorithme.

Le boosting quant à lui, génère une structure séquentielle où chaque AD tente de corriger les erreurs des modèles d'apprentissages qui lui précèdent.

Ces deux méthodes réduisent l'erreur faite par une estimation unique en combinant les résultats de plusieurs arbres de décisions offrant ainsi une plus grande stabilité au modèle.

En pratique deux paramètres du RF sont déterminés empiriquement par l'utilisateur consistant en nombre d'arbres (K) et le nombre de variables prédictives pour diviser les nœuds (m). Les variables prédictives peuvent être de type catégoriel (qualitatif) ou de type numérique (quantitatif). Lors de processus de création d'un arbre de décision, l'objectif principal est de maximiser l'homogénéité des nœuds internes, en fonction d'une mesure d'impureté, ou l'impureté de Gini est utilisée pour les tâches de classification, tandis que la variance est employée pour les tâches de régression.

Dans cette étude, le RF est utilisé dans le cadre d'une classification. De ce fait, l'impureté de Gini est employée. Considérons un ensemble de données D_t qui contient des échantillons répartis en C classes. La probabilité à un nœud t que ces échantillons appartiennent à la classe i est notée p_i .

$$p(i | t) = \frac{N_{i,t}}{N_t}$$

où $N_{i,t}$ est le nombre d'échantillons de la classe i dans le nœud t , et N_t correspond au nombre total d'échantillons dans le nœud.

L'impureté de Gini de l'ensemble est donnée par (Zoli, 1999) :

$$\text{Gini}(D_t) = 1 - \sum_{i=1}^C p_i^2 \quad (6.17)$$

où p_i correspond à la proportion d'éléments de la classe i dans le nœud t , et C es le nombre de classes.

Le RF est originellement utilisé comme un algorithme de 'bagging' et c'est ainsi d'ailleurs que nous l'employant dans notre travail. Par conséquent, une fois l'arborescence construite, les prédictions finales sont déterminées par un vote à la majorité entre les résultats des différents AD (Wen and Hughes, 2020).

L'avantage du 'bagging' est que la proportion d'erreurs de classification par rapport aux éléments Hor-Sac (éléments non sélectionnés lors du sous-échantillonnage), notée OOB, peut être calculé. Cette erreur mesure la précision du modèle en utilisant les observations non incluses lors de sa construction. L'erreur Hor-Sac (OBB) se calcule comme suit :

$$\text{OOB error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1(\hat{y}_i \neq y_i) \quad (6.18)$$

où $1(\hat{y}_i \neq y_i)$ est l'indicateur qui vaut 1 si la prédiction \hat{y}_i de l'arbre pour la donnée i es incorrecte et 0. Il s'agit d'une estimation non biaisée permettant de tester le modèle RF.

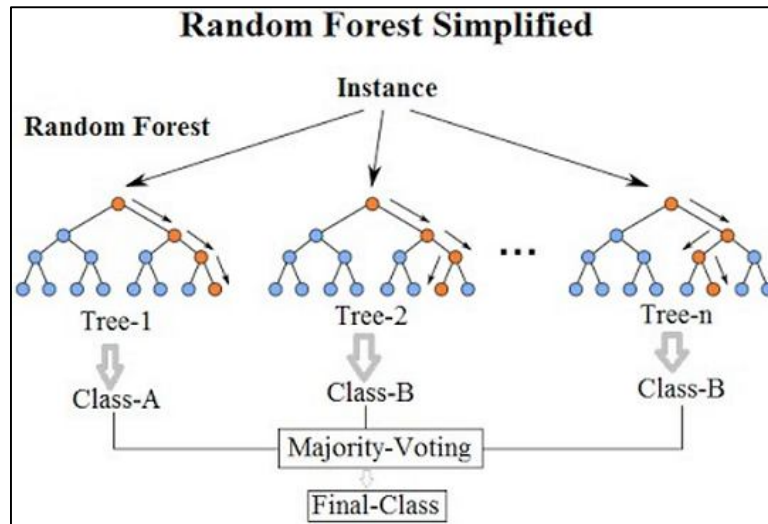


Figure 126: Forêt aléatoire (Random Forest : RF)¹⁷.

Le RF présente plusieurs avantages, notamment le fait qu’il ne nécessite aucune mise à l’échelle, transformation ou modification préalable des données. Ceci en fait un algorithme robuste à une large gamme de structure de donnée.

Un autre avantage du RF est sa capacité de généralisation avec l’augmentation du nombre d’arbres de décision (AD). En effet, l’erreur Hors-Sac (OOB) devient plus stable au fur et à mesure que le nombre d’arbres de décision (AD) générés dans le modèle augmenté (Yang *et al.*, 2022).

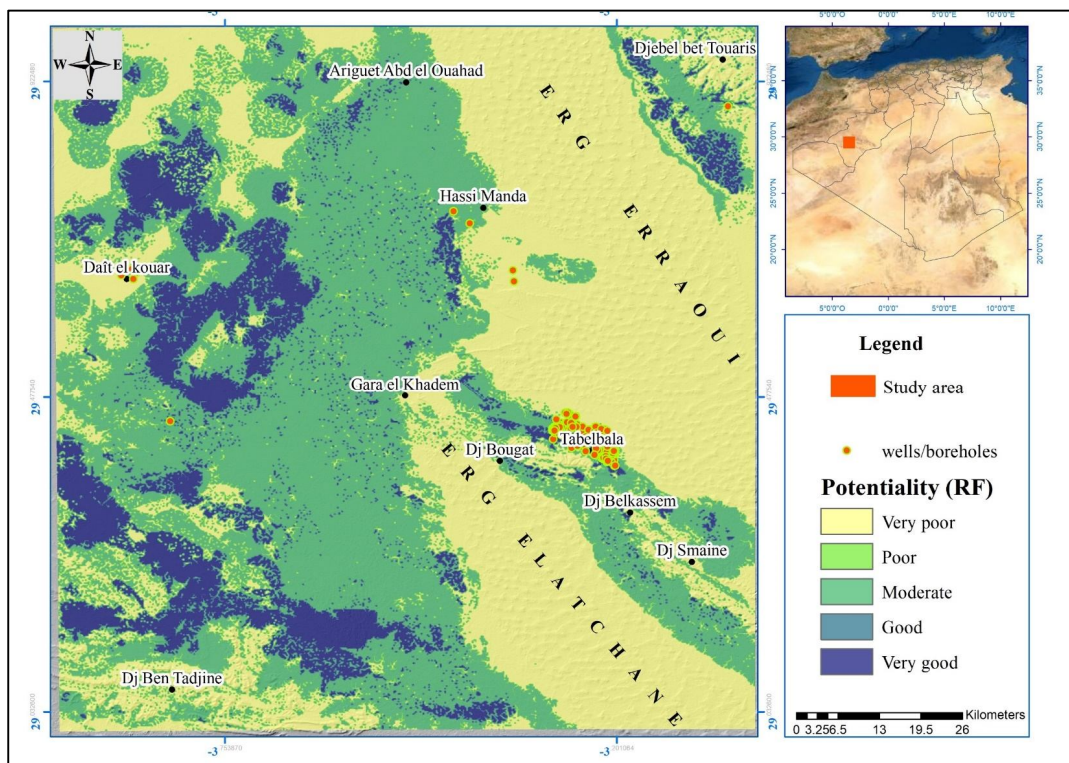


Figure 127: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (RF).

17 « <https://www.nikodez.fr/single-post/2018/07/02/for%C3%AAts-al%C3%A9atoires> ».

3.2 Réseau de Neurones (NN Neurone network)

Les réseaux de neurones représentent une technique d'apprentissage particulièrement performante pour modéliser des relations linéaires ou non linéaires entre des paires d'entrée et de sortie. Ces relations sont identifiées par une architecture composée de plusieurs couches (fig.128) : une couche d'entrée, des couches cachées intermédiaires et une couche de sortie. Dans le cas des réseaux de couches multiples, ces derniers exploitent des représentations simplifiées générées par les couches précédentes pour construire des représentations de plus en plus complexes dans les couches suivantes (Goodfellow, 2016).

La particularité des NN réside dans sa capacité à fournir des résultats prédictifs satisfaisants, même lorsque les données disponibles sont limitées (Yi *et al.*, 2020). En effet, grâce à sa structure hiérarchique et à sa capacité d'apprentissage, un réseau de neurones artificiel pourrait extraire des caractéristiques pertinentes à partir d'un petit ensemble de données, en optimisant un ensemble de paramètres. L'objectif étant de modéliser les relations essentielles entre les entrées et les sorties.

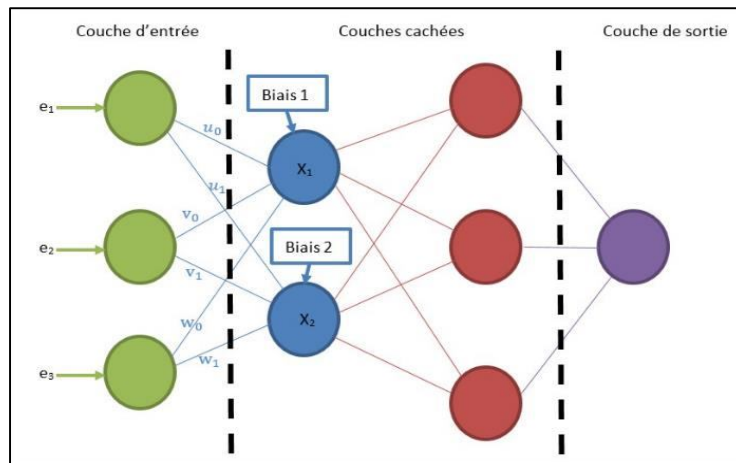


Figure 128 : Principe de Réseau de Neurones (NN)¹⁸

Un réseau de neurones est une méthode de calcul inspirée des études sur le fonctionnement du cerveau humain et des systèmes nerveux. Ces modèles empiriques non linéaires sont constitués d'unités de traitement appelées neurones, qui interagissent et collaborent pour résoudre un problème spécifique après une phase d'apprentissage basée sur des données d'entrée et de sortie. Chaque neurone est équipé d'une fonction d'activation jouant un rôle central dans le traitement d'information.

Les données d'entrée sont introduites dans le réseau par le biais d'une couche d'entrée, puis transmises aux couches cachées où s'effectue le traitement grâce des connexions pondérées par des poids synaptiques. Le résultat final est ensuite envoyé à une couche de sortie. Les paramètres du réseau tels que la fonction d'activation, les connexions entre neurones et les poids synaptiques déterminent les valeurs de sorties générées notamment dans le cadre d'un apprentissage supervisé.

¹⁸ « <https://si.blaisepascal.fr/1t-reseaux-de-neurones/> ».

Les modèles de réseaux de neurones se différencient par leur architecture et les règles d'apprentissage qu'ils adoptent. Parmi ces modèles, la perception monocouche qui se distingue par sa simplicité agit comme un classificateur linéaire reliant les entrées et les sorties du réseau. En hydrogéologie, les réseaux de neurones les plus couramment utilisés sont :

a) *Réseaux de neurones artificiels (ANN)*

Les réseaux de neurones artificiels (RNA), tels que la perception multicouche (MLP), représentent une méthode largement utilisée, capable de modéliser les relations complexes entre les facteurs de conditionnement et les réponses associées. Par rapport aux méthodes statistiques classiques, les RNA offrent plusieurs avantages notamment une grande précision, une capacité d'autoapprentissage et une robustesse élevée (Yilmaz, 2010). Structurellement, un RNA typique à trois couches se compose d'une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie (Yi *et al.*, 2020), comme illustré dans la figure 128. Chaque couche contient un ou plusieurs neurones, reliés entre elles par des connexions pondérées par des poids synaptiques. Ces poids sont ajustés en continu par l'algorithme d'apprentissage suivant une technique de rétropropagation.

Théoriquement, un réseau de neurones simple est doté d'une seule couche cachée est suffisant pour simuler la plupart des fonctions complexes, à condition que le nombre de neurones dans la couche soit adéquat (Hornik, 1993).

Dans le cadre de cette étude, un MLP possédant une seule couche cachée avec 200 neurones utilisés. De plus, pour optimiser l'entraînement du modèle, une couche de normalisation par lot a été ajoutée après la couche cachée.

La couche d'entrée représente les facteurs de conditionnement, tandis que la couche de sortie permet de modéliser la relation complexe entre les zones potentielles et ces mêmes facteurs de conditionnement.

b) *Réseau de neurones convolutif (CNN)*

Le réseau de neurones convolutif unidimensionnel (1D CNN) est une variante des réseaux de neurones convolutifs conçue principalement pour analyser des données unidimensionnelles (1D), telles que les données textuelles et les séries temporelles. Un 1D CNN typique est constitué une couche d'entrée, d'une ou plusieurs couches de convolution, de couches de regroupement ("Pooling"), d'une couche entièrement connectée et d'une couche de sortie. Plus précisément, une couche de convolution est utilisée principalement pour extraire diverses caractéristiques de données en lien avec la cible. Tandis qu'une couche de regroupement réduit efficacement la quantité d'information en une matrice unidimensionnelle tout en préservant les informations essentielles.

Enfin, la couche entièrement connectée agit comme un classificateur, utilisant les caractéristiques de données extraites afin de générer des prédictions. La classe ayant la probabilité la plus élevée est sélectionnée en sortie du réseau.

Dans cette étude, une structure simplifiée a été adoptée comprenant une seule couche de convolution, une couche de regroupement et une couche entièrement connectée pour construire le modèle 1D CNN. De plus, une couche de normalisation par lot a été ajoutée après la couche de convolution et la couche entièrement connectée, afin de réduire les problèmes de surapprentissage (surajustement) du réseau. Ce phénomène se produit lorsque le modèle

apprend trop bien des données d'entraînement, mais donne de mauvais résultats sur de nouvelles données tests. Dans cette optique, une couche de régularisation par abandon ("dropout") avec un taux de 0,5 a été ajoutée après la couche entièrement connectée afin de favoriser un apprentissage plus généralisé du 1D CNN.

c) *Réseaux de neurones récurrents (RNN)*

Les réseaux de neurones récurrents (RNN) sont particulièrement adaptés aux traitements des données séquentielles, telles que le langage ou des données audio ou les séries temporelles. Contrairement aux autres types de réseau de neurones, les RNN tiennent compte des relations implicites entre les éléments successifs et des données séquentielles. En effet, dans les réseaux classiques, les unités d'une couche sont indépendantes et non connectées entre elles, ce qui ne permet pas de capturer la dépendance, notamment temporelle, entre les données. Les RNN se particularisent par leur architecture, où chaque unité de la couche cachée peut mémoriser et utiliser les unités des intervalles de temps précédents. En d'autres termes, la sortie actuelle (Y_{t+1}) est influencée non seulement par l'entrée actuelle (X_{t+1}), mais aussi par les informations passées par provenant des éléments précédents de la séquence (X_t, X_{t-1} etc). Cette capacité à intégrer des informations historiques permet aux RNN d'analyser des séquences de différentes longueurs et de capturer des dépendances temporelles complexes.

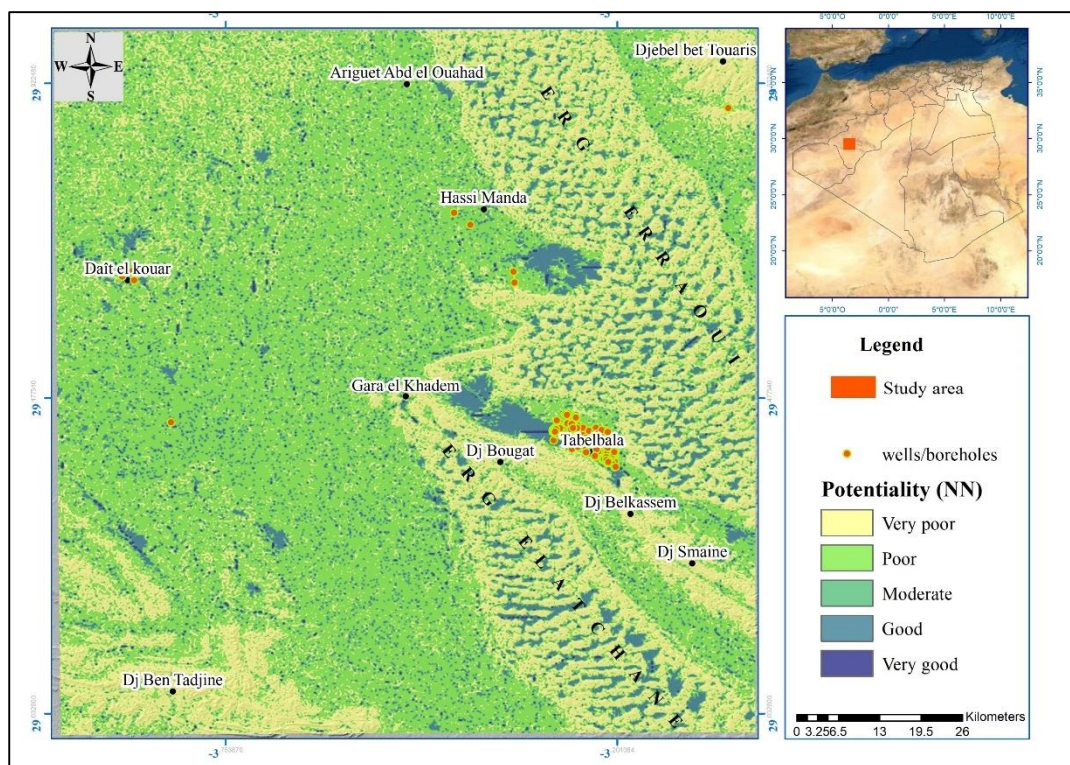


Figure 129: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (NN).

Dans cette étude, les facteurs conditionnant la potentialité ont été traités comme des données séquentielles unidimensionnelles, puis analysées à l'aide d'un modèle RNN possédant une couche cachée.

Le modèle génère une sortie multiclassées comprenant cinq classes, indiquant la présence ou l'absence du potentiel hydrique. Afin de limiter le risque de surapprentissage, une

régularisation par abandon ("dropout") avec un taux de 0,5 a été appliquée après la couche cachée.

3.3 Machine à vecteur de support (SVM support vector machine)

Les machines à vecteurs de support, ou *Support Vector Machines* (SVM) sont des algorithmes d'apprentissage supervisé (fig.130), particulièrement adaptés à la résolution des problèmes de classification et de régression, introduits par (Vapnik, 1995).

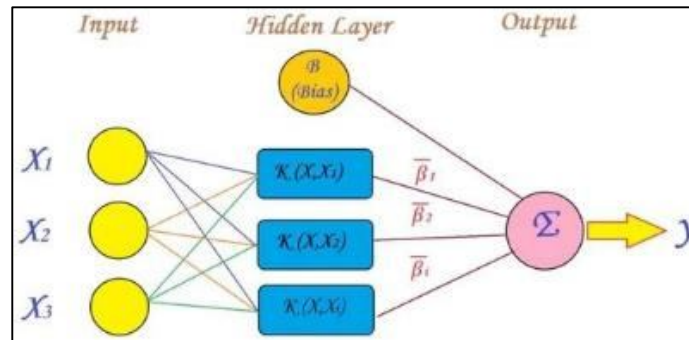


Figure 130: Principe de Machine à vecteur de support (SVM).

Leur principe repose sur la recherche d'hyperplans optimaux qui séparent les différentes classes de données dans un espace multidimensionnel, tout en maximisant la marge entre les classes pour améliorer à la fois la précision et la capacité de généralisation du modèle (Amari and Wu, 1999). En raison de ses performances élevées, le SVM est largement utilisé pour résoudre divers problèmes liés à la gestion et la cartographie des ressources en eau, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des eaux souterraines (Khan and Coulibaly, 2006, Cimen, 2008, Cimen, 2008, Liao, Xu and Wang, 2011, Kisi *et al.*, 2015).

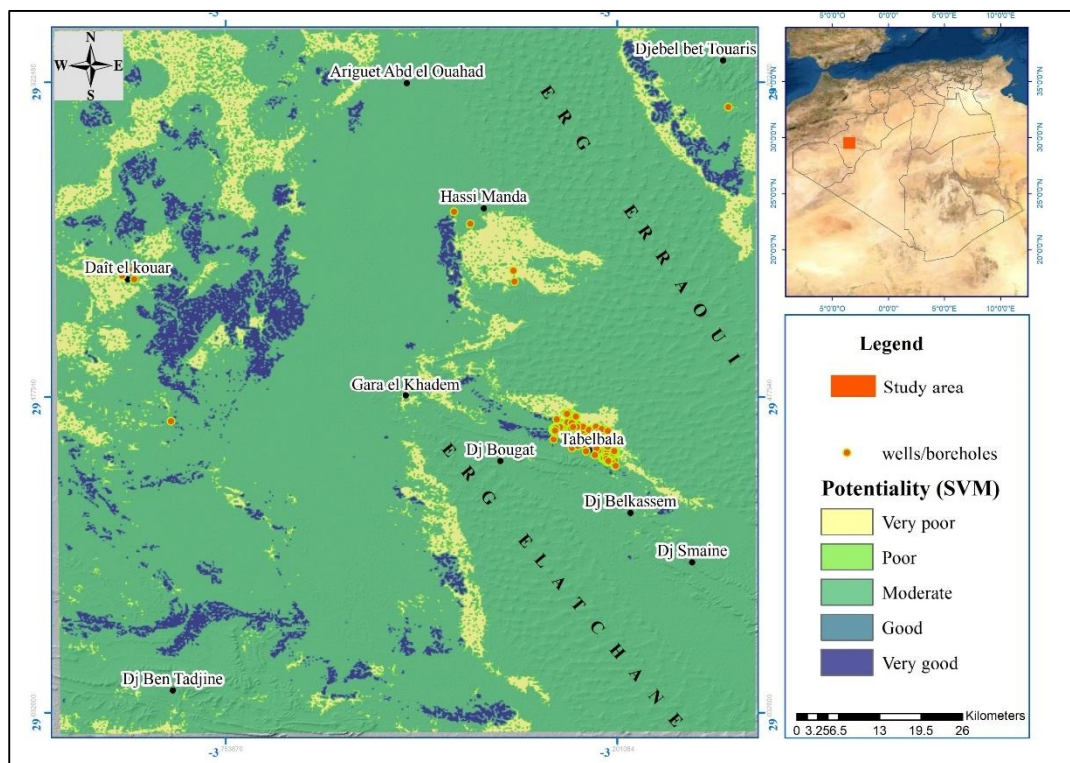


Figure 131: Carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Tabelbala (SVM).

Dans les zones arides et semi-arides, la cartographie du potentiel en eaux souterraines est devenue une priorité face aux changements climatiques extrêmes et des longues périodes de sécheresse ces dernières décennies.

La nécessité d'élaborer des cartes fiables des zones potentielles en eaux souterraines est la principale préoccupation des travaux menés.

4. Augmentation des données

Au cours de cette étude, des méthodes d'apprentissage automatique sont utilisées pour identifier les zones potentielles à l'aide de données de terrain (forages, puits et niveau statique et dynamique...). Pour améliorer la robustesse des méthodes, le jeu de données est augmenté en fonction du niveau piézométrique des eaux souterraines. Sept couches thématiques (lithologie, fracturation, réseau hydrographique, altitude, pente, exposition des versants, indice d'humidité topographique, occupation du sol) sont préparées pour caractériser l'ensemble de la zone d'étude. Sur la base des données de validation et l'analyse de la courbe ROC, le classificateur forêt aléatoire (RF) a montré les meilleures performances ($AUC = 0,867$), en plus de sa stabilité dans la prédiction de nouvelles données.

La carte finale, produite par le RF, présentant les zones potentielles en eau souterraine pourrait être utilisée par les décideurs pour améliorer la gestion des ressources en eau dans la région en question.

L'exploitation de la technologie spatiale dans l'évaluation des ressources hydriques et notamment le potentiel en eau souterraine, suscite d'un grand intérêt en raison de son faible coût et sa large couverture. Au cours de ce travail, la carte de potentialité couvrant une zone supérieure à 12321 km², est réalisée à partir des sept couches thématiques citées précédemment à travers l'utilisation de la méthode d'apprentissage automatique (Machine Learning ML).

Grâce à leurs propriétés, les techniques d'apprentissage automatique (ML) se révèlent être des outils puissants dans la modélisation ainsi que l'analyse des phénomènes complexes. Contrairement aux méthodes classiques et traditionnelles, qui s'appuient sur des hypothèses et des modèles prédéfinis, les approches de ML nécessitent la compilation d'un certain nombre d'instances spécifiques provenant des données exogènes telles que les points d'eau (puits, forages et sources).

De nombreux travaux (Kumar, Dwivedi and Gaur, 2021, Scantlebury *et al.*, 2020, Díaz-Alcaide and Martínez-Santos, 2019) ont démontré que les techniques d'apprentissages automatiques sont plus performantes que les méthodes classiques et prédictives telles que l'analyse multicritères (AHP et Rapport de fréquence et autres...).

Ces avantages s'expliquent par leurs performances et capacités à déterminer les relations complexes et non linéaires entre les couples de variables entrée-sortie, ce qui est essentiel dans des phénomènes naturels tels que les eaux souterraines.

Cependant, la performance et la robustesse des méthodes d'apprentissage automatique dépendent directement de la quantité et de la qualité de l'ensemble de données d'apprentissage disponibles.

Dans le domaine des eaux souterraines, les données présentent souvent des lacunes significatives étant à la fois rares et dispersées géographiquement. Cette fragmentation des données rend nécessaires leur enrichissement, en utilisant a technique d'augmentation des données qui est souvent utilisée dans le domaine de traitement d'image (Scantlebury *et al.*, 2020,Kniaz *et al.*, 2021). Cette technique d'augmentation de données consiste principalement

à augmenter et à amplifier le volume de données du jeu de données en transformant le volume original X_0 :

$$X_{augm} = g(X_0) \quad (6.19)$$

où g désigne la transformation.

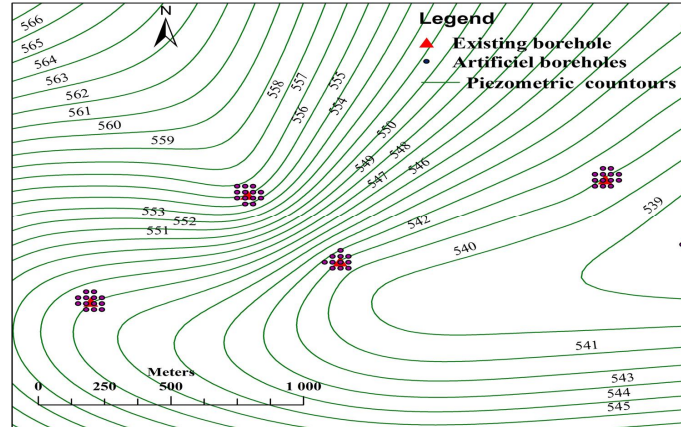


Figure 132: Technique d'augmentation des données initiales proposée (Djerida, Bennia and Kebir, 2023).

Pour ce faire, nous avons mis en place une stratégie qui repose à sur l'exploitation de la carte piézométrique (Groundwater surface level, GSL). Cette approche nommée la pondération par la distance inverse (IDW) (Watson, 1985), permet de mieux caractériser les points des données existants ainsi que leur voisinage (fig.132). Considérant x_1, x_2, \dots, x_n un ensemble d'entrées initiales. Le niveau piézométrique (GSL) en un nouveau point, x est déterminé à partir de l'ensemble des points connus x_i qui lui sont les plus proches.

La formule de l'IDW quand appliquée sur la carte piézométrique s'exprime de la manière suivante :

$$GSL(x) = IDW(GSL(x_1), GSL(x_2), \dots, GSL(x_n)) \quad (6.20)$$

où IDW est la méthode pondérée par la distance inverse (Watson, 1985) attribuant plus de poids aux points les plus proches du nouveau point calculé x .

Pour augmenter l'ensemble de données initial, l'équation suivante doit être satisfaite :

$$d(x, x_i) \leq d_0, \forall i \in [1, n] \quad (6.21)$$

où $d(x, x_i)$ est la distance euclidienne entre x, x_i , et d_0 est un seuil prédéfini qui détermine la limite au-delà de laquelle un point connu x_i n'est pas pris en compte.

Construction et prédiction de modèles

Une fois le jeu de données augmenté, les entités sont affectées à chaque échantillon. Soit X la matrice de données contenant les caractéristiques :

$$X_{m,l} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,l} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \dots & x_{m,l} \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

où $x_{i,j}$ est la valeur du point i (point d'eau) pour la caractéristique j (carte thématique). Dans notre cas, $l = 7$ qui correspond au nombre de couches thématiques tandis que m est la taille augmentée du jeu de données (nombre de points d'eau).

La figure 133 illustre en détail la construction de la matrice de caractéristique en fonction des valeurs attribuées à chaque forage. De manière similaire la variable cible est construite en attribuant une classe à chaque forage, conformément valeurs piézométriques classées.

Elles peuvent exprimer comme suit :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

où $y_i \in [1,5]$.

Il est important de noter que la matrice de caractéristiques peut être remplie avec des caractéristiques classifiées (CS) ou non classifiées (NC). Dans le premier cas (CS), les valeurs des couches thématiques classées selon leur distribution, et la matrice de caractéristiques est remplie avec les numéros de classes correspondants. Tandis que, dans le cas (NC), les valeurs des cartes thématiques sont directement attribuées à la matrice de caractéristiques sans classification préalable.

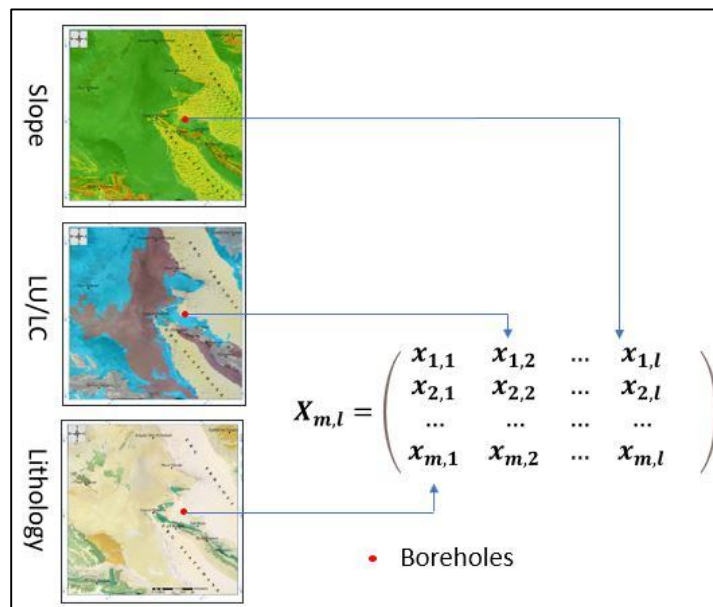


Figure 133: Construction de la matrice de caractéristiques.

Pour construire un modèle entre la matrice de caractéristique (fig.133) et la variable cible, trois algorithmes d'apprentissage automatique sont utilisés. La machine à vecteur de support (SVM), la forêt aléatoire (RF), et le réseau de neurones (NN).

- Le SVM a été initialement développé pour les cas linéairement séparables. Il vise à trouver un hyperplan qui sépare les classes en maximisant la marge d'erreur entre elles. Le problème pourrait être formulé comme suit (Mammone, Turchi and Cristianini, 2009).

$$\min \langle w, w \rangle \text{ s.t. } y_i (\langle x_i, w \rangle + b) - 1 \geq 0 \quad (6.24)$$

où w est le vecteur dont la norme doit être minimisée $\min \| w \|$, et $b \in \mathbb{R}$

Si les données ne sont pas linéairement séparables, un SVM non linéaire pourrait être appliqué pour projeter les données dans un autre espace de caractéristiques où le principe du SVM linéaire peut être utilisé.

- Le RF est une méthode d'ensemble basée sur des arbres de décision qui repose particulièrement sur plusieurs variables. De manière générale, l'algorithme vise à minimiser la valeur attendue de la perte $E(X, Y)$. (Cutler, Cutler and Stevens, 2012).

$$\min E_{XY}(L(Y, f(X))) \quad (6.25)$$

où L est la fonction de perte et f est la fonction de prédiction. Pour les arbres de classification, plusieurs divisions sont utilisées pour caractériser les variables.

- De même, les réseaux de neurones visent à trouver le modèle M , composé de plusieurs nœuds (neurones artificiels), permettant de minimiser une fonction de perte spécifique comme illustré par (Gurney, 2018).

$$\min L(L(M(X), Y)) \quad (6.26)$$

où $M(X)$ Représente les prédictions du modèle pour les données X .

Y est la variable cible, correspondant aux classes des échantillons.

L est une fonction de perte

Une fois le modèle M entraîné, il pourrait utiliser pour effectuer la prédiction des classes de nouveaux points d'échantillonnages. Cette prédiction permet d'établir la carte de potentialité en eau souterraine qui catégorise la zone d'étude en fonction de niveaux piézométriques (GSL).

I. Résultats, validation et évaluation de la performance des approches utilisées

Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'influence de chaque facteur et de qualifier sa contribution à la détermination des zones potentielles en eau souterraine. Ces résultats sont présentés dans diverses figures (123,124,127,129,131), qui illustrent les zones du potentiel en eaux souterraines établies à partir de différentes méthodes utilisées (Fr, AHP, RF, NN et SVM) et des analyses effectuées. Ces cartes ont été classées en cinq catégories de potentialité (très forte, forte, moyenne, faible et très faible potentialité) en utilisant la méthode de discrétisation 'seuils naturels' (Naghibi *et al.*, 2017).

Il est à souligner que, les zones identifiées ayant de très fortes potentialités en eau souterraine sont principalement associées à une pente modérée, à des valeurs d'élévation relativement faible et à une lithologie favorable composée essentiellement de sables, de conglomérats et d'alluvions. Ces zones se situent notamment au sud-ouest du Djebel Ben Touaris, à Tabelbala, au sud-est ainsi qu'au nord de Dait El Kouar et du Djebel Ben Tadjine.

Les zones de haute potentialité, quant à elles, elles se situent particulièrement au sud-ouest de l'Erg El Atchane, à Erg Er Raoui et au Djebel Ben Touaris, avec des altitudes qui varient entre 500 et 600 mètres. Elles se caractérisent par une forte densité de linéaments et une pente douce. En revanche, les zones de potentialité modérée, représentent la proportion la plus importante, sont principalement marquées par des zones à pente relativement modérée avec des linéaments mineurs. Elles correspondent à la partie inférieure du relief supérieur dont le caractère lithologique est composé d'un sable éolien à des altitudes allant de 398 à 550m et un taux de TWI moyen à faible. Les zones de faible potentialité sont situées dans la partie supérieure du relief (zones de recharge). Elle se caractérise par une faible densité de linéaments, une élévation faible et recouverte par une formation protérozoïque.

Il est à signaler que la forte potentialité près de Dait El Kouar s'explique par la forte densité de linéaments (faille tectonique principale). Elle correspond à la partie inférieure du

front et du relief supérieur dont le caractère lithologique est composé de dépôts quaternaires (sables, limons, et alluvions) à des altitudes variant de 398 à 550 mètres. D'un autre côté, les zones de collines se regroupent en aires de ruissellement caractérisées par une très forte pente et une faible infiltration avec une potentialité très faible. Dans ces régions, les eaux souterraines sont limitées aux vallées étroites et sont associées à des failles et fractures (linéaments).

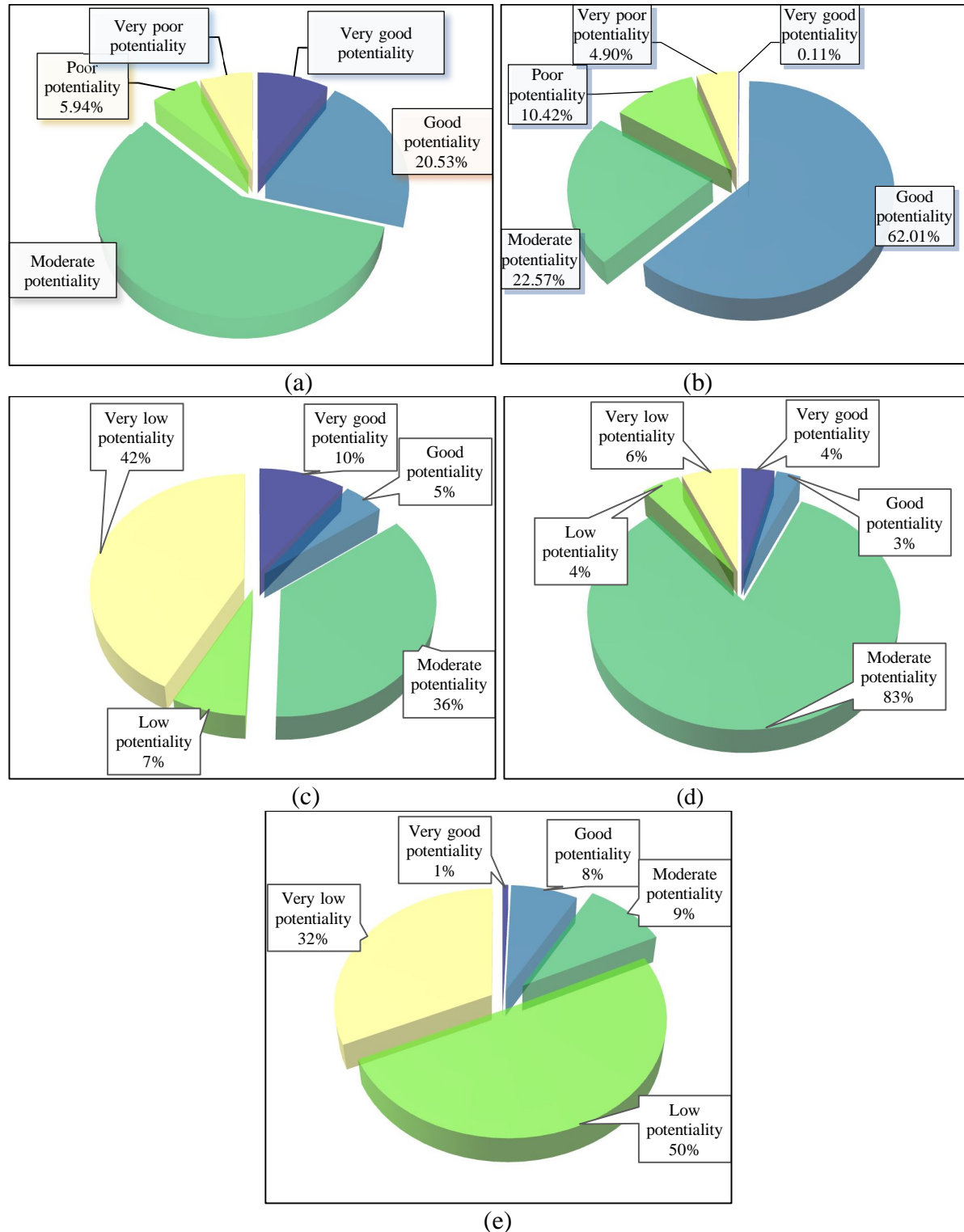


Figure 134: Pourcentage des différentes zones de potentialité spatiale de la zone d'étude. (a) AHP, (b) Fr, (c) RF, (d) SVM et (e) NN.

En ce qui concerne l'implantation des puits, la plupart d'entre eux sont concentrés sur Erg Er Raoui, reconnue comme un réservoir d'eau potable. Les plus connus sont Hassi El Hariga, Hassi Aouissia et Hassi El Kheïl (MEKKAOUI, 2015).

L'évolution des différentes techniques de cartographie hydrogéologique, notamment l'intégration des systèmes d'information géographique, de la télédétection et des algorithmes d'apprentissage automatique a conduit à des progrès substantiels et des avancées significatives dans la détermination des ressources hydriques.

Cependant la vérification et la validation de terrain sont toujours nécessaires en raison des énormes marges d'erreur associées aux modèles utilisés et aux algorithmes automatisés appliqués. La validation des résultats issus de différents modèles utilisés est par conséquent essentielle pour la bonne cartographie de la potentialité en eau souterraine.

Dans cette section, plusieurs techniques (AHP, Fr, RF, NN et SVM) ont été testées sur une zone aride puis comparée aux données recueillies sur terrain, afin de proposer une évaluation précise et globale.

Afin d'offrir une évaluation fiable, des mesures de terrain, basée sur débits de forage bien répartis sont utilisées sur l'ensemble de la région d'étude. Il est également important d'illustrer l'exactitude des différentes couches d'informations préparées préalablement.

Pour ce faire, l'analyse de la courbe ROC (mesure la capacité du modèle à classer correctement les sites potentiels), ainsi que le coefficient Kappa (évalue la concordance entre les prédictions du modèle et les données réelles) sont utilisées pour évaluer la distribution spatiale des différents puits (222 puits et forages obtenus auprès de l'Agence nationale des ressources hydriques ANRH) en comparaison avec la carte des zones potentielles préparées (Panahi *et al.*, 2020, Kumar, Dwivedi and Gaur, 2021).

Les résultats sont résumés dans le tableau1, illustrant une analyse comparative de performances de diverses approches, notamment les méthodes prédictives traditionnelles (AHP et Fr) et des algorithmes d'apprentissages automatiques, tels que la Forêt aléatoire (RF), le Réseau de Neurones (NN) et la Machine à vecteur de support (SVM). Ces performances sont évaluées l'aide des deux principaux indicateurs de validation principaux : l'AUC (Aire sous la courbe ROC) et le coefficient Kappa (κ). Ces métriques, largement employées dans les travaux d'investigations hydrogéologues, permettant de mesurer la précision des différents modèles utilisés (Panahi *et al.*, 2020).

