

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN

كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون

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

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.

Laboratoire N°25: « Promotion des ressources hydriques, minières et pédologiques : législation de l'environnement et choix technologique ».



MÉMOIRE

Présenté par

KEBIBER Merwa Nouria & HEDJAM Wissem

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie.

Thème

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA TECHNIQUE D'IMPLANTATION, DE REALISATION ET DE EQUIPEMENT DU FORAGE DE BENI BAHDEL DAIRA DE BENI SENOUS WILAYA DE TLEMCEN (NORD-OUEST ALGERIEN)

Soutenu le juin 2026, devant le jury composé de :

Président	Mr BENCHAIB.A	M.C.B	Université de Tlemcen.
Encadrant	Mme GUETTAIA.S	M.C.A	Université de Tlemcen.
Co-Encadrant	Mr BOUDJEMA.A	Professeur	Université de Tlemcen.
Examineur	Mr CHIKH.M	M.A.A	Université de Tlemcen.

Année universitaire 2025 /2026.

Remerciements :

Au terme de ce parcours, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'égard de toutes les personnes qui, par leur aide précieuse ou leur simple présence, ont jalonné l'édification de ce projet de fin d'études.

Nous exprimons notre vive reconnaissance à nos encadrants **M^{me} S. GUETTAIA** et **Mr A. BOUDJEMA**, dont la rigueur scientifique, les conseils avisés et la bienveillante disponibilité ont été les piliers de notre réflexion. Leur confiance constante a constitué pour nous un moteur essentiel.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, auxquels nous sommes honorées de présenter ce travail ; nous les remercions par avance pour le temps et l'expertise qu'ils consacreront à son évaluation :

Mr CHIKH.M , Mr BENCHAIB.A

Notre gratitude va également à l'ensemble de l'équipe qui nous a accueillis, en nous offrant un environnement de travail stimulant et un soutien technique sans faille.

Enfin, ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'appui indéfectible de nos familles et amis. Que ce mémoire soit le témoignage de notre affection pour leur patience infinie et leurs encouragements, qui furent notre plus grand réconfort dans les moments de doute.

Dédicaces

En premier lieu, je rends grâce à « Dieu » le tout-puissant pour m'avoir donné la force et la volonté d'achever ce modeste mémoire.

C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail à ceux que les mots ne sauraient suffire à décrire :

À la lumière de mes jours, celle qui a fait de son sacrifice mon bonheur et de sa patience ma réussite : mon adorable mère, **SAFIA**. Que ce travail soit le reflet de ton amour infini.

À mon pilier et mon guide, l'homme à qui je dois la vie et la persévérance : mon cher père, **BENNAMER**. Ta fierté est ma plus belle récompense. Que Dieu vous accorde à tous deux une longue vie, empreinte de santé et de joie.

À mon bras **MOHAMMED**, complice de toujours, pour tes conseils précieux et ton soutien infaillible qui m'ont porté tout au long de mon cursus.

À mes fidèles amies, **FATNA, LILA, YASSMINA, RIHEM, KARIMA** et **ROUA**, les rayons de soleil de mon quotidien. Merci pour votre amitié sincère et votre présence constante.

À ma sœur de cœur et binôme d'exception, **WISSEM**, pour sa patience exemplaire, sa compréhension et son soutien moral durant chaque étape de ce projet.

À toute ma famille, pour leur amour et leurs encouragements.



Merwa

Dédicaces

Tout d'abord, Grâce à Dieu tout puissant et en signe de reconnaissance pour ma réussite et ma volonté pour mener ce travail à terme...

Avec l'expression de ma gratitude et de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail :
A celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, car il est **Mon Père**, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon model de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grâce à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.
A celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être **Ma mère** continueront d'éclairer mon chemin.

A mon petit ange et à la joie de notre foyer, ma sœur **ASSIL**, ton arrivée dans ce monde a été la plus belle joie qui soit entrée dans notre famille.

A mes chers témoins des étapes de ma vie, dans mon succès, joie, tristesse, ma chère sœur **RADJAA** et mon cher frère **BILAL** je n'oublierai j'aimais vos encouragements permanents et soutiens moraux, votre présence dans mon cœur et un trésor précieux.

A mon Binôme **MERWA KEBIBER**, ce travail n'aurait pas eu la même valeur sans toi à mes côtés. Merci pour ta présence, ton soutien et tous les efforts que nous avons partagés, je te souhaite beaucoup de réussite et un plein de bonheur.

A mes chers amis **Merwa, Fatna, Lila, Yassmine, Rihem, Mounira, Lamia, Kaoutar, Fatiha** en écrivant ces lignes merci pour l'énergie positive que vous apportez dans mon existence.

J'adresse mes sincères remerciements à mes encadrants, Monsieur **BOUDJEMA ABDERREZAK** et MADAME **GUETTAIA SABRINE**, pour leur encadrement, leur écoute et leur précieux soutien tout au long de ce travail, leur rigueur et conseils ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire. Recevez toute notre gratitude et notre profond respect.

A toutes mes amies que j'ai rencontré tout au long mon cursus universitaire :vous êtes les meilleures.

Enfin, je dédie ce travail à moi-même, c'est le temps d'y être !

Wissem



الملخص

المساهمة في تحليل تقنية اختيار موقع إنجاز وتجهيز بئر مائي بمنطقة بني بهدل، دائرة بني سنوس، ولاية تلمسان (الشمال الغربي الجزائري)

يتناول هذا العمل دراسة إنجاز بئر مائي يقع في منطقة بني بهدل، وتحديدًا بئر القلعة.

يتمثل الهدف الرئيسي في تحليل مختلف مراحل إنجاز البئر، وكذلك التجهيزات المستعملة أثناء عمليات الحفر. وتشمل الدراسة وصفًا مفصلاً لمراحل الحفر، بدءًا من تحضير الموقع وصولاً إلى مرحلة الاستغلال، مرورًا بالتقنيات والأدوات المستخدمة. كما تم إيلاء اهتمام خاص لتقييم جودة المياه الجوفية من خلال تحاليل فيزيوكيميائية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن مياه البئر تتميز بخصائص مطابقة للمعايير، مما يجعلها صالحة للاستهلاك البشري (صالحة للشرب) وكذلك للري الزراعي.

تبرز هذه الدراسة أهمية الآبار المائية في تأمين الموارد المائية الجوفية ودورها الأساسي في التنمية المحلية.

الكلمات المفتاحية: بني بهدل، بئر مائي، المياه الجوفية، صالحة للشرب، الري، الحماية.

RESUME

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA TECHNIQUE D'IMPLANTATION, DE REALISATION ET DE EQUIPEMENT DU FORAGE DE BENI BAHDEL DAIRA DE BENI SENOUS WILAYA DE TLEMCEN (NORD-OUEST ALGERIEN).

Ce travail porte sur l'étude de réalisation d'un forage hydraulique, situé dans la région de Beni Bahdel, précisément le forage d'El Kalaa.

L'objectif principal est d'analyser les différentes étapes de réalisation du forage, ainsi que les équipements utilisés lors des opérations de foration. L'étude comprend une description détaillée des étapes de foration, depuis la préparation du site jusqu'à la mise en exploitation, en passant par les techniques et outils employés. Une attention particulière est accordée à l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à travers des analyses physico-chimiques.

Les résultats obtenus montrent que l'eau du forage présente des caractéristiques conformes aux normes, ce qui la rend adaptée à la consommation humaine (potabilité) ainsi qu'à l'irrigation agricole.

Cette étude met en évidence l'importance des forages hydrauliques dans la valorisation des ressources en eau souterraine et leur rôle essentiel dans le développement local.

Mots-clés : Beni Bahdel, Forage hydraulique, eaux souterraines, potabilité, irrigation, protection.

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF THE TECHNIQUE OF SITING, CONSTRUCTION, AND EQUIPMENT OF THE BENI BAHDEL BOREHOLE, BENI SNOUS DISTRICT, TLEMCEN PROVINCE (NORTH-WESTERN ALGERIA).

This work focuses on the study of the construction of a hydraulic borehole located in the Beni Bahdel region, specifically the El Kalaa borehole.

The main objective is to analyze the different stages of borehole construction, as well as the equipment used during drilling operations. The study includes a detailed description of the drilling stages, from site preparation to commissioning, including the techniques and tools employed. Particular attention is given to the evaluation of groundwater quality through physico-chemical analyses.

The obtained results show that the borehole water presents characteristics that comply with standards, making it suitable for human consumption (potable) as well as for agricultural irrigation.

This study highlights the importance of hydraulic boreholes in the valorization of groundwater resources and their essential role in local development.

Keywords : Beni Bahdel, hydraulic borehole, groundwater, potability, irrigation, protection.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AEP : Alimentation en eau potable.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

P : Précipitations.

T : Température.

ETP : Evapo-Transpiration Potentielle.

ETR : Evapo-Transpiration Réelle.

pH : potentiel Hydrogène.

CE : Conductivité Electrique.

Ca²⁺ : Ion Calcium.

Mg²⁺ : Ion Magnésium.

Na⁺ : Ion Sodium.

K⁺ : Ion potassium.

NO₃⁻ : Ion Nitrates.

Cl⁻ : Ion Chlorure.

HCO₃⁻ : Ion Bicarbonate.

NO₂⁻ : Ion Nitrite.

SO₄⁻² : Ion sulfate.

PO₄⁻ : Orthophosphates.

CTH : Organisme National de Contrôle Technique de la Construction Hydraulique.

BNEDER : Bureau National d'Études pour le Développement Rural.

LISTE DES FIGURES

Parie 01 :

Figure 1: Situation géographique de la commune de Beni Bahdel.....	3
Figure 2:Ancien village de Beni Bahdel.....	4
Figure 3 : récente village de Beni Bahdel.....	4
Figure 4: La source Ain Moussa.....	4
Figure 5:Variations des précipitations moyennes annuelles (1981-2025).....	7
Figure 6:Variations des précipitations moyennes mensuelles (1981-2025).	7
Figure 7:Précipitations saisonnières.....	8
Figure 8: Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales (1981-2025).	9
Figure 9: Diagramme pluviothermique de Bagnouls et Gausson.....	10
Figure 10: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne.....	12
Figure 11: Climagramme d'EMBERGER	14
Figure 12: Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).	16
Figure 13: Abaque de Verdeil.....	17

Partie 02 Chapitre 01 :

Figure 1 : Coupe géologique de la région de Beni Bahdel BNEDER. 1993.....	22
Figure 2 : Colonne litho -stratigraphique des Monts de Tlemcen (Benest .M; Bensalah .M, 1999).....	26
Figure 3 : Carte géo-structurale de la région d'étude.....	28
Figure4 :Interconnexion des principales sources d'approvisionnement en eau de la wilaya de Tlemcen.....	30

Chapitre 03 partie 02

Figure 1 : Chantier de forage à Beni Bahdel (23 Septembre 2025).....	37
Figure 2 : Schéma simplifié d'une installation de forage par battage.....	38
Figure 3 : Principe de fonctionnement du forage par battage.....	39
Figure 4 : Tiges de forage.....	41
Figure 5 : Massestiges.....	41
Figure 6 : Trépan PDC.....	42
Figure 7 : Trépan tricon.....	42
Figure 8 : Les tools joints.....	42
Figure 9 : Les tiges lourdes.....	43
Figure 10 : les stabilisateurs.....	43
Figure 11 : L'équipement de la rotation.....	46
Figure 12 : Schéma simplifié la circulation en rotary.....	47
Figure 13 : Les déblais du forage El Kalaa.....	49
Figure 14 : Log lithologique détaillé du forage El Kalaa (Profondeur finale :302m).....	50
Figure 15 : Résultats de la diagraphie sur le forage El Kalaa.....	53
Figure 16 : Photo du tubage TNRS.....	56
Figure 17 : Les crépines en TNRS.....	57
Figure 18 : Les différents types des crépines en acier.....	58
Figure 19 : Les crépines en PVC.....	58
Figure 20 : Massif filtrant (gravier additionnel, massif de gravier)	59

Figure 21 : Classification de l'eau selon Schoeller-Berkaloff.....	64
Figure 22 : Diagramme de Stabler.....	65
Figure 23 : Diagramme de Piper.....	65
Figure 24 : Diagramme de Wilcox.....	67
Figure 25 : Diagramme de Riverside.....	68

LISTE DES PHOTOS

Annexes :

Photo 1 : Préparation d'un échantillon rocheux pour l'observation microscopique au laboratoire.....	78
Photo 2 : la calcimètre.....	78
Photo 3 : le forage EL Kalaa.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01

Tableau 1: Coordonnées de la zone d'étude :	3
Tableau 2: Précipitations moyennes annuelles (1981 – 2025) :	6
Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles (1981-2025).....	7
Tableau 4: Calcul des précipitations saisonnières.....	8
Tableau 5: les valeurs des températures moyennes, maximales et minimales (1981-2025) :.....	9
Tableau 6: Précipitations et températures moyennes mensuelles (1981-2025).	10
Tableau 7: Classification de DE Martonne.	11
Tableau 8: l'indice d'aridité mensuel de DE Martonne :	12
Tableau 9: Indice d'Emberger.....	13
Tableau 10: ETR calculée	15
Tableau 11: Déficit d'écoulement selon Wundt.....	15
Tableau 12: Déficit d'écoulement selon Verdeil	16
Tableau 13: Valeurs de l'ETP (1981-2025).....	17
Tableau 14: Bilan hydrologique de la zone d'étude (1981-2025).....	18

Partie 02 Chapitre 02

Tableau 1 : les coordonnées du forage El Kalaa.....	36
Tableau 2 : Classification des eaux d'irrigation, selon le pourcentage de sodium.....	61
Tableau 3 : Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier J., 2009)....	62
Tableau 4: Classification des eaux d'irrigation, selon le pourcentage en sodium.....	67

Annexes

Tableau 1 : Normes de potabilité (JORA 2011 et 2014).....	77
Tableau 2 : Bulletin des analyses de forage EL Kalaa.....	77
Tableau 3 : Classification des eaux d'irrigation d'après Servent 1975.....	78

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumés	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

Partie 01 : Généralités

I. Présentation de la région de Beni Bahdel.....	3
I.1.Situation géographique et administrative	3
I.2.Aspect démographique et économique.....	5
I.3.Besoins en eau potable de la commune et des environs.....	5
II. Etude climatologique.....	6
II.1. Introduction.....	6
II.2. Evaluation des variables climatiques.....	6
II.2.1. Précipitations	6
a) Précipitations moyennes annuelles.....	6
b) Précipitations moyennes mensuelles	7
c) Précipitations saisonnières	8
II.2.2.Température.....	9
a) Températures moyennes mensuelles.....	9
II.3.L'étude du climat.....	10
a. Méthode graphique (méthode de visualisation).....	10
b. Les indices climatiques	11
II.4. Climagramme d'EMBERGER.....	13
Conclusion	19

Partie 02/Chapitre 1 : Contexte géo-structural et hydrogéologique.

I. Cadre géo-structural de la région.....	22
I.1. Description litho- stratigraphique.....	23
1. PALEOZOIQUE	23
1.1. Silurien	23
2. MESOZOIQUE	23
2.1. JURASSIQUE INFERIEUR	23
2.1.1. Domérien.....	23
2.1.2. Toarcien.....	23
2.2. JURASSIQUE MOYEN	23
2.2.1. Bajocien supérieur	23
2.2.2. Bathonien.....	23
2.3. JURASSIQUE SUPERIEUR	23
2.3.1. Oxfordien-Kimméridgien.....	23
a. Les Grès de Boumediène.....	23
b. Les Calcaires de Zarifet.....	24
c. Les Dolomies de Tlemcen	24
d. Les calcaires de Stah.....	24

e.	Les Marno-calcaires de Raouarai.....	24
f.	Les Calcaires de Lato.....	24
g.	Les dolomies de Terny.....	25
h.	Les marno-calcaires de Hariga.....	25
i.	Les grès de Merchiche.....	25
3.	LE QUATERNAIRE.....	25
3.1.	Le Rharbien.....	25
3.2.	Les travertins calcaires.....	25
I.2.	Analyse structurale régionale.....	26
➤	Les phases tectoniques.....	27
I.3.	Synthèse géo-structurale de la région d'étude.....	29
II.	Cadre hydrogéologique.....	29
A.	Formations à fort potentiel aquifère.....	30
B.	Formations à potentiel aquifère moyen.....	31
C.	Formations à faible potentiel aquifère.....	32
	Conclusion.....	32

Partie 2/ Chapitre 02 : IMPLANTATION, PROCEDE, ETAPES DE FORATION ET QUALITE DES EAUX DU FORAGE.