La courbe ROC (fig.135) est un outil permettant d'effectuer une comparaison des performances des modèles en relation avec différents ensembles de variables prédictives (en plusieurs courbes). Cette représentation repose sur les seuils distinguant les sites potentiels des sites non potentiels. Sur cette courbe, l'axe des abscisses correspond à la spécificité (taux de faux positif), tandis que l'axe des ordonnées représente la sensibilité (taux des vrais positifs), traduisant le nombre de pixels liés aux sites correctement classés comme potentiels. Plus la courbe se rapproche aux coins supérieurs gauches du graphique, plus la proportion des sites correctement classés comme potentiels est importante.

La sensibilité et la spécificité sont calculées par les formules suivantes :

$$\text{Sensibilité} = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (\text{Hosmer Jr, Lemeshow and Sturdivant, 2013}), \quad (\text{Javadi et al., 2022}) \quad (6.27)$$

$$\text{Spécificité} = 1 - \text{taux_faux_Positifs} = 1 - \frac{FP}{FP+TN} \quad (6.28)$$

où TN : désigne le nombre de pixels correctement classés hors classe ; FP : est le nombre de pixels non correctement classés dans la classe ; FN : correspond au nombre de pixels non correctement classés hors classe ; TP : lié au nombre de pixels correctement classés dans la classe.

Pour évaluer la performance des modèles de cartographie utilisés, l'indicateur l'Air sous la Courbe ROC (Area Under the Curve) est employé. En pratique, les valeurs de l'AUC varient généralement entre 0 et 1. Les valeurs supérieures à 0.7 considérées comme acceptables (Hosmer Jr, Lemeshow and Sturdivant, 2013). Ce dernier se calcule en fonction des totalités situées entre les différents seuils (Beguería, 2006) et s'exprime par la formule suivante :

$$AUC = \sum_i^{n+1} \frac{\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 * (y_i + y_{i+1})}}{2} \quad (6.29)$$

où x_i : est la spécificité et y_i : correspond à la sensibilité au seuil i .

L'analyse sans augmentation des données révèle clairement que l'exploitation d'un l'ensemble de données sans une stratégie d'augmentation appropriée conduit à des performances peu fiables, en particulier lorsque l'on considère le coefficient Kappa. Ce dernier illustre des valeurs faibles ($\kappa \leq 0,27$), pour les trois algorithmes d'apprentissage automatique évalué, indiquant une faible concordance entre les prédictions et les données réelles.

En revanche, les valeurs AUC (fig.135) sont quant à elles élevées ($AUC \geq 0,86$) est pratiquement similaires. Nous les considérons par conséquent non pertinentes dans ce contexte.

Cependant, après augmentation des données, les performances sur le jeu de données augmenté sont satisfaisantes indiquant une amélioration apparente des résultats (s'améliorent d'une manière claire). Les valeurs de Kappa augmentent progressivement pour atteindre des seuils acceptables ($\kappa \geq 0,38$) et les valeurs d'AUC deviennent légèrement supérieures ($AUC \geq 0,867$), mettant en relief l'impact et l'influence de l'augmentation des données sur les précisions et la robustesse des modèles utilisés (tab.26).

Tableau 26: Comparaison entre les méthodes d'apprentissage automatique à partir de l'AUC et κ .

	RF		NN		SVM		AHP	Fr
Données	AUC	Kappa (%)	AUC	Kappa (%)	AUC	Kappa (%)	AUC	AUC
	0.867	0.38	0.86	0.273	0.839	0.368	0.891	0.909

Parmi les modèles testés et les algorithmes implémentés, l'algorithme RF se distingue par ses performances, offrant les meilleurs scores à la fois pour AUC et Kappa. Tandis que le SVM est classé comme le moins performant. Les performances des réseaux de neurones (NN) ainsi que des autres approches AHP et Fr se situent entre ces deux extrêmes, illustrant des résultats intermédiaires.

Il est à signaler que le schéma de traitement utilisé dans cette investigation n'est pas exclusif à la région Tabelbala, mais peut également être appliqué dans d'autres régions ayant des caractéristiques lithologiques, morphométriques et climatiques identiques.

La recherche menée dans la zone considérée a permis d'obtenir de nouvelles données hydrogéologiques précieuses qui peuvent être utilisées dans les études de fluctuation des eaux souterraines afin de mieux comprendre le comportement des aquifères de la région. Elles pourraient également permettre une meilleure gestion, utilisation et approvisionnement des ressources naturelles, ainsi qu'un développement durable dans cette zone.

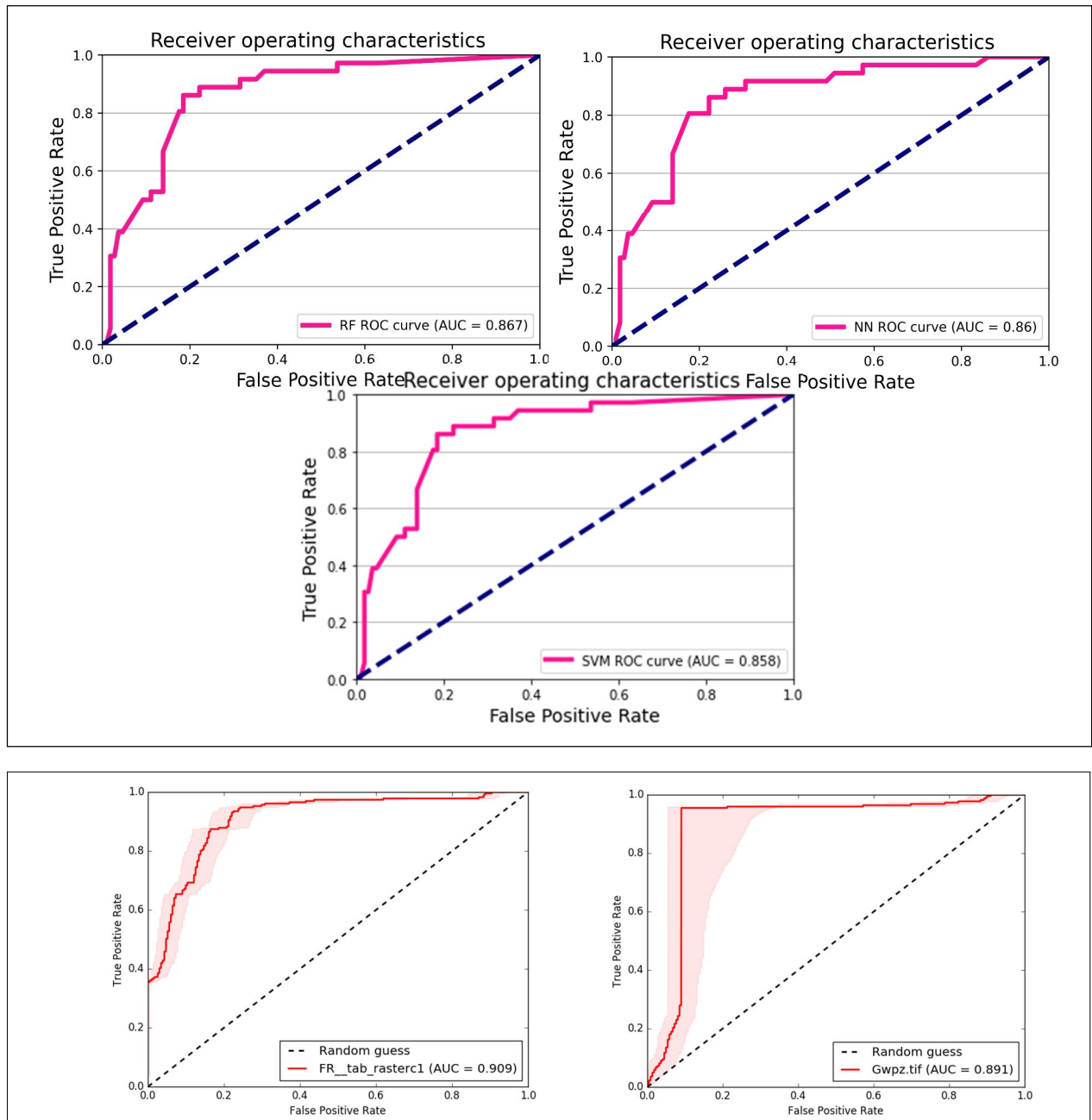


Figure 135: Courbes ROC correspondant aux différentes méthodes utilisées (AHP, Fr, RF, NN et SVM).

V. Conclusion

L'évaluation et la cartographie des eaux souterraines sont devenues essentielles dans la région désertique algérienne. En effet, la croissance rapide de la population du pays a proportionnellement augmenté les besoins en approvisionnement en eau que ce soit pour la population (alimentation en eau potable) ou bien pour l'activité agricole de la région. L'identification et la classification spatiale des zones prometteuses du point de vue hydrogéologique nécessitent un examen détaillé des données ainsi qu'un bon nombre des études préliminaires (géomorphologiques, géologiques, structural ... etc.).

Dans ce travail de thèse, une base de données numérique détaillée a été établie et préparée pour la région de Tabelbala en utilisant sept facteurs prédictifs par l'appui des

méthodes prédictives (AHP et Fr) et la mise en œuvre des techniques d'apprentissages automatiques (RF, NN et SVM). L'analyse de la potentialité a été initiée par la combinaison et l'intégration des divers facteurs de contrôle ou d'influence. La combinaison qui réunit ces facteurs prédictifs à savoir la lithologie, l'occupation du sol, la densité du réseau linéaire, la pente, la densité du réseau de drainage, l'élévation et l'indice d'humidité topographique s'avère être la meilleure combinaison possible pour notre région. Elle a permis en effet de prédire correctement environ 86 % des points d'eau démontrant ainsi des capacités prometteuses dans l'analyse des données orientées terrain.

Les résultats obtenus montrent que les cartes de potentialité en eaux souterraines pourraient être divisées en cinq catégories : très bonne potentialité, bonne potentialité, potentialité modérée, mauvaise potentialité, et très mauvaise potentialité.

La précision de cartes obtenues est validée à l'aide de l'analyse de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), ainsi que le coefficient de validation kappa, en tenant compte de la localisation des puits collectés sur le terrain (222 forages et puits). Les résultats mettent en évidence un coefficient Kappa de 0,38, indiquant que les méthodes et techniques proposées pourraient être utilisées comme un outil d'investigation de haute précision pour les ressources en eau souterraine, en particulier dans les zones où les données sont rares ou incomplètes. Les performances obtenues peuvent également confirmer qu'en l'absence de données de terrain, les techniques spatiales et les approches d'apprentissage automatique sont l'un des outils les plus efficaces pour déterminer les zones potentielles en eaux souterraines.

En fin, ce travail fournit une information complémentaire et une mise à jour numérique (base de données numérique) des différents facteurs déterminant la potentialité qui seront utilisées et augmentera la connaissance générale disponible pour la région de Tabelbala. Ces dernières peuvent par la suite réduire considérablement le coût et la durée d'exploration et d'investigation.

L'approche adoptée présente néanmoins certaines limites, notamment par rapport à l'échelle de travail, du fait de la résolution moyenne des données disponibles ; DEM (30 m), Landsat (30 m), et Sentinel 2 (10 m). En effet la gestion des opérations de forage doit être appuyée par des reconnaissances au sol ou autre source de données parallèles (Sondages électriques verticaux). Comme futurs travaux, il est donc prévu d'améliorer l'échelle de traitement, notamment via l'imagerie satellitaire optique (Alsat2 à 2,5 m en mode pansharpened), et également avec un modèle numérique de terrain de meilleure résolution (basé sur campagne topographique). En fin l'utilisation d'autres approches modernes (l'imagerie lidar) pourrait être envisagée pour améliorer les résultats.

Chapitre VII

Hydrochimie

I. Introduction

L'eau est une ressource naturelle essentielle, indispensable au développement d'un pays et au fonctionnement de la société dans son ensemble, car aucune forme de vie n'est possible sans elle (Mishra, 2023). La communauté a besoin à des quantités d'eau pour satisfaire ses différents besoins ainsi pour la survie non seulement de la vie humaine, mais aussi de la vie animale et végétale (Wescoat and White, 2003). L'eau est nécessaire à la satisfaction de ces besoins devrait non seulement être en quantité suffisante, mais aussi de qualité adéquate (Gleick, 1996). Dans notre zone d'étude, les ressources hydriques souterraines sont exposées à des risques de pollution, ce qui constitue une source d'inquiétude tant pour la population locale que pour les organismes en charge de leur gestion, tels que l'ADE, le DRE et l'ANRH.

La dégradation de la qualité de l'eau a été constatée dans certaines zones, particulièrement celles où les activités agricoles sont intensives, ainsi que près d'anciennes mines et aux alentours des sites présentant des minéralisations (Akhtar *et al.*, 2021).

Une eau dont les paramètres physico-chimiques dépassent les normes établit qu'elles soient nationales (Algériennes) ou internationales (OMS), est généralement jugée impropre à la consommation humaine (Kenniche *et al.*, 2022).

Cette partie de l'étude a été dédiée particulièrement à l'analyse et à l'évaluation des paramètres physico-chimiques des eaux, considérées comme composante essentielle, et complémentaire pour toute étude hydrogéologique. Elle a été menée dans le but de garantir une sécurité sanitaire des ressources destinées à l'alimentation en eau potable en déterminant leur faciès chimique, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation.

Une cartographie hydrochimique a été effectuée dans le but de représenter la distribution spatiale de la minéralisation des eaux au sein de différentes unités hydrogéologiques de la région. Il convient de souligner que ces dernières années, les ressources hydriques, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des eaux souterraines, sont de plus en plus exposées à divers types de pollution (urbaine, industrielle et agricole). Ces dernières, en constante progression, représentent une menace sérieuse pour cette ressource précieuse (Singh *et al.*, 2024).

Dans ce contexte, une approche analytique informationnelle a été mise en œuvre afin d'établir un support cartographique. Ce dernier vise à permettre une zonéographie précise, intégrant l'évolution spatiale des différents paramètres physico-chimiques, l'identification de leur origine, ainsi que l'évaluation du degré d'impact des diverses sources de pollution. Cette cartographie a pour objectif de délimiter les zones en fonction de la qualité d'eau et d'identifier les régions où l'eau est de qualité admissible pour la consommation humaine.

L'analyse et l'interprétation de la zonalité Hydrochimique reposent particulièrement sur la classification génétique des eaux permettant de différencier et de distinguer les types d'eaux en fonction de leurs composantes prédominantes et leur tendance relative aux processus de transformation auxquels elles sont associées (Chapelle, 2000).

D'une manière générale, la concentration des éléments chimiques dans les eaux est largement influencée par la nature lithologique de l'encaissant (roches environnantes), les formations géologiques traversées au cours du trajet de l'eau, ainsi que par la durée de son séjour dans l'aquifère (SHUBE, 2011). D'autres facteurs influencent directement ou indirectement la qualité de l'eau, notamment les échanges hydriques entre les aquifères et l'eau de surface, les conditions climatiques ainsi que les activités anthropiques. Ces dernières, entre

notamment les pratiques agricoles intensives et les rejets des eaux usées, pouvant entraîner une augmentation significative en éléments chimiques.

Dans le cadre de l'étude menée, l'approche adoptée se focalise sur la spatialisation et l'analyse spatiale des différents acteurs (éléments chimiques) qui partagent la même étendue. Les données utilisées proviennent de diverses campagnes de prélèvements et d'échantillons réalisés sur différents points d'eau (forages et puits). Ces prélèvements, effectués des organismes spécialisés dans le secteur de l'eau, notamment l'ANRH et l'ADE de la wilaya, qui ont permis de collecter et de recenser les informations utiles. Une part significative des points d'échantillonnages est localisée au niveau du village de Tabelbala et ses environs, où environ 180 points d'eau repartis entre puits et forages, ont été identifiés et répertoriés. Cette analyse a porté sur plusieurs paramètres, tels que la résistivité, la température, le pH, ainsi que d'autres éléments caractéristiques spécifiques, conduisant à l'établissement d'une fiche signalétique pour chaque forage et point d'eau étudié.

Tableau 27: Standards et caractéristiques statistiques des points d'eau de la plaine de Tabelbala.

Élément/substance	Symbole	Intervalle des résultats	Normes algériennes	Normes OMS	Min	Max	Moyen	Ecart type	Aquifères Tabelbala
Température (°C)	T	22-23	25	-	22	23	22.5	0.7	√
Solides totaux dissous (mg/l ¹)	TDS	260 - 5046	1500	600-1000	260	5046	1414	837	×
pH	pH	6.05 - 8.04	6.5 - 9	6.5 - 8.5	6.05	8.04	7.51	0.26	√
Conductivité à 20°C (µs/cm ¹)	Cond	610-6690	<2800	1000	610	6690	2191	1319	×
Dureté totale (°F)	TH	22 - 255	200 mg/l en CaCO ₃	10	22	255	62.53	36.3	×
Calcium (mg/l ¹)	Ca ²⁺	54 - 473	<200	50	54	473	137.2	80.6	×
Magnésium (mg/l ¹)	Mg ²⁺	22.5 - 357	<150	75	13	380	78.16	51.6	×
Sodium (mg/l ¹)	Na ⁺	65 - 750	<200	200	24	850	203	150	×
Potassium (mg/l ¹)	K ⁺	4 - 304	<12	12	4	315	32.8	35.3	×
Alcalinité (mg/l ¹)	CaCO ₃	22-255	500	-	-	-	-	-	
Chlorures (mg/l ¹)	Cl ⁻	140 - 1162	<500	250	140	1162	322	229	×
Bicarbonates (mg/l ¹)	HCO ₃ ⁻	65 - 253	<250		65	253	118	24.2	√
Sulfates (mg/l ¹)	SO ₄ ²⁻	171 - 2126	<400	250	100	2400	518	345	×
Ammonium (mg/l ¹)	NH ₄	0.001- 0.25	0.5	0.5	0.001	0.25	0.029	0.037	×
Nitrites (mg/l ¹)	NO ₂	0.07-12.3	0.2	3	0	15	0.12	1.22	×
Nitrates (mg/l ¹)	NO ₃	6-135	50	50	6	135	54.53	20.68	×
Phosphate (mg/l ¹)	PO ₄	0.003-0.33	0.5	-	0.001	0.42	0.061	0.076	√

Une première mission de terrain a été réalisée en 2014, afin de prélever des échantillons dans le but de déterminer les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines de la région (tab.27). Les analyses physico-chimiques des différents prélèvements ont été effectuées au laboratoire de Chimie de la Direction Régionale sud-ouest de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Ces analyses ont été menées conformément aux directives et normes algériennes établies dans le décret exécutif n° 11-219.

Dans le tableau 28, sont reportées les valeurs caractéristiques des principaux éléments, offrant une vue d'ensemble statistique de la composition chimique des échantillons analysés. Les résultats détaillés des analyses complètes sont représentés en annexe 1.

Tableau 28: Statistiques des différents paramètres chimiques de la plaine de Tabelbala.

Teneur mg/l	Ca ⁺²	Mg ²⁺	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃
Maximum	522	380	850	315	1300	2400	135	256
Minimum	37	13	24	4	42	100	6	64
Moyenne	133	75	193	32	307	498	55	117

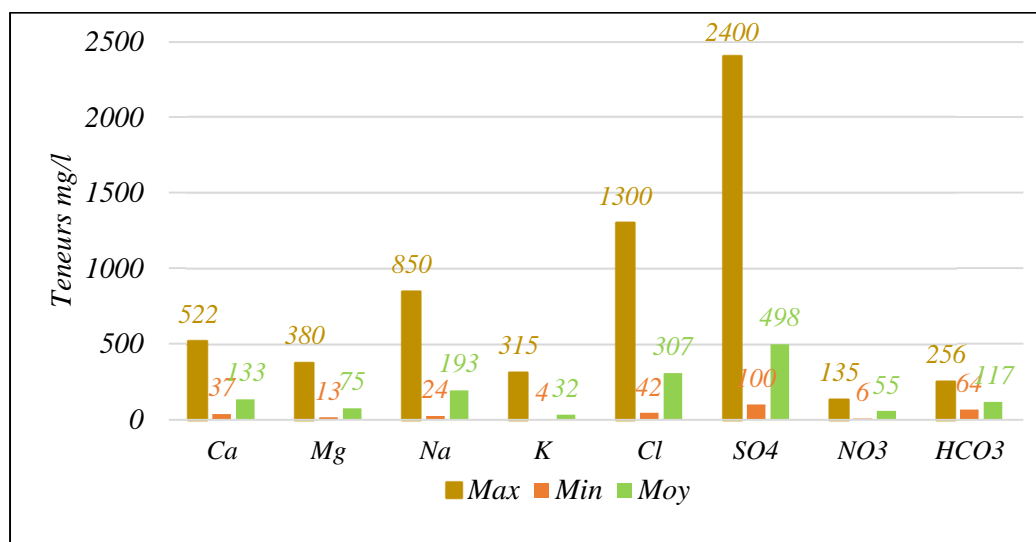


Figure 136: Variation des teneurs des éléments chimiques de la plaine de Tabelbala.

La figure 136 met évidence une prédominance des sulfates parmi les anions, tandis que les chlorures prédominent pour les cations, comme indiqué dans le tableau 28.

II. Paramètres organoleptiques (cartographie hydrochimique)

Lors de la réalisation d'analyses chimiques, il est important de tenir compte des caractéristiques organoleptiques telles que l'odeur, l'aspect et la couleur dès le moment du prélèvement des échantillons et tout au long de leur transport. Ces caractéristiques peuvent subir des altérations au cours de ces opérations, soulignant ainsi l'importance d'une évaluation immédiate idéalement effectuée sur place en vue de garantir la fiabilité des observations.

1. Couleur

La coloration des eaux destinées à la consommation humaine résulte généralement de la présence des substances organiques colorées, en particulier celles issues de la dégradation de l'humus dans le sol. Ces composés organiques, souvent issus de la décomposition de matières végétales, confèrent aux eaux une teinte variant du jaune au brun en fonction de leur concentration chimique. Cependant, l'analyse des échantillons d'eau prélevés dans la région d'étude montre une absence totale de coloration perceptible à l'œil nu. Les eaux analysées apparaissent parfaitement incolores, ce qui indique l'absence de substances colorantes organiques ou inorganiques en quantités significatives.

2. Odeur

Les odeurs dans l'eau peuvent avoir plusieurs origines, notamment la décomposition de la matière organique, la dissolution de substances chimiques, ou la présence d'organismes

aquatiques tels que des algues ou de protozoaires. Ces différentes sources pourraient entraîner des odeurs désagréables ou caractéristiques souvent associées à des composés spécifiques (sulfures, phosphates, nitrates, nitrites, ammonium). Dans l'ensemble des échantillons prélevés dans la région de Tabelbala ont montré des résultats négatifs pour ces paramètres. Les tests réalisés ont permis de conclure que les eaux de cette région ne présentent aucune odeur caractéristique.

3. Solides Totaux Dissous (TDS)

La mesure des solides dissous totaux (TDS) est l'un des paramètres essentiels pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines, exprimant la quantité totale de solides dissous dans l'eau en mg/l. Les TDS peuvent être mesurés à l'aide de deux méthodes distinctes. Une méthode basée sur la conductivité électrique dont les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines sont multipliées par un facteur compris généralement entre 0,55 et 0,75 mg/l selon la nature des ions présents (Hem, 1985). Lorsque les solides dissous totaux sont inférieurs à 3000 mg/l, un facteur de 0,64 est souvent utilisé pour convertir les valeurs de la conductivité électrique afin d'obtenir les valeurs des solides dissous totaux (TDS). Une autre méthode gravimétrique par évaporation qui repose principalement sur l'évaporation de l'eau, permettant par la suite de collecter la matière solide résiduelle, dont la quantité est mesurée par gravimétrie. Dans le cadre de cette étude, les valeurs de TDS observées varient entre 260 mg/l et 5046 mg/l (fig.137), dont les teneurs les plus élevées sont enregistrées au sud de Tabelbala alors que les valeurs les plus basses sont observées au nord de Chraïa.

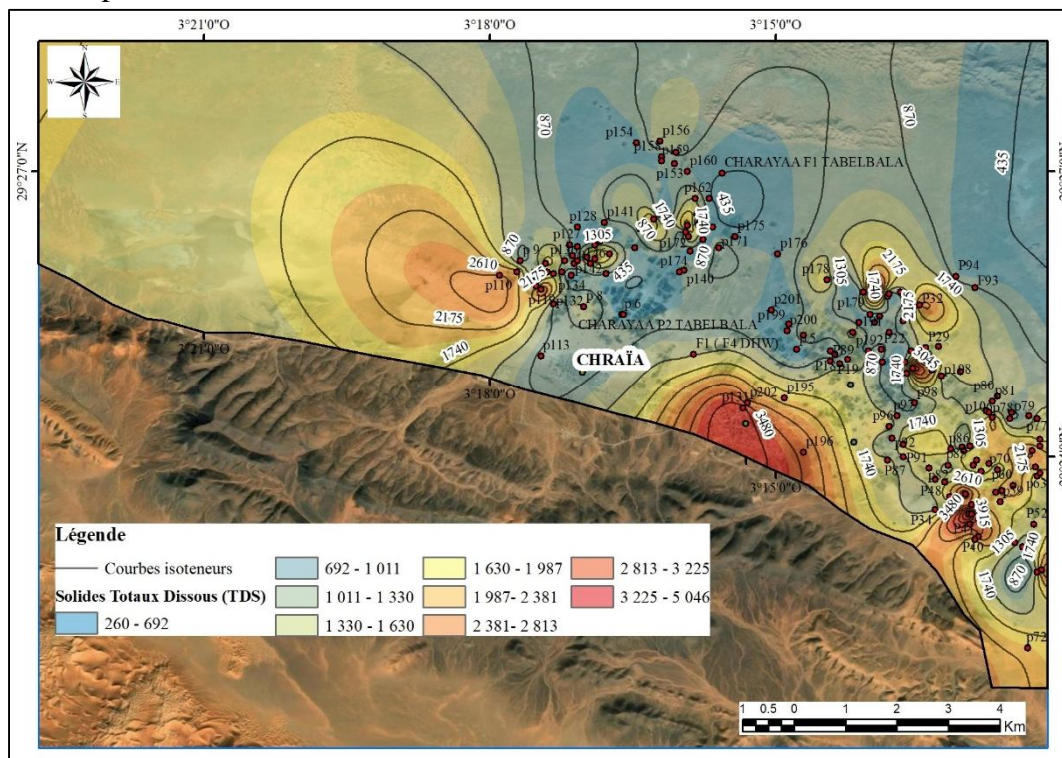


Figure 137: Solides totaux dissous (TDS), (mars 2014).

4. Conductivité électrique (CE) et minéralisation

Par définition, la conductivité électrique (CE) est la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, une propriété qui dépend directement de la concentration de différents ions en solution, ou de la minéralisation (Rhoades, 1996). Une concentration élevée en ions en solution

fait augmenter la conductivité des eaux (Stumm and Morgan, 1996). Cette caractéristique particulière nous permet de mesurer le taux de minéralisation dans les eaux.

Selon la carte de la conductivité électrique générée (fig. 139) pour la zone d'étude, les valeurs observées de conductivité présentent une large amplitude de variation, oscillent entre 610 et 6690 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tab.29). Cette grande amplitude reflète une diversité des éléments majeurs présents dans la plaine de Tabelbala. Selon l'analyse descriptive de ce paramètre physique, la conductivité électrique varie pour une moyenne de plus de 2195 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tableau 29: Analyse descriptive des échantillons pour CE.

Ele.chm	N° Echant	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	180	610	6690	2191	148114	1319.06

La minéralisation résulte de la dissolution des minéraux contenus dans les roches au contact de l'eau. Elle est influencée de la durée de séjour de l'eau dans l'aquifère, les conditions aux limites, ainsi que les paramètres hydrodynamiques (Hamad *et al.*, 2018). La minéralisation varie en fonction de types de formations géologiques traversées. Elle est particulièrement élevée lorsque l'eau entre en contact direct avec des formations gypsifères et anhydritiques, tandis qu'elle reste faible dans les formations cristallines et quartzitiques (MALCUIT, 2012).

Dans la région étudiée, plus de 74.45 %, des échantillons affichent des valeurs de conductivités tolérables, inférieures à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une forte minéralisation a été observée à l'ouest de Ksar Makhlouf, au nord-ouest de Chraïa, ainsi qu'au village de Tabelbala (fig.139). Ce phénomène s'explique principalement par la composition minéralogique et de la nature lithologique des formations traversées, notamment les argiles gréseuses, ainsi qu'à la circulation lente des eaux souterraines comme l'indique la carte piézométrique établie. Par ailleurs, la carte d'isoteneur met également en évidence une diminution notable de la minéralisation des eaux en direction du nord-est et du sud-ouest. Selon la classification de (RODIER, 2005), 100 points d'eau présentent une minéralisation excessive, tandis que les 75 restants ne révèlent d'aucune catégorie spécifique.

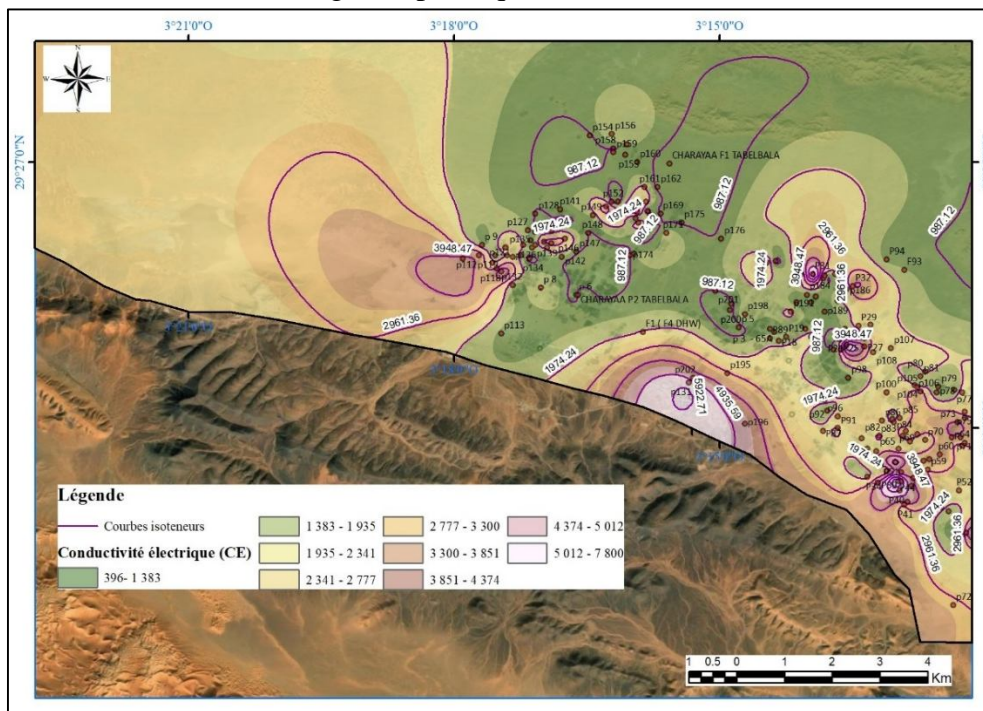


Figure 138: Distribution spatiale de la conductivité électrique à Tabelbala (mars 2014).

Le premier groupe se distingue par une minéralisation significative, principalement localisée à Chraïa et au nord-est de la zone d'étude. En revanche, le deuxième groupe se caractérise par une minéralisation excessive, avec la valeur maximale enregistrée au village de Tabelbala, atteignant 6400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tableau 30: Classification des eaux de la plaine de Tabelbala selon la CE (RODIER, 2005)

Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$)	Qualité d'eau
<100	Eau pure
100-200	Eau douce peu minéralisée
250-500	Eau à minéralisation moyenne (22 points d'eau)
1000-2500	Eau très minéralisée (100 points d'eau)

La figure 139 présentée illustre de manière évidente l'augmentation de la minéralisation dans les échantillons d'eau, avec une nette orientation vers le village de Tabelbala, où les concentrations les plus élevées ont été enregistrées, dépassant les 4838 mg/l. Cette hausse des niveaux de minéralisation est accompagnée d'une augmentation notable de concentrations de plusieurs ions majeurs, tels que le sulfate (SO_4^{2-}), le chlorure (Cl^-), le sodium (Na^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), ainsi qu'une hausse de résistivité (Rs). En revanche, les concentrations les plus faibles de ces ions ont été observées dans la partie nord-est de la région.

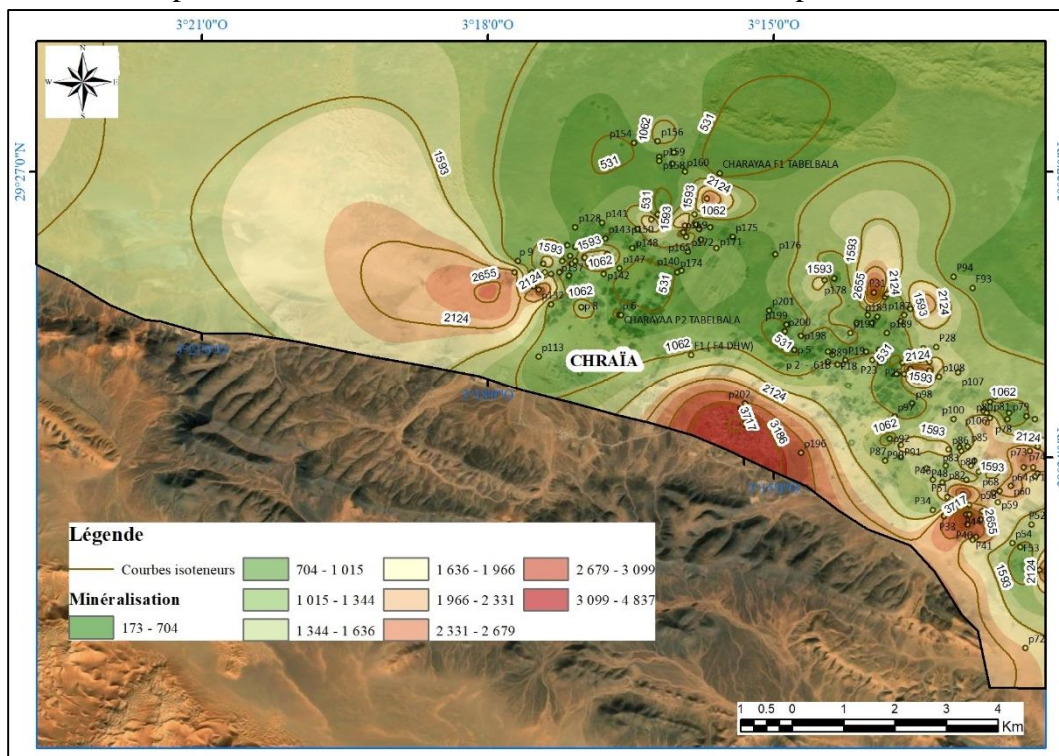


Figure 139: Distribution spatiale de la minéralisation à Tabelbala (mars 2014).

Ces variations de concentration s'expliquent principalement par des changements lithologiques, passant d'une formation alluvionnaire à forte perméabilité à des sédiments plus fins caractérisés par une circulation d'eau plus lente. Par ailleurs, l'utilisation excessive d'engrais riche en azote et en phosphore peut entraîner un lessivage de ces éléments dans les eaux souterraines, augmentant ainsi les concentrations de nitrates ou autre ion dessous. De plus,

l'utilisation des pesticides introduit des produits chimiques dans le système aquatique, affectant la qualité de l'eau. Ainsi les rejets domestiques non traités constituent une source majeure de contamination, en introduisant des substances chimiques qui contribuent aux variations dans les concentrations des éléments mesurés.

5. Dureté totale TH (Total Hardness)

La dureté totale de l'eau reflète sa capacité à produire de la mousse avec du savon, une propriété particulièrement observable dans les eaux douces. Elle est principalement due à la présence d'ions calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}), et s'exprime généralement en équivalent carbonate de calcium (CaCO_3) ou en degré hydrotimétrique français ($^\circ\text{H}$ ou $^\circ\text{F}$). Un degré français (1°F) correspond à 10 mg/l de CaCO_3 . Cependant, d'autres constituants tels que le fer, le manganèse, l'aluminium, le baryum, le strontium et les acides libres, pourraient également contribuer, bien que de manières moins significatives, à la dureté de l'eau. Les différentes formations géologiques traversées par l'eau jouent également un rôle déterminant dans sa dureté.

Tableau 31: Analyse descriptive des échantillons pour TH.

<i>Ele.chm</i>	<i>N° Echant</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moy.</i>	<i>Variance</i>	<i>Ecart-type</i>
TH	180	22	255	62.53	1317	36.3

Selon (Hem, 1985) et (Hammond, 1969), la qualité de l'eau est jugée problématique lorsque sa dureté dépasse 120 mg/l de CaCO_3 . En revanche, les eaux dont la dureté est inférieure à ce seuil peuvent être utilisées pour divers usages, notamment agricoles et industriels.

Tableau 32: Classification des eaux en fonction de leur dureté.

<i>Classes</i>	<i>Dureté en mg/l (CaCO_3)</i>	<i>N° Points d'eau</i>
<i>Douce</i>	<75	131
<i>Moyennement douce</i>	75-150	40
<i>Dure</i>	150-300	6
<i>Très dure</i>	>300	-----

Les mesures de la dureté obtenues pour les différents points d'eau de la région varient entre 22 mg/l ($2,2^\circ\text{F}$) et 255 mg/l ($25,5^\circ\text{F}$), classant ces eaux de très douces à très dures (tab.31 et tab.32). Il est important de noter que plus de la moitié des points d'eau (131 échantillons) fournissent des eaux douces avec une dureté totale (TH) inférieure à 75 mg/l. Cependant, certains points d'eau présentent des teneurs de la dureté dépassant la norme algérienne de potabilité, fixée à 180 mg/l de CaCO_3 (18°F). En se basant sur les valeurs de TH de nos échantillons mesurés, les eaux de la plaine de Tabelbala portent des eaux calcaires avec un TH compris entre 20 et 30.

III. Paramètres physiques

1. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est l'un de divers paramètres chimiques cruciaux rentrant à l'évaluation de la qualité des eaux souterraines, car il est directement lié à la concentration d'ions d'hydrogène [H^+]. C'est une mesure de l'activité des ions hydrogène [H^+] en solution exprimant ainsi son acidité ou sa basicité (Stumm and Morgan, 1996). Sa formule est donnée comme suit :

$$\text{pH} = \log[1/[\text{H}^+]] \quad (7.1)$$

En général, les eaux souterraines naturelles ont des valeurs du pH compris entre 7 et 7,3, considéré comme neutre selon (Twort A C, Hoather R C and Law F M 1, 1974), conforme aux directives et aux normes de portabilité. Des valeurs de pH très élevées, supérieures à 8,5, sont souvent associées à des formations lithologiques riches en sodium (Na) et en carbonates (CO_3). En revanche, la présence des bicarbonates (HCO_3) tend à entraîner des valeurs de pH modérées à élevées, aussi bien pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines.

Tableau 33: Analyse descriptive des échantillons pour pH

Ele.chm	N° Echant	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
pH	180	6.05	8.04	7.51	0.072	0.26

La figure 140 illustre la variabilité spatiale du pH des eaux souterraines dans la région d'étude. Les analyses effectuées dans le village de Tabelbala et ses alentours ont révélé des valeurs de pH variant de 6.05 à 8.04 (tab.33), ce qui est conforme à l'intervalle des normes algériennes de potabilité. Ces résultats révèlent clairement la neutralité des eaux dans cette zone. Cependant, 97 % de nos échantillons illustrent des concentrations tendant vers la basicité, ce qui explique clairement l'absence des ions carbonates (CO_3^{2-}), et traduit la légère alcalinité des eaux de la zone de l'étude.

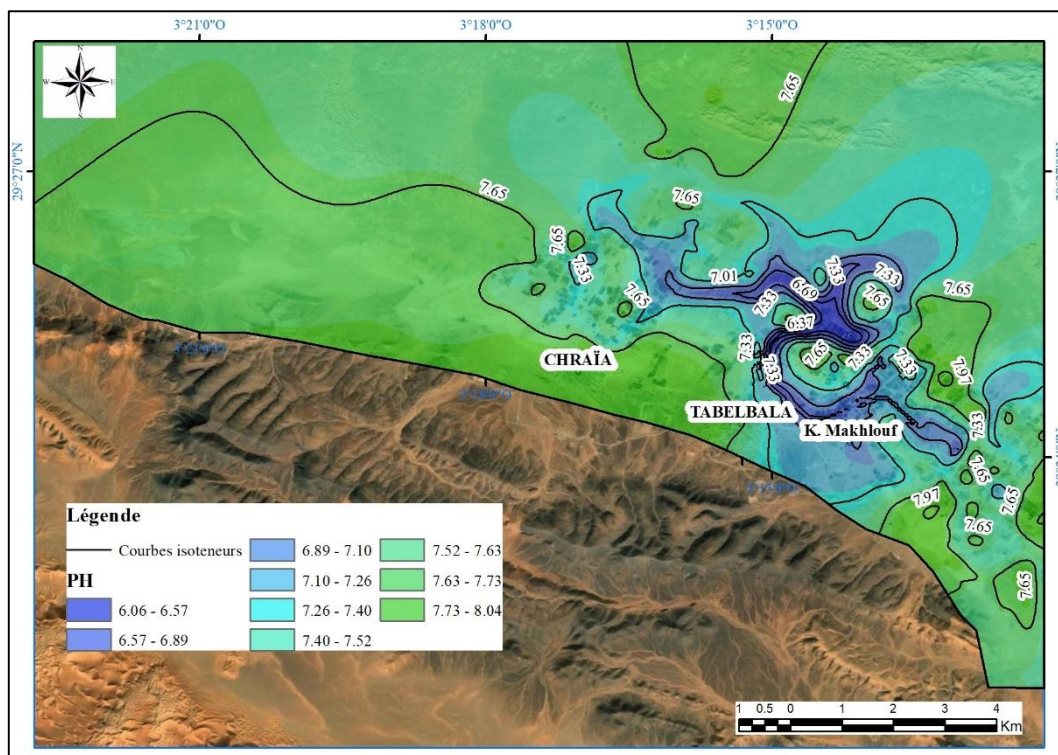


Figure 140: Carte des iso-valeurs du pH des eaux de Tabelbala (mars 2014).

Alcalinité

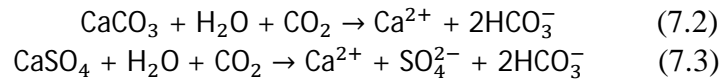
2. Paramètres chimiques majeurs (Cations et anions)

2.1 Calcium (Ca^{+2})

Le calcium est l'un des Cations les plus importants dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines en raison de son abondance. Il provient principalement des formations géologiques des aquifères riches en calcium. Présent dans les eaux souterraines sous forme de particules en suspension, le calcium joue un rôle clé dans la dureté totale de l'eau, principalement sous forme de bicarbonate de calcium qui se dissout facilement.

Les eaux souterraines provenant des terrains calcaires ont généralement des concentrations de calcium comprises entre 10 à 300 mg/l.

La présence d'ions Ca^{+2} dans l'eau peut s'expliquer soit par la dissolution de formations évaporitiques telles que le gypse $[\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})]$ et l'anhydrite (CaSO_4) ou encore par la dissolution des formations carbonatées, comme la calcite (CaCO_3) et la dolomie $[(\text{Ca Mg}) \text{CO}_3]$. Cette réaction résulte particulièrement de la présence de dioxyde de carbone issue de l'activité bactérienne qu'il engendre. Elle se déroule selon les réactions chimiques suivantes :



Dans la zone étudiée, les concentrations de calcium observées varient entre 54 et 473 mg/l. Une comparaison de ces valeurs avec les normes de portabilité algérienne révèle que la partie sud de la région se distingue par des valeurs de calcium particulièrement élevées, atteignant jusqu'à 473 mg/l (fig.141).

Une augmentation progressive des concentrations de calcium dans notre région en direction du sud, suivant les sens d'écoulement des eaux souterraines. Les quantités excessives de calcium pourront entraîner des problèmes liés aux voies urinaires chez les êtres humains.

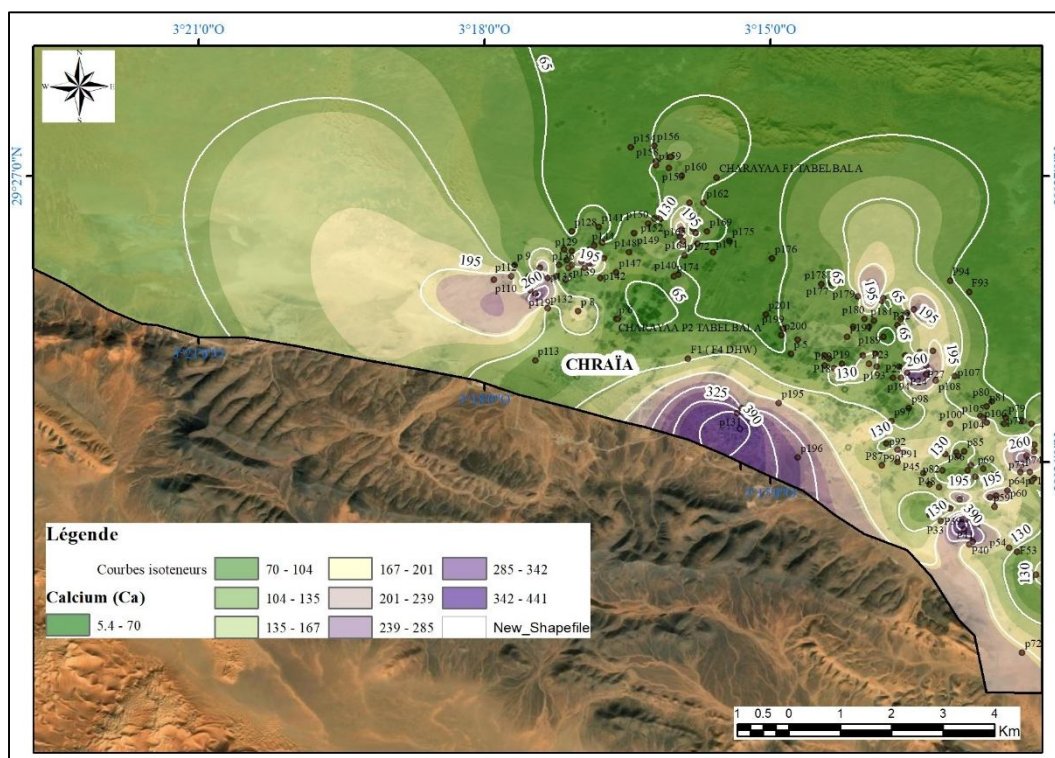


Figure 141: Carte de la répartition spatiale des teneurs en calcium (Ca^{+2}), (mars 2014).

2.2 Magnésium (Mg^{+2})

Le magnésium (Mg^{+2}) est un élément chimique essentiel pour la détermination de la dureté de l'eau, un paramètre important influençant de manière significative ces propriétés chimiques. Il est présent dans les eaux et provient de diverses sources naturelles, telles que les roches magnésiennes, les gypses, ainsi que les minéraux ferromagnésiens. C'est un élément abondant dans les calcaires dolomitiques, les dolomies et parfois dans certains types d'argiles. À l'instar des autres éléments chimiques, le magnésium (Mg^{+2}) se dissout dans l'eau à travers

le processus de dissolution des minéraux. Lorsque l'eau entre en contact direct avec des sédiments et/ou des roches contenant des minéraux solubles (comme les dolomites, les silicates et/ou les carbonates magnésiens), une réaction chimique se produit, libérant des ions de magnésium dans la solution.



Le calcium, tout comme le magnésium, joue un rôle déterminant dans la dureté de l'eau. Les concentrations en magnésium (Mg^{+2}) mesurées dans les eaux de notre zone d'étude varient entre 7.6 et 344 mg/l (fig.142), avec des niveaux particulièrement élevés autour du village de Tabelbala.

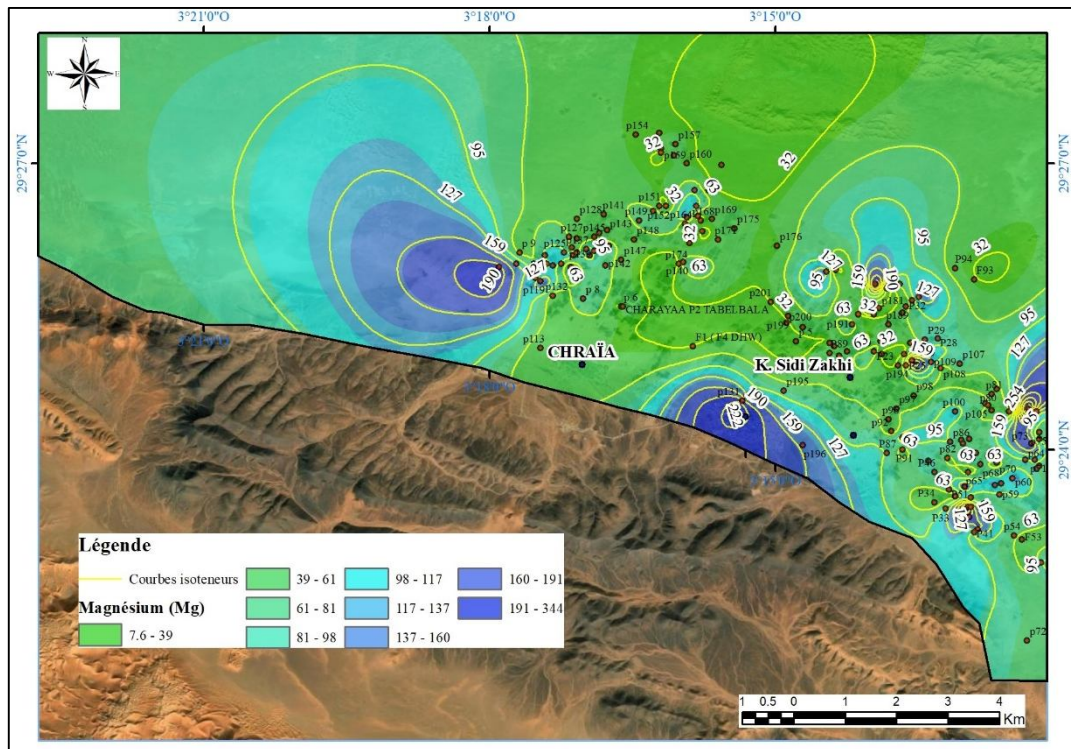


Figure 142: Carte de la répartition spatiale des teneurs en-magnésium (Mg^{+2}), (mars 2014).

Dans cette zone, les concentrations de magnésium dépassent légèrement la norme algérienne de portabilité, qui fixe la limite maximale à 150 mg/l. Toutes fois, il est important de souligner que, malgré cette élévation dans certaines zones (fig.142), plusieurs points d'eau localisés aux alentours présentent des concentrations de magnésium inférieures à cette limite (150 mg/l), ce qui reste conforme aux standards de qualité de l'eau.

2.3 Sodium (Na^+) et potassium (K^+)

La présence de sodium (Na^+) dans les eaux souterraines résulte principalement de l'altération des minéraux riches en sodium, tels que le plagioclase sodique et d'autres minéraux similaires. Ce processus d'altération peut être également expliqué par l'échange d'ions entre le calcium et le sodium sur les minéraux argileux de surface (Davis *et al.*, 1966).



Les réactions d'altération favorisent généralement à l'augmentation des concentrations du sodium dans les eaux souterraines, ce qui pourrait avoir par la suite des implications importantes sur la qualité de l'eau et son utilisation à diverses fins.

La dissolution des diverses formations géologiques, comprenant des argiles, des marnes ainsi que le lessivage des facies riches en NaCl, contribue d'une manière significative à la présence du cation du sodium (Na^+) dans l'eau traversant ces formations.

L'analyse visuelle de la carte des isoteneurs établie (fig.143), révèle clairement que les concentrations du sodium observées au niveau la zone d'intérêt, varient entre 25 et 751 mg/l. Cependant, certains points d'eau présentent des concentrations élevées (fortes concentrations), dépassant les limites fixées par la norme algérienne de portabilité (inférieur à 200 mg/l). Ces concentrations élevées sont principalement observées dans les régions du nord-est et du sud-ouest, tandis que les zones à faible concentration se trouvent au centre et au nord de la zone étudiée.

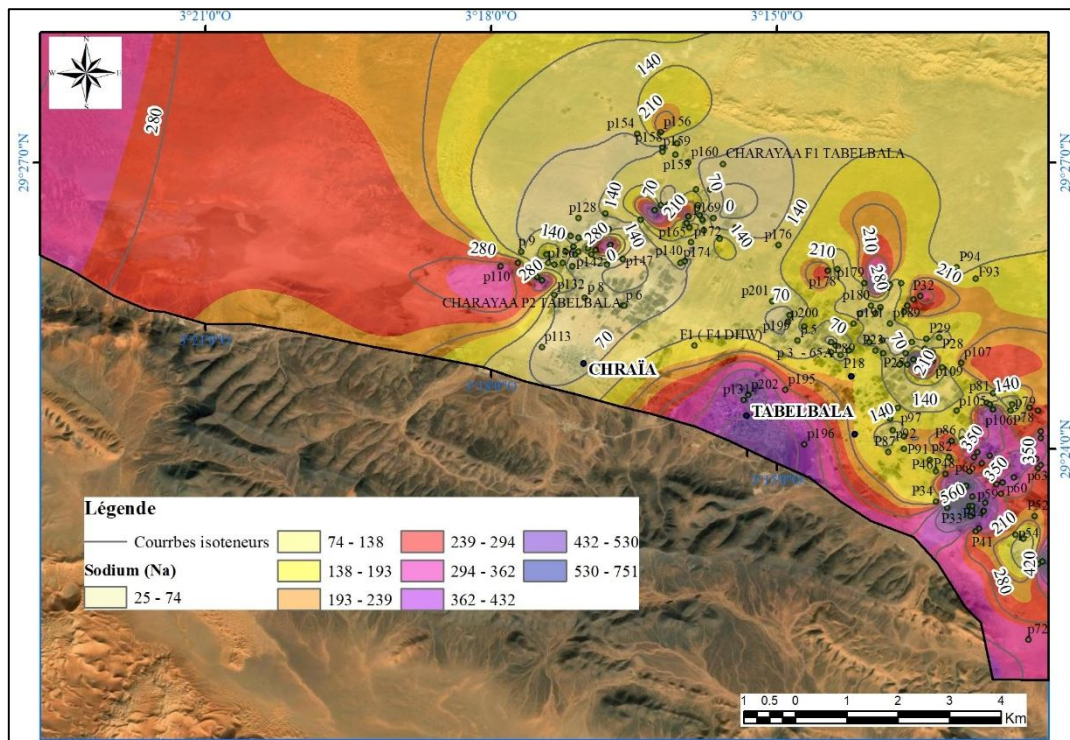


Figure 143: Carte de la répartition spatiale des teneurs en sodium (Na^+), (mars 2014).

Dans la plupart des eaux naturelles, la concentration en potassium est généralement très faible. Les principales sources de potassium dans l'environnement selon Derrond (1989), proviennent de la dissolution des minéraux riches en potassium, tels que l'orthose, le microcline, la biotite, la leucite et la néphéline, présents dans les roches ignées et métamorphiques, pourrait entraîner une augmentation de la concentration de potassium dans les eaux souterraines.

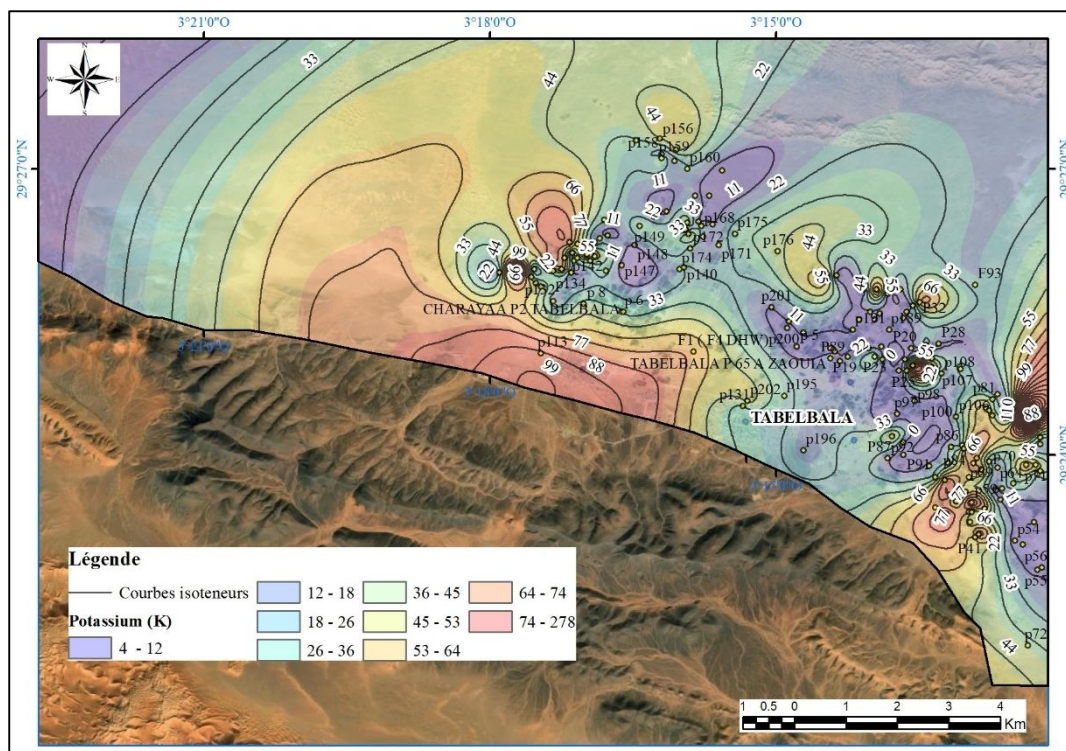


Figure 144: Carte de la répartition spatiale des teneurs en potassium (K+), (mars 2014).

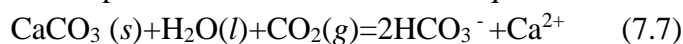
La concentration élevée de potassium dans les eaux souterraines pourrait également résulter de la pollution causée par les eaux usées (eau provenant d'activités agricoles, industrielles ou domestiques). Pour être considérées comme potables, les eaux souterraines doivent contenir moins de 12 mg/l de potassium selon les normes établies. (Davis *et al.*, 1966), soulignent que l'augmentation de la concentration de potassium n'est pas systématiquement corrélée à la présence des solides dissous totaux (TDS). En d'autres termes une élévation de potassium dans les eaux souterraines peut survenir indépendamment de la concentration globale des minéraux dissous dans l'eau.



Dans notre étude, les concentrations de potassium montrent une large variation, allant de 4 à 278 mg/l (fig.144). Cependant, nous observons des concentrations inférieures de la norme algérienne au nord, tandis qu'au sud, certaines valeurs dépassant le seuil fixé par cette norme (inférieure à 12 mg/l).

2.4 Bicarbonates (HCO₃⁻)

La présence de bicarbonates dans l'eau est principalement liée à la dissolution de carbonates tels que le cipolin ou le calcaire, en particulier lorsque l'eau est bien évidente chargée en dioxyde de carbonés (Kreitler, 2023). Ce phénomène se produit lorsque l'eau entre en contact direct avec du dioxyde du carbone (CO₂) dissous, entraînant la formation de bicarbonates dans l'eau. Ce processus se déroule selon l'équation suivante :



Cela montre qu'en présence de CO₂, le calcaire solide se dissout dans l'eau, produisant des ions de bicarbonates (HCO₃⁻) ainsi que des ions de calcium (Ca²⁺). Ce processus est particulièrement intensifié lorsque les eaux sont chargées en CO₂.

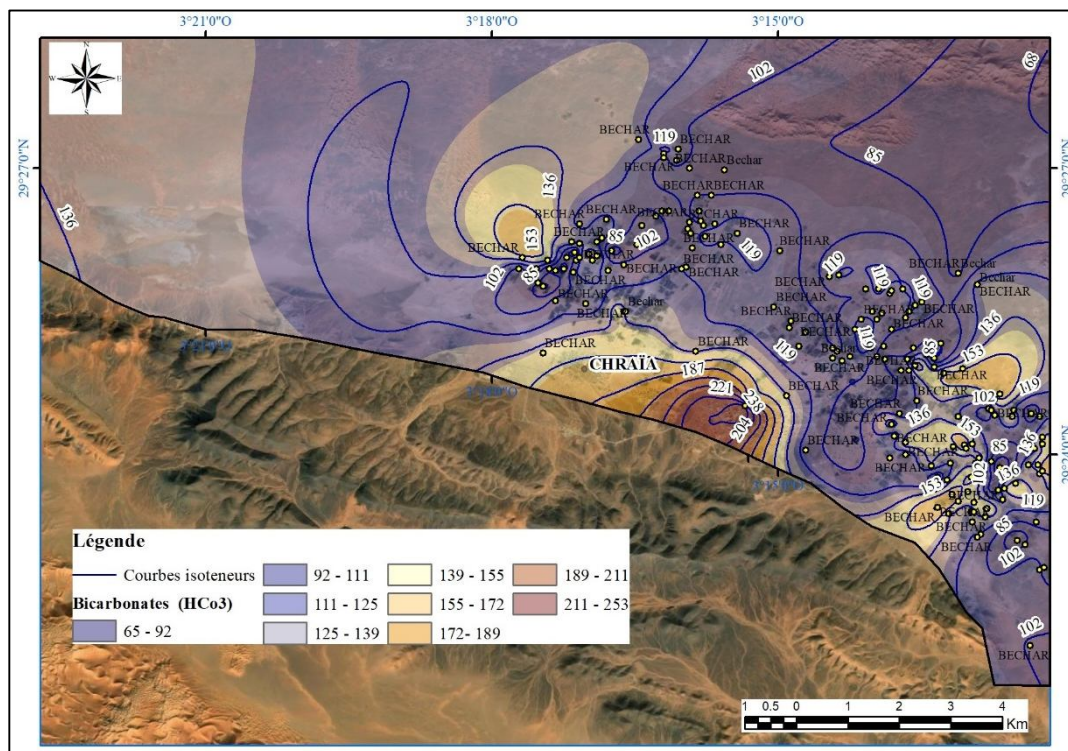
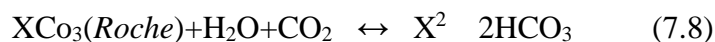


Figure 145: Distribution spatiale des teneurs en bicarbonates (HCO_3^-), (mars 2014).

Une autre équation décrivant la dissolution des carbonates dans les milieux aquatiques est la suivante :



où XCO_3 représente un autre type de carbonate, qui se dissocie en présence de l'eau et de CO_2 pour former des bicarbonates.

Dans notre zone, les résultats d'analyse indiquent que les concentrations de bicarbonates mesurées dans les échantillons d'eau prélevés varient entre 65 et 253 mg/l (fig. 145). Ces valeurs sont pratiquement conformes à la norme algérienne relative à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, qui stipule que la concentration en bicarbonates ne doit pas dépasser 250 mg/l.

2.5 Chlorures (Cl^-)

Le chlorure est l'anion le plus ré pondu dans les eaux souterraines, et sa concentration varie considérablement dans les eaux naturelles en fonction des régions et des conditions géochimiques locales. Ces variations sont directement influencées par plusieurs facteurs, tant naturels qu'anthropiques. L'une des principales sources des chlorures dans les eaux souterraines provient des rejets d'eau domestique et/ou industrielle (effluents issus des activités humaines, en particulier des zones industrielles et urbaines). En outre, l'utilisation excessive des engrais et de pesticides dans les pratiques agricoles, ainsi que la dissolution des sels naturels par le lessivage des sols salins (sel gemme ou de filon traversant d'autres roches) contribuent également à l'augmentation des concentrations des chlorures (Mazor, 2004). Les aquifères côtiers peuvent également présenter des concentrations élevées de chlorure en raison de l'intrusion d'eau de mer. Par ailleurs, la pollution industrielle peut jouer un rôle significatif des niveaux du

chlorure dans la zone industrielle. En ce qui concerne la qualité de l'eau potable, l'OMS fixe le niveau souhaitable de chlorure dans l'eau à 200 mg/l, considéré comme optimal pour préserver ses caractéristiques organoleptiques. Cependant, l'OMS a également mis un niveau maximal admissible de 600 mg/l, au-delà duquel l'eau devient désagréable à boire en raison de son goût salé.

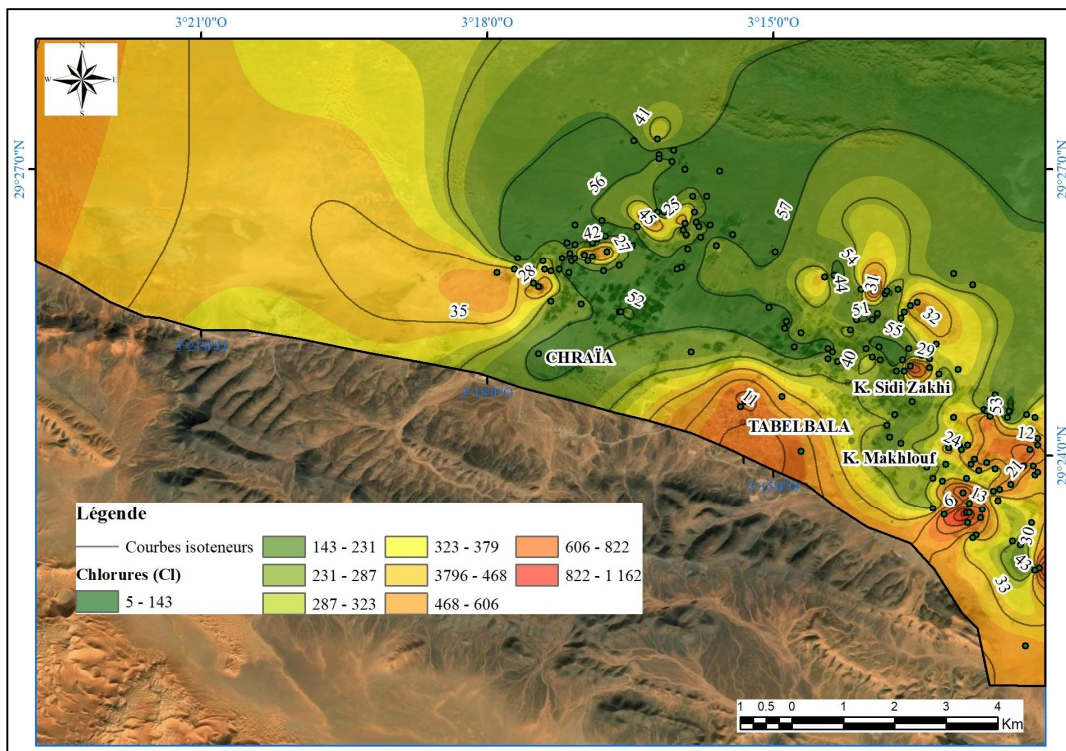
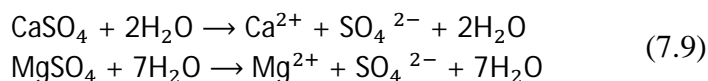


Figure 146: Distribution spatiale des teneurs en chlorures (Cl⁻), (mars 2014).

Selon la carte d'iso-teneur du chlorure (fig.146), les concentrations de chlorure varient entre 140 et 1162 mg/l. Les concentrations élevées ont été observées au nord-ouest, au centre et au sud-est de la zone d'étude, dépassant les normes de portabilité algérienne et celles de l'OMS.

2.6 Sulfates (SO₄²⁻)

Les sulfates se retrouvent dans l'eau en concentrations significatives, provenant généralement de diverses sources telles que l'oxydation de sulfures comme la pyrite, les rejets d'acide sulfurique des eaux usées et le lessivage des engrais, ainsi que la dissolution des gypses (CaSO₄·2H₂O).



La concentration élevée des sulfates est particulièrement préoccupante dans l'eau potable, car des quantités excessives peuvent avoir des effets néfastes (troubles gastro-intestinaux et des effets sur la fonction rénale chez les personnes sensibles) sur la santé humaine (Subba Rao and Surya Rao, 2010, Gupta and Maiti, 2023).

Selon les recommandations des services de santé publique des États-Unis (1962), la concentration de sulfate ne devrait pas dépasser 250 mg/l dans l'eau destinée à la consommation humaine.

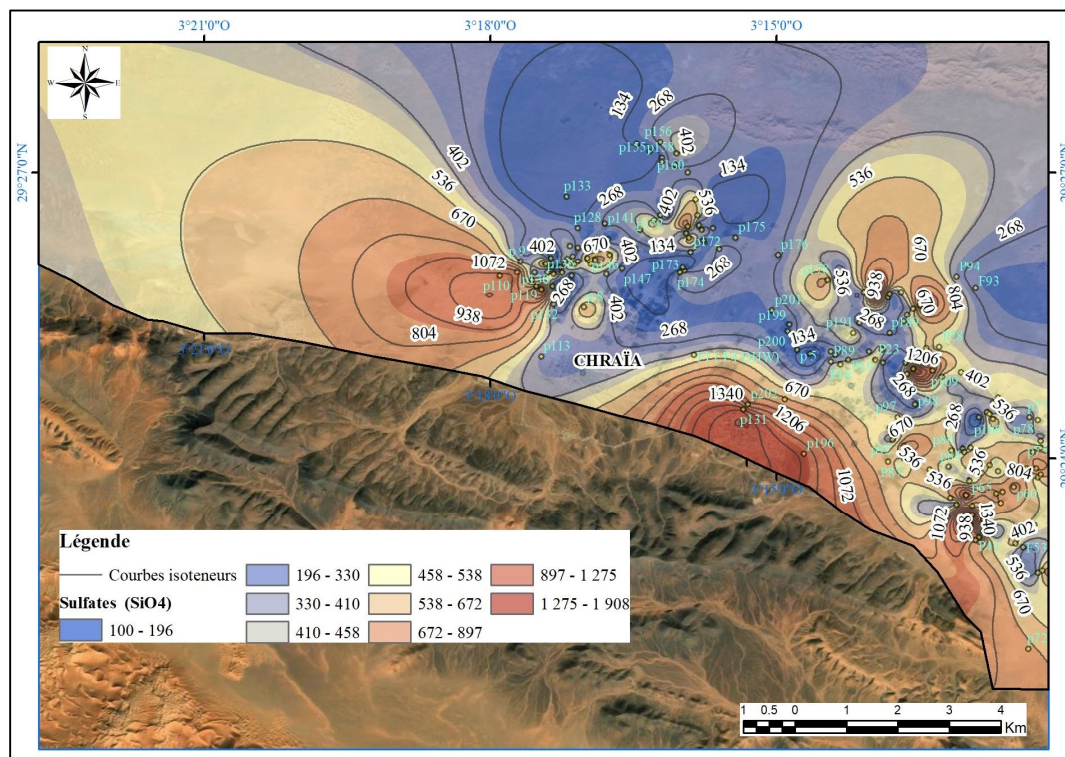


Figure 147: Répartition spatiale des teneurs en sulfates (SO_4^{2-}), (mars 2014).

Les concentrations de sulfates mesurées dans notre zone d'étude s'étendent du 100 au 1908 mg/l (fig.147). Certains points d'eau situés au sud de la zone d'étude présentent des valeurs particulièrement élevées, bien au-dessus de la limite de potabilité recommandée par l'OMS, qui est de 400 mg/l pour les sulfates. Ces teneurs élevées rendent ces points d'eau, non potables en raison de leurs concentrations excessives en sulfates.

2.7 Nutriments

a) Nitrates (NO_3^-)

La présence de nitrates dans les eaux souterraines est également très fréquente et provient de diverses sources, telles que l'infiltration des eaux de pluie à travers les différentes couches du sol (Buvaneshwari *et al.*, 2017), l'utilisation excessive des engrais dans l'agriculture, les rejets industriels, ainsi que les fosses septiques. En général, les concentrations de nitrates dans les eaux souterraines varient entre 10 mg/l et plusieurs centaines de mg/l. Toutefois, dans les eaux naturelles non polluées, la teneur en nitrates est généralement inférieure à 50 mg/l. Dans la zone considérée, les concentrations de nitrates se situent entre 6 et 135 mg/l (tab.34), avec des niveaux plus relevés observés au sud-est (fig.149), dépassant ainsi la norme de potabilité.

Tableau 34: Analyse descriptive des échantillons pour NO_3 .

Ele.chm	N° Echant	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
NO_3^-	135	6	135	54.53	427.95	20.68

L'analyse de la carte d'isoteneur des nitrates révèle des concentrations particulièrement élevées dans certains points d'eau (Tab.34), dépassant le seuil admissible de 50 mg/l. Ces niveaux élevés de nitrates, particulièrement observés dans la plaine de Tabelbala, sont

principalement dus à l'intensification de l'activité agricole dans la région, ainsi qu'à l'utilisation excessive des pesticides et des engrais. Ces substances peuvent se retrouver dans la nappe alluviale par infiltration, contribuant ainsi à l'augmentation des concentrations des nitrates dans les eaux souterraines.

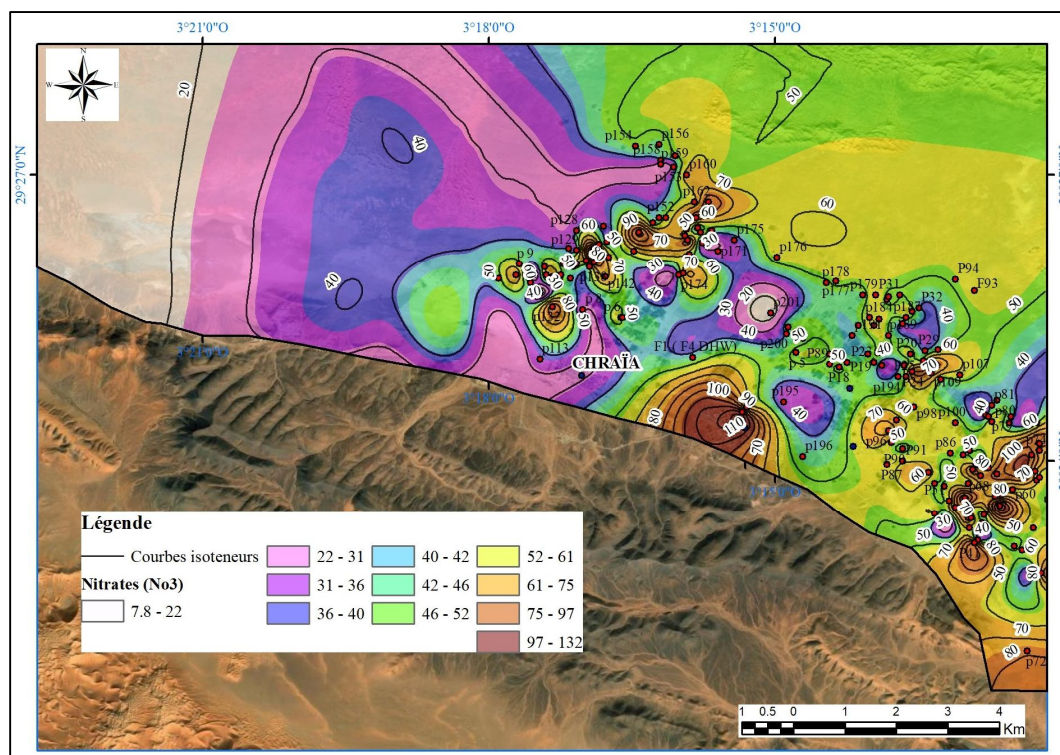


Figure 148: Répartition spatiale des teneurs en nitrates (NO_3^-), (mars 2014).

b) Ammonium (NH_4^+)

L'ammonium (NH_4^+) est un ion fréquemment retrouvé dans les eaux naturelles, témoignant une dégradation partielle de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Sa présence dans l'eau peut être liée à des activités humaines, telles que l'utilisation d'engrais azotés ou la pollution industrielle. L'ammonium est un composé instable, particulièrement dans les milieux aquatiques, où il se transforme rapidement par oxydation en nitrate (NO_3) et en nitrite (NO_2) sous l'action de bactérie nitrifiante (nitrification).

Tableau 35: Analyse descriptive des échantillons pour NH_4^+ .

Ele.chm	N° Echant	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
NH4+	180	0.001	0.25	0.029	0.00139	0.037

Dans la zone étudiée, les concentrations d'ammonium mesurées varient entre 0.001 et 0.25 mg/l (tab.35). Ces valeurs sont nettement inférieures aux limites de potabilités préconisées par l'OMS, qui recommande un seuil de 0.5 mg/l pour l'eau destinée à la consommation humaine. Par conséquent, les résultats obtenus dans notre zone d'étude suggèrent que la qualité de ses eaux ne présente aucun risque en lien avec la présence d'ammonium, et que les concentrations observées restent suffisamment faibles pour ne pas compromettre la santé publique.

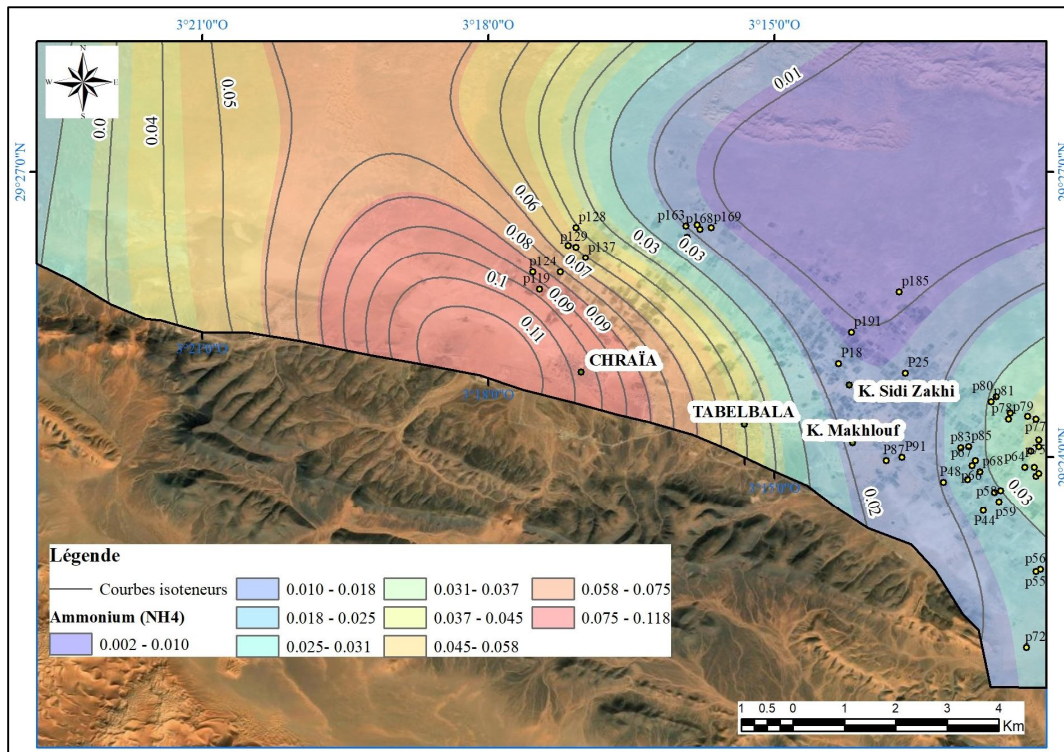


Figure 149: Distribution spatiale des teneurs en ammonium (NH₄⁺), (mars 2014).

2.8 Ortho-phosphate (PO₄⁻)

Les résultats d’analyse ont révélé que les concentrations de phosphates les plus élevées sont trouvées dans les zones nord de la région, où la densité de population est relativement élevée (fig.150). Cette observation suggère une corrélation entre les niveaux de phosphates et les activités humaines notamment celles liées à l’agriculture et l’industrie.

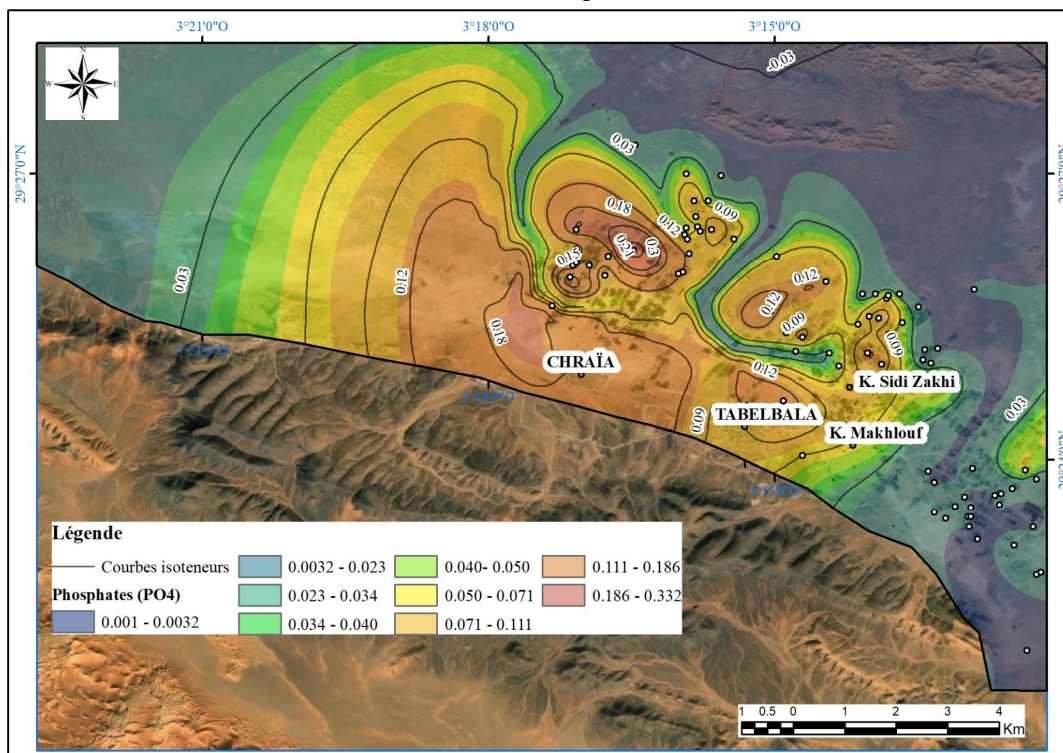


Figure 150: Répartition spatiale des teneurs en phosphate (PO₄⁻), (mars 2014).

En effet, les concentrations de phosphates relevées pour les échantillons d'eau analysés varient de 0.001 à 0.42 mg/l (tab.36).

Tableau 36: Analyse descriptive des échantillons pour PO₄⁻.

Ele.chm	N° Echant	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
PO ₄ ⁻	180	0.001	0.42	0.061	0.0058	0.076

Ces valeurs sont bien en dessous du niveau guide recommandé pour les phosphates, qui est fixé à 0.4 mg/l, ce qui reste largement inférieur à la concentration maximale admissible de 5 mg/l, au-delà de laquelle des effets néfastes sur l'écosystème aquatique, tels que l'eutrophisation, pourraient se produire. Par conséquent, les concentrations observées se situent dans des limites acceptables selon les normes en vigueur.

IV. Classification et faciès chimique des eaux

Sur la base des formules caractéristiques, des taux et des concentrations des différents paramètres physico-chimiques mesurés dans divers points d'eau échantillonnés, ainsi que de la projection de ces résultats d'analyses dans le diagramme de Piper, l'analyse comparative, la classification des eaux et la détermination de leur faciès chimique ont été réalisées.