I.	Introduction.....	35
II.	Implantation du forage.....	35
III.	Installation du chantier.....	36
IV.	Technique de réalisation du forage de Beni Bahdel.....	36
IV.1.	Matériels utilisés dans le forage par battage.....	37
a.	Avantages.....	39
b.	Inconvénients.....	39
V.	Matériels utilisés dans le forage rotary.....	40
V.1.	Matériels et équipement de fond.....	40
V.1.1.	Les tiges.....	40
V.1.2.	Les masses tiges.....	41
V.1.3.	Un trépan.....	41
•	Les Tools-joints.....	42
•	Les tiges lourdes.....	43
•	Les stabilisateurs.....	43
V.1.4.	Outil de forage.....	44
•	Outils à dents d'acier.....	44
•	Outils à picots (inserts).....	44
V.2.	Equipement de surface.....	44
V.2.1.	Matériels et équipement de puissance.....	44
a.	Les sources d'énergie.....	44
b.	La pompe à boue.....	44
c.	Le circuit de la boue.....	45
d.	La boue et son rôle.....	45
V.2.2.	Matériels et équipement de rotation.....	45
a.	La table de rotation.....	45
b.	Le carré d'entraînement.....	46
c.	La tige d'entraînement.....	46
VI.	Méthodologie de réalisation du forage d'El Kalaa.....	47
VI.1.	Travaux préparatoires du chantier.....	47
VI.2.	Reconnaissance du forage par battage.....	47

a.	Mise en place de l'avant-puits et du tube guide.....	48
b.	Forage de reconnaissance et suivi lithologique.....	48
c.	Prélèvement, lavage et conditionnement des déblais.....	48
d.	Essai préliminaire à l'air-lift.....	50
e.	Diagraphies de forage et interprétation hydrogéologique.....	50
e.1.	Objectifs et intérêt des diagraphies.....	51
e.2.	Acquisition des diagraphies en forage.....	51
e.3.	Présentation des enregistrements géophysiques.....	51
e.4.	Interprétation hydrogéologique des résultats.....	51
VI.3.	Complétion du forage : alésage, équipement et cimentation.....	54
VII.	Caractéristiques techniques de l'équipement du forage.....	56
a.	Tubage plein et rôle de soutènement	56
b.	Crépines : fonction, dimensionnement et implantation.....	57
c.	Massif filtrant et protection de l'ouvrage.....	58
VIII.	Qualité physico-chimique des eaux du forage El Kalaa.....	60
VIII.1.	Introduction.....	60
VIII.2.	La balance ionique	60
VIII.3.	Interprétations et discussions.....	60
a.	Aptitude à la consommation humaine.....	60
•	Analyse des paramètres physico-chimiques.....	60
•	Représentation graphique selon Schoeller-Berkaloff.....	63
•	Le diagramme de Stabler.....	64
•	Représentation graphique selon PIPER.....	64
b.	Aptitude à l'irrigation.....	66
•	L'indice de Kelly's Ratio (KR).....	66
•	Pourcentage du sodium (Na ⁺) et classification des eaux par la méthode de Wilcox.....	66
•	Le diagramme de Wilcox.....	67
•	Le diagramme de Riverside.....	68
	Description des axes.....	68
	Analyse du point observé.....	68
	Conclusion générale.....	70
	Biobibliographie.....	73
	Annexes.....	76
	ملخص.....	79

INTRODUCTION GENERALE

Fournir de l'eau potable aux habitants des zones rurales et montagneuses en Algérie représente un défi stratégique crucial, surtout avec le changement climatique qui s'intensifie, la population qui augmente et la pression qui ne cesse de croître sur les eaux de surface et souterraines. La commune de Béni Bahdel, nichée dans les Monts de Tlemcen, incarne parfaitement ce problème : elle s'appuie sur le barrage local, des sources karstiques et des puits souterrains pour répondre aux besoins des résidents et de l'agriculture.

C'est dans ce cadre qu'un creusement d'un forage profond a été proposé à El Kalaa, un ancien village de Béni Bahdel, pour booster les réserves d'eau, garantir un approvisionnement stable et soutenir le développement de la région. Ce mémoire s'inscrit dans cette logique : il justifie et documente ce projet à travers une étude complète qui intègre la géo-structurale, l'hydrogéologie, les techniques de forage et les méthodes de diagraphie.

L'objectif est double, d'abord décrire le milieu naturel autour de Béni Bahdel : géographie, démographie, géologie, structures et hydrogéologie pour identifier les opportunités en eau et les obstacles associés. Ensuite, examiner en profondeur la conception, l'exécution et l'aménagement du forage d'El Kalaa, en insistant sur la méthode rotary, les diagraphies réalisées et les choix pour le tubage, les crépines et le filtre.

Pour conclure, nous proposons une vision d'avenir, en croisant les regards de l'hydrogéologue, de l'ingénieur foreur et du gestionnaire d'eau potable (AEP), avec des conseils pratiques pour exploiter durablement ce forage et mieux utiliser l'eau dans la commune.

***PARTIE 01 :
GENERALITES***

I. Présentation de la région de Beni Bahdel :

I.1. Situation géographique et administrative :

La commune de Béni Bahdel se situe dans la wilaya de Tlemcen, au sein de la daïra de Béni Snous, au cœur des Monts de Tlemcen, à environ 26 km à vol d'oiseau au Sud-Ouest de la ville de Tlemcen. Son territoire correspond à un relief fortement accidenté, dominé par des versants escarpés, des vallées encaissées et des plateaux structuraux, sur la rive gauche du bassin de la Tafna et à proximité immédiate du barrage de Béni Bahdel.

Tableau 1 : Coordonnées de la zone d'étude :

<i>Zone d'étude</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
BENI BAHDEL	660 m à 700 m	34°43' N	1°31' O



Figure 1: Situation géographique de la commune de Beni Bahdel (Extrait de la carte topographique de Tlemcen INCT).

La zone d'étude relative au projet de forage d'El Kalaa se situe autour de 34°43' de latitude Nord et 1°31' de longitude Ouest, soit dans un ensemble de reliefs carbonatés principalement formés de dolomies et de calcaires jurassiques. El Kalaa correspond à l'ancien village de Béni Bahdel, implanté en aval de plusieurs sources naturelles, parmi lesquelles la source « Ain Moussa », qui intervient de manière essentielle dans l'alimentation en eau des parcelles cultivées et des habitations de la commune.

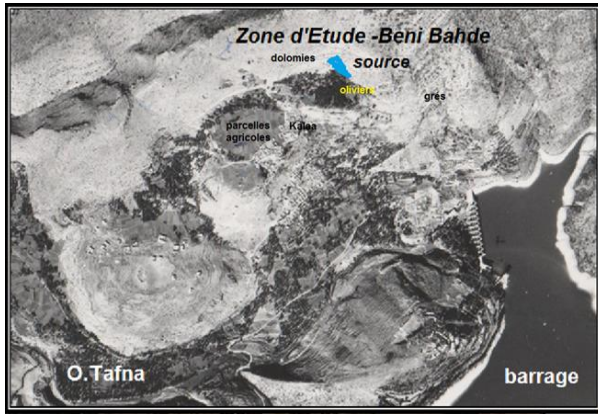


Figure 2: Ancien village de Beni Bahdel

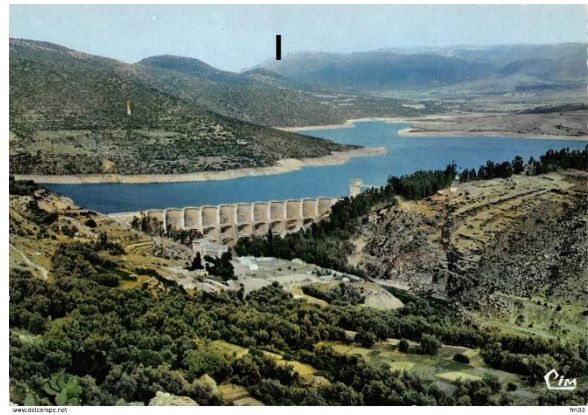


Figure 3 : récente village de Beni Bahdel



Figure 4: La source « Ain Moussa ».

I.2. Aspect démographique et économique :

La commune de Béni Bahdel se distingue par une population de 3021 habitants (recensement du 31/12/2022), toutefois en constante évolution, majoritairement répartie dans de petits villages et douars éparpillés le long des reliefs et des vallées. L'économie locale repose surtout sur l'agriculture, dominée par la culture de l'olivier, complétée par des activités de services et d'élevage, ce qui fait de l'accès à l'eau un facteur déterminant pour la pérennité des systèmes de production traditionnels.

Bien que les documents techniques ne livrent pas systématiquement des séries démographiques détaillées, le rapport hydrogéologique du CTH insiste sur l'impératif de sécuriser les ressources en eau, afin de répondre à l'accroissement des besoins en irrigation et en alimentation en eau potable (AEP), en particulier dans la localité d'El Kalaa. Dans ce contexte, la croissance démographique, la demande croissante de qualité de service et la forte variabilité climatique imposent une gestion anticipative de la ressource, fondée notamment sur la mise en place de nouveaux captages souterrains.

I.3. Besoins en eau potable de la commune et des environs :

Les besoins en eau potable de la commune de Béni Bahdel peuvent être estimés à partir de dotations usuelles appliquées aux zones rurales algériennes, souvent fixées entre 80 et 120 litres par habitant et par jour, selon l'importance du village et le niveau de service visé. En appliquant ces dotations aux populations de Béni Bahdel et de ses hameaux voisins, on débouche sur une demande totale non négligeable, à laquelle il faut ajouter les besoins en eau pour irriguer les oliveraies et les cultures vivrières, situées en aval des sources et du barrage.

Les études hydrogéologiques antérieures montrent que la ressource actuelle, principalement constituée de la source d'Ain Moussa, d'autres résurgences karstiques et de quelques puits, ne permet plus d'assurer un approvisionnement stable, surtout durant les périodes de sécheresse. Les débits disponibles s'avèrent insuffisants, très variables sur l'année et fortement tributaires des conditions climatiques, ce qui justifie la mise en œuvre d'une solution complémentaire par forage profond captant l'aquifère des dolomies de Tlemcen, caractérisé par une plus grande profondeur et des capacités productives potentiellement supérieures.

II. Etude climatologique :

II.1.Introduction :

L'étude du climat, que l'on désigne sous le terme de climatologie, repose sur l'étude de la répartition des variables, principalement la température et les précipitations, dans une région spécifique sur une durée déterminée.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier le type du climat qui prévaut dans la zone d'étude. Dans ce but, nous avons fait appel aux données climatologiques, couvrant la période de 1981 à 2025.

II.2.Evaluation des variables climatiques :

II.2.1. Précipitations :

Les précipitations correspondent à toutes les formes d'eau liquide ou solide qui descendent de l'atmosphère vers la surface terrestre, suite à la condensation de la vapeur d'eau.

a) Précipitations moyennes annuelles

Tableau 1: Précipitations moyennes annuelles (1981 – 2025) : (sur site : Nasa power data)

Années	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
P(mm)	387,1	568,1	181,0	353,5	322,8	601,6	328	331,2
Années	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
P(mm)	421,1	486,9	555,5	446,9	475	351,8	394,6	510,2
Années	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
P(mm)	335,3	280,8	450,4	289,8	399,3	418,5	614,2	569,6
Années	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
P(mm)	388,5	419,6	538,7	682,2	472,4	547,9	529	545,8
Années	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
P(mm)	522,9	443,2	365	395,6	311,4	561,1	352,8	253,8
Années	2021	2022	2023	2024	2025			
P(mm)	253,6	302,4	168,8	179,9	290,9			

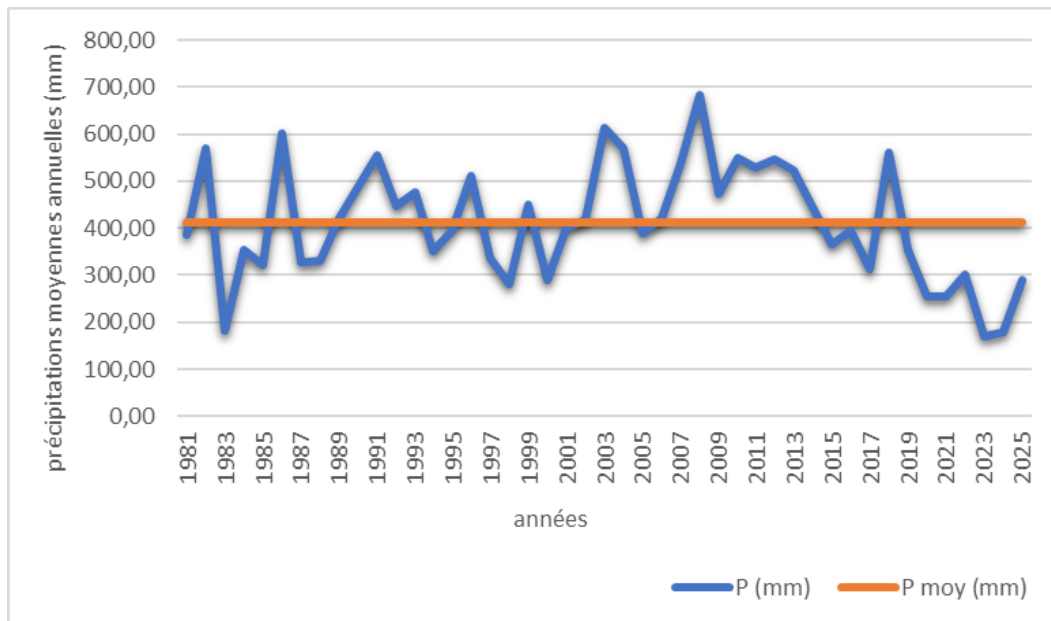


Figure 5: Variations des précipitations moyennes annuelles (1981-2025).

La pluviométrie moyenne annuelle (Fig.5) présente des fluctuations alternantes entre phases sèches et phases humides, pour une moyenne de 413,3mm

La pluviométrie atteint son maximum en 2008 avec 682,2 mm, tandis que le minimum est observé en 2023 à 168,8mm.

b) Précipitations moyennes mensuelles :

Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles (1981-2025).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aut	Sep	Oct	Nov	Déc
Précipitations (mm)	49,5	40,3	48,9	43,2	37,6	12,9	5,5	13,3	30,7	39,7	52,2	39,6

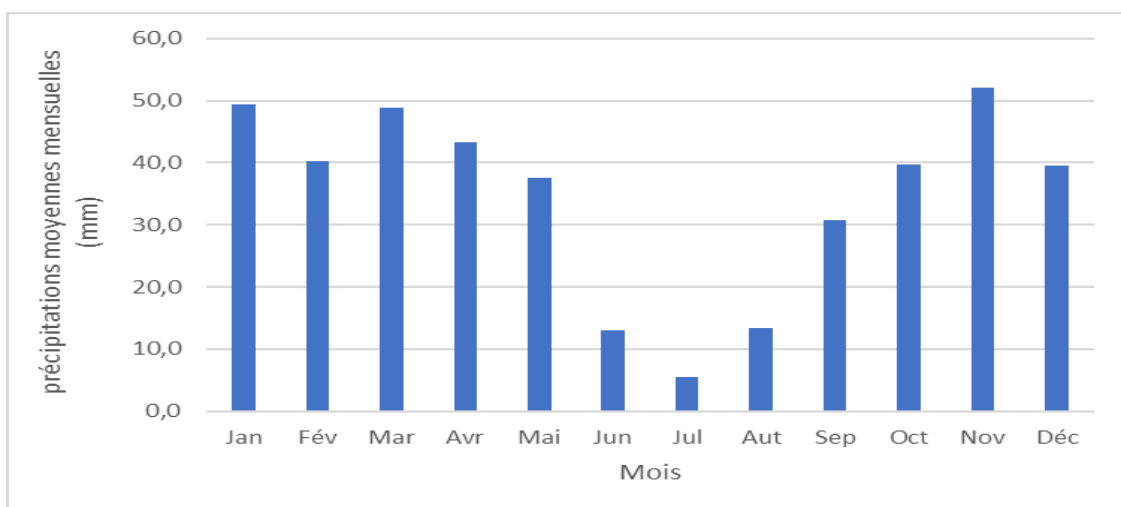


Figure 6: Variations des précipitations moyennes mensuelles (1981-2025).

La Fig.6 présente les variations des précipitations moyennes mensuelles, nous remarquons que novembre est le mois le plus pluvieux (52 ,2mm) et juillet est le mois le plus sec (5,5 mm).

c) *Précipitations saisonnières :*

Représentées par les quatre saisons de l'année :

- ❖ **Printemps** : Mars, Avril, Mai.
- ❖ **Été** : Juin, Juillet, Août.
- ❖ **Automne** : Septembre, Octobre, Novembre.
- ❖ **Hiver** : Décembre, Janvier, Février.

Tableau 3: Calcul des précipitations saisonnières.

SAISONS	P (mm)
<i>Printemps</i>	129,7
<i>Été</i>	31,7
<i>Automne</i>	122,6
<i>Hiver</i>	129,4

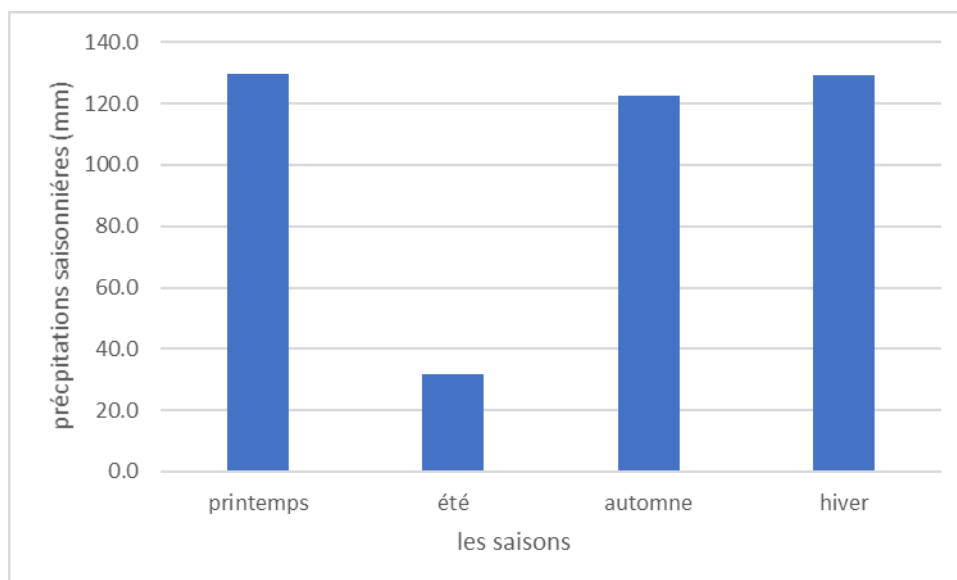


Figure 7: Précipitations saisonnières.

L'analyse des précipitations saisonnières montre que le printemps suivi par l'hiver sont les saisons les plus pluvieuses (129.7 mm et 129.4 mm respectivement), et l'été est la saison la plus aride (31.7mm).

1.1. Températures :

La température, élément clé du climat, interagit avec les paramètres météorologiques et biogéographiques tout en permettant, avec les précipitations, d'établir les indices climatiques principaux.

a) *Les températures moyennes mensuelles :*

Tableau 4: Valeurs des températures moyennes, maximales et minimales (1981-2025) :

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aut	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
T moy (°C)	10,5	11,2	13,3	15,5	18,8	23,1	26,1	26,5	22,8	19,5	14,2	11,2	17,7
T max (°C)	13	13,7	16	18,5	22,8	25,2	28,4	29,3	24,9	21,8	17,5	13,4	20,4
T min (°C)	8,3	7,9	11,7	13,1	15,6	20,6	22	22,7	20,7	15,6	11,2	8,4	14,8

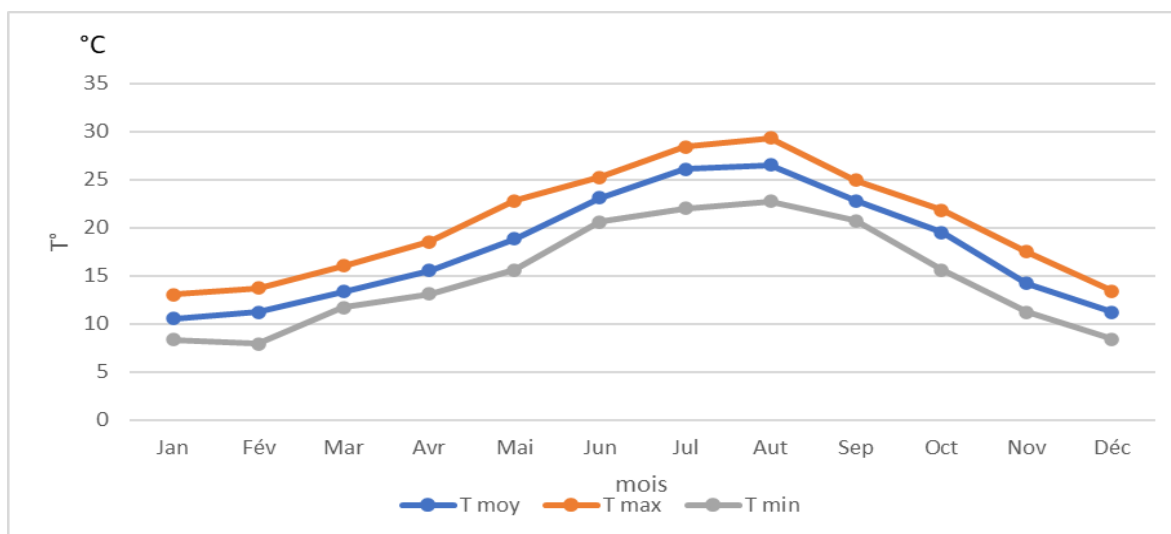


Figure 8: Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales (1981-2025).

Le tableau ci-dessus indique que la température moyenne mensuelle culmine en Août (26,5 °C), avec une température maximale moyenne de 29,3 °C. Le point le plus bas a été noté en janvier (10,5°C), correspondant à un minimum de 8,3°C.

II.3.L'étude du climat :

Afin de déterminer le type de climat dominant dans une région donnée, diverses méthodes sont utilisées :

- ❖ La méthode graphique qui différencie les phases sèches des phases humides.
- ❖ La méthode des indices climatiques mensuels et annuels, issus des informations climatiques.

a) Méthode graphique (méthode de visualisation) :

Selon la méthode de Gaussen et Bagnouls, un mois est considéré comme sec, lorsque la courbe des températures dépasse celle des précipitations. À l'inverse, un mois est qualifié comme humide lorsque la courbe des précipitations dépasse celle des températures. Cette relation permet d'établir des diagrammes pluviothermiques dans lesquels la température est représentée sur une échelle double de celle des précipitations ($P = 2T$).

Tableau 5: Précipitations et températures moyennes mensuelles (1981-2025).

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aut	Sep	Oct	Nov	Déc
Précipitations(mm)	49,5	40,3	48,9	43,2	37,6	12,9	5,5	13,3	30,7	39,7	52,2	39,6
Température(°C)	10,5	11,2	13,3	15,5	18,8	23,1	26,1	26,5	22,8	19,5	14,2	11,2

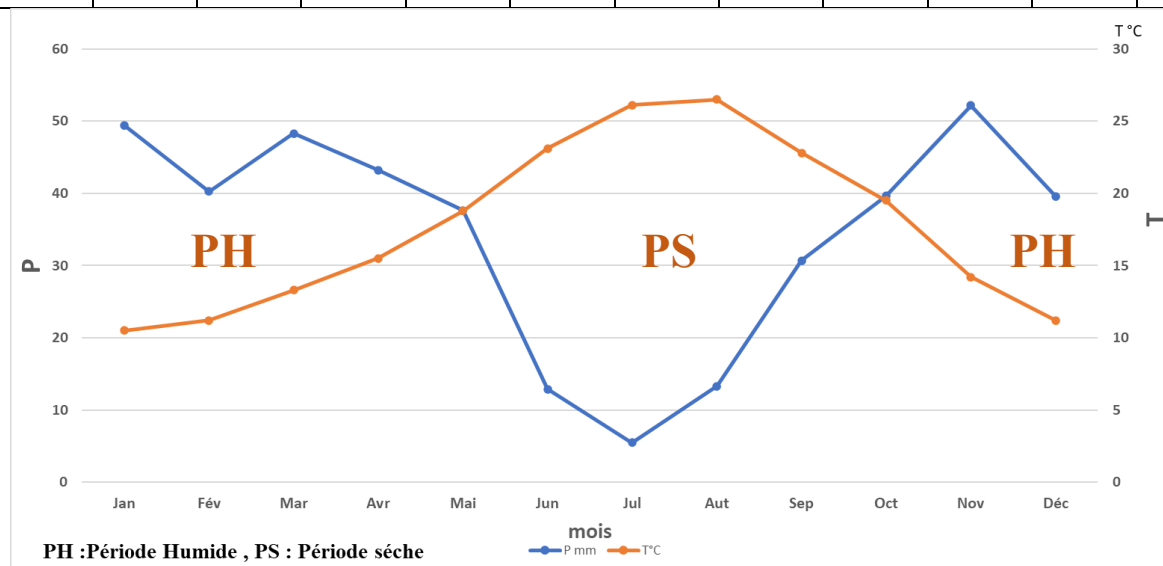


Figure 9: Diagramme pluviothermique de Bagnouls et Gaussen.

Le diagramme pluviothermique indique que la région se distingue par deux phases climatiques :

- Une période excédentaire (Humide) : s'étale du mois de janvier jusqu'au mois de mai et du début octobre au mois de décembre.
- Une période déficitaire (sèche) : s'étend du mois de mai au mois d'octobre.

b) *Les indices climatiques :*

b-1 Indice d'Aridité de DE Martonne :

L'indice d'aridité de DE Martonne est un indicateur quantitatif simple pour évaluer le degré d'aridité ou d'humidité d'une région à partir de données de précipitations et de températures.

- **Indice d'aridité annuel :**

La version annuelle s'exprime par : $I = \frac{P}{T+10}$ Où :

P : précipitations moyennes annuelles(mm)

T : température moyenne annuelle (°C),

I : indice d'aridité annuel.

L'indice d'aridité annuel est : $I = \frac{413,3}{17,7+10} = 14,92$

DE Martonne définit les types climatiques suivants, selon les indices :

Tableau 6: Classification de DE Martonne.

$I > 60$	Zone très humide (Hyper-humide).
$30 < I \leq 60$	Zone humide.
$20 < I \leq 30$	Zone sub-humide.
$10 < I \leq 20$	Zone semi-aride (méditerranéenne).
$5 < I \leq 10$	Zone semi-désertique.
$I \leq 5$	Zone aride (désertique)

après avoir calculé cet indice on a trouvé que $I=14,92$. En se référant au tableau 6, on constate que notre valeur comprise entre 10 et 20, donc elle correspond à une zone semi-aride.

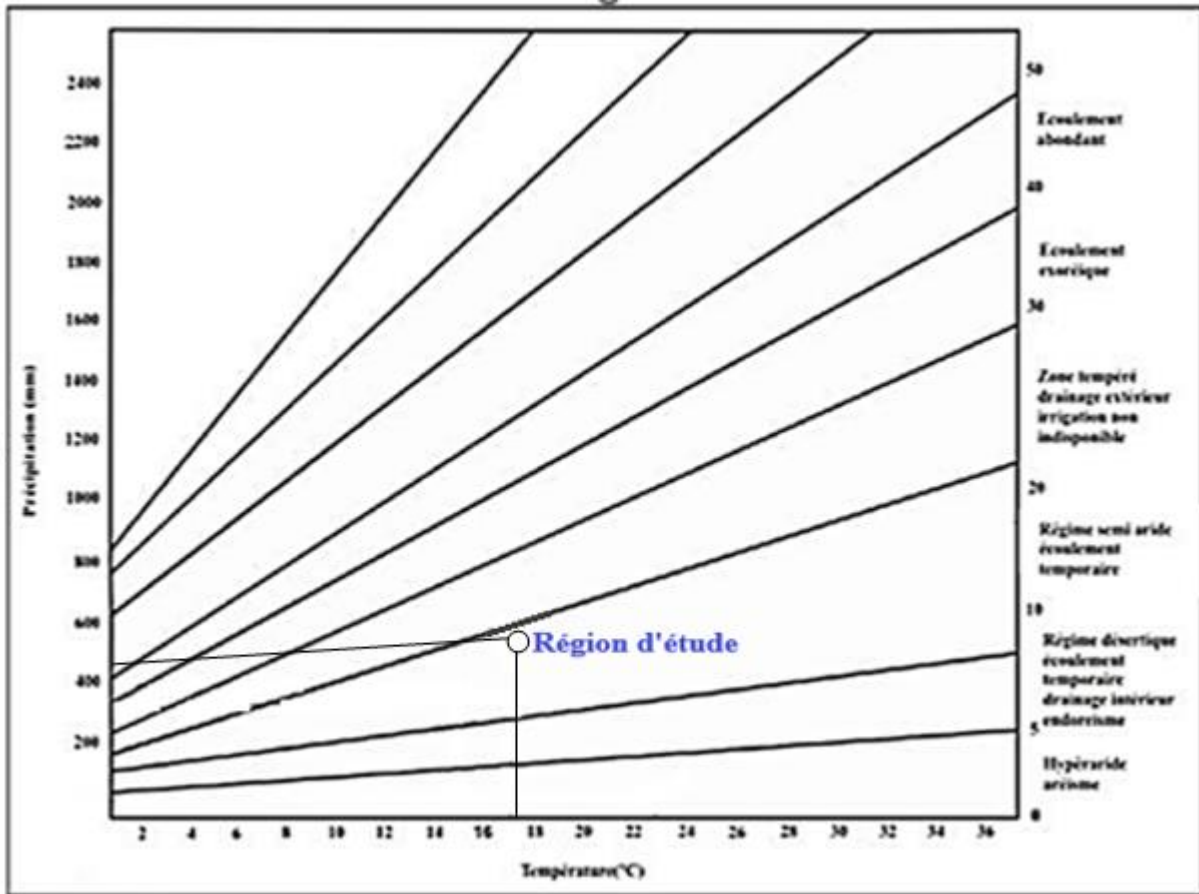


Figure 10: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne

- Indice d'aridité mensuel :

Pour l'indice mensuel : $I = \frac{12P}{T+10}$, ou :

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : Températures moyennes mensuelles (°C)

I : indice d'aridité mensuelle.