Les résultats d'analyses des eaux souterraines de la région de Tabelbala permettent de distinguer clairement trois types de faciès hydrochimiques distincts (fig.151). Une variabilité de faciès hydrochimique a été observée pour l'ensemble des points d'eau étudiés, avec une prédominance du faciès sulfaté sodique, qui représente 67 % (soit 125 forages) des points d'eau étudiés. Ce faciès se particularise par une prédominance des bicarbonates par rapport aux chlorures et une proportion plus élevée de calcium (Ca⁺²) par rapport au magnésium (Mg). Ce type de faciès est principalement observé dans les eaux captées au nord de Chraïa, autour du village de Tabelbala et de Ksar Makhoulf.

Le deuxième faciès, identifié comme sulfaté-calcique, représente 25 % (48 forages) de l'ensemble d'échantillons analysés. Ce faciès se distingue par une prédominance des chlorures (Cl) par rapport aux bicarbonates (HCO₃) ainsi qu'une plus forte proportion d'ions sodium (Na) par rapport aux ions de magnésium (Mg). Quant au troisième faciès, il s'agit du faciès chloruré sodique, représentant 6.96 % (13 forages) de l'ensemble de nos échantillons. Ce dernier se particularise principalement par une nette prédominance des sulfates (SO₄) par rapport aux bicarbonates (HCO₃), ainsi qu'une prépondérance des ions de calciums par rapport aux ions de magnésium. Il se retrouve principalement à l'ouest de Ksar Makhoulf et au nord de Chraïa (fig.151).

Le tableau 37 représente les différents faciès chimiques relatifs à notre région.

Tableau 37: Faciès chimiques et formules ioniques relatifs aux points d'eau de Tabelbala (année 2014).

N° Classe	Nombre de forages	Formule ionique	Faciès chimique
1	125 (67 %)	SO ₄ >HCO ₃ >Cl>NO ₃ Na+K>Ca>Mg	Sulfaté-sodique
2	48 (25 %)	SO ₄ >Cl> HCO ₃ >NO ₃ Ca>Na+K>Mg	Sulfaté-calcique
3	13 (6.96 %)	Cl>SO ₄ > HCO ₃ >NO ₃ Na+K>Ca>Mg	Chloruré sodique
Total	186		

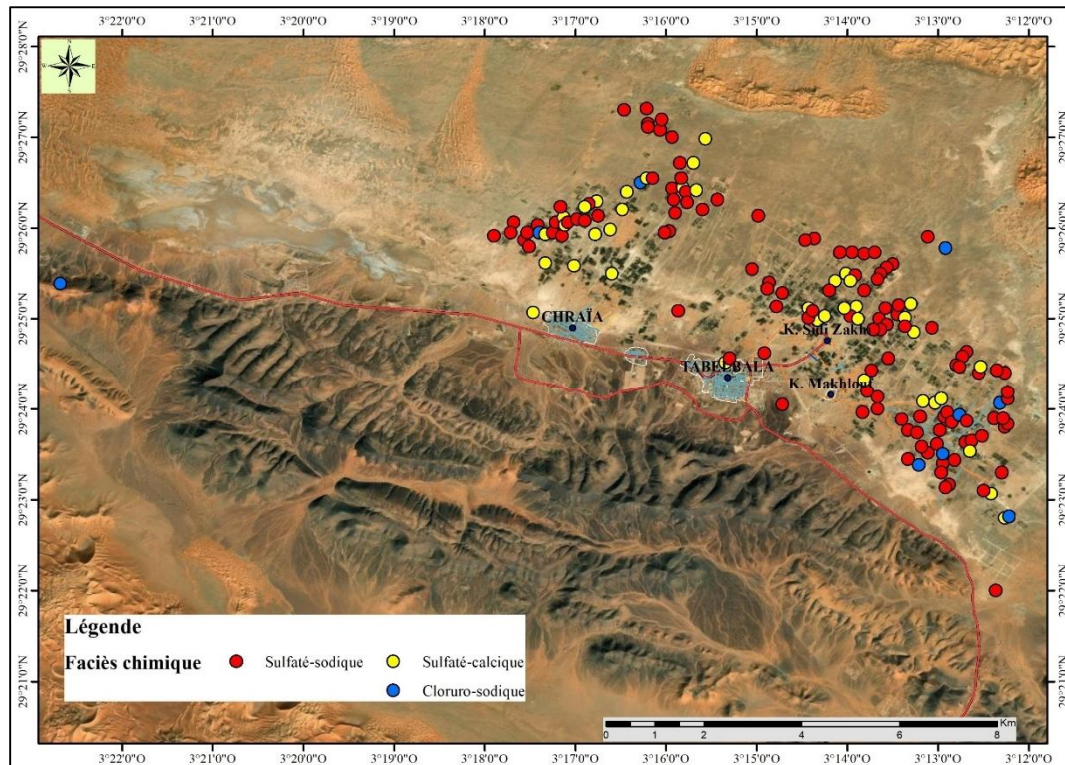


Figure 151 : Distribution spatiale des différents faciès chimiques relatifs aux points d'eau de Tabelbala (mars 2014).

Dans la région considérée, nous avons constaté une transition du faciès hydrochimique, allant du faciès sulfaté sodique au faciès sulfaté calcique, en passant par un faciès chloruré sodique.

1. Représentation graphique

1.1 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est une représentation graphique, utilisé pour représenter les résultats des analyses physicochimiques, en particulier les cations et les anions présents dans l'eau. Il se compose de deux triangles distincts et d'un losange, permettant d'illustrer les proportions relatives aux différents composants chimiques dans l'eau échantillonnée.

Ce diagramme permet de représenter les pourcentages de chaque cation et anion sous forme de triangles distincts mettant en évidence la dominance anionique et cationique. Les pourcentages obtenus sont ensuite reportés sur le losange, où l'intersection des lignes provenant des points déterminés dans chaque triangle donne une visualisation de faciès chimique des échantillons.

Le diagramme de Piper se distingue par sa praticité et sa simplicité, ce qui en fait un outil très efficace pour analyser et traiter un grand nombre d'échantillons de manière pratique et rapide.

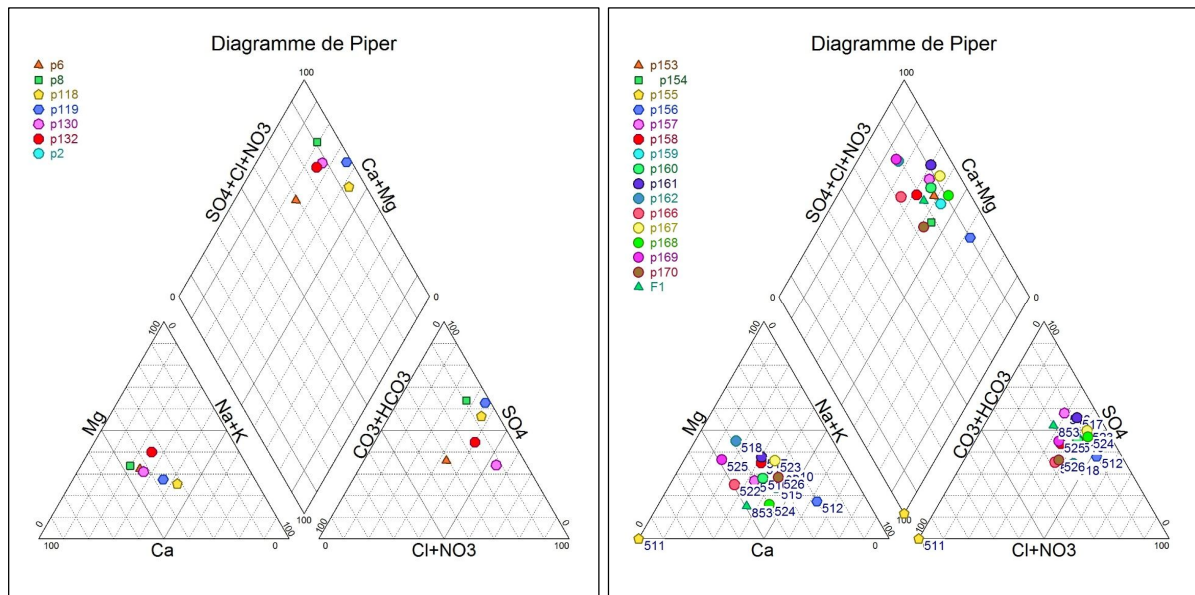
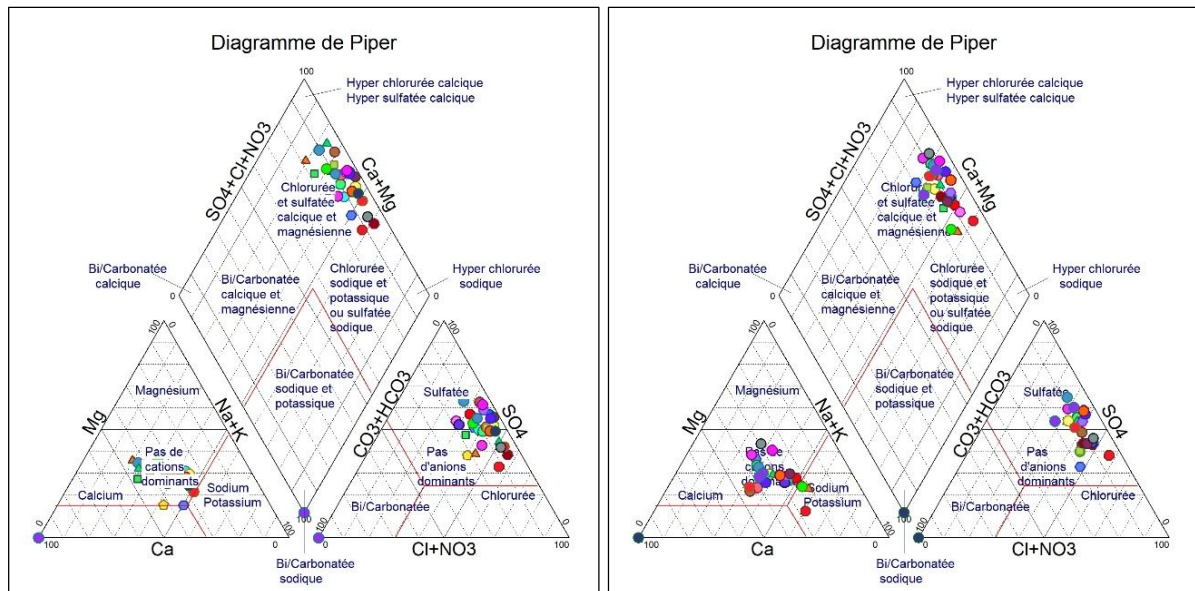


Figure 152: Faciès chimique des eaux relatives aux formations (3-Q6) et (4-Q1-2) selon le diagramme de Piper.



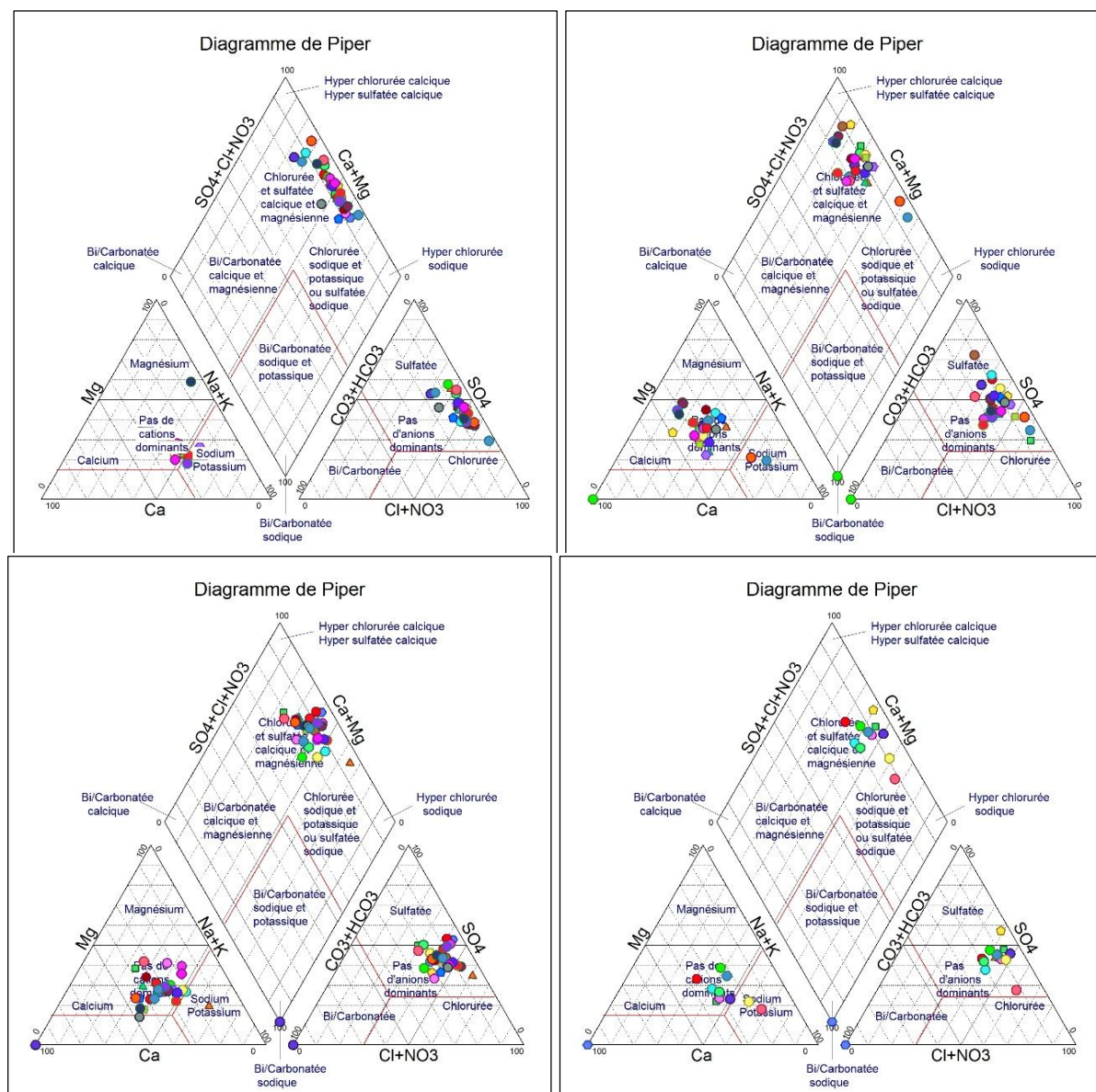


Figure 153: Faciès chimique des eaux relatif à la formation (8-Q4-5) selon le diagramme de Piper.

Les données analysées ont été groupées en fonction de la configuration géologique (type de formation géologique) afin de distinguer les faciès des eaux de l'aquifère étudié et d'évaluer leur variabilité spatiale. Les échantillons analysés sont projetés sur les figures 152 et 153. Il ressort que la grande majorité des points d'eau, soit 90 %, se localisent dans le pôle correspondant aux faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien. En revanche, le faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique ne représente que 10 % de l'ensemble de nos échantillons analysés.

1.2 Diagramme de Stiff

Le diagramme de Stiff est un outil graphique conçu pour la représentation des compositions ioniques des eaux, en particulier pour visualiser la distribution des principaux cations et anions dans des échantillons prélevés. Il permet d'effectuer un classement des échantillons en fonctions de leurs caractéristiques chimiques, en illustrant les concentrations ions majeures sous

forme de tracés polygonaux. Plus précisément, les cations sont représentés sur les axes horizontaux à gauche du diagramme, tandis que les anions figurent à droite. Cette disposition permet d'avoir une vue d'ensemble de caractéristiques ioniques des échantillons et permet de déterminer les différents faciès chimiques existants.

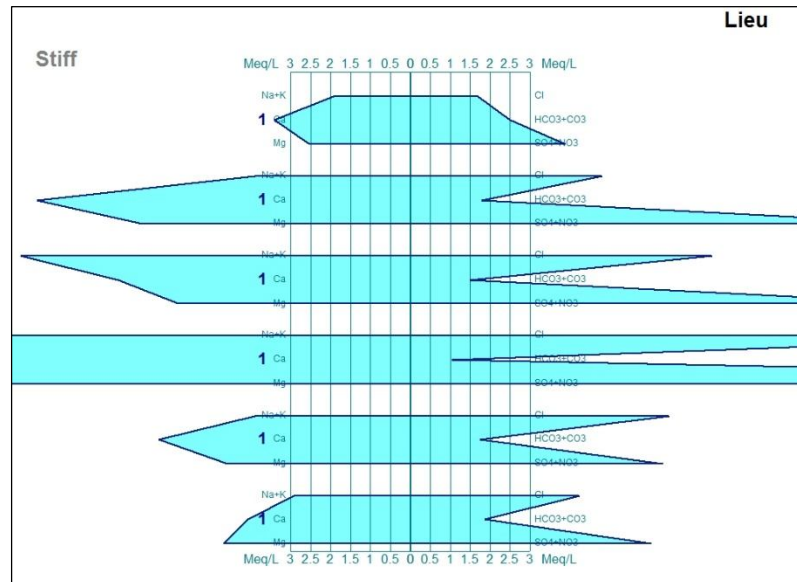


Figure 154 : Diagramme de Stiff (3-Q6).

Dans le cadre de notre investigation, le diagramme de Stiff a été exploité en vue de caractériser la composition ionique des échantillons d'eau collectés dans la plaine étudiée (fig.154, fig.155 et fig.156). Son utilisation nous a permis de mieux comprendre la diversité de faciès hydrochimiques présents dans cette zone. En effet, l'analyse et l'interprétation du tracé polygonal ont montré une grande variabilité dans la composition chimique des eaux, suggérant la présence de plusieurs types d'eau ayant des caractéristiques distinctes, témoignant la diversité hydrochimique dans la plaine.

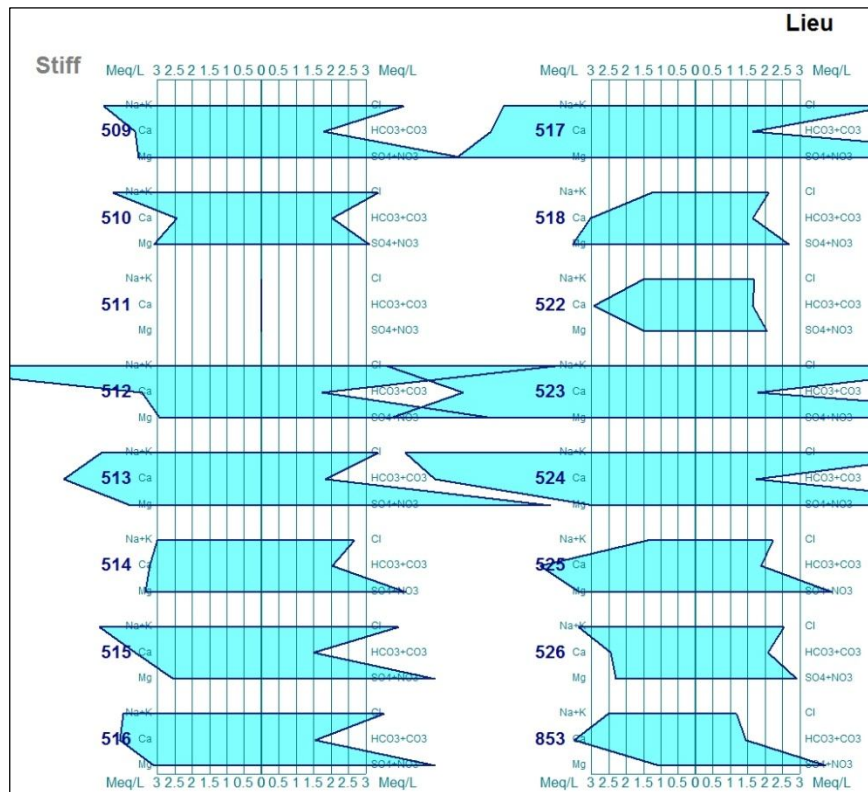


Figure 155: Diagramme de Stiff (4-Q1-2).

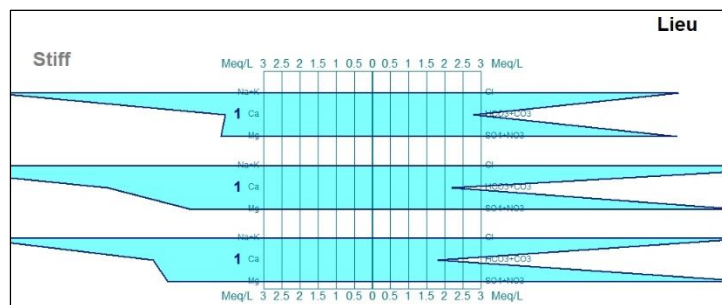
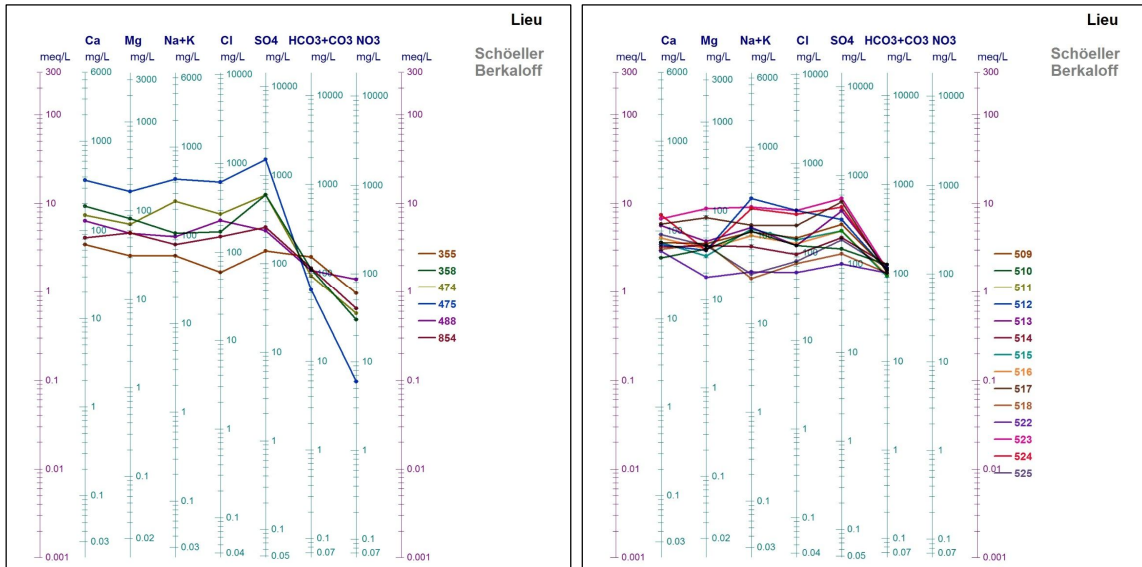


Figure 156: Diagramme de Stiff (13-Q5).

1.3 Diagramme de Schöeller-Berkaloff

Ce diagramme correspond à une illustration graphique semi-logarithmique, où les ions sont positionnés sur l'axe des abscisses et les variations relatives de leurs concentrations ions sont reportées sur l'axe des ordonnées. Les concentrations des différents éléments projetés sont reliées par des droites, ce qui permet d'identifier la nature et le type du faciès d'un échantillon d'eau analysé.

Suite aux analyses réalisées à l'aide du diagramme de Schöeller-Berkaloff (fig.157 et fig.158), il ressort que les eaux de la plaine de Tabelbala se classent principalement parmi les catégories sulfatées-sodiques, sulfaté-calcique et chloruré sodique. La projection de ces résultats chimiques sur ce diagramme nous a permis d'identifier et de mettre en évidence la potabilité de ces eaux de la plaine de Tabelbala. En nous référant aux normes algériennes et aux recommandations de l'OMS, nous constatons que les concentrations des ions présents dans ces eaux dépassent les seuils de potabilité fixés. Ainsi, les teneurs en ions de ces eaux sont supérieures à celles autorisées par les normes de potabilités, tant celles de l'OMS que celles des normes algériennes.

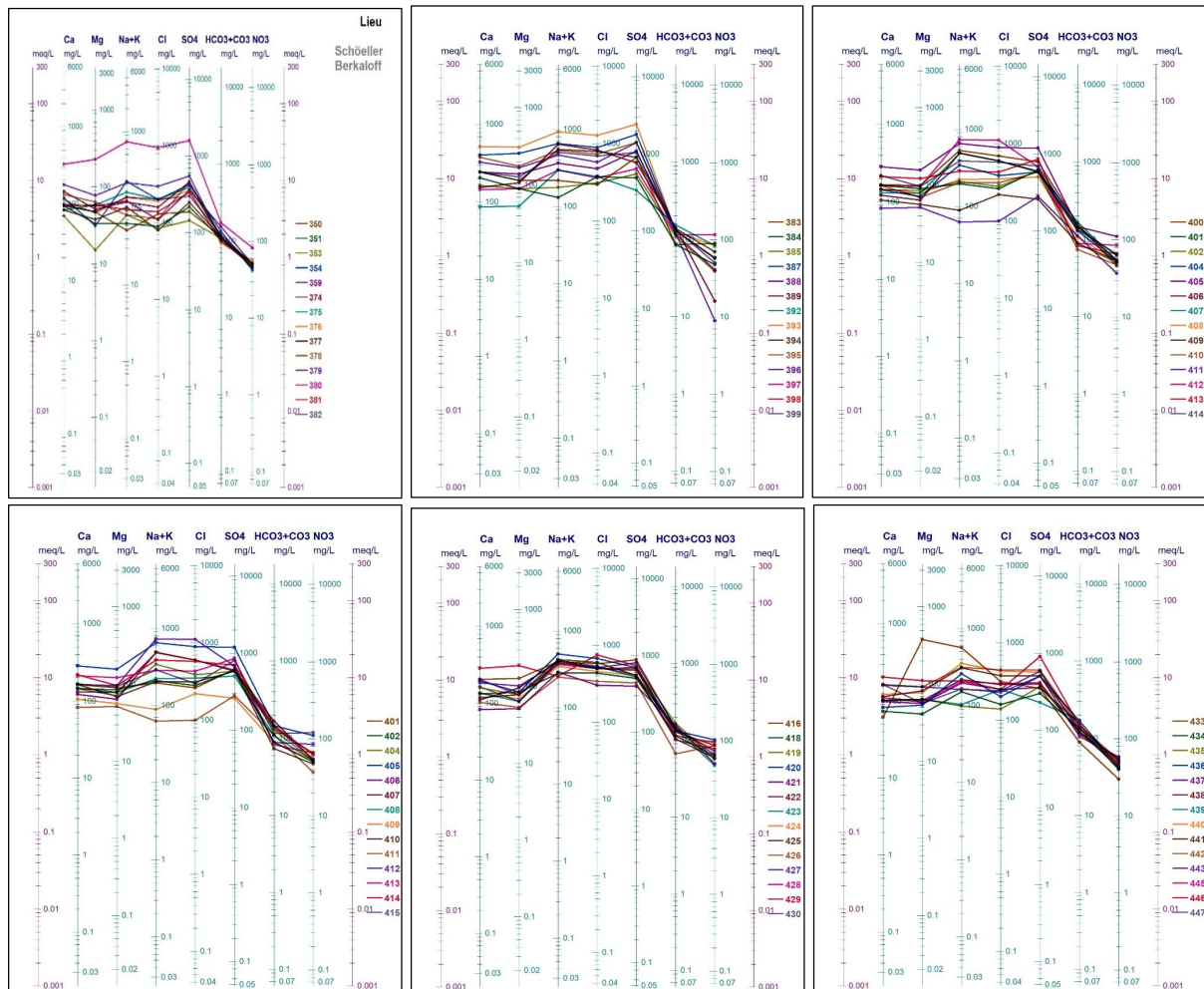


(a)

(b)

Figure 157: Représentation des eaux relatives à la formation (a :3-Q6) et (b :4-Q1-2) selon Schöeller-Berkaloff.

Ces eaux peuvent être utilisées, mais leur exploitation nécessite des précautions particulières ainsi qu'un suivi régulier afin de prévenir tout risque pour la santé publique.



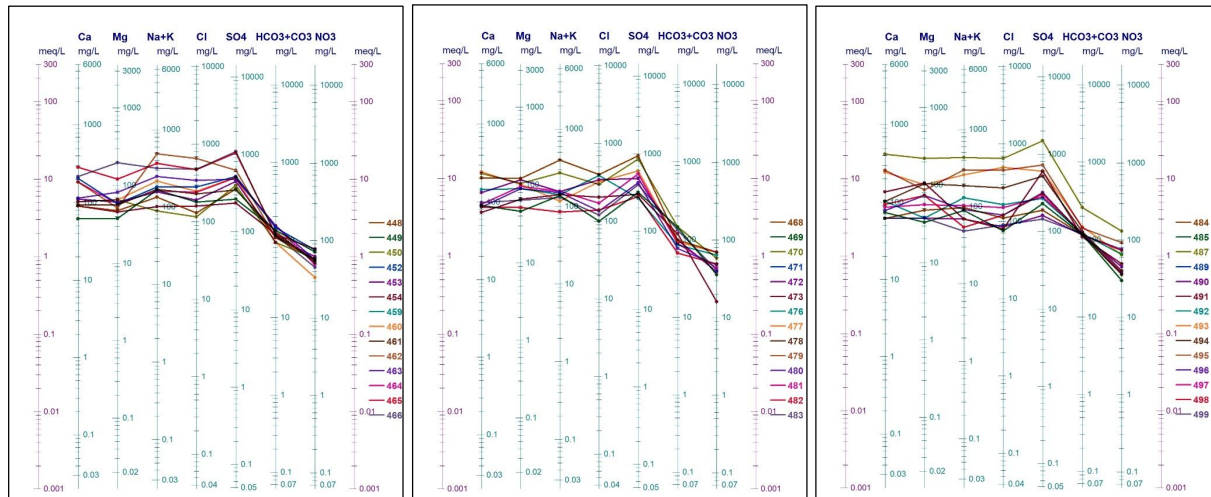


Figure 158: Représentation des eaux relatives à la formation (8-Q4-5) selon Schöeller-Berkaloff.

1.4 Diagramme de Riverside-Wilcox

Le diagramme de Riverside-Wilcox (fig.159) permet d'effectuer une classification des eaux, en fonction de leur conductivité ainsi que des concentrations en Sodium (Na).

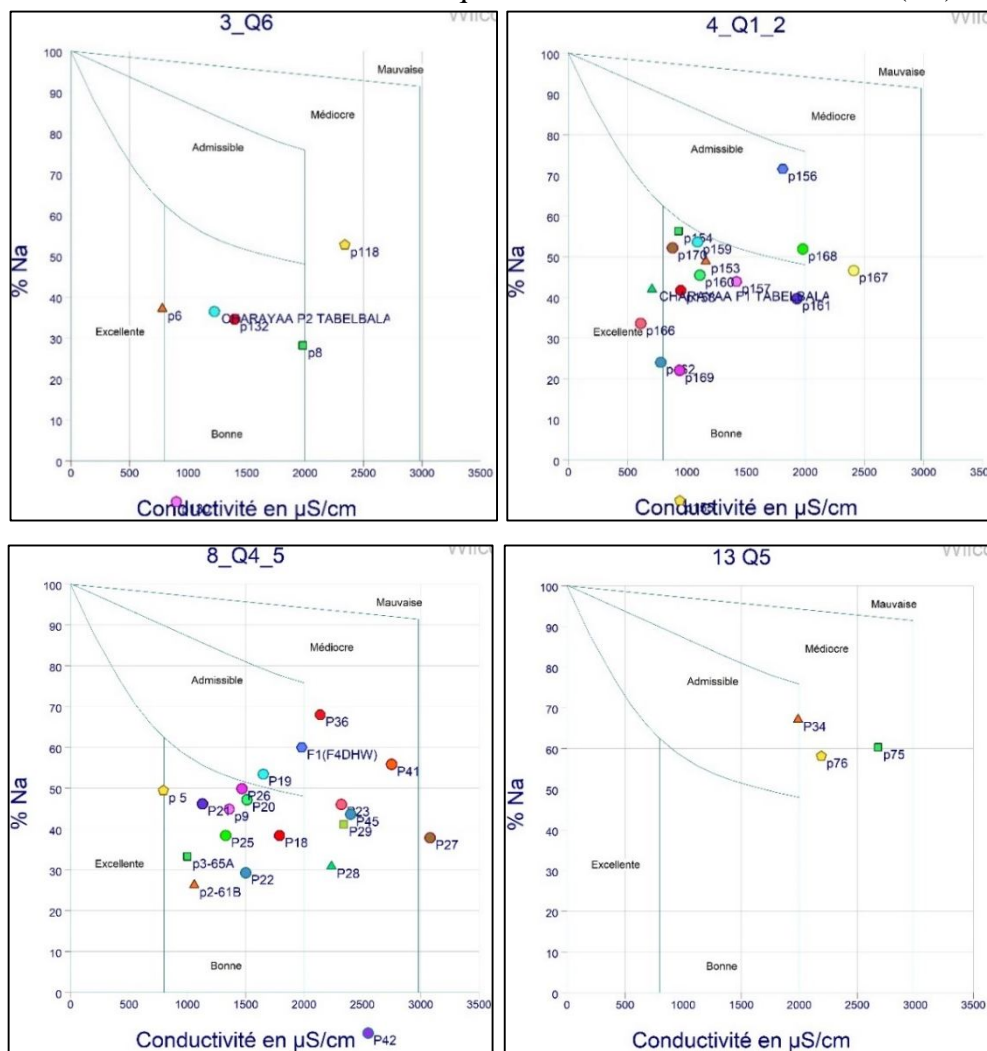


Figure 159: Diagramme de Riverside-Wilcox.

L'analyse des différentes représentations graphiques de nos échantillons par rapport au diagramme de Riverside-Wilcox, révèle une répartition en quatre catégories d'eau. Le premier groupe, majoritaire, appartient à la classe 'bonne'. Le deuxième groupe est classé dans la catégorie 'admissible', tandis que les autres échantillons se répartissent entre les classes 'excellente' et 'médiocre'.

2. Rapport caractéristique

L'analyse des rapports caractéristiques relatifs à nos échantillons repose sur l'étude des trois rapports suivants :

Tableau 38 : Calcul des rapports caractéristiques.

Points d'eau	Désignation	rSO_4/rCl	rCl/HCO_3	rMg/rCa
412	p56	0.6	12.6	0.6
859	Erg Er Raoui P1	0.7	2.7	0.7
476	p120	0.7	4.6	0.6
506	p150	0.8	7.0	0.8
386	P30	0.8	3.4	0.6
462	p106	0.9	6.2	0.3
406	P50	1.0	4.2	0.5
429	p73	1.0	6.5	0.7
423	p67	1.0	3.8	0.5
407	P51	1.0	3.6	0.6
502	p146	1.1	7.0	0.6
433	p77	1.1	3.6	6.2
394	P38	1.1	5.8	0.5
400	P44	1.1	4.5	0.6
418	p62	1.1	3.9	0.6
421	p65	1.3	2.0	0.6
440	p84	1.3	3.1	0.6
441	p85	1.3	2.8	0.7
538	p182	1.3	1.2	0.3
558	p202	1.3	4.8	0.5
535	p179	1.5	1.9	0.6
399	P43	1.5	5.2	0.5
551	p195	1.5	3.4	0.4
416	p60	1.5	4.1	0.6
461	p105	1.5	1.8	0.6
503	p147	1.7	1.0	0.7
518	p162	1.7	0.7	0.7
854	Chraïa P2	1.7	1.3	0.7
540	p184	1.8	1.1	0.6
548	p192	1.8	1.3	0.2

rSO₄/rCl

Parmi les 175 échantillons, 164 présentent des valeurs supérieures à l'unité, ce qui indique une prédominance de 93.71 % de rSO₄ sur le Cl (tab.38).

rCl/HCO₃

La majorité des points d'eau de notre zone (148 points d'eau) ont des valeurs supérieures à l'unité pour ce rapport, tandis que 27 échantillons présentent un rapport inférieur à l'unité, traduisant ainsi la prédominance du HCO₃ (tab.38).

Mg/rCa

Pour la plupart des points d'eau échantillonnés, ce rapport est inférieur à l'unité, à l'exception de 8 points d'eau, ce qui traduit une prédominance de calcium sur le magnésium (tab.38).

3. Analyse de la qualité par les approches statistiques

Dans le but d'identification des caractéristiques minéralogiques des eaux de la plaine de Tabelbala, ainsi de déterminer leur origine, une analyse statistique a été réalisée en utilisant la méthode d'Analyse en Composante Principale sur (ACP) sur les différents points d'eau de la plaine. Dans le domaine des investigations hydrogéologiques, la technique de l'ACP est largement utilisée, car elle permet d'analyser un ensemble de variables, et d'identifier les différents facteurs principaux influençant la variabilité hydrochimique (Mudry, 1987).

Les techniques statistiques bidimensionnelles sont reconnues pour leur capacité à représenter graphiquement les relations entre les variables.

Parmi ces techniques, l'Analyse en Composante Principale (ACP) permet de transformer la base canonique des variables en une base des facteurs définis par les vecteurs propres de la matrice de corrélation.

Cette technique statistique présente la particularité de fournir une corrélation entre les variables, ainsi une visualisation spatiale des observations en deux ou trois dimensions (Mudry, 1987).

L'analyse permet également de créer des liens entre les différentes variables grâce à des représentations graphiques telles que le cercle de corrélations. Elles offrent également une représentation spatiale des individus facilitant leur regroupement en classes (Chaouki *et al.*, 2015). De plus, elle permet de présenter graphiquement une grande quantité d'information contenue dans une base de données (Boucher, Bégin and Arseneault, 2010), ce qui simplifie l'interprétation de volume important de données (Baccini, 2010).

En utilisant XLSTAT, une Analyse en Composante Principale a été menée sur divers paramètres physico-chimiques. Cette analyse a généré une panoplie de résultats, comprenant des tableaux et des graphiques, notamment des nuages de points associés à un cercle de corrélation. Il est important de noter que les points les plus proches du cercle sont considérés comme significatifs.

Les différents paramètres concernés par l'analyse sont reportés dans le Tableau 39.

Tableau 39: Différents paramètres physico-chimiques utilisés dans l'analyse ACP.

Vari	Obser	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Min	Max	Moy	Ecart-type
PH	177	0	177	6.05	8.01	7.510	0.26
Cond	177	0	177	610.00	9140.00	2195.58	1321.64
RS	177	0	177	390.00	5700.00	1391.29	821.90
Ca ²⁺	177	0	177	37.00	522.00	133.23	79.33
Mg	177	0	177	13.00	380.00	74.84	50.08
Na	177	0	177	24.00	850.00	193.37	146.92
K	177	0	177	4.00	315.00	31.85	33.42
Cl	177	0	177	42.00	1300.00	306.78	223.67
SO ₄	177	0	177	100.00	2400.00	497.68	341.71
NO ₃	177	0	177	6.00	135.00	54.53	20.68
HCO ₃	177	0	177	64.00	256.00	117.39	23.64
TH	177	0	177	22.00	255.00	62.59	36.39
TAC	177	0	177	0.00	21.00	9.74	2.10
NH ₄	177	0	177	0.00	0.25	0.008	0.02
NO ₂	177	0	177	0.00	15.00	0.09	1.12
PO ₄	177	0	177	0.00	0.42	0.02	0.06
Mo	177	0	177	0.00	8.40	1.90	2.07
Min	177	0	177	376.00	5667.00	1372.06	821.66
SI	177	0	177	407.00	5668.00	1416.47	817.64

3.1 Matrice de corrélation

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des coefficients de corrélation entre les concentrations relatives aux différents éléments majeurs.

Afin d'identifier la source des eaux souterraines de la région de Tabelbala, une matrice de corrélation de Pearson a été effectuée, permettant ainsi de déterminer les interrelations entre les différents éléments chimiques (Ahamad *et al.*, 2018).

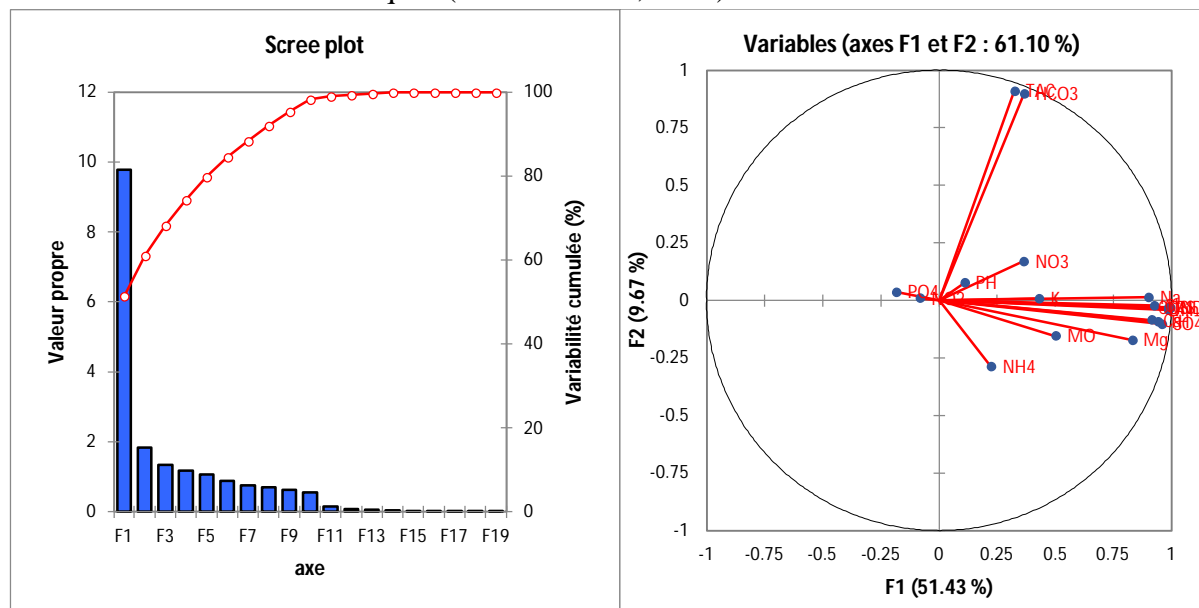


Figure 160 : Analyse en composantes principales (espace des variables).