Tableau 7: l'indice d'aridité mensuel de DE Martonne :

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC
I	29,0	22,8	25,2	20,3	15,7	4,7	1,8	4,4	11,2	16,1	25,9	22,4
Type de régime	S-H	S-H	S-H	S-H	S	D	D	D	S	S	S-H	S-H

H : Humide, S-H : Sub-humide, S : Semi-aride, D : Désertique.

II.4.Climagramme d'EMBERGER :

Le climagramme d'Emberger est une méthode bioclimatique qui permet de classer les climats méditerranéens en fonction des précipitations annuelles et des températures extrêmes (moyennes des températures maximales du mois le plus chaud et minimales du mois le plus froid).

Il est exprimé par la formule suivante : $Q_2 = \frac{1000 \times P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)}$ avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

M : moyenne des maxima de la température en (°K) du mois le plus chaud, (AUT : 29,3°C)

m : moyenne des minima de la température en (°K) du mois le plus froid, (FEV : 7,9°C)

Q₂: quotient pluvio-thermique d'Emberger.

Avec : **K** = T (°C) + 273.

Tableau 8: Indice d'Emberger

<i>P (mm)</i>	<i>M (°K)</i>	<i>m (°K)</i>	<i>Q₂</i>
413,3	302,3	280,9	66,23

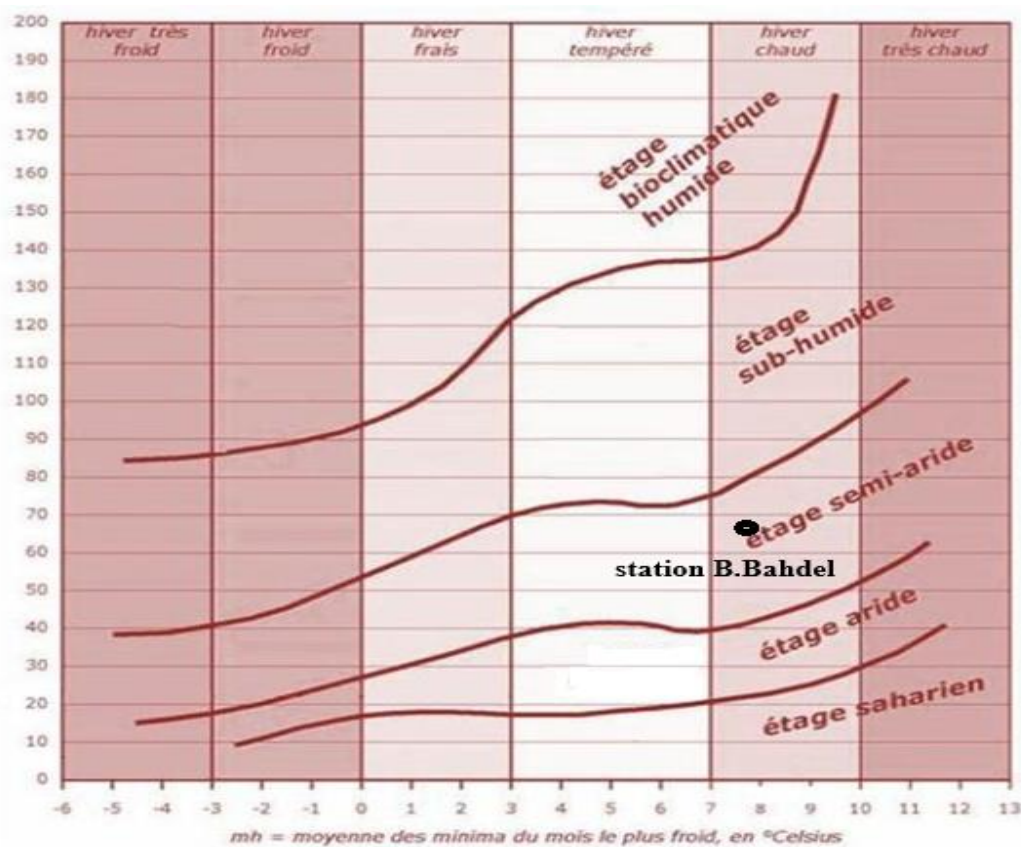


Figure 11: Climagramme d'EMBERGER.

La projection des paramètres sur le climagramme d'Emberger montre que la région d'étude appartient à l'étage climatique *semi-aride*.

3. Bilan Hydrologique :

3.1. Evapotranspiration et déficit d'écoulement :

L'évapotranspiration : est le transfert d'eau vers l'atmosphère par évaporation du sol et transpiration végétale. On distingue :

Évapotranspiration potentielle (ETP) : est la quantité maximale d'eau pouvant s'évaporer d'un sol et transpirer par la végétation dans des conditions climatiques données, avec un approvisionnement en eau illimité.

Évapotranspiration réelle (ETR) : est la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée, limitée par la disponibilité réelle en eau dans le sol et les précipitations.

Le déficit d'écoulement : est la partie des précipitations non transformée en écoulement de surface

(D = P - Q), équivalant à l'évapotranspiration réelle plus infiltration.

❖ **L'évaluation de l'ETR peut s'effectuer par diverses méthodes :**

- La méthode de TURC.
- La méthode de WUNDT.
- La méthode de VERDEIL.

1. La méthode de TURC :

Elle autorise le calcul de l'ETR en définissant les valeurs moyennes annuelles relatives à la température et aux prélèvements, s'exprime typiquement comme suit :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

Avec : $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

P : pluviométrie moyenne annuelle, en (mm).

T : température moyenne annuelle, en (C°).

ETR : évapotranspiration réelle annuelle, en (mm/an).

Tableau 9: ETR calculée.

P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm / an)
413,3	17,7	1019,76	375,7

2. Méthode de Wundt :

L'abaque de Wundt, offre la possibilité d'établir l'évapotranspiration effective en lien avec la température moyenne annuelle (°C) et les prélèvements annuels moyens (mm).

Tableau 10: Déficit d'écoulement selon Wundt.

P (mm)	T (°C)	D (mm/an)	Écoulement et infiltration (mm) ($P-D$)
413,3	17,7	400	13,3

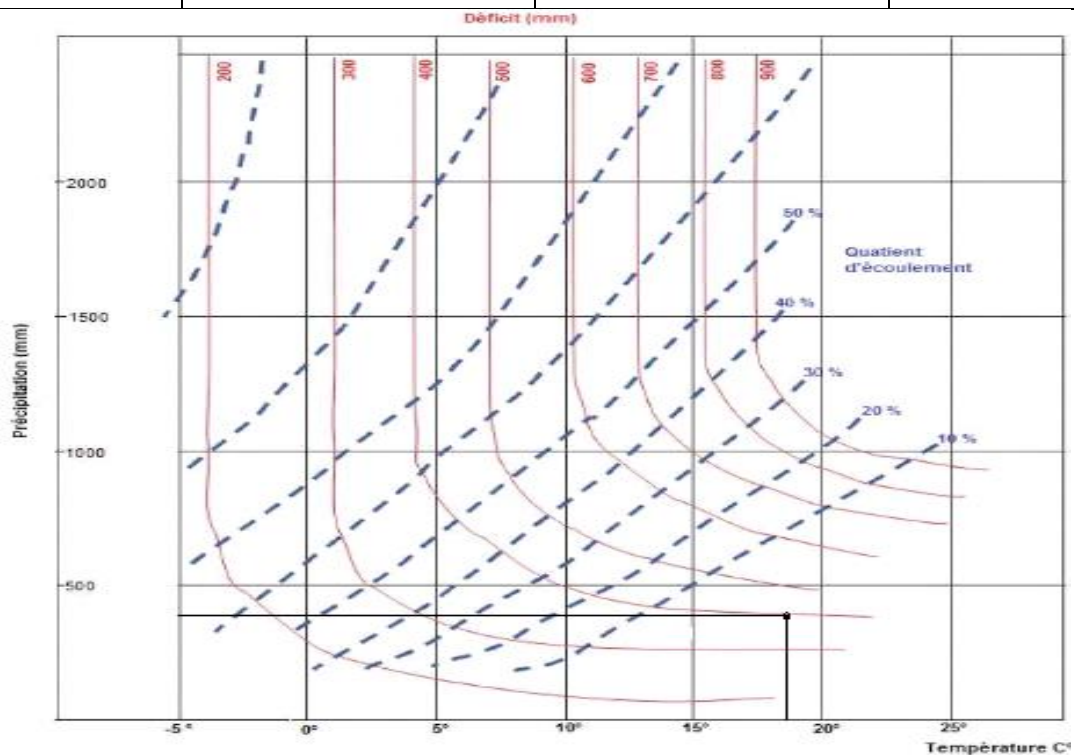


Figure 12: Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).

3. Méthode de Verdeil . P (1988) :

Verdeil.P a conçu un abaque bi-logarithmique pour les zones semi-arides, s'appuie exclusivement sur les prélèvements annuels, afin d'évaluer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement.

Tableau 11: Déficit d'écoulement selon Verdeil.

<i>Précipitations (mm)</i>	<i>Déficit (mm / an)</i>	<i>Ecoulement et infiltration (mm)</i>
413,3	400	13,3

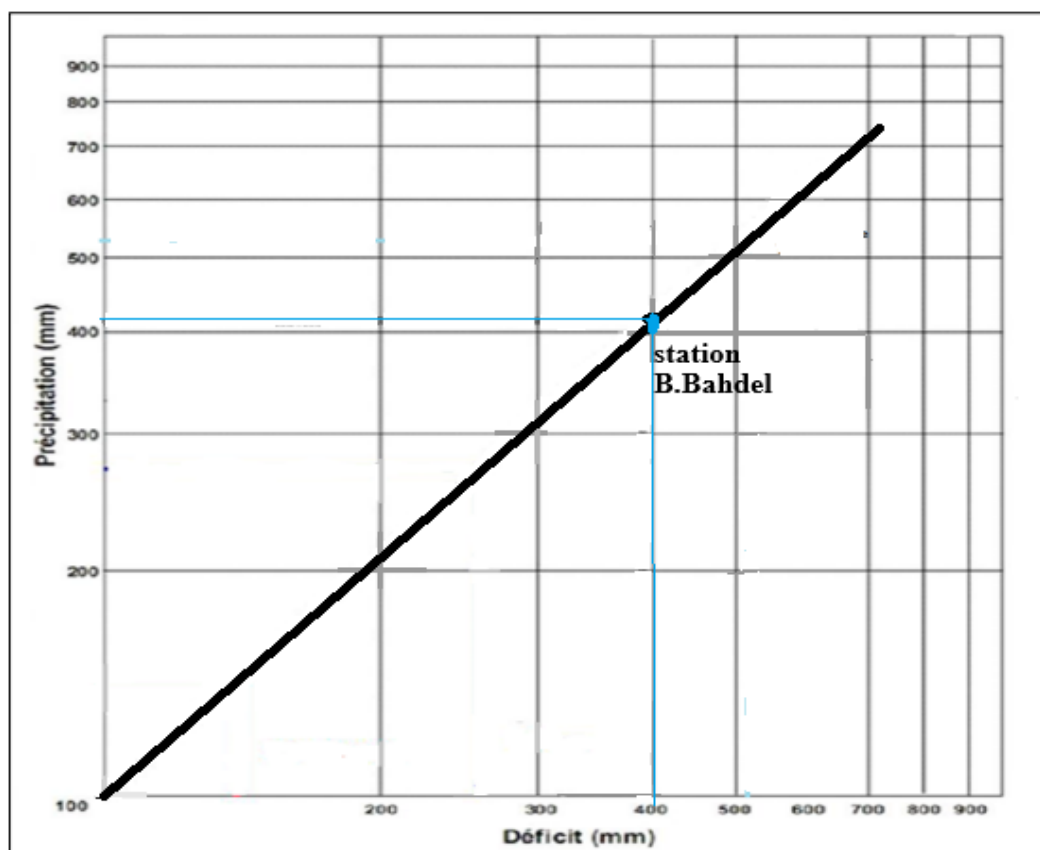


Figure 13: Abaque de Verdeil.

❖ Evapotranspiration potentielle (ETP) :

Méthode de Thornthwaite :

Selon Thornthwaite (1948), l'évapotranspiration potentielle est calculée en utilisant la formule :

➤ **ETP non corrigée** : $= 16 \left(\frac{T}{I} \times 10\right)^a$

Avec : $a = 0.016 I + 0,5$; ($a = 1,85$)

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

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

i : Indice thermique mensuel, avec : $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$

I : la somme des indices mensuels des 12 mois de l'année, avec : $I = \sum_{1}^{12} i$

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

K : Coefficient de correction (34°N).

Tableau 12: Valeurs de l'ETP (1981-2025)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC	Annuel
T(°C)	10,5	11,2	13,3	15,5	18,8	23,1	26,1	26,5	22,8	19,5	14,2	11,2	17,7
I	3,0	3,39	4,39	5,54	7,42	10,14	12,2	12,48	9,94	7,85	4,85	3,39	84,62
ETP non corrigée													813 ,57
K	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86	/
ETP corrigée	20,98	22,83	38,03	53,43	84,07	123,06	156,83	153,37	103,13	72,71	36,26	23,10	887,8

❖ **Evapotranspiration réelle (ETR) :**

Il est faisable de considérer la relation entre l'évapotranspiration réelle et les réserves d'eau disponibles.

Deux scénarios :

- Dans le cas où les précipitations dépassent l'ETP, on a **ETR = ETP**.

- Si les précipitations sont moins importantes que l'ETP, **l'ETR sera équivalent à l'ETP** tant que les réserves d'eau dans le sol peuvent maintenir cet équilibre. Au-delà de ce point, il y aura un déficit.

➤ **Calcul de la réserve en eau du sol :**

❖ **Calcul de la réserve facilement utilisable (R.E.U) :**

On calcule le R.E.U en utilisant la formule ci-dessous :

$$RU = \frac{(C - F)}{100} H \times D + 30$$

- Ru : Réserve utile en eau du sol.
- C : Capacité au champ.
- F : Capacité au point de flétrissement.
- H : Profondeur du sol (H=500mm).
- D : Densité apparent du sol (D=1)
- 30 mm : Enracinement capillaire

Selon les études précédentes, la valeur de c-f est déterminée par le type de sol. Pour notre étude, nous avons établi que c-f = 20%, ce qui donne : RU = 130 mm.

Tableau 13: Bilan hydrologique de la zone d'étude (1981-2025).

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUEL
P (mm)	49.5	40.3	48.9	43.2	37.6	12.9	5.5	13.3	30.7	39.7	52.2	39.6	413.4
ETPc (mm)	20.98	22.83	38.03	53.43	84.07	123.06	156.83	153.37	103.13	72.71	36.26	23.1	887.8
Ru (130mm)	28.52	45.99	56.86	46.63	0.16	0	0	0	0	0	15.94	32.44	226.54
ETR (mm)	20.98	22.83	38.03	53.43	84.07	13.06	5.5	13.3	30.7	39.7	36.26	23.1	380.96
D.A (mm)	0	0	0	0	0	110	151.33	140.07	72.43	33.01	0	0	506.84
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecoulement (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Infiltration (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

III. Conclusion :

La région de Beni Bahdel, située dans la wilaya de Tlemcen, est soumise à un climat semi-aride à hiver tempéré, caractérisée par une irrégularité saisonnière des paramètres climatiques, notamment les précipitations et la température. La saison du printemps (129,7mm) et de l'hiver (129,4mm) est la plus humide de l'année, tandis que la saison d'été (31,7mm) se distingue par une sécheresse marquée.

L'analyse des données climatiques montre que la hauteur moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 413,3 mm. En parallèle, les températures moyennes mensuelles

varient entre 10,5 °C durant la saison froide et 26,5 °C pendant la saison chaude. Les températures maximales sont généralement enregistrées au cours des mois de juillet et d'août, alors que le mois de février (7.9°C) est le plus froid de l'année.

L'étude des courbes pluvio-thermiques a permis de mettre en évidence une alternance entre une période humide ou excédentaire : du mois de janvier au mois de mai et du début octobre au mois de décembre, et une période sèche ou déficitaire couvrant le reste des mois de l'année. Cette répartition saisonnière traduit l'influence du régime climatique méditerranéen à tendance semi-aride qui caractérise la région.

Par ailleurs, l'évaluation du bilan hydrologique a permis d'estimer les principaux paramètres intervenant dans le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude. Ainsi, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été évaluée à environ 887,8 mm/an qui est largement supérieure à l'évapotranspiration réelle, estimée à 380,96mm/an, traduisant un déficit agricole égale à 506.84mm/an, tandis que l'écoulement et l'infiltration sont nuls. Ces résultats mettent en évidence une disponibilité en eau relativement limitée, fortement conditionnée par la variabilité climatique et les pertes par évapotranspiration.

PARTIE :02
CHAPITRE 01 :
CONTEXTE GEO-STRUCTURAL
ET HYDROGEOLOGIQUE

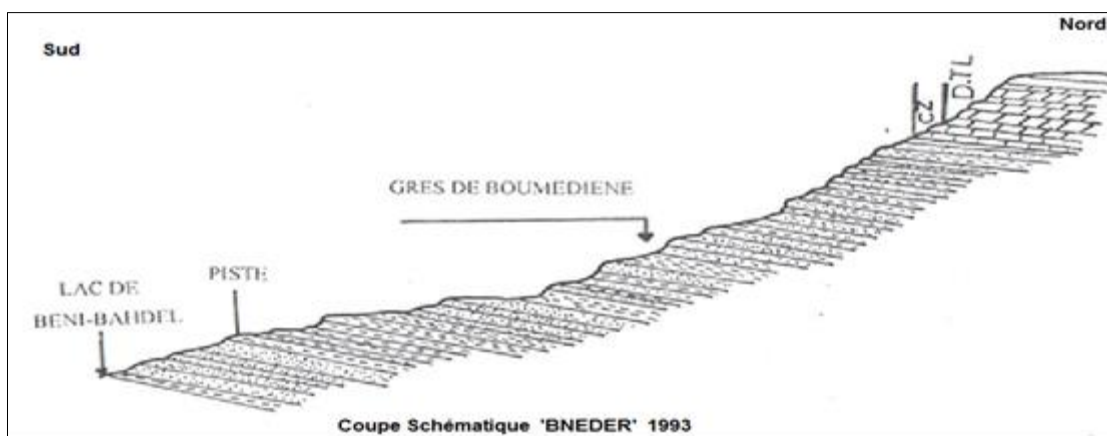
I. Cadre géo-structural de la région :

La région de Béni Bahdel est localisée sur la bordure méridionale des Monts de Tlemcen, au sein de l'Atlas oranaïs, dans une portion de l'Algérie occidentale, caractérisée par une diversité géologique. Elle se distingue par une architecture dominée par des formations sédimentaires d'âge jurassique, en particulier du Jurassique supérieur, qui constituent l'essentiel du socle visible en surface.

La série stratigraphique y est essentiellement composée de roches carbonatées, calcaires et dolomies, associées à des niveaux gréseux représentés notamment par les grès de Boumediène, datés de l'Oxfordien–Kimméridgien. Ces formations jurassiques reposent localement sous des dépôts plus récents d'âge cénozoïque et quaternaire, qui recouvrent partiellement le socle et marquent une évolution postérieure de la sédimentation dans le bassin.

Sur le plan structural, la région est traversée par un réseau de failles orientées principalement Est–Ouest et N120, en lien avec la dynamique tectonique alpine et la mise en évidence du horst de Ghar Rouban. Cette organisation faillée compartimente les formations jurassiques et contrôle fortement leur répartition spatiale, influençant la localisation des unités perméables et des zones de drainage.

Au final, le cadre géologique de la région s'inscrit dans un ensemble typique de l'avant pays tellien, où dominant des terrains jurassiques carbonatés, faillés et structurés, formant un système complexe qui conditionne fortement la répartition des aquifères et la circulation des eaux souterraines.



D.TL : Dolomies de Tlemcen.
CZ : Calcaires de Zarifet.

Figure 1 : Coupe géologique de la région de Beni Bahdel (BNEDER, 1993).

La coupe géologique établie par BNEDER "fig.01" en 1993 passant par la cuvette du barrage vers le sommet du Djebel d'el Kalâa, montre la succession géologique du bas vers le haut :

- Grès de Boumédiène "GB"
- Calcaire de Zatifet "CZ"
- Dolomies de Tlemcen "DT"

I.1. Description litho- stratigraphique : (Fig.02 et 03)

Les formations qui affleurent dans la région d'étude sont décrites de bas en haut :

1-PALEOZOIQUE :

1-1 Silurien : représenté par des grès, argiles et schistes.

2- MESOZOIQUE :

2-1 JURASSIQUE INFERIEUR : LIAS

2-1-1 Domérien : constitué par des calcaires oolithiques.

2-1-2 Toarcien : Formation calcaire à ammonites.

2-2 JURASSIQUE MOYEN : DOGGER

2-2-1 Bajocien supérieur : formé par des marnes à ammonites pyriteuses.

2-2-2 Bathonien : Il s'agit de calcaires et marnes.

2-3 JURASSIQUE SUPERIEUR : MALM

2-3-1 Oxfordien-Kimméridgien : représenté par des grès, des calcaires et argilites et des dolomies avec intercalations calcaires à la base.

a. Les Grès de Boumediène :

Attribués à l'Oxfordien supérieur – Kimméridgien inférieur, ils correspondent à une série à dominance détritique, formée principalement de grès à éléments fins, localement entrecoupés de niveaux argileux rouges ou verts.

Cette formation se présente généralement sous forme de puissants bancs gréseux séparés par des inter-lits argileux, avec un ciment le plus souvent calcaire. Son épaisseur varie globalement de 200 à 500 m selon les secteurs. (Benest.M, 1985).

b. Les Calcaires de Zarifet

D'âge Kimméridgien inférieur. Ils représentent une importante formation carbonatée du Jurassique supérieur, intercalée entre les formations gréseuses de Boumediène et les niveaux dolomitiques (dolomies de Tlemcen).

Cette unité est constituée principalement de calcaires à grandes géodes de calcites en bancs épais, parfois micritiques, détritiques ou légèrement marneux à la base. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 100 m, mais elle peut être localement réduite ou passer de manière progressive à des faciès plus dolomitiques (Benest.M, 1985).

c. Les Dolomies de Tlemcen

Attribué au Kimméridgien inférieur selon Doumergue (1910), et au Kimméridgien supérieur d'après Benest (1982). Au-dessus des Calcaires de Zarifet se développent les Dolomies de Tlemcen. Cette formation est constituée principalement de dolomies massives, compactes, le plus souvent claires, parfois vacuolaires ou finement stratifiées. Elle représente l'une des unités les plus caractéristiques des Monts de Tlemcen et donne des reliefs ruiniformes dans lesquelles la stratification est difficilement reconnaissable.

d. Les calcaires de Stah

Cette formation est indifférentiable des dolomies de Tlemcen que lorsqu'elle est épargnée de la dolomitisation. Elle correspond à des calcaires massifs à dominante micritiques pratiquement dépourvues de passées marneuses. Dans d'autres secteurs, cette formation admet des intercalations marneuses (Bensaoula.F, 2006).

e. Les Marno-calcaires de Raouarai

Les Marno-calcaires de Raouarai représentent des formations marneuses de couleur grise à blanchâtre en surface, intercalées de bancs de calcaires marneux durs. Ils sont d'âge Tithonique inférieur, et leur épaisseur varie de 90m à 150m, d'après Benest (1982).

f. Les Calcaires de Lato

Ils sont formés de calcaires compacts à sub-lithographiques, parfois massifs, pouvant localement passer à des faciès marneux ou dolomitiques. Leur épaisseur est d'environ 50 m en moyenne (Benest, 1982 in Bensaoula.F, 2006).

g. Les dolomies de Terny

C'est des dolomies parfois vacuolaires, avec des stratifications obliques et un aspect très massif. Elles sont d'âge Tithonique supérieur d'après Benest, 1982.

h. Les marno-calcaires de Hariga

Il s'agit d'une alternance de marnes et de marno-calcaires. Les calcaires sont bien lités, souvent graveleux à patine gris clair. La limite supérieure correspond à la semelle du premier banc gréseux des grès de Merchiche. Benest (1982) attribue cette formation au Tithonique inférieur.

i. Les grès de Merchiche

D'âge Tithonique supérieur-Berriasien inférieur. Il s'agit de formation gréseuse de faible épaisseur.

3- LE QUATERNAIRE : PLEISTOCENE

Les formations les plus récentes sont représentées par les dépôts quaternaires, essentiellement : les alluvions anciennes et récentes, les travertins calcaires, les formations de pente et les éboulis de piémont. Les alluvions se rencontrent principalement dans les lits d'oueds et les zones basses. Elles correspondent à des matériaux meubles de granulométrie variable, déposés par l'activité fluviale récente.

3-1 Le Rharbien (ou Soltanien supérieur) :

Est une subdivision géologique du Pléistocène supérieur, caractérisée par des alluvions modernes grises de la basse terrasse des oueds.

3-2 Les travertins calcaires :

Constituent de puissants dépôts disposés en terrasses, la puissance peut dépasser 60m. Ces dépôts sont liés à l'activité ancienne et actuelle de sources karstiques, notamment issues des formations du Kimméridgien.

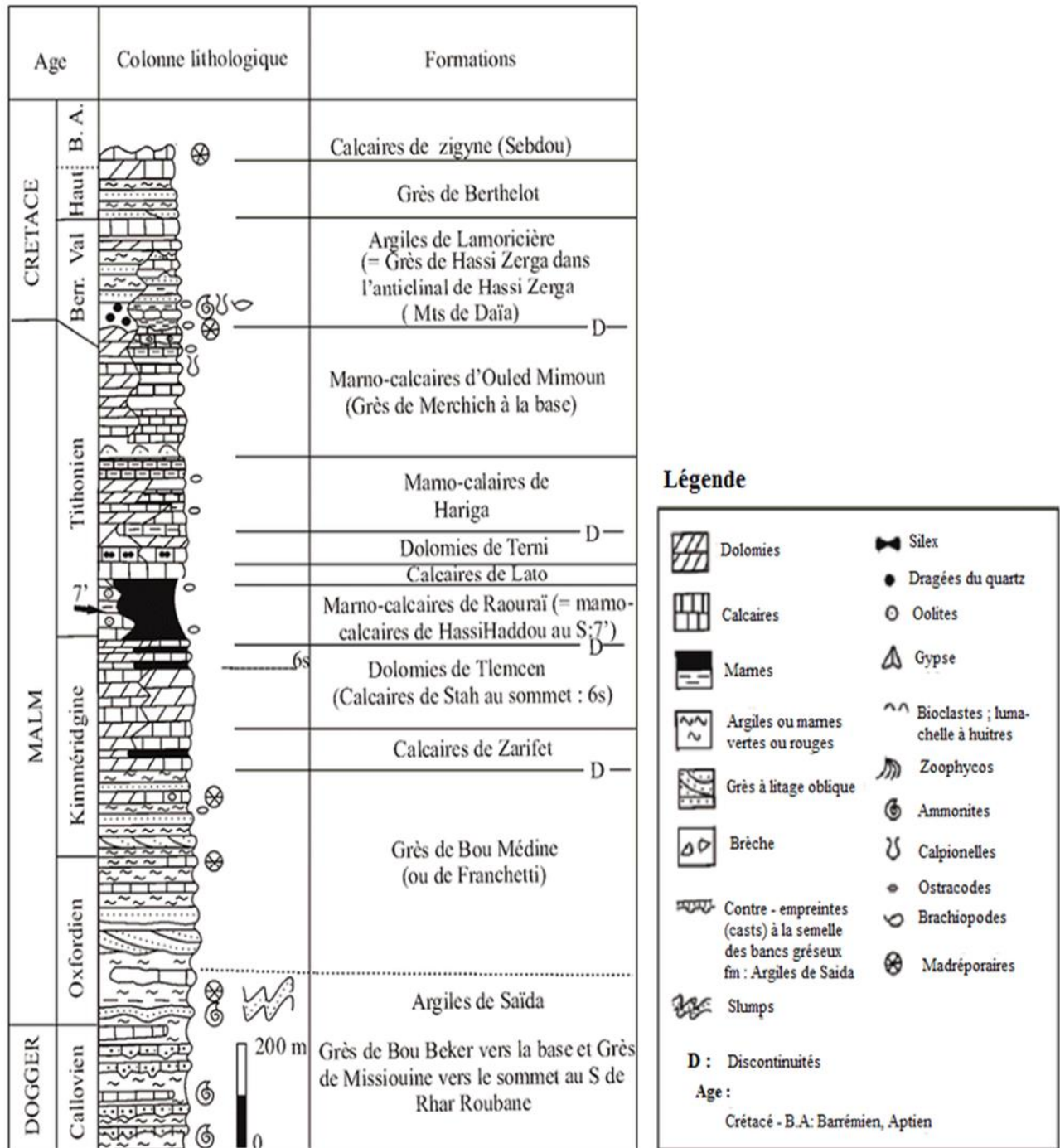


Figure 2 : Colonne litho -stratigraphique des Monts de Tlemcen (Benest .M; Bensalah .M, 1999).

I.2. Analyse structurale régionale :

Les Monts de Tlemcen se situent dans un domaine où la rigidité des roches favorise une tectonique cassante, sans exclure pour autant des déformations souples, visibles à travers la présence d'anticlinaux et de synclinaux.

➤ *Les phases tectoniques :*

Les Monts de Tlemcen ont été façonnés par l'orogénèse atlasique, suivie de mouvements de surrection différentielle, de basculements mio-pliocènes et de coulissage, se prolongeant jusqu'au Quaternaire. La tectonique y est à la fois :

-Distensive cassante, avec des failles longitudinales SW–NE à WSW–ENE et formation de zones effondrées.

-Compressive souple, générant des plis complexes.

Les phases tectoniques principales ont été identifiées selon Benest (1982-1985) :

1-Phase distensive éo-crétacée (fin Crétacé – Éocène) : Subsidence contrôlée par le rejeu des grands accidents SO–NE et subméridiens hérités de l'orogénèse hercynienne, accompagnée de mouvements syn-sédimentaires pré-atlasique.

2-Phase atlasique (fin Éocène – Oligocène) : Mouvements compressifs formant de grands plis E–O (ex. Djebel El Arbi, Sebdou) et mouvements distensifs contrôlés par des failles conjuguées N55°E et N140°E.

3-Phase à dominance distensive : Débutant avant ou lors de la mise en place des nappes, elle est à l'origine des grandes structures coulissantes et chevauchantes. Le rejeu des failles préexistantes a généralement accentué le découpage en Horst et Grabens.

4-Phase récente (Plio-Quaternaire) : se traduit par des mouvements syn-sédimentaires provoquant le jeu des décrochements dextres associés à des déformations plicatives.

5-Phase de déformations actuelles : traduite par l'évolution morphométrique et le jeu des failles actives.