Sur le diagramme de la figure 160, les axes F1 et F2 montrent clairement que 61.10 % des données sont associées à un pôle de minéralisation de l'eau, regroupent le sodium (Na^+), le magnésium (Mg^{2+}), les sulfates (SO_4), la conductivité, la dureté totale (TH), les chlorures (Cl^-), le résidu sec et le calcium (Ca^{2+}). Ce pôle est opposé à celui du phosphate. La forte corrélation entre les sulfates, le magnésium et le calcium suggère probablement une homogénéité des sources et des processus d'acquisition de minéralisation. Ces éléments servent d'indicateurs des interactions entre l'eau et les roches.

Tableau 40: Matrice de corrélation pour les points d'eau de la région de Tabelbala.

Var	PH	Con	RS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	TH	TAC	NH ₄	NO ₂	PO ₄	MO	SI
PH	1																	
Cond	0.102	1																
RS	0.101	0.999	1															
Ca	0.035	0.903	0.903	1														
Mg	0.045	0.786	0.788	0.749	1													
Na	0.090	0.925	0.925	0.708	0.647	1												
K	0.173	0.368	0.371	0.249	0.589	0.358	1											
Cl	0.086	0.943	0.942	0.767	0.685	0.970	0.356	1										
SO ₄	0.071	0.957	0.959	0.937	0.817	0.809	0.348	0.816	1									
NO ₃	0.058	0.334	0.334	0.344	0.222	0.283	0.008	0.308	0.275	1								
HCO ₃	0.064	0.320	0.324	0.265	0.167	0.319	0.189	0.292	0.262	0.195	1							
TH	0.051	0.929	0.930	0.972	0.826	0.730	0.277	0.789	0.967	0.333	0.266	1						
TAC	0.058	0.278	0.283	0.218	0.139	0.279	0.169	0.253	0.224	0.160	0.945	0.229	1					
NH ₄	- 0.005	0.204	0.206	0.201	0.217	0.192	0.150	0.174	0.219	- 0.064	-0.041	0.189	- 0.062	1				
NO ₂	0.026	-0.076	- 0.074	- 0.069	- 0.055	- 0.073	-0.027	- 0.074	-0.074	- 0.036	-0.014	- 0.065	- 0.026	-0.024	1			
PO ₄	- 0.246	-0.167	- 0.165	- 0.119	- 0.120	- 0.173	-0.115	- 0.159	-0.152	- 0.034	-0.041	- 0.120	- 0.029	-0.091	0.238	1		
MO	0.083	0.444	0.449	0.424	0.417	0.371	0.309	0.415	0.436	0.150	0.071	0.450	0.064	0.078	0.042	- 0.072	- 0.471	1
Min	0.096	0.983	0.982	0.888	0.775	0.908	0.357	0.926	0.940	0.354	0.310	0.915	0.266	0.201	-0.077	- 0.172	- 0.471	
SI	0.084	0.981	0.982	0.891	0.779	0.906	0.367	0.923	0.945	0.351	0.322	0.918	0.277	0.196	-0.077	-0.16	0.475	1

D'après le tableau 40, il ressort que les corrélations observées révèlent que les variations des charges ioniques dissoutes sont majoritairement liées aux fluctuations de teneurs de ces ions. Il est également noté qu'une bonne partie d'éléments majeurs présente une corrélation positive entre eux (bonne corrélation), tandis que les concentrations de NO₂ et de PO₄ montrent une corrélation négative avec les autres éléments (fig.161).

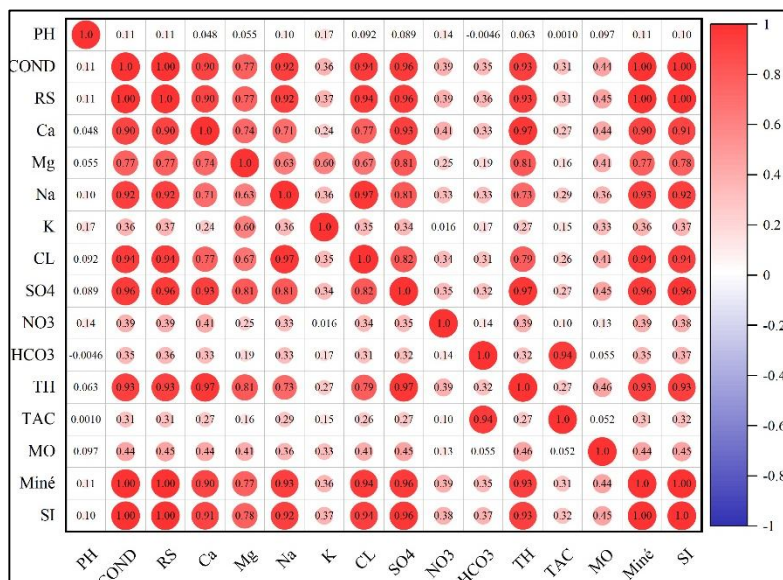


Figure 161 : Diagramme de corrélation des variables.

Des corrélations très fortes ont été mises en évidence entre plusieurs paramètres. Une corrélation presque parfaite (0.999) a été observée entre la conductivité et le résidu sec, ce qui montre que ces deux variables sont étroitement liées probablement en raison de la concentration des totales des solides dissous dans l'eau. En outre, une relation tout aussi forte (0.998), a été constatée entre le Si et la Minéralisation indiquant que l'augmentation des concentrations de Si est étroitement associée à une minéralisation élevée dans l'eau. De plus, une forte corrélation de 0.97 a été mise en évidence entre le chlorure (Cl⁻) et le sodium (Na⁺). Il est à signaler que d'autres corrélations ont été enregistrées entre la dureté totale (TH) et les sulfates (SO₄) (0.96), ainsi qu'entre la minéralisation et la conductivité (0.993).

En revanche, les nitrites (NO₂) ne montrent que des corrélations très faibles avec les autres variables. Les phosphates (PO₄) quant à eux, présentent des corrélations négatives avec plusieurs ions, notamment, le calcium (Ca²⁺), le magnésium (Mg²⁺) et les sulfates (SO₄²⁻), ce qui traduit l'existence d'une relation inverse, où les concentrations importantes de ces ions minéraux réduisent la présence des phosphates dans l'eau.

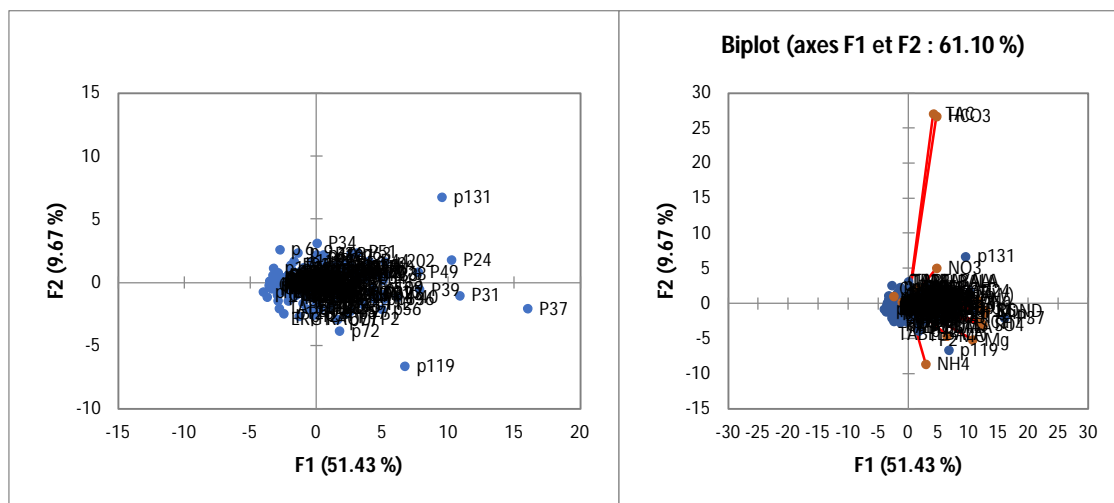


Figure 162: Analyse en composantes principales (espace des individus).

Etant donnée le nombre limité de données, en particulier dans un contexte de pression anthropique accrue, l'Analyse en Composante Principale (ACP) présente une fiabilité un peu restreinte pour fournir des informations sur le mécanisme secondaire associé à l'interaction eau-roche. Cependant, ces éléments seront bien éclaircis à l'aide des diagrammes binaires, qui permettent également d'examiner et de prendre en compte chaque point d'eau de manière individuelle, offrant ainsi donnant par la suite des résultats probants.

3.2 Application du CAH sur les échantillons de la région de Tabelbala

L'analyser des regroupements des échantillons en clusters distincts repose sur l'examen de seize variables hydrochimiques : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), dureté totale (TH), potassium (K^+), nitrites (NO_2^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), chlorure (Cl^-), nitrate (NO_3^-), alcalinité totale (TAC), ammonium (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}), molybdène (Mo), minéralisation (Min), et solide dessous (SI). Ces variables ont été choisies pour leur capacité à refléter l'évolution chimique des eaux en fonction des processus hydrochimiques qui les influencent.

L'analyse de regroupement hiérarchique de ces variables a permis de visualiser la distribution de ces échantillons sous forme d'un dendrogramme (fig.163 et fig.164). Cette technique met en évidence une séparation nette des échantillons en deux clusters principaux, offrant une compréhension détaillée des similarités et des différences entre les groupes d'échantillons en fonction de leur composition chimique. Le premier groupe rassemble un grand nombre de variables : COND, RS, SO_4^{2-} , Ca^{2+} , TH, Na^+ , K^+ , Cl^- , dont il montre une forte similarité entre ces éléments qui sont associés à la minéralisation naturelle de l'eau ainsi qu'à la dissolution des roches évaporitiques et carbonatées. Le regroupement de ces variables dans un même cluster suggérant qu'elles sont probablement influencées par des processus hydrochimiques communs ou des sources similaires.

En revanche, le deuxième groupe se compose de Mg, MO, et K traduisant la contribution probable des silicates (micas, feldspaths), et pourrait être lié à des apports anthropiques dans certains contextes. Tandis que le troisième groupe rassemble les nutriments et les composés azotés ((nitrate (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) nitrite (NO_2^-) et phosphate (PO_4^{3-}) qui constituent des éléments classiques de pollutions d'origine agricole ou bien domestique. Le quatrième

groupe renferme le bicarbonate (HCO_3^-) et le TAC dont le Tac est largement influencé par la concentration du HCO_3^- .

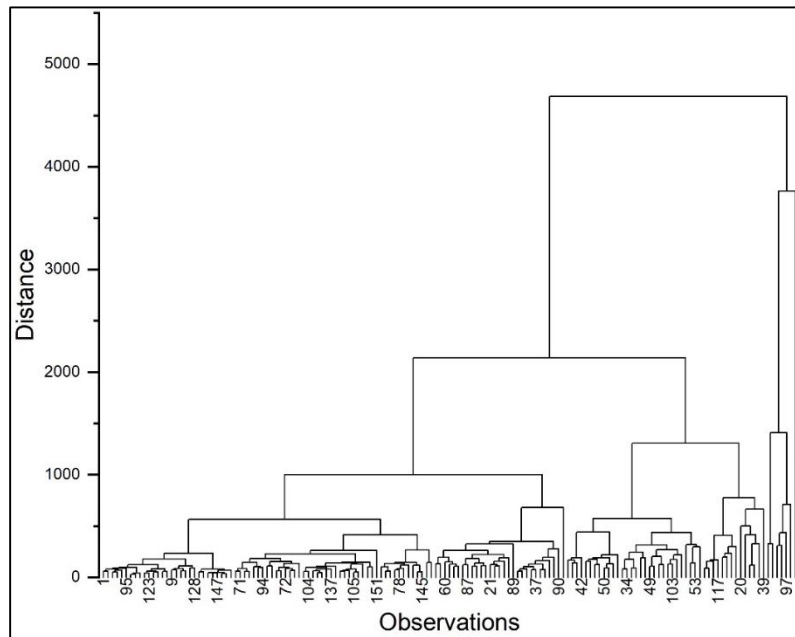


Figure 163: Dendrogramme des échantillons analysés de Tabelbala.

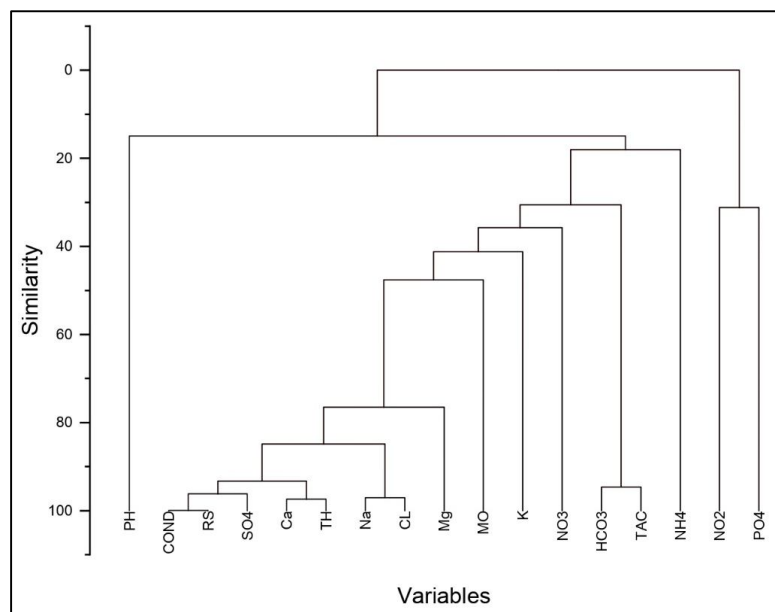


Figure 164: Dendrogramme des classes des individus de la plaine de Tabelbala.

4. Corrélation chimique

4.1 Relation magnésium-calcium (Mg^{2+} - Ca^{2+})

La figure de corrélation entre les concentrations de magnésium (Mg^{2+}) et de calcium (Ca^{2+}) met en évidence une relation claire et linéaire entre les deux éléments. Cette corrélation linéaire pourrait également indiquer l'existence d'un équilibre chimique stable entre ces deux éléments dans les eaux étudiées (fig.165).

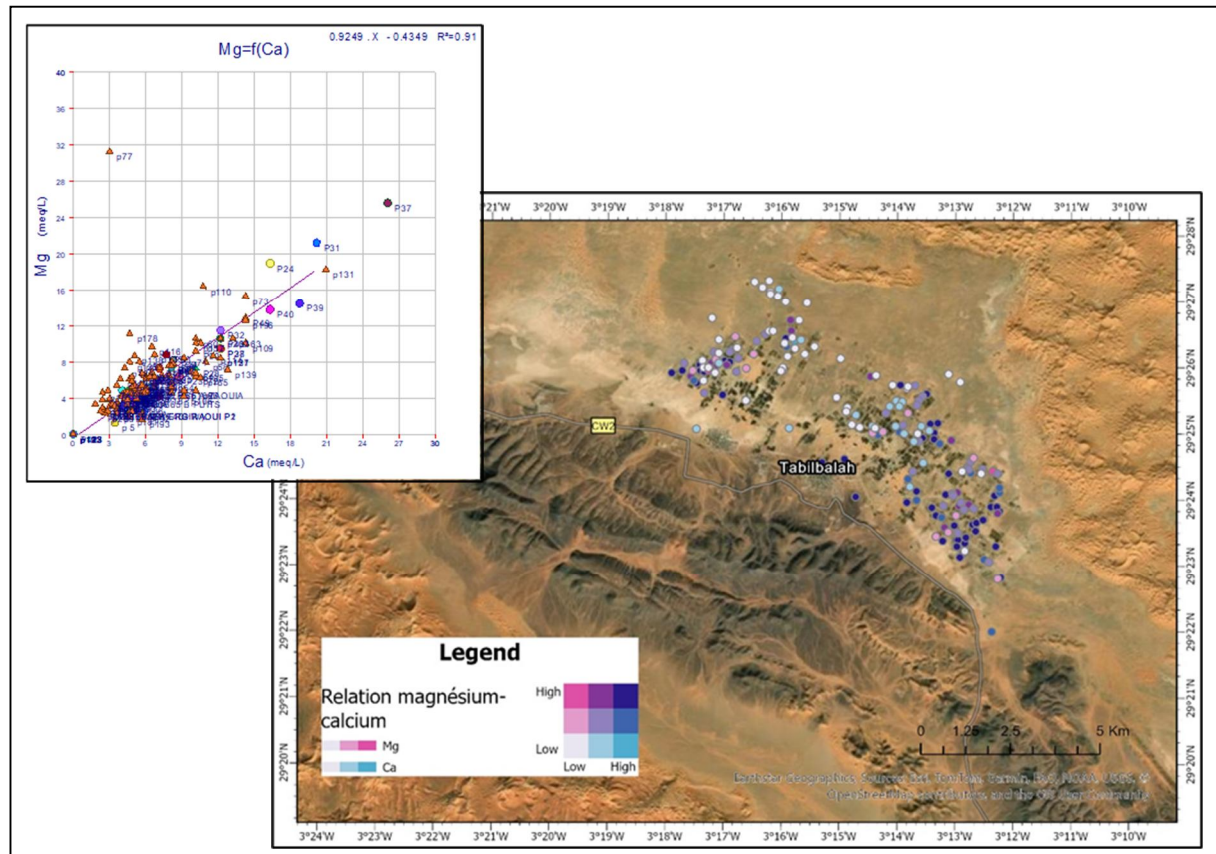


Figure 165: Relation magnésium (Mg^{2+})- calcium (Ca^{2+}).

4.2 Relation chlorure-sodium (Cl^-Na^+)

L'analyse détaillée de la corrélation entre le chlorure (Cl^-) et le sodium (Na^+) montre que la quasi-totalité des points d'eau se projette au-dessus de la ligne 1/1, indiquant une relation quasi proportionnelle nette entre ces deux ions avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.91$. Cette forte corrélation suggère une origine commune pour ces deux éléments chimiques, probablement liée des processus géochimiques spécifiques tels que la dissolution d'halite ($NaCl$) (Fehdi *et al.*, 2009),(Farid, Baloch and Ahmad, 2012), (Bouselsal and Saibi, 2022). Cette corrélation entre la donnée, traduit également et confirme la présence d'un faciès chloruré sodique dans les eaux étudiées (fig.166).

4.3 Relation sulfates-sodium ($SO_4^{2-}-Na^+$)

L'analyse de la corrélation entre les concentrations de sulfates (SO_4^{2-}) et de sodium (Na^+) révèle une relation directe, indiquant que les deux ions évoluent de manière parallèle dans la plaine de Tabelbala. Ce lien entre les concentrations confirme la prédominance du faciès sulfaté sodique dans cette région. Un grand nombre des points d'eau dans cette région se concentre le long de la droite d'influence de la dissolution sulfatée, en particulier l'anhydrite et le gypse. Les résultats obtenus suggèrent que la majeure partie du système aquifère de la plaine de Tabelbala est caractérisée par une prédominance des faciès sulfatés sodique avec une dissolution marquée de l'anhydrite et de gypse, processus qui mène à une concentration élevée de sulfates par rapport au sodium dans l'eau (fig.167).

V. Conclusion

Les résultats d'analyses menées dans la région de Tabelbala indiquent clairement que les eaux de la plaine sont fortement minéralisées, comme en témoigne leur conductivité élevée. Cette conductivité élevée est le reflet de la présence d'une grande diversité des éléments majeurs dissous dans l'eau. Le pH des échantillons d'eau varie généralement entre 6.56 et 8.1, plaçant ces eaux dans une gamme de pH légèrement acides à neutre. Cela suggère que ces eaux ne sont pas excessivement influencées par des polluants acides ou alcalins, mais restent d'une plage où les processus naturels dominent.

Les analyses des faciès hydrochimiques des eaux de la région ont permis d'identifier trois principaux types de composition ionique. Le faciès le plus dominant est le faciès sulfaté sodique, qui représente 67 % des échantillons analysés. Ce faciès se distingue principalement par une prédominance des ions de calcium (Ca^{2+}) par rapport aux ions de magnésium (Mg^{2+}), bien que la différence entre ces deux ions demeure peu prononcée. Le deuxième faciès identifié est le faciès sulfaté calcique, représentant 25 % des échantillons. Ce faciès se particularise par une forte présence des ions sodium (Na^+) par rapport aux ions magnésium (Mg^{2+}), ce qui suggère que la dissolution de sels solubles sodium joue un rôle clé dans la composition chimique des eaux. Enfin, le troisième faciès, représentant 6.96 % des échantillons, est le faciès chloruré sodique. Ce dernier se caractérise par une prédominance notable des sulfates (SO_4^{2-}) par rapport aux bicarbonates (HCO_3^-), ainsi que des ions calcium (Ca^{2+}) par rapport au magnésium (Mg^{2+}).

Un point essentiel qui mérite une attention particulière dans cette région est l'évolution des niveaux des nitrates dans les eaux. L'augmentation des concentrations des nitrates constitue un indicateur préoccupant de la dégradation de la qualité naturelle des eaux souterraines. Cette tendance suggère une pollution progressive des nappes phréatiques. Parmi des principales causes de cette pollution, les pratiques agricoles jouent un rôle majeur. En effet, l'utilisation intensive d'engrais azotés, couramment employé dans l'agriculture de la région, contribue significativement à l'augmentation de la concentration de cet élément dans les eaux souterraines.

Chapitre VIII
Evaluation de la
qualité des eaux

I. Introduction

Cette partie aborde une estimation prédictive de la qualité des eaux souterraines dans la région, en se basant sur l'analyse des données recueillies. Les caractéristiques chimiques de l'eau souterraine jouent un rôle déterminant pour évaluer son adéquation à différents usages, tels que la consommation domestique, l'agriculture et l'industrie. Ainsi, les différents travaux et recherches approfondies menés sur la composition chimique des eaux revêtent une importance capitale, car elles fournissent des informations essentielles sur leur qualité, leur dynamique et leur direction de mouvement. De nombreuses études ont également montré que la composition chimique des eaux souterraines dépend de divers facteurs, notamment la nature géologique des formations traversées, les propriétés des sols, les processus biologiques, ainsi que la topographie et le climat de la région d'étude (Davis and De Wiest, 1966, Todd and Mays, 2004).

La rareté croissante des ressources hydriques constitue une menace significative pour la vie humaine et le développement impactant le secteur agricole, industriel et urbain (Hasan and Tarhule, 2022, Chaudhary and Satheeshkumar, 2018, Kahil, Connor and Albiac, 2015). Plus de deux milliards d'habitants souffrent d'un accès insuffisant à l'eau (Gonçalves et al., 2019). Cette rareté se manifeste parfois par l'indisponibilité de l'eau, la non-potabilité due à la contamination des nappes phréatiques, ou l'inaccessibilité (ressources en eau) en raison de facteurs politiques, techniques et/ou institutionnels (Judeh, Bian and Shahrour, 2021). Cette situation de pénurie d'eau contraste avec les objectifs de développement durable (ODD6) des Nations unies (ONU) et les recommandations de l'OMS (Organisation mondiale de la santé) pour une gestion adéquate de l'eau (UNESCO and others, 2021). Par ailleurs, les différents travaux et investigations menés ont également mis en évidence que certaines épidémies telles que la grippe peuvent se propager à la faveur de cette pénurie d'eau, mettant en lumière l'importance d'une stratégie rationnelle et appropriée de ces ressources (Anser *et al.*, 2020, Adams, Pretorius and Snow, 2019, Zakar, Zakar and Fischer, 2020).

Cette pénurie a des répercussions directes sur l'activité agricole, notamment en réduisant les superficies irriguées et en affectant l'élevage dans la région considérée. Cette situation a eu un impact négatif sur le ratio eau-alimentation dans la région d'étude. En parallèle, la pollution des ressources hydriques s'est intensifiée au fil de temps, en particulier au cours de ces dernières années selon le rapport mondial des Nations Unies de 2018, sur l'évaluation qualitative et quantitative des ressources en eau. Cette pollution est principalement engendrée par les activités agricoles, industrielles et urbaines (UNEP, 2016, Loudière and Gourbesville, 2020, Koncagül *et al.*, 2020).

Selon le Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau (2018), environ 730 millions de tonnes d'eaux usées et de contaminants sont déversés chaque année dans l'eau, avec l'activité industrielle représentant le principal facteur contributif, déversant entre 300 à 400 millions de tonnes par an. De nombreuses études confirment cette tendance, mettant en évidence la dégradation croissante de la qualité d'eau à l'échelle mondiale (Chaudhary and Satheeshkumar, 2018, MacDonald, D'Odorico and Seekell, 2016, Gleeson *et al.*, 2012). Cette détérioration résulte principalement à la diminution de la recharge des nappes phréatiques, de l'utilisation excessive des pesticides par les agriculteurs et des activités humaines en général (Adimalla, 2019). De plus, l'augmentation de la température des eaux, tant en surface qu'en

profondeur, induit des changements biologiques et chimiques qui affectent indirectement sa qualité (Heiß *et al.*, 2020). Selon les investigations de l'ONU (Water, 2011, UNESCO, 2012), UNESCO and others, 2021), environ 1.8 milliard d'habitants consomment de l'eau contaminée, ce qui entraîne la mort de 1000 enfants chaque jour.

Afin d'établir une panoplie de cartes hydrochimiques la plus complète possible et d'étudier le comportement hydrochimique de la nappe aquifère, soumise à une surexploitation, les résultats sont présentés en utilisant à la fois les données d'échantillonnages recueillis, combinés à différentes méthodes et modèles d'évaluation de la qualité de l'eau qu'ils soient universels, empiriques, multicritères. De nombreux facteurs clés influencent la détermination des différentes caractéristiques quantitatives de l'utilisation de ressources hydriques à l'échelle mondiale, tels que la densité de la population, le niveau de développement socio-économique, les caractéristiques physiographiques y compris les conditions climatiques ainsi que l'étendue géographique du territoire (Li *et al.*, 2017, El Garouani *et al.*, 2024).

Le prélèvement total d'eau pour répondre aux besoins de la population (notamment pour la consommation domestique), de l'industrie et de l'agriculture, a été évalué pour chaque région, pays ou bassin hydrographique (UNESCO and others, 2021).

Le chimisme de l'eau joue un rôle primordial et important, en particulier dans l'évaluation qualitative des eaux souterraines, un domaine encore peu exploré dans les zones arides (Li *et al.*, 2017). Bien que la variabilité naturelle du chimisme de l'eau soit un phénomène entièrement aléatoire, des concentrations élevées en éléments chimiques indésirables peuvent avoir des conséquences graves sur la santé humaine et l'écosystème aquatique. Il est indéniable que la chimie des eaux souterraines est extrêmement complexe, mais les informations et les données recueillies sur divers facteurs permettent généralement d'estimer la qualité des eaux souterraines d'une zone spécifique ou d'un lieu donné.

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines repose sur l'idée que l'environnement physique offre un certain degré de protection des eaux souterraines contre les effets naturels, notamment vis-à-vis des contaminants qui peuvent atteindre l'environnement souterrain. Ainsi, certaines zones sont plus vulnérables que d'autres à la contamination des eaux souterraines.

Dans les zones arides, la protection des aquifères contre la pollution devient particulièrement essentielle, en particulier dans les milieux où les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques favorisent une propagation rapide des polluants (Kerzabi *et al.*, 2021). L'adoption de nouvelles technologies telles que les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la Télédétection et l'Intelligence artificielle sont désormais indispensables pour la cartographie et l'évaluation de la vulnérabilité, en particulier dans les régions en plein développement où les données géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, et sur occupation du sol sont souvent limitées.

II. Evaluation de la qualité des eaux de Tabelbala à des fins d'irrigation

Dans de nombreux pays, l'irrigation représente l'activité principale, consommant environ 90 % de l'eau disponible. Son rôle est essentiel pour garantir une production agricole suffisante et assurer une sécurité alimentaire. Les critères de qualité chimique de l'eau d'irrigation sont déterminés en fonction des besoins spécifiques des cultures, des caractéristiques des sols, du climat et des méthodes d'irrigation utilisées (Demdoum and Djebbar, 2009).

Dans la région de Tabelbala, l'irrigation repose largement sur des eaux souterraines, et les variations de leurs caractéristiques chimiques affectent directement les différentes cultures de palmiers dattiers cultivées dans les oasis. Il devient donc impératif de réaliser une analyse chimique des eaux d'irrigation afin d'identifier tout risque potentiel associé à certains éléments chimiques tels que le sodium, le magnésium et les bicarbonates. Le développement durable de l'agriculture dépend de la préservation de la qualité des ressources naturelles essentielles, à savoir les sols et l'eau. Bien que certaines pratiques agricoles puissent engendrer des risques environnementaux affectant à la fois les zones urbaines et rurales, il est possible de les minimiser en adoptant une gestion appropriée. Ces pratiques doivent intégrer les connaissances actuelles en matière de conservation des sols et de l'eau, en maintenant la productivité agricole.

Nous envisageons de mener une étude détaillée dans la région de Tabelbala, reconnue pour son activité agricole par excellence, et où la nappe phréatique est fortement sollicitée. Dans le cadre de l'analyse de la qualité de l'eau des aquifères de cette région, afin de déterminer sa pertinence pour l'irrigation, plusieurs méthodes ont été employées telles que le SAR, le TH, le Na %, l'IP, le RSC, le MAHR et le KR. Ces techniques ont permis de mettre en évidence, différentes catégories d'eau définies en fonctions de l'absorption de sodium, de calcium et de magnésium. Les résultats des analyses des échantillons ont été cartographiés et représentés sous forme de cartes des iso-concentrations, mettant en relief la répartition des différentes catégories d'eau ainsi que les zones présentant des risques pour l'agriculture. Par ailleurs, les risques de toxicité peuvent être associés à des problèmes liés à certains ions spécifiques ainsi à la présence d'éléments traces et des métaux lourds (Ayers, Westcot, and others, 1985). En raison de l'absence de donnée sur ces derniers, cette partie ne traitera pas les métaux lourds.

1. Taux d'Adsorption du Sodium (SAR)

L'alcalinisation des sols est un phénomène naturel majeur, étroitement lié à l'absorption excessive de sodium par les plantes. Ce dernier est particulièrement préoccupant dans les zones d'irrigation où l'eau utilisée est riche en sodium (Durand, 1973). Ce phénomène est évalué à l'aide du ratio d'absorption du sodium (SAR), qui mesure la relation entre la proportion de sodium présente dans l'eau d'irrigation par rapport à celle des cations calcium et magnésium.

Il est important de tenir compte la relation entre le SAR et le taux d'absorption du sodium par les racines de plantes. En effet, plus la concentration du sodium dans le l'eau d'irrigation est élevée, plus le risque d'alcalinisation du sol devient important (risque accru de salinisation du sol). En outre, la présence d'une quantité importante de sodium dans les eaux d'irrigation soulève une problématique particulière, car ce sodium est absorbé par la racine des plantes, puis transporté jusqu'aux feuilles, où il peut s'accumuler engendrant des dommages aux cellules végétales (Bouka *et al.*, 2019). Les résultats des analyses obtenus montrent que les valeurs des taux d'adsorption du sodium (SAR) des eaux de notre région varient de 2 à 48 méq/l, indiquant des différences significatives dans la qualité de l'eau d'irrigation de la région (fig.168).

Environ de 54.28 % (95 points d'eau) des échantillons prélevés au niveau de la région étudiée sont classées dans la catégorie "excellente" à "bonne" pour l'irrigation, signifiant que cette classe ne présente aucun risque d'alcalinisation. Par ailleurs, 22.28 % (39 points d'eau) des points d'eau appartiennent à la catégorie "admissible" (tab.42), traduisant que ces eaux peuvent être utilisées avec une surveillance régulière de leur qualité afin d'éviter tout problème potentiel à long terme. Cependant, 41 points d'eau, représentant 23.42 % de l'ensemble

d'échantillons, ont été jugés "inadmissibles" pour l'irrigation en raison de leur concentration élevée en sodium.

Le Taux d'Adsorption du Sodium (SAR) se calcule selon la formule de (Richards, 1954a) :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \quad (8.1)$$

où les concentrations du Na, Ca et Mg²⁺ sont exprimées en méq/l.

Tableau 41: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon le SAR (Todd, 1959),(Richards, 1954b)

Classes de l'indice SAR	Qualité	Nombre de points d'eau
<9	Excellente	28 (16 %)
9-17	Bonne	67 (38.28 %)
18-25	Admissible	39 (22.28 %)
>25	Inadmissible	41 (23.42 %)

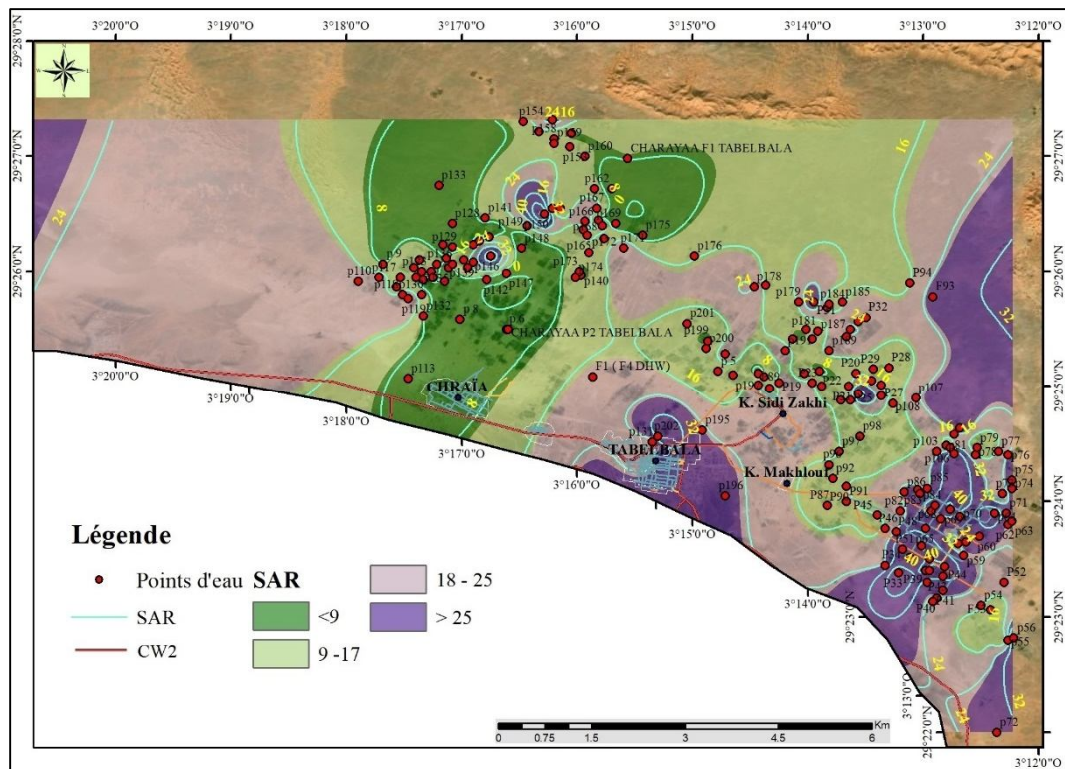


Figure 168: Variation du SAR dans la plaine de Tabelbala.

2. Titre hydrométrique (TH)

Cet indice, qui représente la différence entre la dureté totale et la dureté permanente de l'eau, varie selon les pays et peut être exprimé de différente manière selon les systèmes de mesures utilisées, telles que les degrés français, allemands, américains et russes. Le TH est influencé particulièrement par la présence de sels de magnésium et de calcium dans l'eau, qui contribuent à sa charge minérale. Les ions de magnésium et de calcium sont des éléments responsables à la formation des calcaires dans l'eau rendant ces eaux dures.

La dureté de l'eau est généralement mesurée par le titre hydrométrique (TH), et est exprimée en degré français (F°), où 1F° équivaut à 10 mg de carbonate de calcium (CaCO₃) par litre d'eau.

D'après la classification présentée dans le tableau 43, le degré de dureté est calculé.

Tableau 42: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon le TH. (Todd, 1959),(Richards, 1954b).

Classes	Dureté en mg/l (CaCo3)	N° de points d'eau
Douce	<75	129 (73.71 %)
Moyennement douce	75-150	39 (22.28 %)
Dure	150-300	7 (4 %)
Très dure	>300	-----

Le Th est donné par l'équation suivante :

$$TH = Ca * \frac{CaCo3}{Ca} + Mg * \frac{CaCo3}{Ca} \quad (8.2)$$

Avec : Caco³ et Mg²⁺ sont exprimés en méq/l.

Cette équation peut être simplifiée à :

$$TH = 2.5Ca * 4.1Mg \quad (8.3)$$

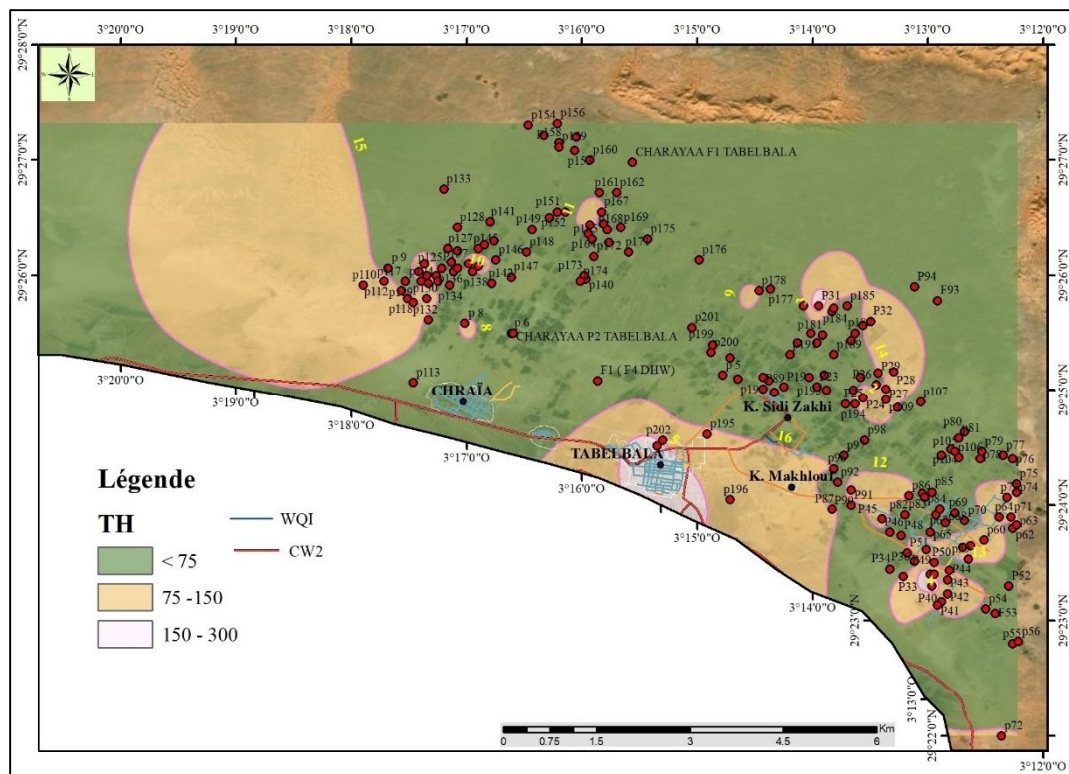


Figure 169: Répartition spatiale du titre hydrométrique à Tabelbala (TH).

Dans la zone étudiée (plaine de Tabelbala), les résultats obtenus montrent clairement que parmi les points d'eau échantillonnés, 129 points eau (soit 73.7 % de l'ensemble des échantillons) présentent une dureté inférieure à 75 mg/l⁻¹, ce qui signifie que ces eaux sont classées comme "eaux douces". Environ 39 points d'eau (soit 22.28 % des échantillons) présentent des concentrations comprises entre 75 et 150 mg/l, témoignant que ces eaux sont

‘moyennement douces’. Alors que 7 points d’eau (soit 4 % des échantillons) se situent dans la catégorie ‘eau dure’ (fig.169).

3. Pourcentage de Sodium soluble (SSP ou Na %)

Le sodium est un des éléments les moins souhaitables dans l’eau destinée à l’irrigation en raison de ses effets négatifs sur la perméabilité du sol et l’infiltration de l’eau. Il est souvent utilisé pour évaluer la qualité des eaux souterraines en vue de leur utilisation pour l’irrigation. Ce composant chimique se forme généralement de divers processus tels l’activité du système d’irrigation adopté, l’action d’altération des roches et des sols, l’effet d’intrusion marine et aux processus des traitements des eaux. Les concentrations importantes de sodium dans l’eau peuvent avoir un impact négatif sur la perméabilité du sol et sur l’infiltration de l’eau. Elles contribuent également à l’augmentation de la salinité globale de l’eau et peuvent être toxiques pour certaines cultures sensibles. En effet, l’ion sodium peut présenter des risques pour les structures des sols, engendrant des difficultés à réduire la perméabilité et à infiltrer l’eau. De plus, Il peut substituer le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d’argiles, entraînant par la suite la dispersion des particules du sol. Cette dispersion conduit à la genèse d’un sol compact, dur et très imperméable (Simsek and Gunduz, 2007).

Le pourcentage de sodium dans l’eau se calcule à partir de l’équation suivante (Eaton, 1950) :

$$Na \% = \frac{Na+K}{Ca^{2+}+Mg+Na+K} * 100 \quad (8.4)$$

Avec : Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺, sont exprimés en méq/l.

Les résultats de l’étude révèlent que la région considérée présente des concentrations de sodium (Na %) variant entre 17 et 80 méq/l. Les concentrations les plus élevées de sodium sont observées dans certains puits, localisés particulièrement à l’est de la zone d’étude, notamment les puits de Tabelbala, p150, p56, P50, P156, P33. Cette concentration élevée en sodium dans ces puits est probablement liée à la présence des évaporites dans le sous-sol de cette partie de la région.

Tableau 43: Classification des eaux de la plaine de Tabelbala selon le Pourcentage de Sodium Na % (Todd, 1959).

Classes de l'indice Na %	Qualité	Nombre de points d'eau
<20	Excellente	1 (0.51 %)
20-40	Bonne	36 (20.57 %)
40-60	Admissible	110 (62.85 %)
60-80	Inadmissible	29 (16.57 %)

La spatialisation du pourcentage du sodium soluble (tab.44) révèle clairement que la majorité des eaux souterraines des aquifères de la région de Tabelbala appartiennent aux classes ‘admissibles’ (62.85 %) et ‘bonnes’ (20.57 %).

Cependant, 16.57 % des points d’eau sont classés comme ‘inadmissibles’, localisés principalement aux extrémités est et ouest de la région de Tabelbala (fig.170). Bien que la qualité de l’eau soit globalement adaptée à l’irrigation dans la plupart des zones, les points d’eau, en particulier ceux situés aux extrémités de la région, présentent des concentrations en sodium particulièrement élevées, ce qui les rend inappropriés pour l’irrigation. Cela impose une gestion prudente de ces ressources dans la région.

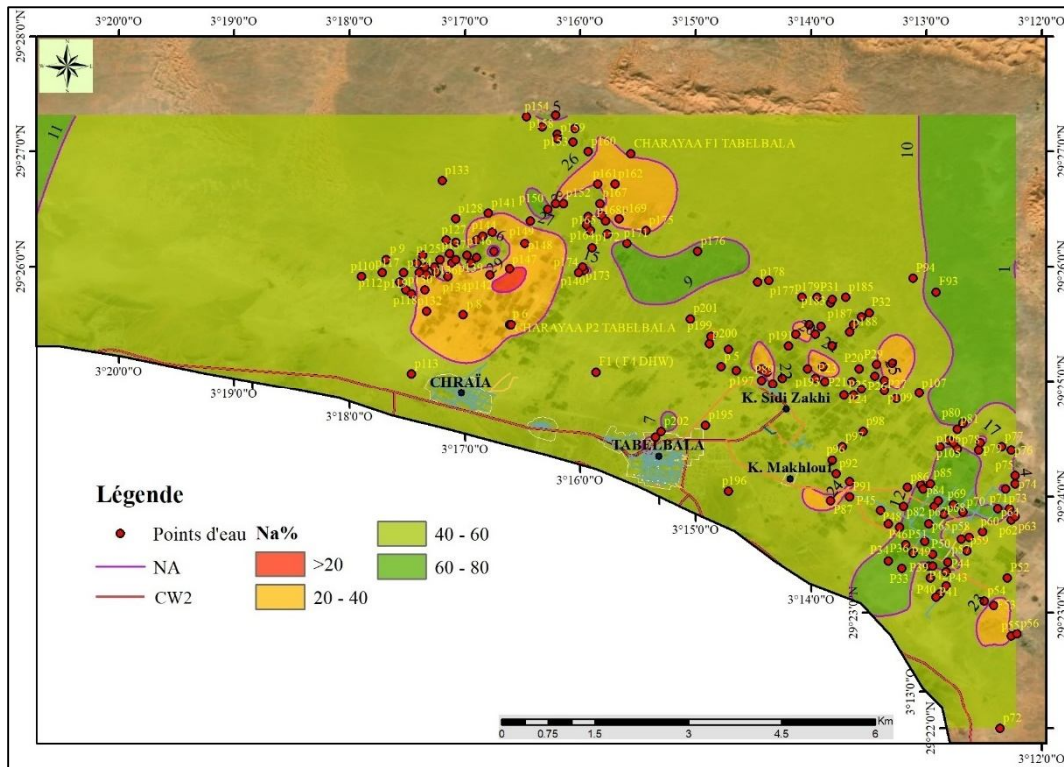


Figure 170: Présence de pourcentage de sodium (Na %) à Tabelbala.

Lorsque la concentration en sodium dépasse les 15 %, la porosité du sol diminue, ce qui entraîne une diminution de circulation de l’air et de l’eau dans le sol. Une telle teneur élevée en sodium pourrait engendrer un stress hydrique, même en cas d’irrigation intensive, si l’eau n’atteint pas les racines des plantes.

4. Indice de perméabilité (IP)

De nombreux travaux, notamment ceux de (Younsi *et al.*, 2001), ont montré que la perméabilité du sol dépend principalement de plusieurs paramètres tels que la teneur en sodium, la concentration en bicarbonate, la concentration totale de l’eau et la nature du sol.

L’indice de perméabilité a été initialement défini par (Doneen, 1962), qui a combiné ces trois paramètres (quantité du sodium, concentration en bicarbonate et concentration totale de l’eau) pour évaluer la perméabilité du sol.

Cet indice s’exprime par la formule suivante :

$$PI = \frac{Na^{++} + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na} * 10 \quad (8.5)$$

Tableau 44: Classes d'indice de perméabilité relatives aux points d'eau de la plaine de Tabelbala. (Doneen, 1964).

Classes de l'indice IP	Qualité	Nombre de points d'eau
$>75 \%$	Excellente	122 (69.71 %)
$75 \% > PI > 50 \%$	Bonne	51 (29.14 %)
$50 \% > PI > 25 \%$	Admissible	2 (1.14 %)
$PI < 25 \%$	Inadmissible	-----

Les résultats obtenus indiquent que les eaux analysées présentent un indice de perméabilité variant de 1.14 à 69 % (tab.44). Il a été conclu que la majorité des points d'eau étudiés sont adaptés à l'irrigation, avec un indice de perméabilité du sol indiquant une qualité "excellente" pour 122 points d'eau, principalement situés au sud-ouest. Par ailleurs, 51 points d'eau correspondant à une qualité "bonne" ont également été identifiés. En revanche, la classe de qualité "admissible" se trouve particulièrement au nord-ouest de Chraïa, avec 2 points d'eau (fig.171).

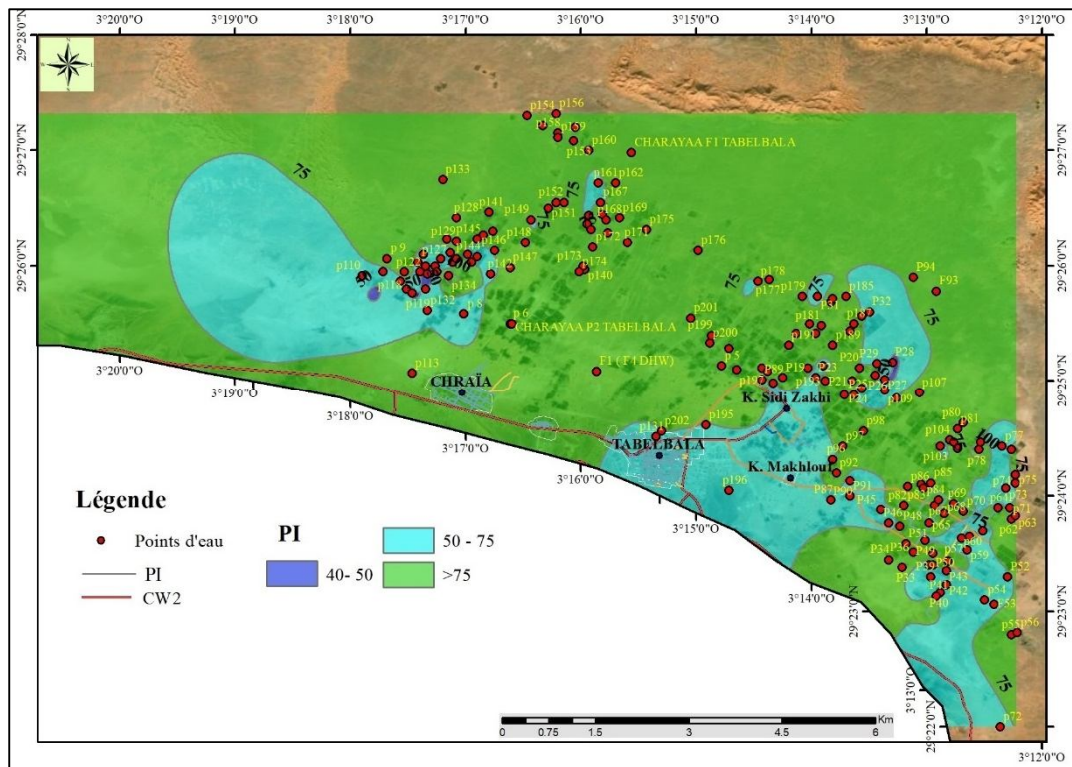


Figure 171: Indice de perméabilité (IP) dans la plaine de Tabelbala.

5. Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)

Dans cette investigation, le concept d'alcalinité résiduelle est utilisé dans le but de suivre l'évolution hydrochimique des eaux dans l'espace et dans le temps. L'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation ne repose pas uniquement sur le rapport de sodium adsorbé (SAR), qui néglige souvent le risque d'alcalinisation. En effet, les concentrations élevées de résidu sec carbonaté (RSC) entraînent généralement une forte adsorption de sodium (Na^+) par le sol, ce qui réduit la perméabilité du sol et ralentit également la croissance végétale (Rao *et al.*, 2012).

Cet indice est généralement exprimé par la formule suivante (Raghaunth, 1989a):

$$RSC = (Hco3 + Co3) - (Ca + Mg) \quad (8.6)$$

Avec $Co3$, $Hco3$, Ca et Mg sont exprimés en méq/l.

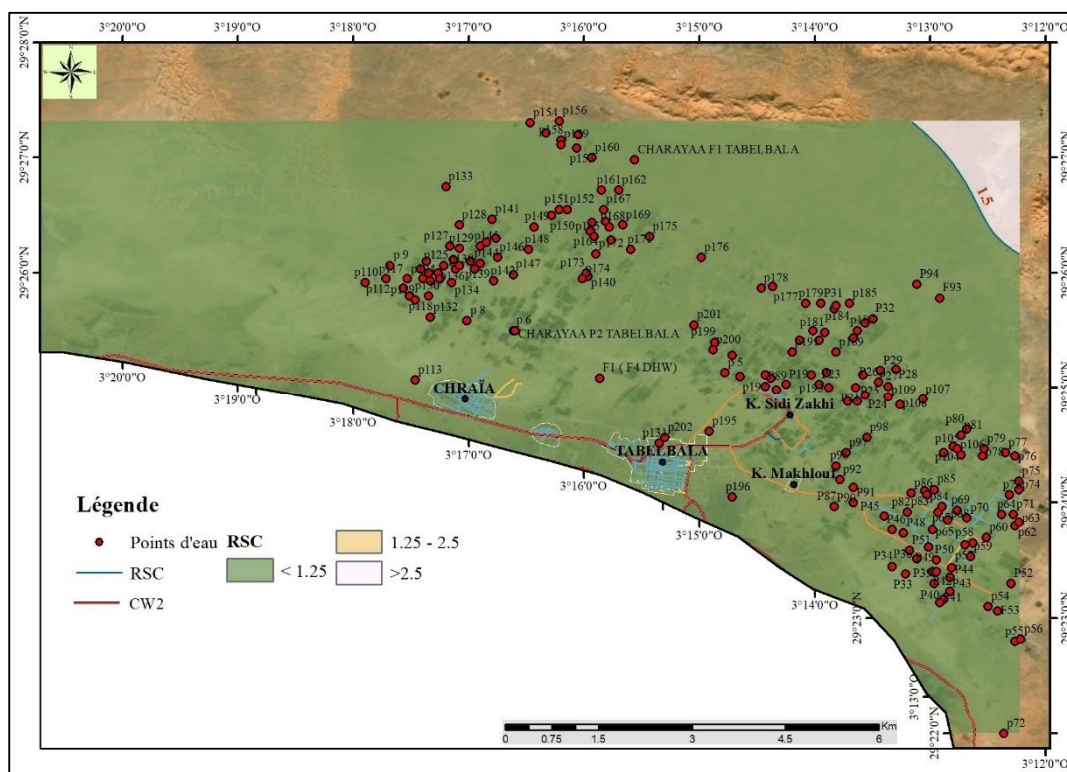


Figure 172: Carbonate de sodium résiduel (RSC) dans la plaine de Tabelbala.

Tableau 45: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon le RSC.(Raghaunth, 1989b).

Classes de l'indice RSC	Qualité	Nombre de points d'eau
<1.25	Appropriée à l'irrigation	175 (100 %)
1.25-2.5	Marginale à l'irrigation	-----
>2.5	Médiocre pour l'irrigation	-----

Pour nos échantillons étudiés, les valeurs calculées du résidu sec carbonaté (RSC) sont inférieures à 1.25 (tab.45 et fig.172), ce qui indique que les eaux analysées sont appropriées à l'irrigation. Cela signifie que l'eau étudiée ne présente aucun risque d'alcalinisation, du sol lors de son utilisation pour l'irrigation.

6. Taux d'Adsorption du Magnésium (MAR/MH)

Lorsque les eaux destinées à l'irrigation ne renferment plus de chlorure, il devient un peu difficile d'identifier correctement le risque de sodisation et d'alcanisation de ces eaux en se basant uniquement sur le SAR. Pour pallier cette limitation, la détermination des carbonates de sodium résiduel ou de l'alcanité résiduelle (RSC) a été introduite comme indicateur de qualité pour l'irrigation.

Le Taux d'Adsorption du Magnésium (MAR) est un des paramètres déterminants permettant l'évaluation d'aptitude des eaux à l'irrigation en prenant en compte la concentration relative de magnésium (Mg^{2+}) par rapport à la synthèse additive du calcium (Ca) et du

magnésium (Mg^{2+}) (Doneen, 1962). Ce taux permet de déterminer dans quelle mesure le magnésium est absorbé par le sol.

Le taux d'Adsorption du Magnésium est donné par la formule suivante (Raghaunth, 1989a) :

$$MAR = Mg / (Ca + Mg) \quad (8.7)$$

Dont les concentrations de magnésium (Mg^{2+}) et de calcium (Ca) sont généralement exprimées en méq/l.

Les résultats indiquent que les valeurs du Taux d'Adsorption du Magnésium (MAR), calculées pour les prélèvements d'eau de la plaine de Tabelbala oscillent entre 14 et 84 méq/l.

Tableau 46 : Classes du taux d'Adsorption du Magnésium relative aux points d'eau de la plaine de Tabelbala.(Doneen, 1964).

Classes de l'indice MAR	Qualité	Nombre de points d'eau
<50	Adéquate	171 (97.71 %)
>50	Inadéquate	4(2.28 %)

Les valeurs calculées du taux d'adsorption du magnésium (MAR), pour les échantillons prélevés varient de 14 à 84 méq/l (tab.46 et fig.173). Les résultats illustrent que 171 points d'eau sur 175 (soit 97.71 %) présentent des valeurs de MAR inférieur à 50, ce qui signifie que la majorité des points d'eau étudiés sont considérés comme adéquats pour l'irrigation. En revanche, seulement 4 échantillons ont un taux d'adsorption du magnésium supérieur à 50, ce qui les classe comme "inadéquates" pour l'irrigation (tab.46).

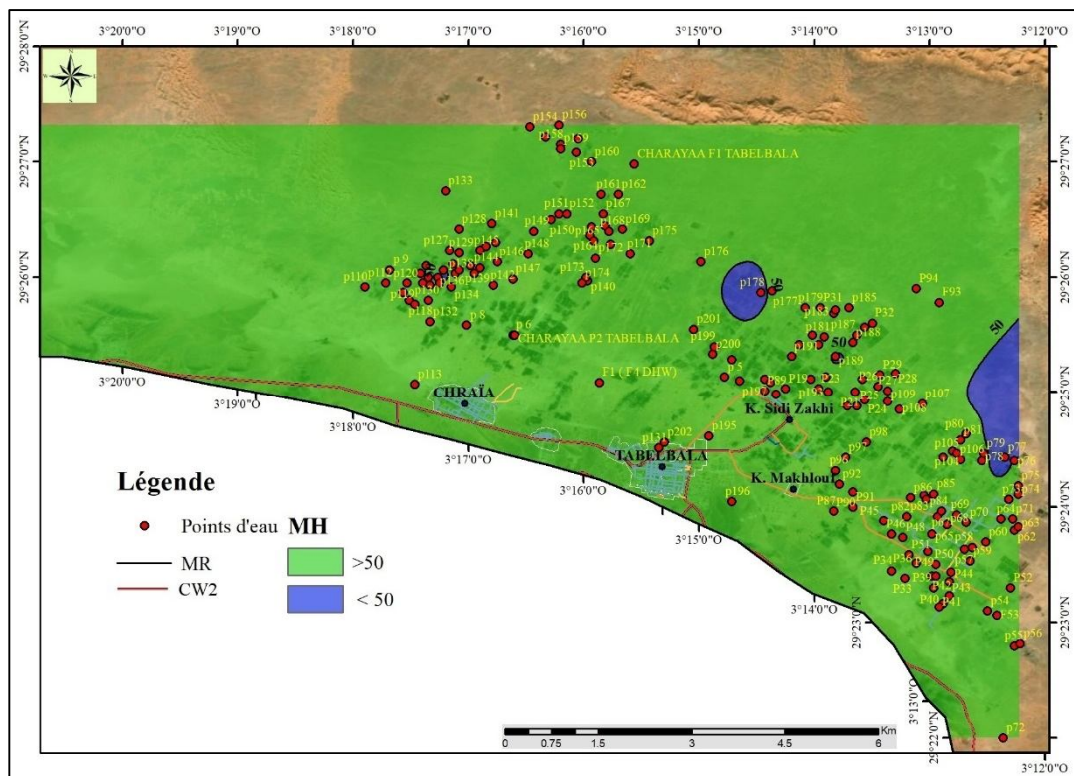


Figure 173: Risque de magnésium (MH/MAR) dans la plaine de Tabelbala.

7. Indice de Kelley (KR)

L'indice de Kelley, qui est l'un des paramètres déterminant l'aptitude des eaux à l'irrigation. Il permet d'évaluer le risque de sodicité des eaux destinées à l'irrigation. Ce dernier est défini comme le ratio des concentrations de Na⁺ par rapport à la somme du Ca⁺ et du Mg⁺.

Il se calcule selon la formule de (Doneen, 1962) :

$$KR = Na / (Ca^{+2} + Mg^{2+}) \quad (8.8)$$

Tableau 47: Classification des eaux relatives à la plaine de Tabelbala selon l'indice de Kelly.(Doneen, 1962)

Classes de l'indice KR	Qualité	Nombre de points d'eau
< 0.7	Excellente	61 (34.85 %)
0.7-1	Bonne	51 (29.14 %)
1-1.2	Admissible	27 (15.42 %)
>1.2	Inadmissible	36 (20.87 %)

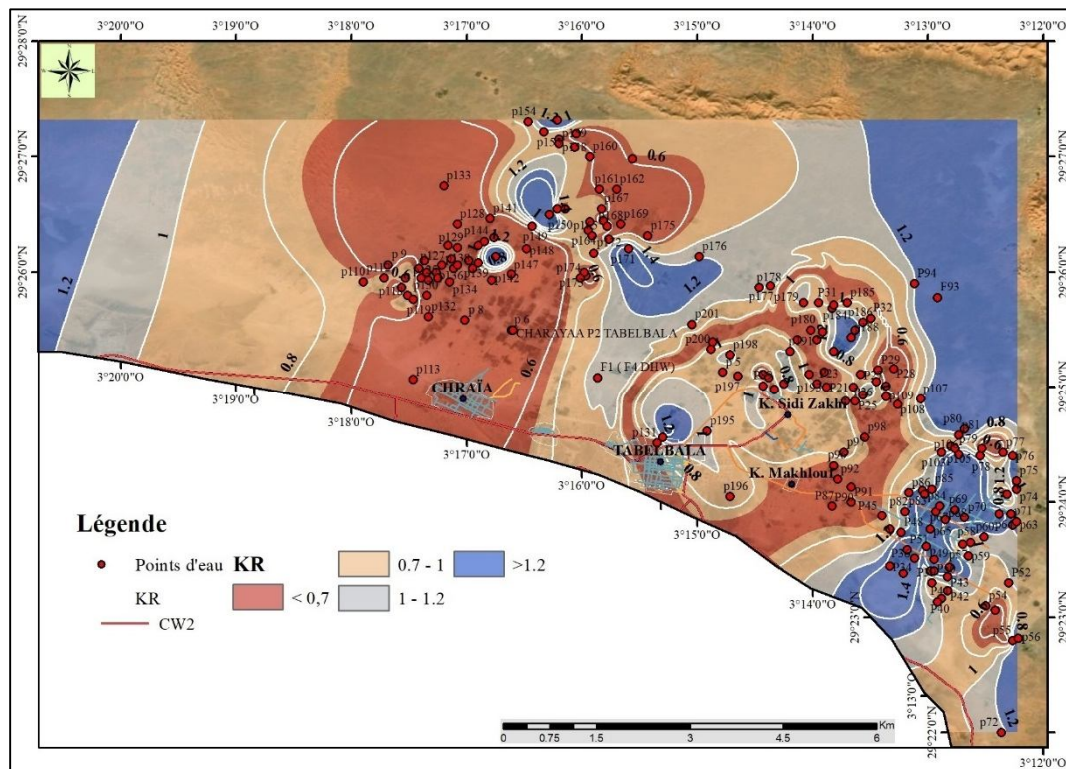


Figure 174: Indice de Kelley (KR) dans la plaine de Tabelbala.

D'après la carte générée (fig.174), il a été constaté que 61 points d'eau (34.8 %) des échantillons prélevés sont adaptés à l'irrigation, avec un KR illustrant une qualité "excellente" il se manifeste principalement au centre de la zone d'étude et au sud de Tabelbala. Par ailleurs, 51 (29.14 %) points d'eau correspondant à une qualité "bonne", caractérisant Ksar Makhlouf et Ksar Sidi Zakri. En revanche, les classes de qualité "admissible" et "inadmissible" se trouvent particulièrement aux extrémités est et ouest de la zone.

8. Indice de qualité de l'eau pour l'irrigation

En vue d'évaluer l'impact des différents paramètres de l'eau sur sa qualité et par conséquent sur sa pertinence à l'irrigation, l'indice de qualité de l'eau pour l'irrigation (IQWI) a été exploité (M'nassri *et al.*, 2022). Ce dernier permet de synthétiser l'impact global de de divers paramètres

de qualité de l'eau sur sa qualité d'ensemble. Il est classé en cinq catégories : excellente, bonne, mauvaise, très mauvaise et inappropriée. Une analyse paramétrique est effectuée en fonction de la matrice de corrélation calculée sur la base des données normalisées de 13 paramètres afin de déterminer les paramètres influençant la variabilité de l'eau d'irrigation. Ensuite, l'estimation valeur de mesure de qualité (q_i) est faite en fonction de la concentration de chaque paramètre rentre à la détermination de l'indice IWQI.

L'application de l'équation après normalisation des poids de pondération (W_i) de sorte que leur somme totale soit égale à 1. En utilisant l'équation (8.9), en se basant sur les limites de tolérance reportées sur le tableau 49, la valeur de q_i pour chaque paramètre est calculée.

$$q_i = q_{imax} - [(x_{ij} - x_{inf}) * q_{iamp}) / x_{amp}] \quad (8.9)$$

q_{imax} : désigne la valeur maximale de q_i pour chaque classe, x_{ij} : est la valeur mesurée de chaque paramètre, x_{inf} : correspond à la valeur associée à la limite inférieure de la classe du paramètres, q_{iamp} : est l'amplitude de la classe de mesure de qualité, x_{amp} : est l'amplitude de la classe.

Tableau 48 : Valeurs limites relatives aux paramètres utilisés dans l'évaluation de qualité (q_i).

q_i	CE ($\mu S\ cm^{-1}$)	SAR	Na ⁺ ($Meq\ L^{-1}$)	Cl ⁻ ($Meq\ L^{-1}$)	HCO ₃ ⁻ ($Meq\ L^{-1}$)
85-100	200 ≤CE<750	2≤SAR<3	2≤Na ⁺ <3	1≤Cl ⁻ <4	1≤HCO ₃ ⁻ <1.5
60-85	750≤CE<1500	3≤SAR<6	3≤Na ⁺ <6	4≤Cl ⁻ <7	1.5≤HCO ₃ ⁻ <4.5
35-60	1500≤CE<3000	6≤SAR<12	6≤Na ⁺ <12	7≤Cl ⁻ <10	4.5≤HCO ₃ ⁻ <8.5
0-35	CE<750 or CE≥3000	SAR<2 or SAR≥12	Na ⁺ <2 or Na ⁺ ≥9	Cl ⁻ <1 or Cl ⁻ ≥10	HCO ₃ ⁻ <1 or HCO ₃ ⁻ ≥8.5

La normalisation des poids de pondération de chaque paramètre est effectuée selon l'équation (8.10) :

$$w_i = \sum_{j=1}^k F_j A_{ij} / \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n F_j A_{ij} \quad (8.10)$$

où w_i représente le poids calculé pour chaque paramètre (variable) pour le modèle IWQI ; F_j : est la valeur propre du premier composant ; A_{ij} : est l'explicabilité du paramètre I par le facteur J ; i : est le nombre de paramètres physico-chimiques retenus dans le modèle compris entre 1 et n ; j : est le nombre de facteurs retenus dans le modèle compris entre 1 et k :

$$IWQI = \sum_{i=1}^n q_i w_i \quad (8.11)$$

où l'IWQI est un paramètre sans dimension variant de 0 à 100 et qui a été calculé par rapport à des variables telles que la conductivité électrique (CE), l'indice d'adsorption de sodium (SAR), le sodium (Na⁺), le chlore (Cl⁻), et les bicarbonates (HCO₃⁻), q_i est un paramètre de mesure compris entre 0 et 100 et w_i est le poids normalisé du $i^{ième}$ paramètre.

En utilisant l'équation 8.11, l'indice de qualité de l'eau pour l'irrigation est calculé. Dans le tableau sont reportés les poids relatifs à chaque paramètre (Meireles *et al.*, 2010).

Tableau 49 : Poids relatifs utilisés pour calculer l'indice IWQI.(Meireles et al., 2010)

Paramètres	Wi
SAR	0.189
CE	0.211
Cl ⁻	0.194
Na	0.204
HCO ⁻	0.202
Total	1

Il est à noter que la classification des eaux d'irrigation selon l'IQWI a été établie en se basant sur des indices de qualité en prenant en considération le problème de salinité, la toxicité pour les plantes ainsi que la réduction de l'infiltration des eaux dans les sols.

La variabilité spatiale de qualité de l'eau pour l'irrigation dans la région de Tabelbala est notable en raison des valeurs de IWQI enregistré dans la région. Des valeurs élevées de l'indice IWQI ont été enregistrées presque dans la totalité de la zone sauf dans quelques points d'eau où des valeurs moyennes ont été enregistrées reflétant la dynamique de la qualité de l'eau influencée peut-être par l'activité humaine. Les résultats de l'indice (IWQI) montrent clairement que 80 % des points d'eau de la région considérée font partie de la catégorie excellente et sont adaptés à l'irrigation (fig.176).

Tableau 50: Classification des eaux d'irrigation selon l'indice IWQI.

IWQI type	IWQI
Excellente qualité	85-100 (73 points d'eau) 42.2 %
Bonne qualité	70-85 (55 points d'eau) 31.8 %
Mauvaise qualité	55-70 (30 points d'eau) 17.3 %
Très mauvaise qualité	40-55 (12 points d'eau) 6.9 %
Inappropriée	0-40 (3 points d'eau) 1.73 %

La répartition spatiale des échantillons de la région de Tabelbala et les résultats du calcul de l'indice d'irrigation montrent clairement que 73 forages et puits (42 % des points d'eau) de la région appartiennent à la catégorie excellente.

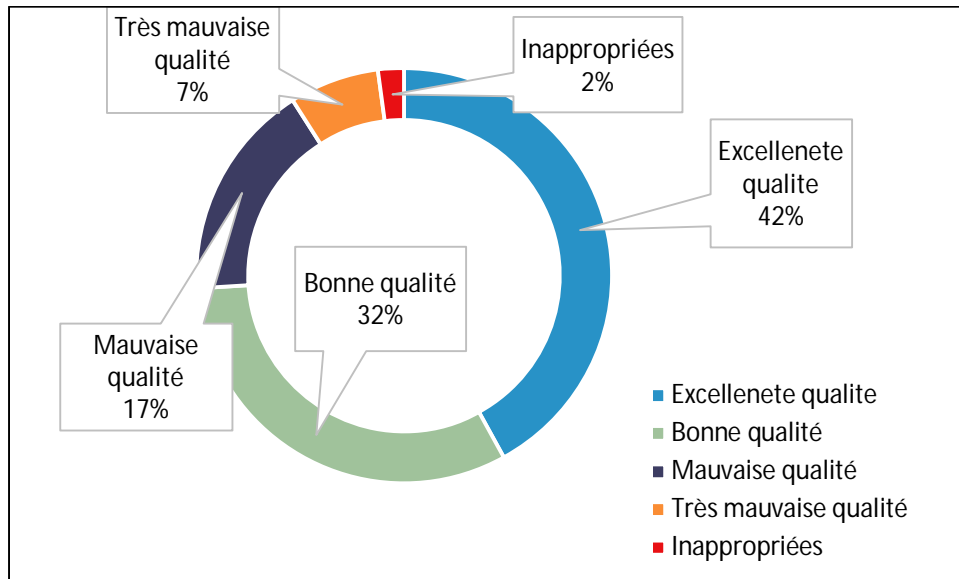


Figure 175 : Différentes classes des eaux d'irrigation selon l'indice IWQI.

55 forages et puits (31 %) sont classés dans la catégorie bonne, 30 puits et forages (17 %) appartiennent à la catégorie mauvaise, et 15 puits (8.5 %) se trouvent dans les catégories très mauvaise et inappropriée (fig.175).

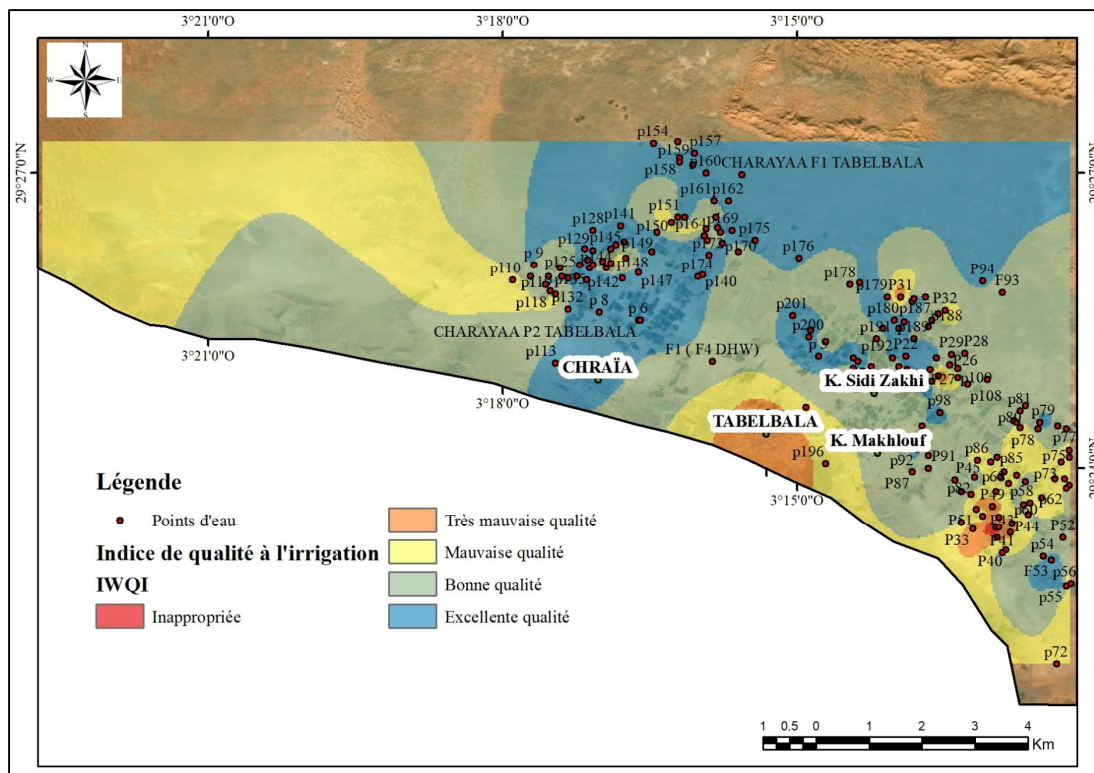


Figure 176: Distribution spatiale de l'adéquation de l'eau de Tabelbala à l'irrigation (IWQI).

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines est un enjeu majeur, en particulier dans le cadre de leur utilisation à des fins d'irrigation, car elle détermine leur impact direct sur la durabilité des sols ainsi que la santé des cultures. Dans le cadre de cette étude, plusieurs paramètres hydrochimiques, des indices qualitatifs ainsi que des données géospatiales ont été exploités en vue de déterminer l'aptitude des eaux souterraines de la région de Tabelbala à

l'irrigation. Les résultats ont été menés sur un total de 178 échantillons d'eau prélevés, dont divers points d'eau répartis sur l'ensemble de la région.

Tableau 51: Résultats de calcul de l'indice d'irrigation.

Nom	IWQI	Type	Nom	IWQI	Type	Nom	IWQI	Type	Nom	IWQI	Type
p119	64.6	Mauvaise	P23	79.4	Bonne	p169	93.1	Excellente	P31	42.2	Très mauvaise
p126	94.0	Excellente	p69	59.6	Mauvaise	p128	92.1	Excellente	p127	88.2	Bonne
p70	78.0	Bonne	p151	93.4	Excellente	p176	86.5	Excellente	p78	81.3	Bonne
Tabel Erg Raoui P2	86.4	Excellente	p135	90.9	Excellente	p140	88.9	Excellente	F93	79.0	Bonne
p54	81.6	Bonne	p 5	90.4	Excellente	p201	87.3	Excellente	F4DHW	78.6	Bonne
p124	91.6	Excellente	p152	91.0	Excellente	p182	88.3	Excellente	P45	76.9	Bonne
p146	65.5	Mauvaise	p199	91.4	Excellente	p171	80.1	Bonne	p85	71.5	Bonne
Tabel 65 B Puits	89.7	Excellente	p147	93.0	Excellente	p198	79.8	Bonne	p75	66.6	Mauvaise
p57	73.3	Bonne	p97	83.3	Excellente	p59	71.6	Bonne	p68	66.7	Mauvaise
P27	80.4	Bonne	p193	86.7	Excellente	P41	73.0	Bonne	p64	54.0	Très mauvaise
P28	84.0	Bonne	p132	87.6	Excellente	p110	66.9	Mauvaise	P43	52.7	Très mauvaise
p120	85.3	Excellente	p168	79.8	Bonne	P32	66.8	Mauvaise	P30	65.2	Mauvaise
ChrF1Tabe	94.8	Excellente	p156	75.1	Bonne	p73	65.6	Mauvaise	p195	66.0	Mauvaise
p125	88.4	Excellente	P29	80.6	Bonne	p177	88.5	Excellente	P38	47.5	Très mauvaise
F53	88.9	Excellente	p165	76.9	Bonne	p143	91.6	Excellente	p84	66.7	Mauvaise
P46	81.6	Bonne	P52	76.2	Bonne	p190	88.8	Excellente	p139	68.7	Mauvaise
p77	80.7	Bonne	p106	56.9	Mauvaise	p174	88.3	Excellente	p67	60.4	Mauvaise
p56	34.7	Inappropriée	P21	88.6	Excellente	p145	86.7	Excellente	P33	43.7	Très mauvaise
P94	90.8	Excellente	p55	91.1	Excellente	p98	86.4	Excellente	p113	87.8	Excellente
p159	89.8	Excellente	p164	90.5	Excellente	p136	85.9	Excellente	p96	76.5	Bonne
P20	86.3	Excellente	p184	89.9	Excellente	p117	83.0	Bonne	p74	59.9	Mauvaise
p104	82.5	Bonne	p153	87.5	Excellente	p185	81.7	Bonne	p60	58.7	Mauvaise
p118	79.9	Bonne	Tabel P65A-Zaouia	86.2	Excellente	P87	81.1	Bonne	P50	55.7	Mauvaise
p121	85.5	Excellente	p 8	87.8	Excellente	p82	77.5	Bonne	P90	74.1	Bonne
p160	90.6	Excellente	p194	85.3	Excellente	p191	76.7	Bonne	p114	73.7	Bonne
p149	86.2	Excellente	P89	78.0	Bonne	p187	73.5	Bonne	p86	65.9	Mauvaise
p148	94.4	Excellente	p167	77.9	Bonne	p186	73.5	Bonne	p137	71.0	Bonne
P22	90.5	Excellente	TabelErg RaouiP1	75.5	Bonne	p109	66.8	Mauvaise	p71	61.1	Mauvaise
P25	89.2	Excellente	p76	74.1	Bonne	P40	60.0	Mauvaise	p58	58.9	Mauvaise
p116	83.4	Excellente	p178	73.0	Bonne	p79	86.6	Excellente	P49	40.3	Très mauvaise
p112	72.7	Bonne	p163	63.7	Mauvaise	p141	87.2	Excellente	p 6	89.8	Excellente
p150	53.3	Très mauvaise	p134	91.7	Excellente	p192	85.8	Excellente	p 9	85.1	Excellente
p166	95.1	Excellente	p142	91.8	Excellente	P26	82.8	Bonne	p108	77.9	Bonne
p162	95.0	Excellente	p157	88.4	Excellente	p175	91.1	Excellente	p81	76.3	Bonne
p161	85.2	Excellente	p 2 - 61B	91.2	Excellente	p158	89.4	Excellente	p107	70.8	Bonne
p72	67.4	Mauvaise	p92	87.6	Excellente	p154	87.4	Excellente	P36	67.6	Mauvaise
p172	90.3	Excellente	Chrayaa P2 Tabelb	90.1	Excellente	p144	83.3	Bonne	p65	69.1	Mauvaise
p3-65A	92.1	Excellente	p180	88.2	Excellente	p138	79.6	Bonne	P44	49.0	Très mauvaise
p200	90.8	Excellente	P18	85.4	Excellente	P37	20.5	Inappropriée	p202	47.6	Très mauvaise
p181	88.9	Excellente	P19	82.1	Bonne	p170	88.1	Excellente	p80	69.4	Mauvaise
p183	85.4	Excellente	p188	78.1	Bonne	p105	81.4	Bonne	p63	58.6	Mauvaise
p189	84.4	Bonne	p62	71.3	Bonne	P48	70.4	Bonne	P51	53.7	Très mauvaise

Les différents paramètres hydrochimiques étudiés incluent des éléments clés tels que la salinité (SSP), le rapport d'absorption de sodium (SAR), l'indice de Kelley (KR), le taux d'absorption de magnésium (MAR), les carbonates de sodium résiduel (RSC), l'indice de perméabilité (PI), le pH, les différentes concentrations en cations majeurs et en anions majeurs ont également permis d'évaluer la qualité de l'eau en lien avec les normes internationales et locales relatives à l'irrigation.

Les résultats obtenus lors de cette analyse, montrent clairement que la qualité des eaux souterraines dans la région de Tabelbala est globalement excellente à bonne pour l'irrigation pour une bonne partie des échantillons étudiés. En effet, une proportion significative des échantillons satisfait les critères nécessaires pour une exploitation sans risque pour les sols et les cultures. Cependant, l'analyse détaillée révèle également l'existence d'une disparité dans la qualité de l'eau dans certaines zones où des concentrations élevées en sodium ou en chlorures, ce qui pourrait nuire et engendrer des risques pour les sols et nécessite une surveillance régulière afin de réduire les effets indésirables.

III. Adéquation des eaux de Tabelbala à la consommation humaine

L'eau souterraine provenant des aquifères de la région de Tabelbala joue un rôle important à l'approvisionnement en eau des habitants de cette région, notamment pour l'usage domestique (consommation, hygiène...). Dans un contexte où la qualité de l'eau est primordiale pour garantir la santé publique, il est essentiel d'évaluer l'adéquation de ces eaux à la consommation humaine (Edition, 2011). A cet effet, l'utilisation de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) s'impose comme une méthode efficace et fiable afin de synthétiser les données complexes relatives à la qualité en une seule valeur aisément interprétable (Naz *et al.*, 2024).

L'objectif principal de toute étude de suivi de qualité de l'eau est d'évaluer son état par rapport à un usage spécifique. L'WQI constitue un outil mathématique permettant de convertir de grande quantité de données physicochimique en un indice unique reflétant le niveau de la qualité de l'eau. Ce processus facilite la communication des résultats aux gestionnaires de l'eau, tout en servant de base pour la planification et la gestion de ces ressources.