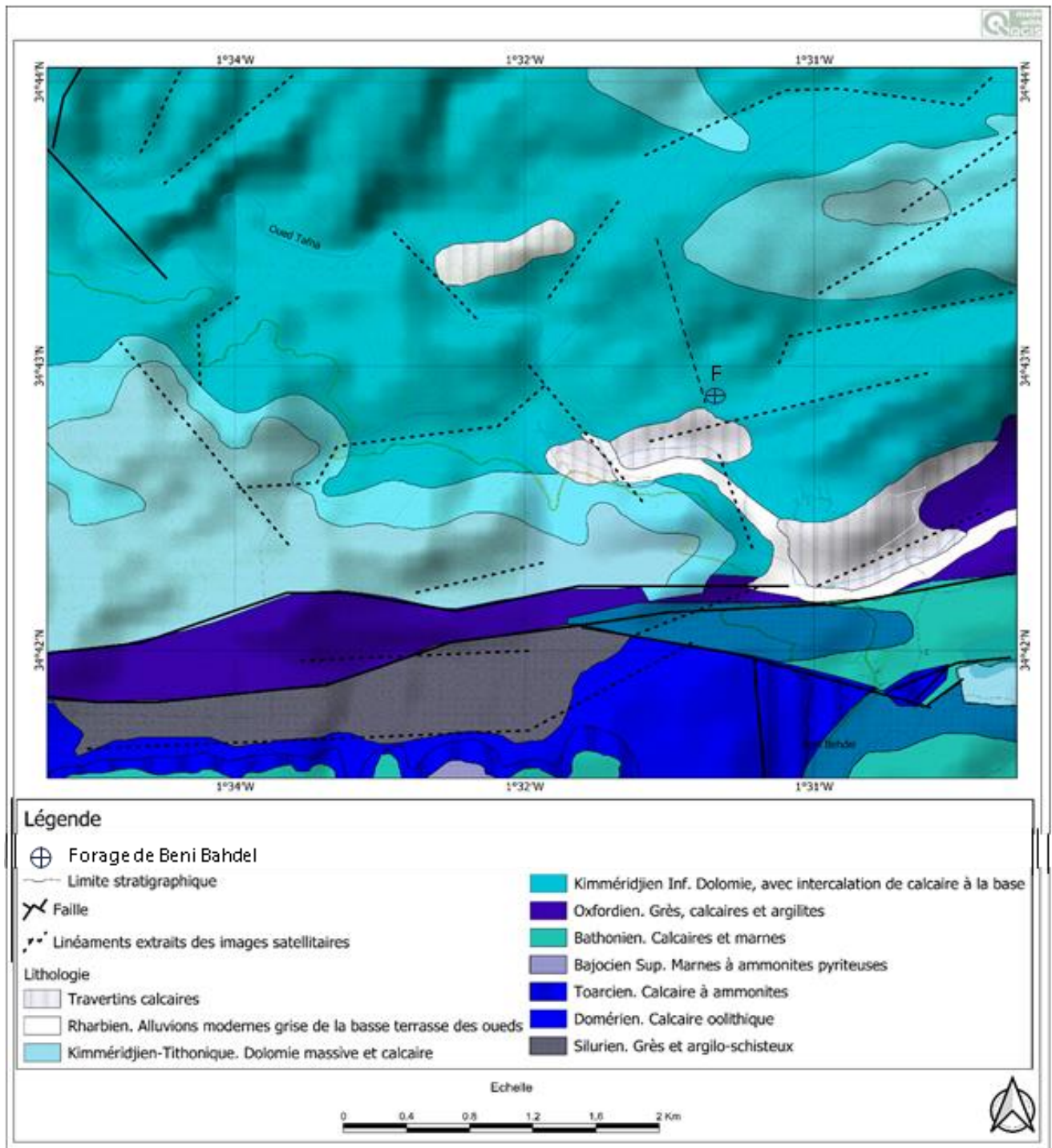


Figure 3 : Carte géo-structurale de la région d'étude, extraite des cartes géologiques de Tlemcen et de Maghnia au 1/50000, complétée par les photos aériennes et les cartes satellitaires.

I.3. Synthèse géo-structurale de la région d'étude :

La région de Béni Bahdel repose sur un substratum silurien grés-argilo-schisteux, globalement peu perméable, surmonté par une épaisse couverture méso-cénozoïque dominée par les formations jurassiques du Domérien–Toarcien au Tithonien, localement associées à des formations crétacées. Les unités jurassiques inférieures et moyennes se composent d'alternances de calcaires, marnes, grès et argilites, reflétant des milieux de plateforme carbonatée, soumis à des influences terrigènes variables, attestées par la présence de fossiles ammonitiques toarciens sur le site (Benest et al,1999). Le Jurassique supérieur (Oxfordien–Kimméridgien–Tithonien) est marqué par des grès épais à intercalations calcaire-marneuses, surmontés par des ensembles dolomitiques et calcaires massifs qui constituent l'ossature des reliefs et les principaux aquifères carbonatés, puis recouverts par des grès éocènes, des marnes et conglomérats miocènes, ainsi que des dépôts pliocènes transitionnels vers les formations plio-quaternaires alluviales et travertins récents.

Sur le plan structural (fig.03), la région s'inscrit dans un système de plis et de failles hérités de l'inversion tectonique téthysienne, avec des directions dominantes NE–SW à E–W et des accidents secondaires NW–SE, responsables d'un compartimentage intense des formations, en particulier dans les horizons carbonatés jurassiques. Cette fracturation engendre des blocs tectoniques qui peuvent soit connecter, soit isoler les aquifères, selon le rejet et le remplissage des failles, tandis que les anticlinaux et synclinaux contrôlent les pendages et la répartition des unités aquifères, expliquant la distribution des dolomies, grès et travertins autour du bassin de la Tafna et du barrage de Béni Bahdel. Les linéaments tectoniques cartographiés correspondent souvent à des zones de forte perméabilité, où les fractures ouvertes et brèches facilitent l'infiltration et l'acheminement des eaux souterraines vers les exutoires naturels, influençant directement la productivité et la circulation des nappes.

II. Cadre hydrogéologique :

Les ressources en eau karstiques des Monts de Tlemcen constituent la ressource en eau la plus mobilisée qui alimente, pour une grande part, la population de Tlemcen. Ces formations sont largement karstifiées et constituent les aquifères les plus importants de la wilaya

Le contexte hydrogéologique de la région de Béni-Bahdel est dominé par le bassin de la Haute Tafna, dans les Monts de Tlemcen, où les affluents des oueds Khemis-Sebdou traversent des terrains jurassiques carbonatés très fracturés avant d'atteindre le barrage de Béni-Bahdel. La zone est donc marquée par une forte structuration tectonique, des failles et des niveaux

calcaires perméables qui contrôlent directement les écoulements souterrains et les échanges avec les sources. (Bouanani, 2004 ; Yebdri, 2023 ; Salah et Bensafi, 2017).

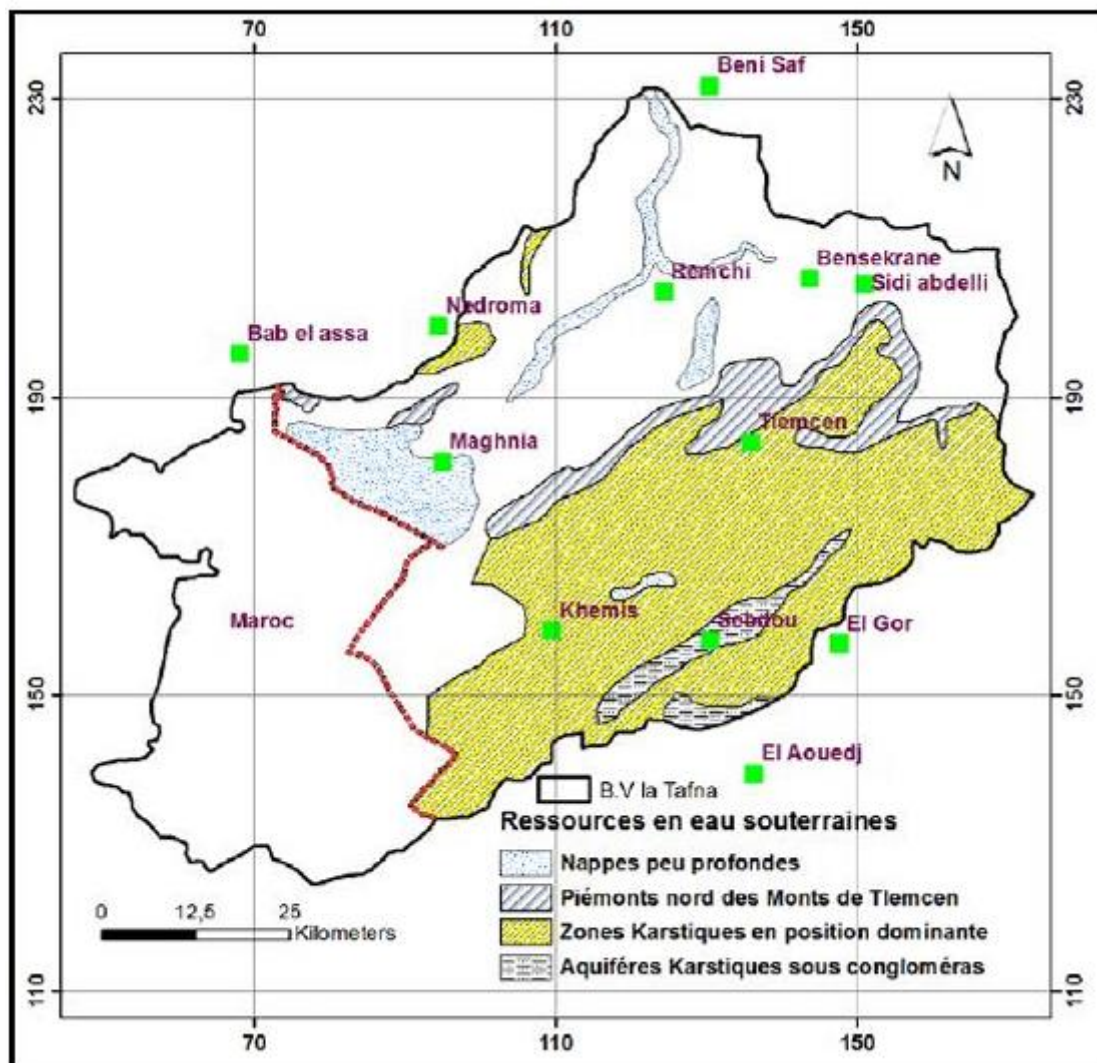


Figure 4 : Zones aquifères de Tlemcen. (D'après Collignon B., 1984 ; in Bemoussat A., 2012).

A. Formations à fort potentiel aquifère :

Les formations à fort potentiel aquifère de la région d'étude sont essentiellement représentées par les ensembles calcaréo-dolomitiques du Jurassique supérieur, en particulier les Dolomies de Tlemcen, les Dolomies de Terny et, localement, les Calcaires de Zarifet et de Lato. Ces formations se distinguent par une fracturation intense et une karstification développée, favorisant l'infiltration, le stockage et la circulation souterraine des eaux. Elles constituent ainsi

les principaux réservoirs aquifères des Monts de Tlemcen et sont à l'origine de nombreuses émergences karstiques observées dans la région. Bensaoula et al. (2005, 2007).

➤ **Dolomies de Tlemcen**

Les Dolomies de Tlemcen, décrites initialement par Doumergue (1910), affleure largement dans les secteurs nord-ouest et nord-est du bassin. Elles reposent généralement sur les Calcaires de Zarifet, définis plus tard par Benest (1972) dans le cadre de la stratigraphie du Jurassique supérieur des Monts de Tlemcen. D'un point de vue hydrogéologique, cette formation constitue un aquifère majeur, en raison de sa nature carbonatée, de sa perméabilité élevée liée aux fractures et à la dissolution, ainsi que de son rôle dans l'alimentation des sources karstiques.

➤ **Les Dolomies de Terny**

Présentent des caractéristiques lithologiques et hydrogéologiques comparables à celles des Dolomies de Tlemcen. Elles font partie des formations carbonatées jurassiques supérieures, reconnues comme particulièrement favorables à la circulation et à l'emménagement des eaux souterraines. En raison de leur fissuration et de leur karstification, elles participent activement à la constitution des réserves aquifères régionales et au drainage souterrain des eaux.

➤ **Les calcaires de Zarifet, de Stah et de Lato**

Ces formations présentent des intercalations marneuses et/ou gréseuses, par endroits, selon leur épaisseur et lorsqu'ils sont fracturés et karstifiés, ils peuvent constituer un réservoir.

B. Formations à potentiel aquifère moyen :

Selon Bensaoula.F et al. (2005) et Bouanani.A (2004) :

Les formations à potentiel aquifère moyen comprennent principalement les formations gréseuses, telles que le Grès de Merchiche, ainsi que les alluvions plio-quaternaires. Leur comportement hydrogéologique est variable, car elles dépendent de plusieurs facteurs, notamment la granulométrie, le degré de fissuration, la porosité, l'épaisseur des niveaux perméables et leur extension spatiale. Ces formations peuvent localement jouer un rôle non négligeable dans la recharge et le stockage temporaire des eaux souterraines.

➤ **Grès de Merchiche :**

Les Grès de Merchiche constituent une formation détritique dont le potentiel aquifère demeure moyen à localement favorable, selon son degré de compaction, sa fracturation et l'existence éventuelle de niveaux plus poreux. Bien que sa perméabilité soit généralement inférieure à celle des formations dolomitiques, certains bancs gréseux peuvent assurer une circulation locale des eaux et contribuer à l'alimentation de petites nappes ou de résurgences secondaires.

➤ **Alluvions plio-quaternaires :**

Les alluvions plio-quaternaires regroupent les dépôts récents accumulés le long des cours d'eau, les terrasses alluviales, les croûtes calcaires anciennes du Quaternaire, ainsi que les conglomérats de remplissage des zones déprimées, notamment au niveau du fossé de Béni-Bahdel et de certaines dépressions tectoniques régionales. Bien que leur épaisseur soit souvent modérée, leur extension spatiale importante favorise localement le développement d'une nappe phréatique plus ou moins continue, généralement peu profonde et facilement exploitable.

C. Formations à faible potentiel aquifère :

Les formations à faible potentiel aquifère correspondent aux unités faiblement perméables, où l'infiltration et la circulation verticale des eaux souterraines demeurent limitées. Ces formations jouent le plus souvent un rôle de niveau semi-imperméable ou à drainance, contrôlant les écoulements souterrains et conditionnant parfois la mise en charge des aquifères situés au-dessus ou au-dessous (Bensaoula.F et al. 2005).

➤ **Grès de Boumediène**

Le Grès de Bou-Médine présente une perméabilité généralement faible. Cette perméabilité reste souvent conditionnée par la présence de diaclases, de fractures ou de certains bancs gréseux plus épais. Toutefois, dans l'ensemble, cette formation ne constitue pas un aquifère majeur, mais peut intervenir localement comme niveau de circulation secondaire ou comme support latéral de drainage.

Conclusion :

La région de Béni Bahdel appartient à la bordure méridionale des Monts de Tlemcen, dans l'Atlas oranais nord occidental, au Sud-Ouest de la ville de Tlemcen. Ce secteur constitue un chaînon structural de transition entre les domaines telliens internes au Nord et les hauts plateaux au Sud, marqué par une histoire tectono-sédimentaire, allant du Paléozoïque au Quaternaire.

Les formations dolomitiques et calcaires du Jurassique supérieur et moyen, très fracturées et localement karstifiées, constituent les réservoirs aquifères majeurs de la zone d'étude. Les alternances de niveaux rigides (calcaires, dolomies, grès) et de niveaux plastiques (marnes, argilites) créent un système aquifère multicouche dans lequel les horizons marneux et argileux assurent un rôle d'écrans imperméables, compartimentant verticalement et latéralement les circulations souterraines.

L'hétérogénéité lithologique et la complexité structurale contrôlent la formation des aquifères, surtout carbonatés et le développement de la karstification en profondeur, ce qui conditionne les contrastes des écoulements en profondeur, éléments essentiels à considérer dans toute étude de gestion et de mobilisation durable des ressources en eau dans la région.