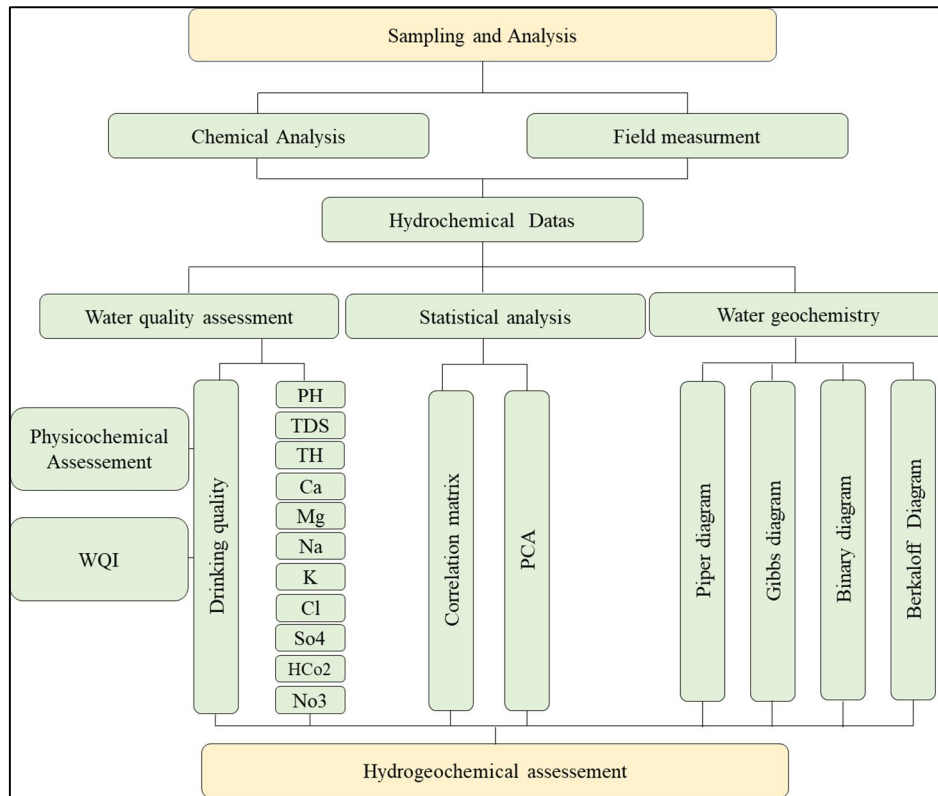


Figure 177: Organigramme montrant l'approche adoptée.

Cette approche (fig.177) permet d'estimer de manière globale la qualité de l'eau en considérant les concentrations de différents éléments par rapport aux normes recommandées par l'OMS, tout en tenant compte de l'importance relative de chaque élément dans l'évaluation de la qualité des eaux destinée à la consommation humaine. Elle vise à attribuer une valeur unique représentant la qualité d'un point d'eau, facilitant ainsi l'interprétation et la comparaison des données.

Dans un premier temps, il est essentiel de présenter les différents éléments chimiques relatifs à l'aire de l'étude, ainsi que les normes de potabilité exigées par l'OMS. Ensuite, un de ces paramètres doit être sélectionné, en fonction de son influence négative sur la qualité globale de l'eau et sur la santé. Dans notre cas, le nitrate (NO_3^-) a été retenu, en raison de sa concentration élevée, atteignant largement des niveaux supérieurs, aux normes de potabilité admises.

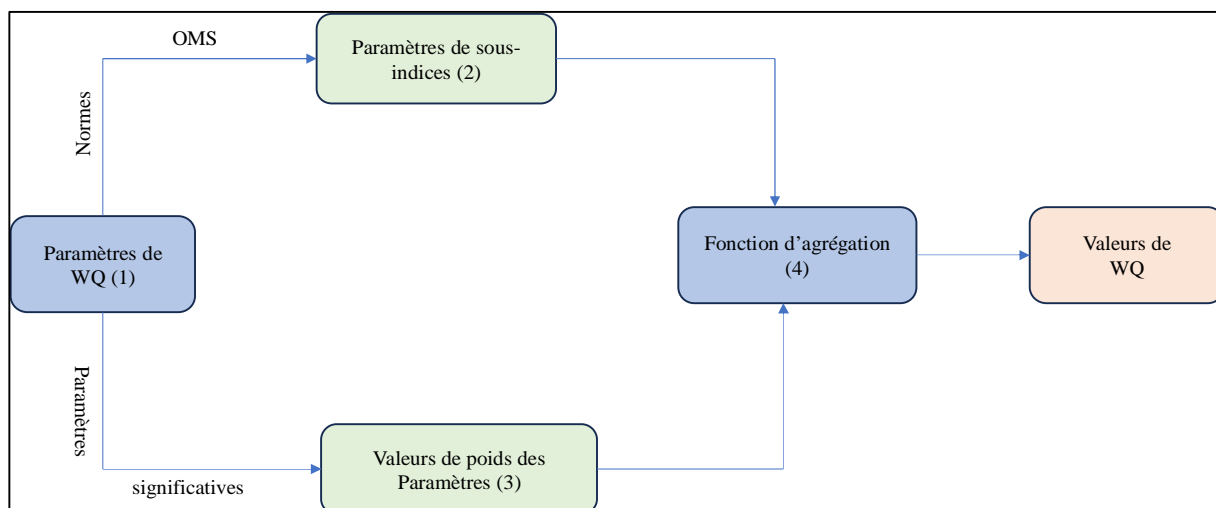


Figure 178: Structure générale du modèle WQI.

En vue de calculer l'indice de qualité de l'eau (WQI) de notre zone, dix paramètres clés ont été utilisés, notamment le pH, le TDS, le calcium (Ca), le magnésium (Mg²⁺), le sodium (Na), le potassium (K), le chlorure (Cl), le bicarbonate (HCO₃), le sulfate (SO₄), le nitrate (NO₃). Cette méthode, introduite pour la première fois par (Horton and Hawkins, 1965) et développée par (Brown, Skougstad and Fishman, 1970), offre un cadre permettant d'effectuer une classification de la qualité de l'eau en comparant différents aspects de celle-ci aux normes mondiales établies par l'OMS.

Tableau 52: Poids normalisés relatifs aux éléments chimiques introduits dans le calcul de WQI.

Paramètres	Normes OMS (SI)	Poids(q _i)	Poids relatif (Wi)
pH	7	3	0.094
TDS	500	5	0.156
TH	200	3	0.063
Ca ²⁺ (mg/l)	75	2	0.063
Mg ²⁺ (mg/l)	30	2	0.094
Na ⁺ (mg/l)	200	4	0.094
K ⁺ (mg/l)	10	1	0.125
Cl ⁻ (mg/l)	250	4	0.031
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	200	5	0.125
HCO ₂ (mg/l)	200	3	0.08
NO ₃ ⁻ (mg/l)	45	5	0.14

$\sum (Wi) = 37$

La méthode utilisée (fig.178) repose particulièrement sur l'indice arithmétique pondéré (Brown, Skougstad and Fishman, 1970, Brown *et al.*, 1972, Chatterjee and Raziuddin, 2007, Yidana and Yidana, 2010), un outil très performant et efficace pour effectuer une évaluation qualitative des échantillons d'eau prélevés sur une période donnée dans une région spécifique (Singh *et al.*, 2016). Cette méthode se base sur l'indice arithmétique modéré, qui repose sur le

choix des paramètres chimiques comme données d'entrée. Chaque paramètre étant pondéré pondération en fonction de son importance dans l'évaluation globale de la qualité de l'eau.

Dans le cadre de notre d'étude, les poids d'importances élevées ont été attribués aux paramètres tels que les TDS, SO_4^{4-} , Na^+ et NO_3^{3-} , en raison de leur importance primordiale dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Tiwari, Singh and Mahato, 2014), (Mahmud, Sikder and Joardar, 2020). A l'inverse, le potassium (K) a reçu une pondération moindre en raison de son influence relativement faible sur l'évaluation globale de la qualité.

Le calcul des poids relatifs des différents paramètres d'entré est également effectué à la l'aide de la formule suivante (8.12) (Tiwari, Singh and Mahato, 2014).

$$W_i = \left(\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (8.12)$$

où : W_i : Poids relatif, w_i : est le poids d'éléments chimiques selon son importance relative dans la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

A l'aide de l'équation (8.13), la notation de qualité correspondant à chaque élément qui rentre à la détermination de la qualité a été estimée (Iwar *et al.*, 2021).

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} * 100 \right) \quad (8.13)$$

Avec : q_i : Notation de qualité relative à chaque élément, C_i : Désigne la concentration de chaque élément chimique et S_i : Corresponds à la valeur limite d'élément chimique recommandée par l'OMS. Le résultat obtenu doit être multiplié par 100.

Le sous-indice SI est calculé par la multiplication du poids relatif (W_i) et la notation de qualité relative à chaque élément (q_i) afin d'évaluer l'indice de qualité (WQI).

$$SI = W_i * q_i \quad (8.14)$$

où : SI : correspond au sous-indice du paramètre i, W_i : est le poids relatif au paramètre i, q_i : est la valeur basée sur la concentration du nième paramètre, et n : nombre de paramètres.

$$WQI = \sum SI \quad (8.15)$$

où : WQI correspond particulièrement à la synthèse additive des SI, correspondant à la qualité de l'eau de chaque prélèvement. Par la suite, l'indice de qualité devrait être affecté à chaque échantillon. En fonction du WQI calculé, une discrétisation en cinq catégories selon le Tableau 53.

Les résultats de l'indice de qualité de l'eau (WQI) de la région étudiée sont répertoriés dans le tableau suivant, mettant en évidence les différentes catégories de qualité de l'eau, le nombre d'échantillons dans chaque classe (en valeur absolue et en pourcentage), ainsi que la proportion de la superficie correspondante :

Tableau 53: Différentes classes de qualité d'eau de WQI (Tiwari, Singh and Mahato, 2014).

Classes de l'indice WQI	Type d'eau	N° d'échantillon & (%)	Superficie %
<50	Excellente	6	5 %
50 – 100	Bonne	43	20 %
100 – 200	Médiocre	82	50 %
200 – 300	Très Médiocre	34	25 %
>300	Non potable	11	10 %

D'après les résultats obtenus, il a observé que les différentes valeurs de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) dans la zone étudiée varient de 28 à 491, mettant en relief une large disparité dans la qualité des eaux souterraines.

Ces valeurs permettent de classer la qualité de l'eau de la région considérée en plusieurs catégories, allant de « non potable » à « excellente qualité ». Plus précisément, Il a été remarqué que 82 échantillons, représentant plus de la moitié des points d'eau analysés, présentent une qualité d'eau médiocre, avec des valeurs de WQI comprises entre de 100 et 200.

En revanche, 43 échantillons soit environ 12 % des points d'eau étudiés affichent des valeurs de WQI correspondant à une qualité d'eau classée comme « bonne », ce qui les rend directement utilisables pour la consommation.

Concernant les catégories moins favorables, un groupe de 34 d'échantillons présente une qualité d'eau « très médiocre », tandis que 11 échantillons se classent dans la catégorie « non potables », traduisant une qualité d'eau inadaptée à toute utilisation sans un traitement rigoureux (fig.179).

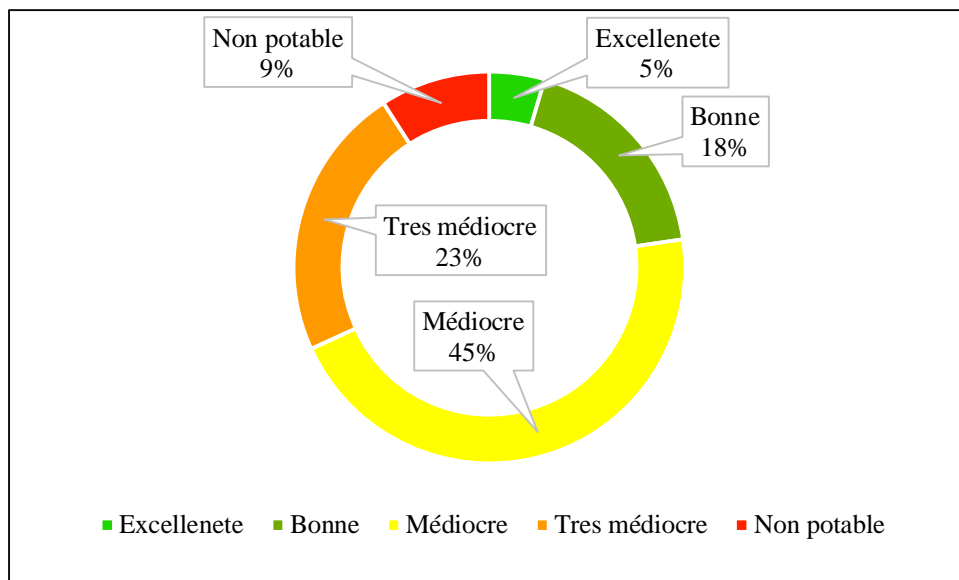


Figure 179: Différentes classes des eaux d'irrigation selon l'indice WQI.

La carte de la répartition spatiale de l'indice de qualité de l'eau (WQI) a mis en évidence des variabilités significatives dans la qualité des eaux souterraines de la région de Tabelbala (fig.180). Elle révèle que la classe d'excellente qualité (< 50) se localise particulièrement au nord de Chraïa et au nord-est sous forme de points isolés. Ces pointements d'excellente qualité

se manifestent essentiellement dans des zones d'activité agricole, suggérant une faible influence des engrais et des pesticides sur la qualité de eaux.

Les eaux classées comme bonnes (50-100) sont observées principalement au nord de Tabelbala, au nord de Chraïa et à Ksar Makhlouf, qui sont adaptées à la consommation humaine, et à l'irrigation sans traitement. En revanche, la classe médiocre (100-200) est la catégorie la plus réponde, couvrant une grande partie de la superficie étudiée. Elle est observée particulièrement à l'ouest, au centre, à l'est de Ksar Makhlouf ainsi qu'à Ksar Sidi Zakri (fig.180). Bien que ces eaux puissent être utilisées, elles nécessitent des traitements pour respecter les normes de potabilité.

Quant à la classe de qualité très médiocre (200-300), elle s'individualise au nord-ouest de Chraïa, au sud-ouest de Tabelbala et sud-est de Ksar Makhlouf. La dégradation marquée de la qualité de ces eaux s'explique principalement par la présence d'une zone d'activité minière au sud de Tabelbala. Cette exploitation minière contribue à une altération significative des caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère, entraînant par la suite une dégradation notable de la qualité des eaux souterraines dans ces zones.

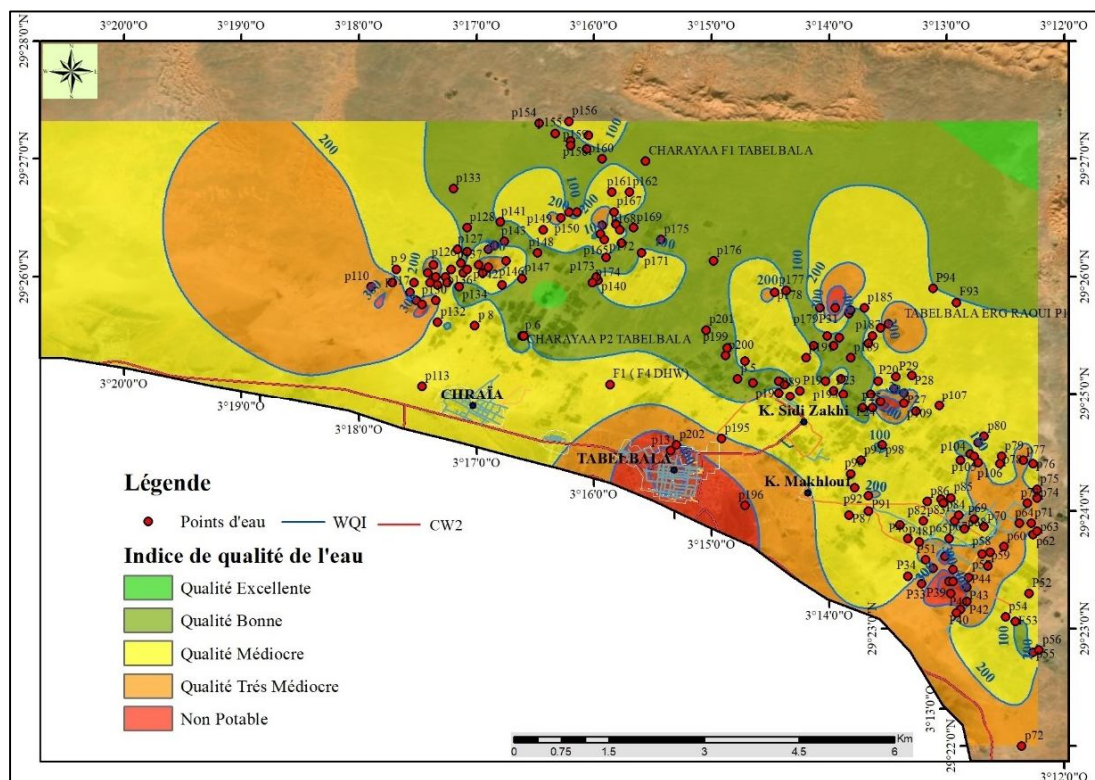


Figure 180: Distribution spatiale de l'adéquation de l'eau de Tabelbala à la consommation humaine selon l'indice WQI.

Ces résultats montrent une variabilité significative en termes de qualité de notre zone d'étude, allant des niveaux excellents à des niveaux inadéquats pour la consommation humaine, ce qui souligne l'efficacité ainsi que l'importance de cette technique dans la surveillance des ressources hydrique d'une manière appropriée.

IV. Conclusion

Dans les zones arides, le recours aux ressources hydriques souterraines est indispensable pour répondre à la forte demande en eau. Face aux enjeux climatiques et environnementaux tels que la pollution, la contamination et le réchauffement climatique, l'évaluation qualitative (chimisme) relative aux ressources hydriques destinées à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation (consommation humaine) est devenue une priorité essentielle. Dans ce contexte, des campagnes de prélèvements et d'analyses de différents paramètres physicochimiques ont été réalisées en vue d'évaluer la qualité des eaux de la plaine de Tabelbala, en particulier leurs aptitudes à l'irrigation et à la consommation humaine. Cette évaluation a inclus plusieurs indices et paramètres tels que le SAR, le MAR, le IP, le Na %, le KR, le TH, le RSC, le WQI, qui ont donné de résultats significatifs traduisant l'adéquation de la qualité de ladite zone à l'irrigation ainsi qu'à la consommation humaine. L'ensemble de résultats pourrait être utilisé comme support de base et d'orientation pour résoudre les problèmes d'approvisionnement en eau dans notre région.

Les résultats des analyses qualitatives des échantillons d'eau de la région ont révélé que la plupart étaient jugés adaptés. Selon l'indice de la qualité d'eau d'irrigation 'IQWI', il a été constaté que 98.8 % des échantillons étaient classés comme excellents pour l'irrigation.

En raison de sa position géologique stratégique, la région de Tabelbala avec ces mines, indices et sites de minéralisation, est exposée au risque de pollution des métaux lourds tels que l'argent (Ag), le cuivre (Cu), le baryum (Ba), le bismuth (Bi), le fer (Fe), le manganèse (Mn) et le plomb (Pb). Il est donc recommandé de mettre en place un système de surveillance pour prévenir tout type de pollution, et pour d'identifier la variabilité chimique des eaux, en particulier celles proches des sites de minéralisation. Ce système pourrait être renforcé en utilisant des données spatiales de haute résolution afin de déterminer d'éventuelles zones d'activités agricoles ou toute autre activité au-delà des limites de notre zone qui pourrait recevoir ces eaux, afin de mieux contrôler leur qualité.

Conclusion générale

La présente investigation s'inscrit dans le cadre de la recherche et de la valorisation des ressources hydriques souterraines dans les zones arides, en particulier dans la région de Tabelbala situé au cœur du Sahara algérien (au sein des monts de l'Ougarta). Dans un contexte marqué par une croissance démographique rapide et une pression croissante sur les ressources hydriques, la mise en place d'outil de cartographie prédictive et de gestion efficace de potentialité en eau souterraine devient une nécessité stratégique pour répondre aux besoins domestiques, agricoles et industriels. L'identification des zones prometteuses à potentiel hydrogéologique, nécessite une analyse approfondie des données issues des études préliminaires renfermant des informations climatiques, géologiques, structurales, géomorphologiques et autres. Dans ce contexte, la présente étude porte sur la région de Tabelbala (intégrée au sein des monts de l'Ougarta).

Du point de vue climatique, la région est confrontée à des conditions climatiques extrêmes rigoureuses, marquée par une sécheresse chronique ayant entraîné la dégradation de nombreuses palmeraies, éléments essentiels à l'équilibre écologique, économique et social. L'analyse climatique révèle que la région s'inscrit dans un étage bioclimatique hyperaride, caractérisé par une très faible pluviométrie, avec une distribution spatiale inégale des précipitations qui tend à diminuer du nord vers le sud. Ce phénomène d'aridité, combinée à une longue durée de sécheresse induite une pression croissante sur les ressources hydriques disponibles dans la région et favorise une exploitation intensive et non durable des nappes phréatiques.

Les analyses géologiques, structurales et géomorphologiques, ont permis en évidence la complexité du contexte lithostratigraphique de la région la configuration stratigraphique de la région comprend des formations volcano-sédimentaires attribuées au Protérozoïque, des quartzites, grès quartzitiques et conglomérats rouges du Cambro-Ordovicien, ainsi que des argiles siluriennes. Le Néogène est dominé par des dépôts détritiques, tandis que le Quaternaire, largement représenté, se manifeste particulièrement par des encroutements clairs et des formations meubles composées de sables, limons, cailloux roulés et argiles gypsifères. L'ensemble de cette formation est affecté par un réseau dense de failles et de structures linéaires influençant de manière significative l'écoulement souterrain.

L'étude hydrogéologique entreprise dans notre zone a révélé l'existence de plusieurs aquifères distincts. L'aquifère profond du Cambro-Ordovicien (aquifère du socle), assimilé à celui de la région de Beni Abbès dont son alimentation se fait principalement par les eaux de ruissèlement issues des monts de l'Ougarta et drainées par la Hammada de Guir. Au centre de la zone d'étude se développe l'aquifère quaternaire, également appelé nappe de Tabelbala. Il s'agit d'un principal réservoir exploité pour les besoins en eau potable et en irrigation, en raison de la bonne qualité des eaux. Ce dernier est alimenté par des écoulements de surface et souterrain provenant des zones perméables situées au nord telles que le Grand Erg Occidental et la Hammada de Guir, via les crues de l'Oued Daoura. La nappe d'Erg Er Raoui, localisée au nord-est de la région, parente un potentiel hydrique encore méconnu, son exploitation reste limitée. L'interprétation des données géophysiques acquises sur la région de Boulaadam lors de la réalisation de cette thèse a permis de caractériser les différentes structures du sous-sol et de souligner l'extension des formations gréseuses du Cambro-Ordovicien. Cependant, les coupes géoélectriques obtenues mettent en évidence trois horizons lithologiques bien distincts,

différenciés selon leurs propriétés physiques et leurs résistivités. Le premier horizon (peu profond) est composé principalement de calcaires hammadiens de l'Eocène, associés à des formations sableuses d'origine quaternaire. Ce dernier se particularise par une hétérogénéité lithologique et une résistivité relativement élevée, variant entre 70 et 1000 Ohm.m. Le deuxième horizon, plus profond, présente une épaisseur recomprise entre 40 et 130 mètres, constitué majoritairement d'argile du Cambro-Ordovicien, illustrant des résistivités faibles modérées (entre 7 et 78 Ohm.m).

Ce niveau contient également des passages de grès à extensions limitées, présentant des valeurs de résistivité comprise entre 80 et 300 Ohm.m, suggérant une hétérogénéité locale en termes de perméabilité et de porosité. Tandis que le troisième horizon correspond à un substratum résistant situé à faible profondeur. Il est formé principalement de quartzites du Cambro-Ordovicien, reconnus par leur forte cohésion et leur faible porosité. Dans ce niveau, les résistivités mesurées oscillent entre 180 et 2000 Ohm.m.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région d'étude a conduit à l'identification trois principaux types de compositions ioniques. Le faciès prédominant est le faciès sulfaté sodique, représentant 67 % des échantillons analysés. Ce dernier se distingue par une prépondérance des ions de calcium (Ca^{2+}) par rapport aux ions magnésium (Mg^{2+}), bien que la différence entre ces deux éléments reste relativement faible. Le deuxième faciès, représente 25 % des échantillons, est le faciès sulfaté calcique. Il se caractérise par une concentration notable d'ions de sodium (Na^+) en comparaison avec les ions de magnésium (Mg^{2+}) qui pourrait être liée principalement à des processus géochimiques locaux, notamment l'altération des formations salines. Le troisième faciès, bien que moins représenté (6.96 % des échantillons), est le faciès chloré sodique. Ce dernier illustre une forte concentration de sulfate (SO_4^{2-}) par rapport aux bicarbonates (HCO_3^-), accompagnée d'une prédominance d'ions calcium (Ca^{2+}) sur les ions magnésium (Mg^{2+}).

Dans le cadre de cette recherche, une base de données hydrogéologique intégrée dans un système d'information géographique (SIG) a été élaborée, en tenant compte d'une série d'indicateurs et de facteurs prédictifs pertinents. Cette dernière a servi de fondement à l'application des méthodes l'analyse hiérarchique multicritère (AHP, Fr) et d'algorithmes d'intelligences artificielles, notamment, le rapport de fréquence (Fr), les forêts aléatoires (RF), les réseaux de neurones (NN) et les machines à vecteur de support (SVM) dans le but d'élaborer une cartographie prédictive des zones favorables à la présence d'eau souterraine dans la région considérée.

Cette étude se particularise par l'intégration des approches innovantes, combinant la télédétection, les SIG et l'apprentissage automatique, appliquées à des données géospatiales multi sources, notamment, celles issues de la télédétection satellitaire (Sentinel, Landsat8) et des données exogènes. L'efficacité des modèles utilisés a été rigoureusement validée à travers des analyses statistiques, telles que l'AUC-ROC, permettant une évaluation fiable des performances des modèles prédictifs. Les résultats obtenus ont mis en évidence la pertinence des approches exploitées pour l'identification des zones du potentiel hydrique, en particulier grâce à la complémentarité des critères géologiques, hydrologiques, morphologiques et climatiques. L'analyse spectrale seule s'est avérée insuffisante, soulignant la nécessité d'une approche intégrée mobilisant des paramètres intrinsèques et extrinsèques (lithologie, fracturation, pente, aspect, forages...).

Dans cette étude, l'utilisation des statistiques s'est avérée concluante grâce à l'échantillonnage stratifié des données existantes, ce qui a permis d'éviter une confusion excessive induite par de nombreux paramètres tels que les différences dans l'occupation du sol et d'autres données moins précises. De plus, l'intégration et l'exploitation des données de différentes sources telles que les images radar et optique de Sentinel et de Landsat 8 avec l'analyse multicritère AHP et Fr, ainsi la technique d'apprentissage automatique (RF, NN et SVM), s'est révélée très appropriée pour la cartographie et l'identification du potentiel hydrique souterrain dans la région de Tabelbala.

Dans le but d'évaluer l'adéquation des ressources en eaux de la région de Tabelbala à l'irrigation et à la consommation humaine, des campagnes de prélèvements ont été menées, accompagnées d'analyses approfondies de différents paramètres physicochimiques. Cette évaluation s'est appuyée sur des indices et des paramètres reconnus, notamment le SAR (Taux d'Adsorption du Sodium), le MAR (Taux d'Adsorption du Magnésium), l'indice de perméabilité (IP), le pourcentage de sodium (Na %), l'Indice de Kelley (KR), le Titre hydrométrique (TH), le carbonate de Sodium résiduel (RSC), ainsi que l'indice de qualité de l'eau (WQI). Les résultats obtenus indiquent que la qualité des eaux souterraines de la plaine de Tabelbala est compatible avec les usages agricoles et domestiques traduisant ainsi une source hydrique de bonne qualité dans ce contexte saharien. Il a été constaté que l'analyse qualitative basée sur l'indice de qualité de l'eau pour l'irrigation (IWQI) a révélé que 98.8 % des échantillons prélevés sont classés dans la catégorie 'excellente' pour l'usage agricole. Ces résultats constituent une base de données précieuse pour orienter les stratégies de gestion et d'exploitation des ressources hydriques de la région, tout en contribuant à la résolution des problématiques liées à l'approvisionnement en eau.

Ce travail a également permis d'évaluer ainsi que de comparer le potentiel des images Sentinel et Landsat 8 pour la détermination des zones potentielles, en appliquant des traitements incluant des compositions en fausse couleur basée sur les polarisations VH et VV.

Cependant, cette approche d'investigation multicritère présente certaines limites, notamment en ce qui concerne l'échelle de travail, en raison de la résolution relativement grossière des données disponibles telles que le modèle numérique de terrain à 30 mètres de résolution, les images Landsat 8 à 30 mètres et Sentinel-2 à 10 mètres. En effet, la planification des opérations de forages nécessite souvent une reconnaissance sur le terrain ou d'autres méthodes d'enquêtes parallèles telles que les sondages électriques. Pour les travaux futurs, il est prévu d'améliorer l'échelle de traitement, notamment en utilisant des images satellitaires optiques et des hautes résolutions comme celle de Alsat-2 A avec une résolution de 2.5 mètres en mode panchromatique ainsi qu'un modèle numérique de terrain de très haute résolution, de plus, l'utilisation d'autres approches émergentes telles que l'apprentissage automatique approfondie.

L'importance de l'adoption de nouvelle technologie et de diverses méthodes avancées d'apprentissage automatique approfondie dans le domaine de gestion, de la prospection et de l'évaluation des eaux souterraines est devenue essentielle. Ces avancées ont démontré leur efficacité en termes de qualité de résultats obtenus. Les conclusions de cette recherche ont ouvert de nombreuses perspectives et ont identifié plusieurs pistes de recherches à explorer pour approfondir les travaux sur l'identification des zones du potentiel hydrique en utilisant la télédétection et SIG, ainsi que les techniques modernes d'intelligence artificielle.

Références bibliographiques

- Abijith, D. et al. (2020) 'GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones-a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India', *HydroResearch*, 3, pp. 1–14.
- Abubakar, I. and Idi, B. (2024a) 'Statistical analysis of NASA POWER meteorological data for the assessment of climate variability in Adamawa State', *Environmental Technology and Science Journal*, 15(2), pp. 119–129.
- Abubakar, I. and Idi, B. (2024b) 'Statistical analysis of NASA POWER meteorological data for the assessment of climate variability in Adamawa State', *Environmental Technology and Science Journal*, 15(2), pp. 119–129.
- Adams, J., Pretorius, L. and Snow, G. (2019) 'Deterioration in the water quality of an urbanised estuary with recommendations for improvement', *Water SA*, 45(1), pp. 86–96.
- Adeyeye, O.A., Ikpokonte, E.A. and Arabi, S.A. (2019) 'GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria', *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(2), pp. 175–181.
- Adimalla, N. (2019) 'Groundwater quality for drinking and irrigation purposes and potential health risks assessment: a case study from semi-arid region of South India', *Exposure and health*, 11(2), pp. 109–123.
- Adnan, R.M. et al. (2020) 'Least square support vector machine and multivariate adaptive regression splines for streamflow prediction in mountainous basin using hydro-meteorological data as inputs', *Journal of Hydrology*, 586, p. 124371.
- Ahamad, A. et al. (2018) 'Assessment of groundwater quality with special emphasis on nitrate contamination in parts of Varanasi City, Uttar Pradesh, India', *Applied water science*, 8, pp. 1–13.
- Ahmadi, H. et al. (2020) 'GIS-based groundwater potentiality mapping using AHP and FR models in central antalya, Turkey', *Environmental Sciences Proceedings*, 5(1), p. 11.
- Ait-Kaci, A. and others (1990) Evolution lithostratigraphique et sédimentologique des monts d'ougarta pendant le cambrien (Sahara Algérien Nord-occidental). PhD Thesis.
- Akhtar, N. et al. (2021) 'Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review', *Water*, 13(19), p. 2660.
- Aliev, M. et al. (1971) 'Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz du Sahara Algérien', Sonatrach editions [Preprint].
- Almorox, J. et al. (2017) 'Assessment of surface solar irradiance retrieved by CERES', *International Journal of Remote Sensing*, 38(12), pp. 3669–3683.
- Amanambu, A.C. et al. (2020) 'Groundwater system and climate change: Present status and future considerations', *Journal of Hydrology*, 589, p. 125163.
- Amari, S. and Wu, S. (1999) 'Improving support vector machine classifiers by modifying kernel functions', *Neural Networks*, 12(6), pp. 783–789.
- ANRH. 2008. Rapport géophysique par prospection électrique dans la région de Boulaadam, Commune de Tabelbala, Bechar. Bechar. Rapport interne
- Anser, M.K. et al. (2020) 'Identifying the potential causes, consequences, and prevention of communicable diseases (including COVID-19)', *BioMed Research International*, 2020(1), p. 8894006.
- Arabameri, A. et al. (2020) 'Novel ensemble of MCDM-artificial intelligence techniques for groundwater-potential mapping in arid and semi-arid regions (Iran)', *Remote Sensing*, 12(3), p. 490.
- Augiéras, E.M. (1919) Le Sahara occidental : Société de Géographie. Capitaine Augiéras. Mémoire public au moyen de la fondation Duchesne-Fournet et de subventions accordées par le Gouvernement général de l'Algérie et la Résidence générale de France au Maroc. Masson et Cie.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., and others (1985) Water quality for agriculture. Food and agriculture organization of the United Nations Rome.
- Baccini, A. (2010) 'Statistique Descriptive Multidimensionnelle (pour les nuls)', Institut de Mathématiques de Toulouse-UMR CNRS, 5219.
- Bagnouls, F. (1953) 'Saison sèche et indice xérothermique', *Bull Soc His nat Toulouse*, 88, pp. 193–239.
- Baker, N. et al. (2019) Workshop report on basic research needs for scientific machine learning: Core technologies for artificial intelligence. USDOE Office of Science (SC), Washington, DC (United States).
- Balamurugan, P. et al. (2020) 'Non-carcinogenic risk assessment of groundwater in southern part of Salem District in Tamilnadu, India', *Journal of the Chilean Chemical Society*, 65(1), pp. 4697–4707.
- Bandira, P.N.A. et al. (2023) 'Assessment of NASA POWER for Climate Change Analysis using the De Martonne Climate Index in Northern Peninsular Malaysia', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 012029.
- Beguiría, S. (2006) 'Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management', *Natural Hazards*, 37, pp. 315–329.
- Belgiu, M. and Drăguț, L. (2016) 'Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions', *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 114, pp. 24–31.
- Berhanu, K.G. and Hatiye, S.D. (2020) 'Identification of groundwater potential zones using proxy data: Case study of Megech watershed, Ethiopia', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, p. 100676.

- Bessole, B. (1977) 'Géologie de la Afrique. 1. Le craton Quest Africain', Mem. BRGM, 88, p. 402.
- Bevan, A. and Lake, M. (2016) 'Intensities, interactions, and uncertainties: some new approaches to archaeological distributions', in Computational approaches to archaeological spaces. Routledge, pp. 27–52.
- Beyaztas, U. et al. (2019) 'Construction of functional data analysis modeling strategy for global solar radiation prediction: application of cross-station paradigm', Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 13(1), pp. 1165–1181.
- Boobalan, C. and Gurugnanam, B. (2016) 'Mapping of groundwater potential zones in Sarabanga Sub-basin, Cauvery River, South India using remote sensing and GIS techniques', Indian Journal of Applied Research, 6(2), pp. 364–369.
- Boote, D.R., Clark-Lowes, D.D. and Traut, M.W. (1998) 'Palaeozoic petroleum systems of North Africa', Geological Society, London, Special Publications, 132(1), pp. 7–68.
- Boucher, É., Bégin, Y. and Arseneault, D. (2010) 'Dendrohydrologie en milieu boréal', La dendroécologie-Principes. Méthodes et applications, pp. 573–592.
- Boudjadja, A., Messahel, M. and Pauc, H. (2003) 'Ressources hydriques en Algérie du Nord', Revue des sciences de l'eau, 16(3), pp. 285–304.
- Boughariou, E. et al. (2021) 'Delineation of groundwater potentials of Sfax region, Tunisia, using fuzzy analytical hierarchy process, frequency ratio, and weights of evidence models', Environment, Development and Sustainability, 23(10), pp. 14749–14774.
- Bouïma, T. (1986) Le gîte de Rahmani (monts d'Ougarta, Algérie), sédimentologie du Cambrien inférieur et étude des minéralisations stratiformes cuprifères associées: mise en évidence d'un processus de remobilisation de type Roll| Theses. fr. PhD Thesis. Paris 11.
- Bouka, E. et al. (2019) 'Institut National des Recherch'.
- Bouselsal, B. and Saïbi, H. (2022) 'Evaluation of groundwater quality and hydrochemical characteristics in the shallow aquifer of El-Oued region (Algerian Sahara)', Groundwater for Sustainable Development, 17, p. 100747.
- Breiman, L. (2001) 'Random forests', Machine learning, 45, pp. 5–32.
- Brown, E., Skougstad, M.W. and Fishman, M.J. (1970) Methods for collection and analysis of water samples for dissolved minerals and gases. US Govt. Print. Off.,.
- Brown, R.M. et al. (1972) 'A water quality index—crashing the psychological barrier', in Indicators of Environmental Quality: Proceedings of a symposium held during the AAAS meeting in Philadelphia, Pennsylvania, December 26–31, 1971. Springer, pp. 173–182.
- Buvaneshwari, S. et al. (2017) 'Groundwater resource vulnerability and spatial variability of nitrate contamination: insights from high density tubewell monitoring in a hard rock aquifer', Science of the Total Environment, 579, pp. 838–847.
- Capellier, D. (2000) "prospection électrique des surfaces/cours de géophysique", université de Lausanne, institut Française du pétrole, pp. 55–59.
- Chalikakis, K. (2006) Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. PhD Thesis. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Chaouki, I. et al. (2015) 'Application de l'analyse en composantes principales (ACP) pour l'évaluation de la qualité des eaux usées industrielles de Salam Gaz–Skhirat', Journal of Materials and Environmental Science, 6(2), pp. 455–464.
- Chapelle, F.H. (2000) Ground-water microbiology and geochemistry. John Wiley & Sons.
- Chatterjee, P.R. and Raziuddin, M. (2007) 'Studies on the water quality of a water body at Asansol town, West Bengal', Nature, Environment and Pollution Technology, 6(2), pp. 289–292.
- Chaudhary, V. and Satheeshkumar, S. (2018) 'Assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in arid areas of Rajasthan, India', Applied Water Science, 8, pp. 1–17.
- Chavaillon, J. (1965) 'Alimen H.(1964).—Atlas de Préhistoire, vol 1: Généralités, Méthodes en Préhistoire', Quaternaire, 2(2), pp. 171–172.
- Chuvieco, E. (1991) 'Fundamentos de teledetección espacial', Estudios Geográficos, 52(203), p. 371.
- Cimen, M. (2008) 'Estimation of daily suspended sediments using support vector machines', Hydrological Sciences Journal, 53(3), pp. 656–666.
- Collomb, P. and Donzeau, M. (1974) 'Relations entre kink-bands décamétriques et fractures de socle dans l'Hercynien des monts d'Ougarta (Sahara occidental, Algérie)', Tectonophysics, 24(3), pp. 213–242.
- Combes, M. (1966) 'Etude hydrogéologique de la hamada du Guir', Commune de Béchard Département de la Saoura. Etude SES, 68.
- Conrad, G. (1969a) L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Éditions du Centre national de la recherche scientifique.
- Conrad, G. (1969b) L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien:(Saoura, Erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Éditions du Centre national de la recherche scientifique.
- Conrad, G. (1969c) L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien:(Saoura, Erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Éditions du Centre national de la recherche scientifique.

- Conrad, J. (1984) Les séries carbonifères du Sahara central. Stratigraphie, sédimentologie, évolution structurale. Université de droit d'Aix Marseille.
- Cutler, A., Cutler, D.R. and Stevens, J.R. (2012) 'Random forests', *Ensemble machine learning: Methods and applications*, pp. 157–175.
- Dar, I.A., Sankar, K. and Dar, M.A. (2011a) 'Deciphering groundwater potential zones in hard rock terrain using geospatial technology', *Environmental monitoring and assessment*, 173(1), pp. 597–610.
- Dar, I.A., Sankar, K. and Dar, M.A. (2011b) 'Deciphering groundwater potential zones in hard rock terrain using geospatial technology', *Environmental monitoring and assessment*, 173(1), pp. 597–610.
- Darman, L.P. et al. (2024) 'Assessment of NASA POWER reanalysis products as data resources alternative for weather monitoring in West Sumbawa, Indonesia', in *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 06006.
- Das, B. and Pal, S.C. (2019) 'Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India', *HydroResearch*, 2, pp. 21–30.
- Davis, S. et al. (1966) 'Groundwater in fractured rocks', New York, Hydrogeology, 318.
- Davis, S. and De Wiest, R. (1966) 'Hydrogeology Wiley', New York, 463.
- De Sève, D., Desjardins, R. and Toutin, T. (1994) 'Contribution des données radar d'ERS-1 dans l'appréhension de l'organisation des linéaments: le cas de l'astrolème de Charlevoix', *Canadian journal of remote sensing*, 20(3), pp. 233–244.
- Delahaye, D. (2003) 'Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture: analyse spatiale d'un phénomène complexe (From concentrated runoff to flash flood in silty loamy plateaux: spatial analysis of a complex phenomena)', *Bulletin de l'Association de géographes français*, 80(3), pp. 287–301.
- Demdoum, A. and Djebbar, M. (2009) 'CARACTÉRISATION HYDROCHIMIQUE ET APPORT ISOTOPIQUE SUR LA SALINITÉ DU BASSIN D'EL EULMA EN RÉGION SUD-SÉTIFIENNE (ALGÉRIE NORD ORIENTALE)', *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, pp. 19–26.
- Derdour, A. et al. (2022) 'Groundwater Potentiality Assessment of Ain Sefra Region in Upper Wadi Namous Basin, Algeria Using Integrated Geospatial Approaches', *Sustainability*, 14(8), p. 4450.
- Deroin, J.-P. et al. (1991) 'Combinaison d'images de télédétection et de données exogènes pour la compréhension géologique des paysages. Application à la cartographie lithologique et à l'analyse structurale en pays Cévenol (Massif Central français)', *Bulletin-Société française de photogrammétrie et de télédétection*, (122), pp. 53–57.
- Díaz-Alcaide, S. and Martínez-Santos, P. (2019) 'Advances in groundwater potential mapping', *Hydrogeology Journal*, 27(7), pp. 2307–2324.
- Dinesh Kumar, P., Gopinath, G. and Seralathan, P. (2007) 'Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India', *International Journal of Remote Sensing*, 28(24), pp. 5583–5601.
- Doneen, L. (1962) 'The influence of crop and soil on percolating water', in *Proc. 1961 Biennial conference on Groundwater recharge*, pp. 156–163.
- Doneen, L. (1964) 'Water quality for agriculture', Department of Irrigation, University of California, California, 48.
- Donzeau, M. (1972) 'Les déformations hercyniennes dans le Paléozoïque des monts d'Ougarta (Sahara occidental algérien)', *CR Acad. Sci. Paris*, 274, pp. 3519–3522.
- Donzeau, M., Fabre, J., and others (1981) 'Comportement de la dalle saharienne et orogénèse Varisque: essai d'interprétation'.
- Dostal, J. et al. (2002) 'Neoproterozoic magmatism in Southwestern Algeria (Sebkha el Melah inlier): a northerly extension of the Trans-Saharan orogen', *Journal of African Earth Sciences*, 35(2), pp. 213–225.
- Dubief, J. (1953a) 'Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara', (No Title) [Preprint].
- Dubief, J. (1953b) 'Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara', (No Title) [Preprint].
- Dubief, J. (1960a) 'Le climat du Sahara, Tome I, Univers. Alger, Inst. rech', *Sahar. Publ. CNRS, Paris*, 214.
- Dubief, J. (1960b) 'Le climat du Sahara, Tome I, Univers. Alger, Inst. rech', *Sahar. Publ. CNRS, Paris*, 214.
- Dubois, J.O. and Gvishiani, A. (2013) *Dynamic systems and dynamic classification problems in geophysical applications*. Springer Science & Business Media.
- Durand, J. (1973) 'Utilisation des eaux salines pour l'irrigation', *Bulletin Techn. Inform*, 276, pp. 39–58.
e15cb251-0b85-4abc-802f-2317730f347d (772x299) (no date). Available at:
<https://diy7ta1tt6jst.cloudfront.net/prod/okulus/e15cb251-0b85-4abc-802f-2317730f347d> (Accessed: 9 March 2025).
- Eaton, F.M. (1950) 'Significance of carbonates in irrigation waters', *Soil science*, 69(2), pp. 123–134.
- Edition, F. (2011) 'Guidelines for drinking-water quality', *WHO chronicle*, 38(4), pp. 104–8.
- EL ABIDINE, R.Z. and ABDELMANSOUR, N. (2019) 'Landslide susceptibility mapping using information value and frequency ratio for the Arzew sector (North-Western of Algeria)', *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 160(160), pp. 197–211.
- El Garouani, M. et al. (2024) 'An integrated and multidimensional approach for analyzing vulnerability of water resources under territorial climate conditions', *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, p. 100383.

- Eldosouky, A.M., Abdelkareem, M. and Elkhateeb, S.O. (2017) 'Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt', *Journal of African Earth Sciences*, 130, pp. 28–37.
- Elmahdy, S., Ali, T. and Mohamed, M. (2021) 'Regional mapping of groundwater potential in ar rub al khali, arabian peninsula using the classification and regression trees model', *Remote Sensing*, 13(12), p. 2300.
- El-Sawy, K. et al. (2016) 'Automated, manual lineaments extraction and geospatial analysis for Cairo-Suez district (Northeastern Cairo-Egypt), using remote sensing and GIS', *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(5), pp. 491–500.
- Emberger, L. (1955) *Une classification biogéographique des climats*.
- Ennih, N. and Liégeois, J.-P. (2001) 'The Moroccan Anti-Atlas: the West African craton passive margin with limited Pan-African activity. Implications for the northern limit of the craton', *Precambrian Research*, 112(3–4), pp. 289–302.
- Fabre, J. (1976a) *Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines: La couverture phanérozoïque*. publisher not identified ED.
- Fabre, J. (1976b) *Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines: La couverture phanérozoïque*. publisher not identified ED.
- Fabre, J. (1976c) *Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines: La couverture phanérozoïque*. publisher not identified ED.
- Fabre, J. (1976d) *Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines: La couverture phanérozoïque*. publisher not identified ED.
- Fabre, J. et al. (1982) 'Carte géologique et gravimétrique de l'Adrar des Iforas au 1/500.000 et notice explicative: la chaîne panafricaine, son avant-pays et la zone de suture au Mali', *Dir. nat. Geol. et Mines*, pp. 1–85.
- Fabre, J. (1988) 'Les séries Paléozoïques d'Afrique: une approche', *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 7(1), pp. 1–40.
- Fabre, J. (2005) 'Géologie du Sahara occidental et central. Série/Reeks: Tervuren African Geosciences Collection', MRAC Tervuren, Belgique [Preprint].
- Farid, S., Baloch, M.K. and Ahmad, S.A. (2012) 'Water pollution: Major issue in urban areas', *International journal of water resources and environmental engineering*, 4(3), pp. 55–65.
- Fashae, O.A. et al. (2014) 'Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach', *Applied Water Science*, 4(1), pp. 19–38.
- Fehdi, C. et al. (2009) 'The hydrogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, northeastern Algeria', *Environmental Geology*, 58, pp. 1611–1620.
- Feng, W. et al. (2020) 'Drought characteristics and its elevation dependence in the Qinghai–Tibet plateau during the last half-century', *Scientific Reports*, 10(1), p. 14323.
- Filipponi, F. (2019) 'Sentinel-1 GRD preprocessing workflow', *Multidisciplinary digital publishing institute proceedings*, 18(1), p. 11.
- Furon, R. (1964) *Le Sahara: géologie, ressources minérales*. FeniXX.
- Gabr, S.S., Hassan, S.M. and Sadek, M.F. (2015) 'Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, South Eastern Desert, Egypt, using remote sensing data analysis', *Ore Geology Reviews*, 71, pp. 1–13.
- Gautier, E.F. (1908) *Sahara algérien*. Librairie A. Colin.
- Geomatics, P. (2018) 'Geomatica Exploration and Geological Applications', PCI Geomatics: Markham, ON, Canada [Preprint].
- Gevin, P. (1960) *Études et reconnaissances géologiques sur l'axe cristallin Yetti-Eglab et ses bordures sédimentaires: par Pierre Gevin.... Bordures sédimentaires*. Service de la carte géologique de l'Algérie.
- Ghienne, J.-F. et al. (2007) 'The Cambrian–Ordovician succession in the Ougarta Range (western Algeria, North Africa) and interference of the Late Ordovician glaciation on the development of the Lower Palaeozoic transgression on northern Gondwana', *Bulletin of Geosciences*, 82(3), pp. 183–214.
- Gleeson, T. et al. (2012) 'Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint', *Nature*, 488(7410), pp. 197–200.
- Gleick, P.H. (1996) 'Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs', *Water international*, 21(2), pp. 83–92.
- Gleick, P.H. (2014) 'Water, drought, climate change, and conflict in Syria', *Weather, climate, and society*, 6(3), pp. 331–340.
- Gomes Silva, M., Pacaud, M. and Wiel, F. (1963) 'Contribution à l'étude du Cambro-Ordovicien des chaînes d'Ougarta', *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(1), pp. 134–141.
- Gomez, C. (2004) *Potentiels des données de télédétection multisources pour la cartographie géologique: Application à la région de Rehoboth (Namibie)*. PhD Thesis. Université Claude Bernard-Lyon I.
- Gomez Silva, M., Pacaud, M. and Wiel, F. (1963) 'Contribution à l'étude du Cambro-Ordovicien des chaînes d'Ougarta (Sahara algérien)', *Bulletin de la Société géologique de France*, 7, pp. 134–141.

- Goodfellow, I. (2016) 'Nips 2016 tutorial: Generative adversarial networks', arXiv preprint arXiv:1701.00160 [Preprint].
- Guerin, R. et al. (2004) 'La résistivité électrique comme outil pour la reconnaissance d'une friche industrielle', *Environnement, Ingénierie & Développement* [Preprint].
- Gunaratne, M., De Silva, S. and Amarasinghe, R. (2022) 'Can NASA Power Climatic Data Fill the Gap of Climatic Data Required for Agriculture and Forest Ecosystems Modeling?', in *Proceedings of International Forestry and Environment Symposium*.
- Gupta, D.K. et al. (2013) 'Recursive ant colony optimization: a new technique for the estimation of function parameters from geophysical field data', *Near Surface Geophysics*, 11(3), pp. 325–340.
- Gupta, S. and Maiti, S. (2023) 'Comparison between self-organizing map and principal component analysis for water quality assessment and hydro-geochemical characterization in dyke intruded complex geological settings', *Water and Environment Journal*, 37(3), pp. 512–526.
- Gurney, K. (2018) *An introduction to neural networks*. CRC press.
- Guru, B., Seshan, K. and Bera, S. (2017a) 'Frequency ratio model for groundwater potential mapping and its sustainable management in cold desert, India', *Journal of King Saud University-Science*, 29(3), pp. 333–347.
- Guru, B., Seshan, K. and Bera, S. (2017b) 'Frequency ratio model for groundwater potential mapping and its sustainable management in cold desert, India', *Journal of King Saud University-Science*, 29(3), pp. 333–347.
- Hai, T. et al. (2020) 'Global solar radiation estimation and climatic variability analysis using extreme learning machine based predictive model', *IEEE Access*, 8, pp. 12026–12042.
- Halimi, A.H., Karaca, C. and Büyüktaş, D. (2023) 'Evaluation of NASA POWER Climatic Data against Ground-Based Observations in The Mediterranean and Continental Regions of Turkey', *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1), pp. 104–114.
- Hamad, A. et al. (2018) 'Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundary basin)', *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3, pp. 1–15.
- Hamdi, M. and Goïta, K. (2023) 'Estimation of Aquifer Storativity Using 3D Geological Modeling and the Spatial Random Bagging Simulation Method: The Saskatchewan River Basin Case Study (Central Canada)', *Water*, 15(6), p. 1156.
- Hamdidouche, R. (2009) *Le bassin intra-cratonique de l'Ougarta (SW-Algérie): évolution géodynamique au Paléozoïque*. PhD Thesis. Thèse de Doctorat en Sciences, Université des Sciences et de la Technologie
- Hami, K. et al. (no date) 'Geomatic Approach and Geophysical Interpretation of the Hydrogeological Basin of the Hassi Naga Region (Algerian Southwest)', *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 3(2), p. 239112.
- Hammad, N. (2016) *Cartographie géologique et analyse linéamentaire de la région d'El Kseïbat (Sahara du sud-ouest) à partir des images spatiales. Incidence sur l'exploration minière*. PhD Thesis. Thèse Doctorat es Science, Université Ouargla, Algérie.
- Hammond, W.W. (1969) 'Ground-Water Resources of Matagorda County, Texas', *TEX WATER DEVELOPMENT BOARD, REP NO 91, MAR 1969. 163 P, 35 FIG, 12 TAB, 55 REF.* [Preprint].
- Harbaugh, J.W. and Bonham-Carter, G. (1970) 'Computer simulation in geology', (No Title) [Preprint].
- Hasan, E. and Tarhule, A. (2022) 'Recent Advances in Physical Water Scarcity Assessment Using GRACE Satellite Data', *Remote Sensing of Water-Related Hazards*, pp. 187–201.
- Hashim, M. et al. (2013) 'Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery', *Advances in Space Research*, 51(5), pp. 874–890.
- Hatefi, A.A.H. and Ekhtesasi, M.R. (2016) 'Groundwater potentiality through analytic hierarchy process (AHP) using remote sensing and geographic information system (GIS)'.
 Hauchard, E. (2001) *De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie: Application aux bassins-versants de la marge nord occidentale du Bassin de Paris*. PhD Thesis. Rouen.
- Heiß, L. et al. (2020) 'Index-based groundwater vulnerability and water quality assessment in the arid region of Tata city (Morocco)', *Groundwater for Sustainable Development*, 10, p. 100344.
- Hem, J.D. (1985) *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hervouet, Y. and Duée, G. (1996) 'Analyse morphostructurale par imagerie satellitaire et coupes structurales modélisées des monts d'Ougarta (Sahara occidental, Algérie): une chaîne hercynienne chevauchante à plis passifs', *Mém. Serv. géol. Algérie*, 8, pp. 127–173.
- Hobbs, W.H. (1904a) 'Lineaments of the Atlantic border region', *Bulletin of the Geological Society of America*, 15(1), pp. 483–506.
- Hobbs, W.H. (1904b) 'Lineaments of the Atlantic border region', *Bulletin of the Geological Society of America*, 15(1), pp. 483–506.
- Hornik, K. (1993) 'Some new results on neural network approximation', *Neural networks*, 6(8), pp. 1069–1072.

- Horton, J. and Hawkins, R. (1965) 'Flow path of rain from the soil surface to the water table', *Soil Science*, 100(6), pp. 377–383.
- Hosmer Jr, D.W., Lemeshow, S. and Sturdivant, R.X. (2013) *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- Human Rights Council, H. (2021) *The allocation of water resources in the Occupied Palestinian Territory, including East Jerusalem*. Palestine, 2021, p. Pp. 1-17.
- IDRES, M. et al. (no date) 'PROPOSITION D'UN MODÈLE DE MORPHOLOGIE DU SOCLE SOUS LE BASSIN DE TINDOUF, ALGÉRIE, À PARTIR DE L'INVERSION 3D DES DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES.'
- Iwar, R.T. et al. (2021) 'Fluoride levels in deep aquifers of Makurdi, North-central, Nigeria: An appraisal based on multivariate statistics and human health risk analysis', *Environmental monitoring and assessment*, 193, pp. 1–18.
- Jacob, C.E. (1947) 'Drawdown test to determine effective radius of artesian well', *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 112(1), pp. 1047–1064.
- Jamin, P. et al. (2020) 'Direct measurement of groundwater flux in aquifers within the discontinuous permafrost zone: an application of the finite volume point dilution method near Umiujaq (Nunavik, Canada)', *Hydrogeology Journal* [Preprint].
- Jasrotia, A., Kumar, A. and Singh, R. (2016) 'Integrated remote sensing and GIS approach for delineation of groundwater potential zones using aquifer parameters in Devak and Rui watershed of Jammu and Kashmir, India', *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), p. 304.
- Javadi, M.A. et al. (2022) 'Sensitivity analysis of a multi-generation system based on a gas/hydrogen-fueled gas turbine for producing hydrogen, electricity and freshwater', *Energy Conversion and Management*, 252, p. 115085.
- Jed, M. et al. (2022) 'Validation of the Accuracy of NASA Solar Irradiation Data for Four African Regions', *Planning*, 17(1), pp. 29–39.
- Jha, M.K., Chowdhary, V. and Chowdhury, A. (2010) 'Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques', *Hydrogeology journal*, 18(7), pp. 1713–1728.
- Jiang, F. et al. (2017) 'Artificial intelligence in healthcare: past, present and future', *Stroke and vascular neurology*, 2(4).
- Judeh, T., Bian, H. and Shahrour, I. (2021) 'GIS-based spatiotemporal mapping of groundwater potability and palatability indices in arid and semi-arid areas', *Water*, 13(9), p. 1323.
- Kahil, M.T., Connor, J.D. and Albiac, J. (2015) 'Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe', *Ecological Economics*, 120, pp. 226–233.
- Kamal El-Din, G.M. et al. (2021) 'Using multispectral and radar remote sensing data for geological investigation, Qena-Safaga Shear Zone, Eastern Desert, Egypt', *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), p. 997.
- Keary, P. and Brooks, M. (1984) 'An Introduction to Geophysical Exploration ELBS edition'.
- Kenniche, S. et al. (2022) 'Hydrochemical characterization, physicochemical and bacteriological quality of groundwater in Sidi Kada Mountains, northwest of Algeria', *Arabian Journal of Geosciences*, 15(11), p. 1061.
- Kerzabi, R. et al. (2021) 'Contribution of Remote Sensing and GIS to mapping groundwater vulnerability in arid zone: case from Amour Mountains-Algerian Saharan Atlas', *Journal of African Earth Sciences*, p. 104277.
- Khan, M.S. and Coulibaly, P. (2006) 'Application of support vector machine in lake water level prediction', *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(3), pp. 199–205.
- Kharroubi, M. et al. (2022) 'Water quality assessment and hydrogeochemical characterization of the Ouargla complex terminal aquifer (Algerian Sahara)', *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3), p. 251.
- Kheyruri, Y., Nikaein, E. and Sharafati, A. (2023) 'Spatial monitoring of meteorological drought characteristics based on the NASA POWER precipitation product over various regions of Iran', *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), pp. 43619–43640.
- Khokhlov et al (1981) *Recherche et prospection systématique des minéralisations dans la feuille de Tabelbala*. Rapport final, EREM, (inédit).
- Kim, G.-B. (2020) 'A study on the establishment of groundwater protection area around a saline waterway by combining artificial neural network and GIS-based AHP', *Environmental Earth Sciences*, 79(5), p. 117.
- Kisi, O. et al. (2015) 'A survey of water level fluctuation predicting in Urmia Lake using support vector machine with firefly algorithm', *Applied Mathematics and Computation*, 270, pp. 731–743.
- Kniaz, V.V. et al. (2021) 'Adversarial dataset augmentation using reinforcement learning and 3d modeling', in *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV: Selected Papers from the XXII International Conference on Neuroinformatics*, October 12-16, 2020, Moscow, Russia. Springer, pp. 316–329.
- Koncagül, E. et al. (2020) 'Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020: l'eau et les changements climatiques, faits et chiffres'.
- Kordestani, M.D. et al. (2019) 'Groundwater potential mapping using a novel data-mining ensemble model', *Hydrogeology journal* [Preprint].
- Kousalya, P. et al. (2012) 'Analytical Hierarchy Process approach—An application of engineering education', *mathematica Aeterna*, 2(10), pp. 861–878.

- Kreitler, C.W. (2023) *Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization*. Routledge.
- Kumar, R., Dwivedi, S.B. and Gaur, S. (2021) 'A comparative study of machine learning and Fuzzy-AHP technique to groundwater potential mapping in the data-scarce region', *Computers & Geosciences*, 155, p. 104855.
- Kumar, Tarun, Gautam, A.K. and Kumar, Tinu (2014) 'Appraising the accuracy of GIS-based multi-criteria decision making technique for delineation of groundwater potential zones', *Water resources management*, 28, pp. 4449–4466.
- Kurek, S. and Preidl, M. (1987) 'Le Précambrien des chaînes d'Ougarta (Sahara Algérien), sa place dans la structure de l'Afrique du Nord-Ouest', in *Colloquium on african geology*. 14, pp. 61–64.
- Lee, J.-S. et al. (1994) 'Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review', *Remote sensing reviews*, 8(4), pp. 313–340.
- Lee, S., Hong, S.-M. and Jung, H.-S. (2018) 'GIS-based groundwater potential mapping using artificial neural network and support vector machine models: the case of Boryeong city in Korea', *Geocarto international*, 33(8), pp. 847–861.
- Lee, S. and Pradhan, B. (2007) 'Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models', *Landslides*, 4(1), pp. 33–41.
- Legrand, P. (1998) *Approche stratigraphique de l'ordovicien terminal et du silurien inférieur du Sahara algérien par l'étude des diplograptides (graptolites)*. PhD Thesis.
- Les interactions rayonnement / matière (no date). Available at: <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-1-interaction-rayonnement-matiere.html> (Accessed: 9 March 2025).
- Les ondes électromagnétiques (no date). Available at: <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-2-les-ondes-electromagnetiques.html> (Accessed: 9 March 2025).
- Li, P. et al. (2017) 'Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China', *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp. 13224–13234.
- Liao, Y., Xu, J. and Wang, W. (2011) 'A method of water quality assessment based on biomonitoring and multiclass support vector machine', *Procedia Environmental Sciences*, 10, pp. 451–457.
- Loudière, D. and Gourbesville, P. (2020) 'Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020-L'eau et les changements climatiques'. EDP Sciences.
- Mabrouk, N. (2007) *Étude hydrochimique et isotopique des eaux de la vallée de la Soura (Sahara Nord Occidental)*. PhD Thesis. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
- MacDonald, G.K., D'Odorico, P. and Seekell, D.A. (2016) 'Pathways to sustainable intensification through crop water management', *Environmental Research Letters*, 11(9), p. 091001.
- Macgregor, D.S. (1996) 'The hydrocarbon systems of North Africa', *Marine and Petroleum Geology*, 13(3), pp. 329–340.
- Magesh, J.P., Nochyil S. et Chandrasekar, Nainarpandian et Soundranayagam (2012) 'Délimitation des zones potentielles d'eaux souterraines dans le district de Theni, Tamil Nadu, à l'aide de techniques de télédétection, SIG et MIF', *Frontières géoscientifiques*, 3, pp. 189–196.
- Mahmud, A., Sikder, S. and Joardar, J.C. (2020) 'Assessment of groundwater quality in Khulna city of Bangladesh in terms of water quality index for drinking purpose', *Applied Water Science*, 10, pp. 1–14.
- Makanda, K., Nzama, S. and Kanyerere, T. (2022) 'Assessing the role of water resources protection practice for sustainable water resources management: a review', *Water*, 14(19), p. 3153.
- MALCUIT, E. (2012) *Origine de la minéralisation des eaux dans un aquifère multicouche profond*. PhD Thesis. Thèse université de Bordeaux 3. 456p.
- Mammone, A., Turchi, M. and Cristianini, N. (2009) 'Support vector machines', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 1(3), pp. 283–289.
- Maescot, L. and Loke, M.H. (2004) 'Using the depth of investigation index method in 2D resistivity imaging for civil engineering surveys', in *17th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. European Association of Geoscientists & Engineers, p. cp-186.
- Marzouk, O.A. (2021) 'Assessment of global warming in Al Buraimi, sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements', *Heliyon*, 7(3).
- Mazor, E. (2004) *Global water dynamics: shallow and deep groundwater, petroleum hydrology, hydrothermal fluids, and landscaping*. CRC Press.
- McNeill, J. and Labson, V.F. (1991) 'Geological mapping using VLF radio fields'.
- Mehrotra, D. (2019) *Basics of artificial intelligence & machine learning*. Notion Press.
- Meireles, A.C.M. et al. (2010) 'A new proposal of the classification of irrigation water', *Revista Ciência Agronômica*, 41, pp. 349–357.

- Mekkaoui, A. (2015) Le magmatisme basique de l'axe Damrane-Kahal Tabelbala (Daoura, monts de l'Ougarta, Sud-Ouest, Algérie): Géologie, Pétrologie, Géochimie et Contexte Géodynamique. PhD Thesis. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
- MEKKAOU, A. (2015) Le magmatisme basique de l'axe Damrane-Kahal Tabelbala (Daoura, monts de l'Ougarta, Sud-Ouest, Algérie): Géologie, Pétrologie, Géochimie et Contexte Géodynamique. PhD Thesis. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
- Mekkaoui, A., Remaci-Bénaouda, N. and Graïne-Tazerout, K. (2017) 'Mafic dikes at Kahel Tabelbala (Daoura, Ougarta Range, south-western Algeria): New insights into the petrology, geochemistry and mantle source characteristics', *Comptes Rendus Geoscience*, 349(5), pp. 202–211.
- Menchikoff, N. (1930a) Recherches géologiques et morphologiques dans le Nord du Sahara occidental... PhD Thesis. Univ. de Paris.
- Menchikoff, N. (1930b) Recherches géologiques et morphologiques dans le Nord du Sahara occidental... PhD Thesis. Univ. de Paris.
- Menchikoff, N. (1930c) Recherches géologiques et morphologiques dans le Nord du Sahara occidental... PhD Thesis. Univ. de Paris.
- Menchikoff, N. (1949) 'Quelques traits de l'histoire géologique du Sahara occidental. Livre jubilaire Charles Jacob', *Annales Hébat et Haug*, 7, pp. 303–325.
- Menchikoff, N. (1952) 'Les chaînes d'Ougarta et la Saoura. Aperçu géologique', XIXe Congr. Géol. Intern., Monograph. Région.(1ere. sér., Algérie), 15, p. 16e22.
- Merzougui, T. et al. (2021a) 'Approach To Integrated Water Management In A Hyper Arid Zone; Case Of The Oasis OF Beni Abbes (South West Of Algeria).', *Applied Biology in Saharan Areas*, 3(2), pp. 12–20.
- Merzougui, T. et al. (2021b) 'Approach To Integrated Water Management In A Hyper Arid Zone; Case Of The Oasis OF Beni Abbes (South West Of Algeria).', *Applied Biology in Saharan Areas*, 3(2), pp. 12–20.
- Merzougui, T., Rezzoug, C. and Abderahmane, M. (2022a) 'Origin of Groundwater Salinization in the Osis of Béni Abbès (Saoura Valley, South-West Algeria)', *World Journal of Environmental Biosciences*, 11(4–2022), pp. 48–53.
- Merzougui, T., Rezzoug, C. and Abderahmane, M. (2022b) 'Origin of Groundwater Salinization in the Osis of Béni Abbès (Saoura Valley, South-West Algeria)', *World Journal of Environmental Biosciences*, 11(4–2022), pp. 48–53.
- Mialon, A. (2005) Etude de la variabilité climatique des hautes latitudes nord, dérivée d'observations satellites micro-ondes. PhD Thesis. Université Joseph-Fourier-Grenoble I; Université de Sherbrooke.
- Mishra, R.K. (2023) 'Fresh water availability and its global challenge', *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), pp. 1–78.
- Misra, A.K. (2014) 'Climate change and challenges of water and food security', *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), pp. 153–165.
- Mitra, R. and Roy, D. (2023) 'Delineation of groundwater potential zones through the integration of remote sensing, geographic information system, and multi-criteria decision-making technique in the sub-Himalayan foothills region, India', *International Journal of Energy and Water Resources*, 7(4), pp. 581–601.
- M'nassri, S. et al. (2022) 'Estimation of irrigation water quality index in a semi-arid environment using data-driven approach', *Water Supply*, 22(5), pp. 5161–5175.
- Morel-Seytoux, H.J. and Nimmo, J.R. (1999) 'Soil water retention and maximum capillary drive from saturation to oven dryness', *Water resources research*, 35(7), pp. 2031–2041.
- Mozas, M. and Ghosn, A. (2013) 'État des lieux du secteur de l'eau en Algérie', *Institut de Perspective Économique du Monde Méditerranéen (IPMED)*, 27.
- Mudry, J. (1987) Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. PhD Thesis. Université de Franche-Comté.
- Nag, S. and Chakraborty, S. (2003) 'Influence of rock types and structures in the development of drainage network in hard rock area', *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 31, pp. 25–35.
- Naghbi, S.A. et al. (2017) 'A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping', *Journal of Hydrology*, 548, pp. 471–483.
- NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources (no date). Available at: <https://power.larc.nasa.gov/> (Accessed: 22 January 2025).
- Nasir, M.J. et al. (2018a) 'Delineation of groundwater potential zones using GIS and multi influence factor (MIF) techniques: a study of district Swat, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan', *Environmental Earth Sciences*, 77(10), pp. 1–11.
- Nasir, M.J. et al. (2018b) 'Delineation of groundwater potential zones using GIS and multi influence factor (MIF) techniques: a study of district Swat, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan', *Environmental Earth Sciences*, 77(10), pp. 1–11.
- Naz, I. et al. (2024) 'Integrated Geospatial and Geostatistical Multi-Criteria Evaluation of Urban Groundwater Quality Using Water Quality Indices', *Water*, 16(17), p. 2549.

- Nemmour-Zekiri, D. and Oulebsir, F. (2020) 'Application of remote sensing techniques in lithologic mapping of Djanet Region, Eastern Hoggar Shield, Algeria', *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14), pp. 1–10.
- Nguyen, P.T. et al. (2020) 'Groundwater potential mapping combining artificial neural network and real AdaBoost ensemble technique: the DakNong province case-study, Vietnam', *International journal of environmental research and public health*, 17(7), p. 2473.
- Nithya, C.N. et al. (2019) 'Assessment of groundwater potential zones in Chittar basin, Southern India using GIS based AHP technique', *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15, p. 100248.
- Nourani, V. and Mousavi, S. (2016) 'Spatiotemporal groundwater level modeling using hybrid artificial intelligence-meshless method', *Journal of Hydrology*, 536, pp. 10–25.
- Oliveira, R.B. et al. (2018) 'Computational methods for pigmented skin lesion classification in images: review and future trends', *Neural Computing and Applications*, 29, pp. 613–636.
- Omar, P.J. et al. (2019) 'Groundwater modelling using an analytic element method and finite difference method: an insight into Lower Ganga river basin', *Journal of Earth System Science*, 128(7), p. 195.
- ORGM (2001) Rapport intermédiaire des travaux de prospection de cuivre dans la série volcanosédimentaire de Damrane (inédit).
- ORGM EX EREM (1979) Recherches systématiques et levé géologique au 1/200 000, 1979-1980. Office Nationale de Recherche Géologique et Minière.
- Osman, A.I.A. et al. (2022) 'Past, present and perspective methodology for groundwater modeling-based machine learning approaches', *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), pp. 3843–3859.
- Ozenda, P. (1991) 'Les relations biogéographiques des montagnes sahariennes avec la région méditerranéenne', *Revue de géographie alpine*, 79(1), pp. 43–53.
- Panagiotakis, C. and Kokinou, E. (2014) 'Linear pattern detection of geological faults via a topology and shape optimization method', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1), pp. 3–11.
- Panahi, M. et al. (2020) 'Spatial prediction of groundwater potential mapping based on convolutional neural network (CNN) and support vector regression (SVR)', *Journal of Hydrology*, 588, p. 125033.
- Park, J.-W. et al. (2017) 'Efficient thermal noise removal for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(3), pp. 1555–1565.
- Pietroniro, A. and Leconte, R. (2005) 'A review of Canadian remote sensing and hydrology, 1999–2003', *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(1), pp. 285–301.
- Polo, J. (2015) 'Solar global horizontal and direct normal irradiation maps in Spain derived from geostationary satellites', *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 130, pp. 81–88.
- Population et Emploi (no date). Available at: https://interieur.gov.dz/Monographie/article_detail.php?lien=1205&wilaya=8 (Accessed: 9 March 2025).
- Prost, G.L. (1994) *Remote sensing for geologists: a guide to image interpretation*. CRC Press.
- Prost, G.L. (2013) *Remote sensing for geoscientists*. CRC Press New York.
- Provencher, L. and Dubois, J.-M.M. (2007) *Précis de télédétection-Volume 4*. Puq.
- Punniyamoorthy, M., Mathiyalagan, P. and Lakshmi, G. (2012) 'A combined application of structural equation modeling (SEM) and analytic hierarchy process (AHP) in supplier selection', *Benchmarking: An International Journal* [Preprint].
- Raghaunth, H. (1989a) 'Groundwater Wiley Eastern Ltd New Delhi. 563'.
- Raghaunth, H. (1989b) 'Groundwater Wiley Eastern Ltd New Delhi. 563'.
- Rahmati, O. et al. (2015) 'Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. Arab J Geosci 8 (9): 7059–7071'.
- Rao, A.M. et al. (2012) 'The influence of pore-water advection, benthic photosynthesis, and respiration on calcium carbonate dynamics in reef sands', *Limnology and Oceanography*, 57(3), pp. 809–825.
- Ravi, D. et al. (2016) 'Semantic segmentation of images exploiting DCT based features and random forest', *Pattern Recognition*, 52, pp. 260–273.
- Réflexion (no date). Available at: <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-3-reflexion.html> (Accessed: 9 March 2025).
- Réfraction (no date). Available at: <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-6-refraction.html> (Accessed: 9 March 2025).
- Rencz, A.N. and Ryerson, R.A. (1999) *Manual of remote sensing, remote sensing for the earth sciences*. John Wiley & Sons.
- Rhoades, J. (1996) 'Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids', *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, pp. 417–435.
- Richards, L.A. (1954a) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Government Printing Office (60).
- Richards, L.A. (1954b) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Government Printing Office (60).

- Rivereau, J. and Fontanel, A. (1976) 'Remote Sensing as an Aid to Petroleum and Mining Exploration'.
- Roche, E. (1973) 'Marqueurs stratigraphiques (pollen et spores) du Paléocène et de l'Éocène inférieur de Belgique', *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, 59(1), pp. 956–969.
- Roche, M.A. (1973) 'Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord occidental)', (No Title) [Preprint].
- RODIER, J. (2005) 'Analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer: Chimie, physicochimie, biologie, interprétation des résultats', Paris Dunod, 1383.
- Saaty, T. (1980) 'The analytic hierarchy process (AHP) for decision making', in Kobe, Japan, p. 69.
- Saaty, T.L. (1990) *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
- Saaty, T.L. (2003) 'Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary', *European journal of operational research*, 145(1), pp. 85–91.
- Sayago, S. et al. (2020) 'Daily solar radiation from NASA-POWER product: assessing its accuracy considering atmospheric transparency', *International Journal of Remote Sensing*, 41(3), pp. 897–910.
- Scantlebury, J. et al. (2020) 'Data set augmentation allows deep learning-based virtual screening to better generalize to unseen target classes and highlight important binding interactions', *Journal of chemical information and modeling*, 60(8), pp. 3722–3730.
- Scanvic, J.-Y. (1983) 'Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre', *Manuels et méthodes-Bureau de recherches géologiques et minières* [Preprint], (7).
- Scanvic, J.-Y. (1997) *Aerospatial remote sensing in geology*. CRC Press.
- Schoeller, H. (1945) 'L'hydrogéologie d'une partie de la vallée de la Saoura et du Grand erg occidental', *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5(7–8), pp. 563–585.
- Seltzer, P. (1946) 'Le climat de l'Algérie. Inst. Météor. Et de phys. Du globe', Univ. Alger [Preprint].
- SEMARI, K. (2016) 'Forme des lits pour les cours d'eau du bassin versant de la MactaV'.
- Shao, Z. et al. (2020) 'Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China', *Environmental Modelling & Software*, 134, p. 104868.
- Shekhar, S. and Pandey, A.C. (2015) 'Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques', *Geocarto International*, 30(4), pp. 402–421.
- SHUBE, H. (2011) *School of Earth and Planetary Science Department Of Earth Sciences Carbon dioxide-water-rock interaction and hydrogeochemical evolution of thermal and cold ground waters in Wonchi Crater Lake and Ambo-Woliso area*. PhD Thesis. Addis Ababa University.
- Simsek, C. and Gunduz, O. (2007) 'IWQ index: a GIS-integrated technique to assess irrigation water quality', *Environmental monitoring and assessment*, 128, pp. 277–300.
- Singh, P.K. et al. (2024) 'Critical review on toxic contaminants in surface water ecosystem: sources, monitoring, and its impact on human health', *Environmental Science and Pollution Research*, 31(45), pp. 56428–56462.
- Singh, S. et al. (2016) 'Assessment of pollution potential of leachate from the municipal solid waste disposal site and its impact on groundwater quality, Varanasi environs, India', *Arabian Journal of Geosciences*, 9, pp. 1–12.
- Small, D. et al. (2008) 'Accurate geometric correction for normalisation of PALSAR radiometry'.
- SNAP – STEP (no date). Available at: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (Accessed: 9 March 2025).
- SONAREM (1977) *Travaux de verifications des anomalies magnétiques dans la région de Tabelbala*. Société Nationale de recherches et d'Exploitation Minières.
- SONAREM (1978) *Levés aéromagnétiques et interprétations rapport des travaux* (inédit).
- Stumm, W. and Morgan, J. (1996) 'Water chemistry', *Encyclopedia of Environmental science*, 3, pp. 1142–1161.
- Subba Rao, N. and Surya Rao, P. (2010) 'Major ion chemistry of groundwater in a river basin: a study from India', *Environmental Earth Sciences*, 61, pp. 757–775.
- Tahmasebi, P. (2023) 'Geotechnics', in *Encyclopedia of Mathematical Geosciences*. Springer, pp. 573–575.
- Tanvir Rahman, M.A., Rahman, S.H. and Majumder, R.K. (2012) 'Groundwater quality for irrigation of deep aquifer in southwestern zone of Banglades.', *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 34(3).
- Tapeh, A.T.G. and Naser, M. (2023) 'Artificial intelligence, machine learning, and deep learning in structural engineering: a scientometrics review of trends and best practices', *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), pp. 115–159.
- Thapa, R. et al. (2017a) 'Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal', *Applied Water Science*, 7(7), pp. 4117–4131.
- Thapa, R. et al. (2017b) 'Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal', *Applied Water Science*, 7(7), pp. 4117–4131.
- Theriault, M. (1996) 'L'intégration des études environnementales et des systèmes d'informations géographiques pour appuyer les décisions d'aménagement: un objet de recherche prometteur/The integration of environmental studies and geographical information systems to support planning and development decisions: a promising area of research', *Géocarrefour*, 71(2), pp. 155–156.

- Tiwari, A.K., Singh, P.K. and Mahato, M.K. (2014) 'GIS-based evaluation of water quality index of ground water resources in West Bokaro Coalfield, India', *Current world environment*, 9(3), p. 843.
- Todd, D.K. (1959) *Annotated bibliography on artificial recharge of ground water through 1954*. US Government Printing Office.
- Todd, D.K. and Mays, L.W. (2004) *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
- Tong, W. (2010) *Fundamentals of wind energy*. WIT press Southampton, UK.
- Twort A C, Hoather R C and Law F M 1 (1974) *Water supply* (London: Edward Arnold Publishing Ltd.) p 245.
- UNEP, A. (2016) 'A snapshot of the world's water quality: towards a global assessment', Nairobi, United Nations Environment Programme [Preprint].
- UNESCO (2012) *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*.
- UNESCO and others (2021) *The United Nations world water development report 2021: valuing water*. United Nations.
- Vadrevu, K.P., Eaturu, A. and Badarinath, K. (2006) 'Spatial distribution of forest fires and controlling factors in Andhra Pradesh, India using spot satellite datasets', *Environmental monitoring and assessment*, 123(1), pp. 75–96.
- Vapnik, V. (1995) 'Support-vector networks', *Machine learning*, 20, pp. 273–297.
- VERDEIL, P. (1988) 'Les karsts du bord de mer du Languedoc et d'Oranie et les problèmes de contamination par le biseau salé'.
- Vervelde, G. (1976) 'Land use in advancing agriculture: Vol. 1 of Advanced Series in Agricultural Sciences. APA Vink. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, NY, 1975, 394 pp., 94 figures, 115 tables, DM 60.00, US \$25.80, ISBN 3-540-07091-5'. Elsevier.
- Villalta Echeverria, M.D.P. et al. (2022) 'Lineament extraction from digital terrain derivate model: A case study in the Girón–Santa isabel basin, South Ecuador', *Remote Sensing*, 14(21), p. 5400.
- Water, U. (2011) 'UN Water policy brief: water quality'. Jenewa.
- Watson, D.F. (1985) 'A refinement of inverse distance weighted interpolation', *Geo-processing*, 2, pp. 315–327.
- Weiss, A. (2001) 'Topographic position and landforms analysis', in Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA.
- Welcome to Sahara Overland | Sahara Overland (no date). Available at: <https://sahara-overland.com/home/> (Accessed: 9 March 2025).
- Wen, L. and Hughes, M. (2020) 'Coastal wetland mapping using ensemble learning algorithms: A comparative study of bagging, boosting and stacking techniques', *Remote Sensing*, 12(10), p. 1683.
- Wescoat, J.L. and White, G.F. (2003) *Water for life: Water management and environmental policy*. Cambridge University Press.
- Yahiaoui, A. (1992a) Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Tabelbala (Sahara Nord Occidental). *Projet d'Ingéniorat d'Etat*. Oran.
- Yahiaoui, A. (1992b) Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Tabelbala (Sahara Nord Occidental). *Projet d'Ingéniorat d'Etat*. Oran.
- Yahiaoui, A. (1992c) Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Tabelbala (Sahara Nord Occidental). *Projet d'Ingéniorat d'Etat*. Oran.
- Yang, S. et al. (2022) 'Image data augmentation for deep learning: A survey', arXiv preprint arXiv:2204.08610 [Preprint].
- Yeh, H. et al. (2016) 'Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*', Elsevier Ltd, 26(1), pp. 33–43.
- Yi, Y. et al. (2020) 'Landslide susceptibility mapping using multiscale sampling strategy and convolutional neural network: A case study in Jiuzhaigou region', *Catena*, 195, p. 104851.
- Yidana, S.M. and Yidana, A. (2010) 'Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis', *Environmental Earth Sciences*, 59, pp. 1461–1473.
- Yilmaz, I. (2010) 'The effect of the sampling strategies on the landslide susceptibility mapping by conditional probability and artificial neural networks', *Environmental Earth Sciences*, 60, pp. 505–519.
- Yin, B. et al. (2020) 'Sensitivity assessment and simulation of water resource security in karst areas within the context of hydroclimate change', *Journal of Cleaner Production*, 258, p. 120994.
- Younsi, A. et al. (2001) 'Incidences de pluies exceptionnelles sur un aquifère libre côtier en zone semi-aride (Chaouia, Maroc)', *Revue des sciences de l'eau*, 14(2), pp. 115–130.
- Zakar, M.Z., Zakar, D.R. and Fischer, F. (2020) 'Climate change-induced water scarcity: a threat to human health', *South Asian Studies*, 27(2).
- Zegait, R., Bensaha, H. and Addoun, T. (2021) 'Water management and the agricultural development constraints in the Algerian Sahara: Case of the M'Zab Valley', *Journal of Water and Land Development* [Preprint].
- Zeroual, I. et al. (2020) 'Geo Electric Study in Hydrogeology According to the Axis Hassi Naga–Hassi Khebi of Tindouf (Southwestern Algeria)', *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(4), pp. 51–64.

Zoli, C. (1999) 'Intersecting generalized Lorenz curves and the Gini index', *Social Choice and Welfare*, 16(2), pp. 183–196.