**Partie 02 : CHAPITRE : 02
IMPLANTATION, PROCEDE,
ETAPES DE FORATION ET
QUALITE DES EAUX DU
FORAGE.**

I. Introduction :

Les ressources actuelles de Béni Bahdel souffrent de fortes limites : les sources, pourtant relativement pérennes, sont sensibles aux fluctuations saisonnières des précipitations et aux sécheresses, avec des baisses de débits capables de perturber l'irrigation et l'alimentation en eau potable, tandis que les puits traditionnels exploitent surtout des aquifères superficiels à productivité incertaine. Dans les calcaires compacts et karstifiés, des forages peu profonds peuvent échouer s'ils n'interceptent pas les principaux conduits, ce qui impose des études hydrogéologiques et géophysiques préalables ainsi qu'une planification rigoureuse des captages.

L'implantation d'un forage profond à El Kalaa se justifie par la présence d'un aquifère karstifié dans les dolomies de Tlemcen, identifié comme ayant une forte capacité de stockage et de bons débouchés au contact des grès de Boumediène, avec un site d'implantation optimisé sur les affleurements calcaire-dolomitiques proches des zones de concentration d'eaux souterraines.

Socio-économiquement, ce forage renforcera durablement l'AEP de la localité, soutiendra l'agriculture en aval et réduira la vulnérabilité de la commune, face aux sécheresses et à la variabilité des apports au barrage, dans une logique de gestion intégrée des ressources en eau de la haute Tafna, combinant eaux de surface et souterraines.

II. Implantation du forage :

Les études géologiques, complétées par l'interprétation des photographies aériennes, des images satellitaires et de la carte géologique de la région de Beni Bahdel, ont mis en évidence l'affleurement des dolomies et calcaires jurassiques présentant un pendage orienté vers le lit de l'Oued Tafna. Dans ces formations carbonatées, les eaux souterraines circulent préférentiellement le long des diaclases, fissures et zones de faille, où le développement de conduits karstiques assure un drainage efficace.

Les investigations hydrogéologiques montrent que le secteur d'étude est caractérisé par des formations à forte capacité de stockage, notamment la série calcaire-dolomitique du Jurassique supérieur, reposant sur les calcaires de Zarifet, qui constitue une zone majeure de recharge des émergences au contact des grès de l'Oxfordien supérieur rendus perméables par la fracturation. Ce contexte géo-structural et lithologique conduit à proposer l'implantation du forage dans la zone où se superposent, d'une part, les formations perméables du Jurassique

supérieur et, d'autre part, les grès fracturés au voisinage de la faille cartographiée, aux coordonnées suivantes :

Tableau 1 : Les coordonnées du forage El Kalaa.

Géographiques		UTM (m)		Lambert (m)	
Latitude	Longitude	X	Y	X	Y
34°42'52,20"N	1°30'58.34" O	635872.69	3842384.69	114082.02	165859.30

III. Installation du chantier

La disposition du site de forage doit assurer une action rapide du foreur en présence d'un souci. Il faut déterminer les mesures de précaution à prendre :

- Un périmètre de sécurité autour du chantier.
- Un accès pour les véhicules.
- Un approvisionnement en eau (citernes).
- Un accès facile pour le remplissage des fosses.
- Un endroit sec pour la rédaction (bureau).
- Une zone de déblais (cuttings).
- Un terrain aplani pour faciliter le calage de la machine.
- L'emplacement et le creusage des fosses à boue.
- Le positionnement du compresseur de façon à ce qu'il ne reçoive pas la poussière de forage.
- L'installation de toutes les unités de pompage, de pression hydraulique et des moteurs sur un plan horizontal.
- L'outil de mesure de la pression hydraulique doit être protégé du soleil.

IV. Technique de réalisation du forage de Beni Bahdel :

La réalisation du forage de Beni Bahdel a été conduite en deux grandes phases successives, en combinant d'abord la méthode de battage puis la méthode rotary, afin d'assurer à la fois la reconnaissance et la complétion de l'ouvrage. Dans une première étape, un tube-guide de 24 pouces a été battu de 0 à 10 m pour stabiliser les horizons superficiels et constituer un ancrage solide de la tête de puits, avant de poursuivre par un forage de

reconnaissance au diamètre 12 pouces 1/4 jusqu'à 250 m, complété par l'enregistrement des diagraphies (gamma-ray, potentiel spontané, résistivités et diamétreur) et un essai de nappe à l'air-lift. Dans une seconde étape, la méthode rotary a été mobilisée pour aléser le forage en 17 pouces 1/2 entre 10 et 250 m, mettre en place le tubage plein puis les crépines TNRS en 13 pouces 3/8 et 6 mm d'épaisseur, réaliser le gravillonnage annulaire avec des graviers siliceux roulés de granulométrie 0,5–1 cm, puis cimenter l'espace annulaire, assurant ainsi la complétion structurale et hydraulique du forage, en vue de son développement, de son nettoyage et des essais de pompage ultérieurs.



Figure 1 : Chantier de forage à Beni Bahdel (23 Septembre 2025).

IV. 1. Matériels utilisés dans le forage par battage :

La technique de forage par battage utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation. L'énergie utilisée pour actionner cet outillage est l'air comprimé à haute pression (10-25 bars). C'est un procédé très intéressant en recherche hydrogéologique et principalement en terrains durs (calcaire et grès).

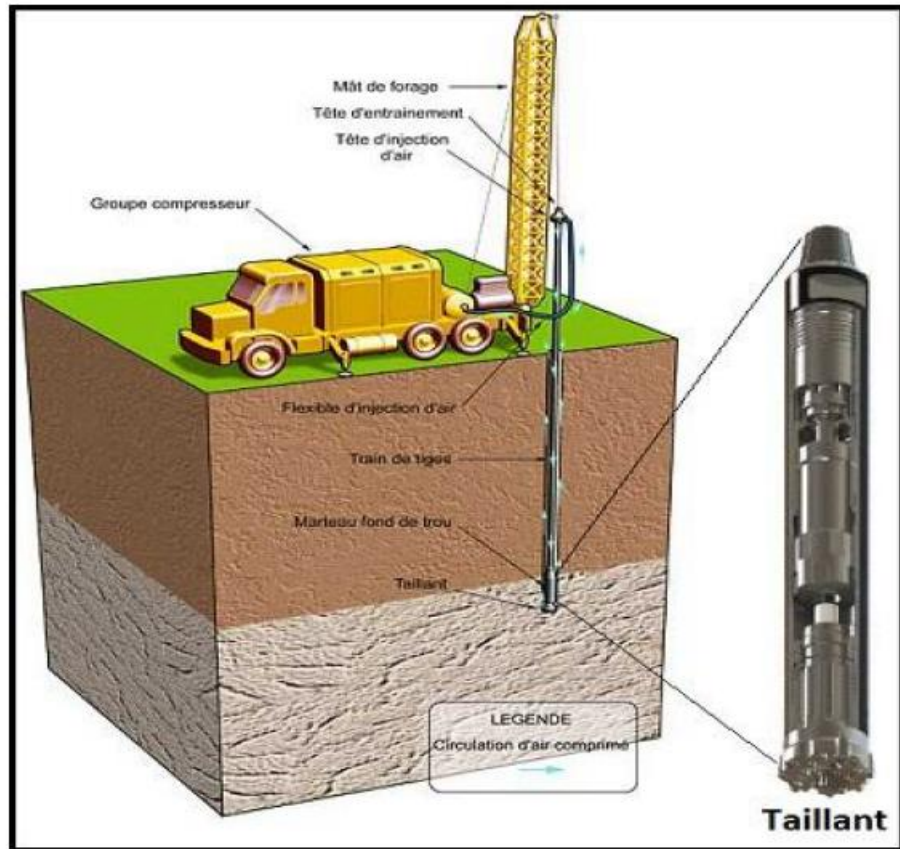


Figure 2 : Schéma simplifié d'une installation de forage par battage.

Un marteau pneumatique équipé de taillant (Fig.2) est fixé à la base d'un train de tiges et animé en percussion par envoi d'air comprimé dans la ligne de sonde.

Il convient de noter que ce type de forage est parfois couplé à l'emploi de mousse de forage (injectée dans le circuit d'air) pour favoriser la tenue des parois et/ou la remontée des déblais, ce qui est le cas pour le forage de Béni Bahdel « El Kalaa ».

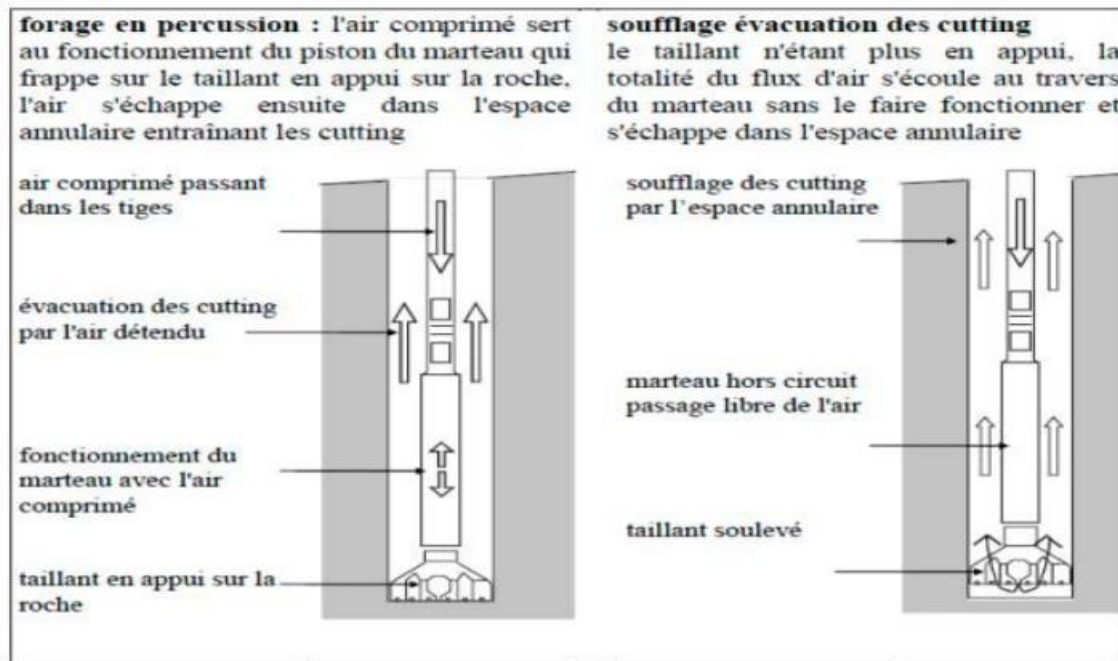


Figure 3 : Principe de fonctionnement du forage par battage.

a) Avantages :

- ✓ Avancement rapide et profondeur d'investigations pouvant dépasser les 300 m de profondeur (en fonction du diamètre et de la puissance du compresseur d'air).
- ✓ Bonne observation des déblais (coupe géologique) et des zones productrices (suivi foration).
- ✓ Fluide de forage (air) bien adapté au forage d'eau en général par l'absence de produit polluants (pas d'interférence entre l'eau de l'aquifère et des boues de forage).

b) Inconvénients :

- ✓ Procédé peu adapté dans les terrains non consolidés (sables) ou plastiques (argiles). Ce qui nécessite l'emploi de mousse injectée dans le circuit d'air pour favoriser la tenue des parois et/ou la remontée des déblais.
- ✓ Le fluide "air" peut perturber en foration les observations relatives à la qualité du fluide d'un niveau producteur par oxydation d'éléments ou en occultant des venues de gaz. La confirmation de la qualité du fluide (eau et gaz) d'un niveau producteur doit fréquemment être réalisée par pompage associé.
- ✓ L'interprétation délicate du niveau de production d'un horizon reconnu (débit) par mesure en soufflage (air lift) à l'aide de l'équipement de foration. Les données obtenues en foration, quant aux débits des horizons traversés, doivent être prises en compte avec

réserve. Il convient de considérer que les débits obtenus en fonction de l'air sont toujours optimistes.

V. Matériels utilisés dans le forage rotary :

La méthode rotary adoptée pour la réalisation du forage d'El Kalaa consiste à faire tourner un trépan solidarisé au bout d'un train de tiges, entraîné par une table de rotation ou un système d'entraînement supérieur, tandis qu'un fluide de forage circule en continu à l'intérieur de l'outil. Le trépan broie ou coupe les formations traversées, produisant des débris (cuttings) qui sont remontés en surface, grâce à la circulation du fluide, assurant ainsi le dégagement du fond de trou et la progression de l'avancement.

Le fluide de forage remplit plusieurs fonctions essentielles : il transporte les déblais, refroidit et lubrifie le trépan, stabilise les parois du forage, en exerçant une pression hydrostatique et en formant un cake filtrant, et contribue à limiter les pertes de circulation dans les formations fissurées ou karstifiées. La maîtrise de ses paramètres (densité, viscosité, vitesse de circulation) est donc déterminante pour assurer un bon débit de pénétration, la stabilité physique du trou et la sécurité globale de l'ouvrage, en accord avec les principes de conception et de gestion des forages profonds décrits par Driscoll (1986) et Houben & Treskatis (2007).

V.1. Matériels et équipement de fond :

La garniture de forage désigne l'ensemble des outils et éléments tubulaires qui opèrent sous la surface du sol, au-dessous de l'appareil de forage. Elle constitue un arbre de forage creux, composé principalement des tiges de forage, des tiges lourdes et des masse-tiges, assemblées les unes aux autres.

V.1.1. Les tiges :

Les tiges de forage consistent en des tubes en acier solides (fig.04) qui s'assemblent par vissage pour créer une longue chaîne. Elles acheminent la force de la foreuse rotative jusqu'à la tête de perçage (trépan) et permettent d'approfondir le puits étape par étape, en rajoutant des sections supplémentaires au besoin.



Figure 4 : Tiges de forage.

V.1.2. Les masses tiges :

Elles sont utilisées pour conférer du poids à l'instrument, afin de faciliter le perçage des roches, tout en conservant la tension sur la colonne de tiges et en minimisant le danger d'une déformation. Elles constituent un élément de l'équipement de forage qui est généralement plus épais et plus pesant que les barres de forage conventionnelles.



Figure 5 : Masses tiges.

V.1.3. Un trépan :

Est l'outil de coupe situé à l'extrémité inférieure du train de tiges, indispensable pour creuser des puits dans les secteurs du pétrole, des mines ou de l'eau. Actionné par un mouvement de rotation et soumis à une forte pression verticale, il brise, broie ou cisaille les formations rocheuses pour progresser dans le sous-sol. Selon la dureté du terrain, on utilise principalement

des trépan à molettes (tricônes), qui écrasent la roche, ou des trépan PDC munis de diamants synthétiques, qui la découpent, permettant ainsi d'atteindre des profondeurs de plusieurs kilomètres pour l'extraction de ressources.



Figure 6 : Trépan PDC



Figure 7 : Trépan tricon

- **Les Tools-joints :**

Les tools joints sont des raccords métalliques vissés aux extrémités des tiges de forage (drill pipe) qui permettent de relier plusieurs tiges entre elles pour former la colonne de forage.

- Assurer la liaison mécanique entre tiges en transmettant la rotation et la poussée de la foreuse à l'outil de fond.
- Garder un passage central étanche pour la circulation de la boue de forage le long de la garniture.



Figure 8 : Les tools joints.

- **Les tiges lourdes :**

Ce sont des éléments de transition placés entre les tiges de forage classiques et les massetiges, qui permettent d'augmenter légèrement le poids sur l'outil, tout en gardant une certaine flexibilité.



Figure 9 : Les tiges lourdes.

- **Les stabilisateurs :**

Pour diminuer la déviation et améliorer le contrôle, nous intégrons des stabilisateurs. Nous examinons leur quantité, leurs dimensions et leur emplacement pour assurer une efficacité maximale.

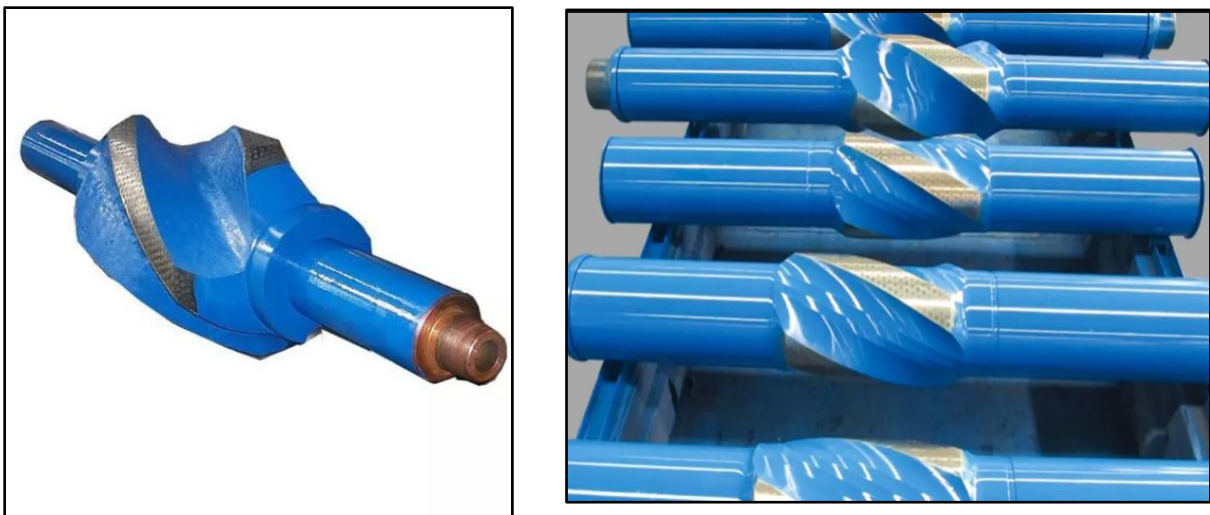


Figure 10 : les stabilisateurs.

V.1.4. Outil de forage :

Véritable pièce maîtresse du forage, l'outil de coupe est le garant de la réussite technique de l'ouvrage. Son rôle fondamental est de désagréger la roche afin de réaliser le forage dans les délais impartis. Au fil des décennies, cet équipement a connu des avancées technologiques majeures pour relever les défis de l'industrie extractive. L'objectif de ces innovations est triple : accroître la vitesse d'avancement, prolonger la durée de vie du matériel et minimiser les coûts opérationnels.

La diversité des formations géologiques a conduit à la création d'une vaste gamme d'outils que l'on peut classer selon leurs spécificités :

- *Outils à dents d'acier* : Particulièrement efficaces dans les sols tendres, ils sont souvent utilisés en début de forage avec des vitesses de rotation élevées.
- *Outils à picots (inserts)* : Conçus pour les roches dures, ils se déclinent en plusieurs variantes pour s'adapter à presque toutes les configurations lithologiques.

Parmi eux, le tricône demeure la référence du forage rotary, depuis son apparition en 1909. Comme le souligne Grondin (2004), cet outil se compose de trois cônes rotatifs indépendants, fixés sur des bras soudés qui forment le corps de l'outil.

V.2.Équipement de surface :

Ces les installations de surface indispensables à la méthode rotary. Ces équipements sont organisés en plusieurs pôles opérationnels dont la mission est d'actionner le trépan, tout en garantissant l'intégrité et la sécurité du puits.

V.2.1. Matériels et équipement de puissance :

a. *Les sources d'énergie :*

L'utilisation d'appareils électriques présente de nombreux avantages, tels qu'une diminution significative du bruit et une optimisation de la gestion des chantiers, malgré un coût d'acquisition important. En Algérie, les groupes électrogènes diesel sont privilégiés et demeurent les plus répandus sur le terrain.

b. *La pompe à boue :*

Véritable cœur du système circulatoire du forage, la pompe à boue assure le transfert pressurisé du fluide depuis les bassins de stockage vers le fond du puits. Cette injection sous haute pression remplit des fonctions critiques : elle garantit l'évacuation continue des débris

rocheux vers la surface, maintient la propreté de l'ouvrage et prévient la surchauffe du trépan, en régulant sa température durant l'opération.

c. Le circuit de la boue :

Le cycle de circulation du fluide de forage repose sur un système en circuit fermé. Le processus débute par la préparation d'un mélange d'eau et de bentonite, lequel est ensuite injecté sous pression dans la garniture de forage par les pompes. Après avoir atteint le fond du puits et traversé le trépan, le fluide remonte vers la surface via l'espace annulaire, transportant avec lui les débris de roche. Une fois en surface, la boue subit un traitement mécanique par tamisage pour éliminer les impuretés solides, permettant ainsi sa réintroduction continue dans le circuit.

d. La boue et son rôle :

La boue de forage joue plusieurs rôles importants pendant le forage. Elle permet de ramener à la surface les morceaux de roche cassés au fond du puits. Elle aide aussi à refroidir l'outil de forage et à faciliter son travail dans la roche. En même temps, elle protège les parois du trou, en formant une fine couche appelée « cake », ce qui évite leur effondrement. Enfin, elle réduit le poids des tiges de forage, grâce à son effet de flottabilité.

V.2.2. Matériels et équipement de rotation :

Le fluide de forage remplit des missions polyvalentes indispensables pour mener à bien le forage d'un puits. Il ne se contente pas d'évacuer les débris rocheux en surface : il refroidit et lubrifie la tête de perçage pendant l'abattage de la formation. Côté stabilité, la boue forme un filtre mince sur les parois, appelé cake de filtration, qui empêche les effondrements. Par ailleurs, elle exerce un effet de flottabilité archimédienne qui diminue le poids effectif du tubage, soulageant ainsi les équipements en surface (Grondin, 2004).

a. La table de rotation :

Les tables de rotation sont conçues pour l'entraînement (fig.11) d'une colonne de forage suspendue verticalement, ou pour la réception du couple moteur réactif de cette colonne. Conçu par le moteur d'attaque. Une table de rotation est constituée d'un châssis fixe qui porte un élément mobile interne, celui-ci reposant sur le composant fixe, grâce à l'intermédiaire d'un roulement principal à billes.

b. Le carré d'entraînement :

L'entraînement en rotation du train de tiges (fig.11) repose sur l'interaction entre la table, la fourrure principale et le carré de Kelly. Ce dispositif permet de transmettre la force nécessaire au forage. Par ailleurs, lors du maniement des tubes, le maintien sécurisé de la structure est assuré par l'insertion de bagues de réduction (fourrures intermédiaires) au cœur du dispositif de support.

c. La tige d'entraînement :

Positionnée entre l'émerillon (tête d'injection) et le train de tiges (fig.11), cette pièce sert de connecteur principal. C'est elle qui relaie la force rotative générée par la table vers l'ensemble de la structure de forage, en s'appuyant sur le dispositif du carré d'entraînement

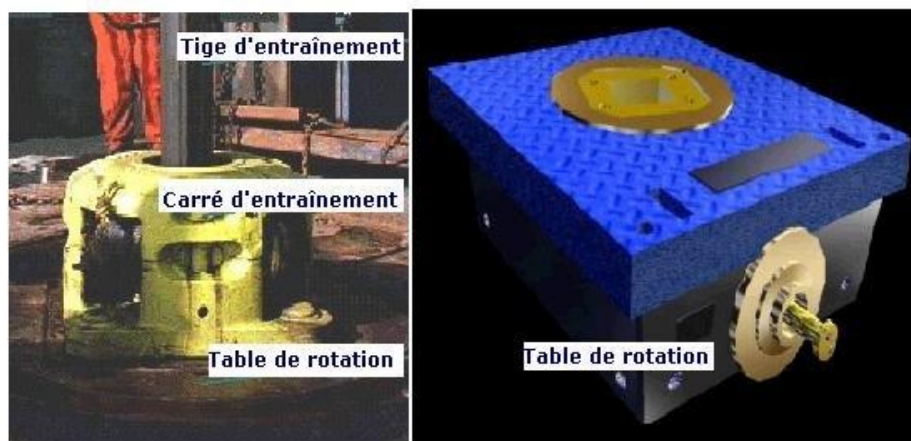


Figure 11 : L'équipement de la rotation.

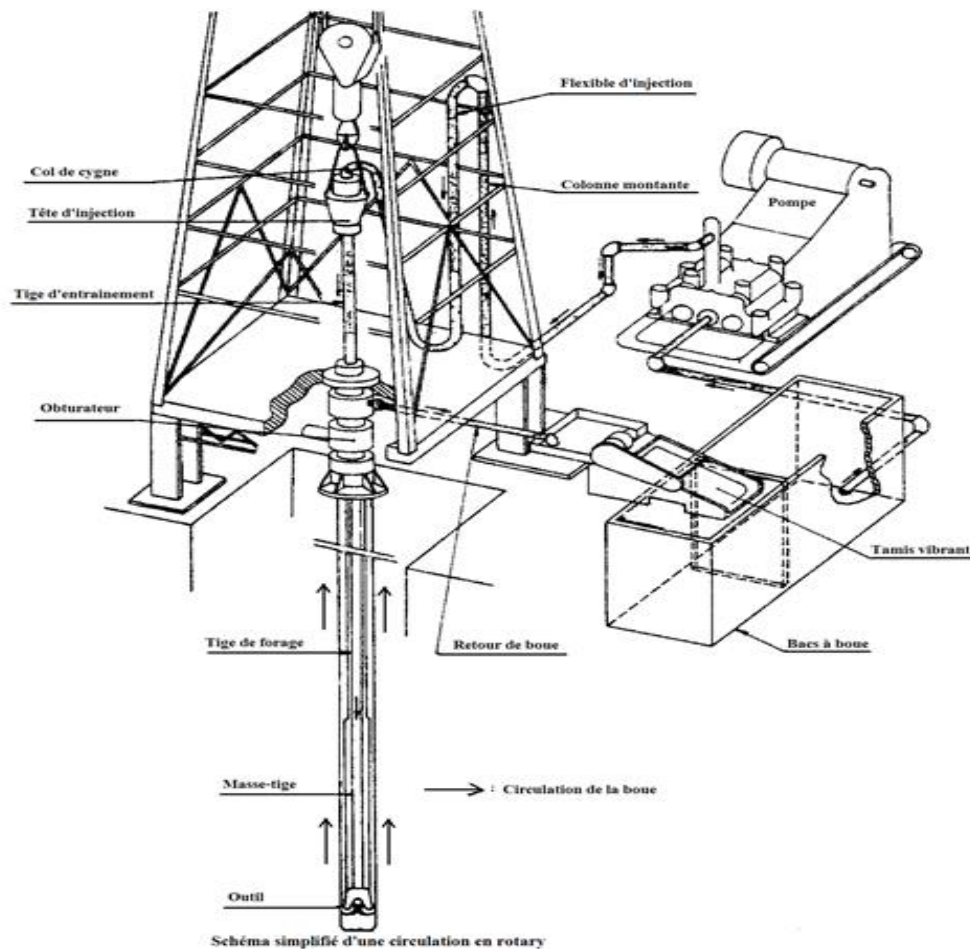


Figure 12 : Schéma simplifié la circulation en rotary.

VI. Méthodologie de réalisation du forage d'El Kalaa :

VI.1. Travaux préparatoires du chantier :

Les travaux préparatoires du forage d'El Kalaa ont consisté en la mobilisation du matériel de forage, l'installation des ateliers de boue et d'air, ainsi que l'aménagement de la plate-forme de chantier dans des conditions compatibles avec le déroulement des opérations de foration. Cette phase inclut également les opérations de montage, de démontage et de repli des équipements, ainsi que le nettoyage final de l'aire de travail, de manière à assurer à la fois l'efficacité technique du chantier et la remise en état du site en fin d'intervention.

VI.2. Reconnaissance du forage par battage :

La phase de reconnaissance a été exécutée en mode battage afin de caractériser les formations traversées, de préciser la coupe lithologique et d'identifier les niveaux aquifères présentant un intérêt hydraulique pour l'exploitation future. Cette étape constitue le socle de la

décision technique, car elle conditionne à la fois l'interprétation hydrogéologique du site, la profondeur utile de l'ouvrage et les choix ultérieurs d'équipement et de complétion.

a) Mise en place de l'avant-puits et du tube guide :

Le démarrage des travaux a été assuré par la réalisation d'un avant-puits de 10 m de profondeur, foré en diamètre 24 pouces et équipé d'un tubage de 20 pouces, puis cimenté dans le terrain naturel afin de stabiliser les terrains superficiels et de sécuriser la tête du forage. Cette disposition permet d'éviter les éboulements en début de creusement, de protéger les horizons de surface et de fournir un appui mécanique adapté à la poursuite du forage en profondeur.

b) Forage de reconnaissance et suivi lithologique :

Le forage de reconnaissance a été réalisé entre 10 et 250 m de profondeur en diamètre 12"1/4, soit environ 300 mm, selon une méthode permettant le contrôle continu de la lithologie rencontrée. Cette phase visait à documenter la succession des formations dolomitiques, gréseuses et localement argileuses, tout en repérant les niveaux fissurés, karstifiés ou altérés susceptibles de constituer des horizons productifs ou, au contraire, des niveaux à isoler lors de l'équipement définitif.

c) Prélèvement, lavage et conditionnement des déblais :

Le suivi géologique du forage a reposé sur le prélèvement systématique des déblais tous les six mètres au fur et à mesure de l'avancement, suivi de leur lavage, de leur conditionnement dans des sachets ou contenants appropriés et de l'identification rigoureuse de chaque échantillon par sa cote de profondeur, de manière à garantir une traçabilité lithologique fiable des terrains traversés, à confronter les observations directes aux enregistrements diagraphiques et à affiner ainsi l'interprétation de la structure aquifère et des caractéristiques du réservoir capté, la description lithologique détaillée de ces déblais étant réalisée au laboratoire n°25.

L'analyse lithologique de ces déblais a permis d'établir la coupe litho-stratigraphique des formations traversées par ce forage (figure n°14).

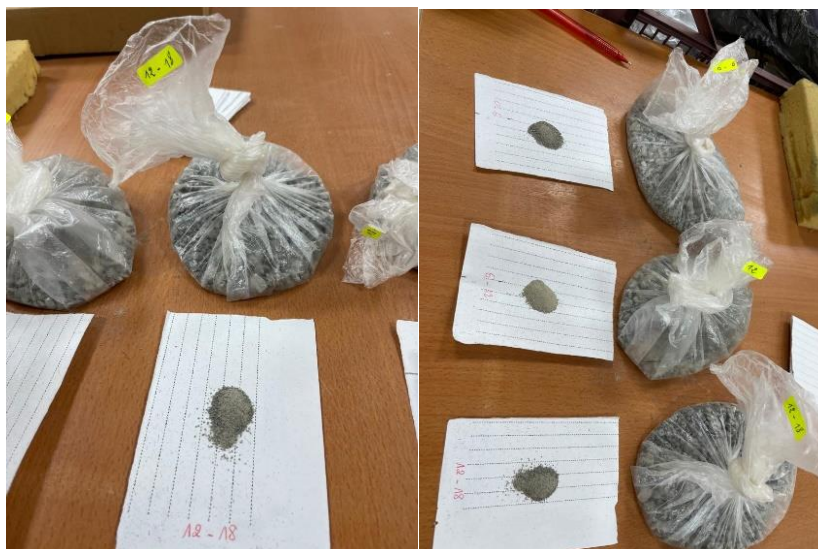


Figure 13 : Les déblais du forage El Kalaa.

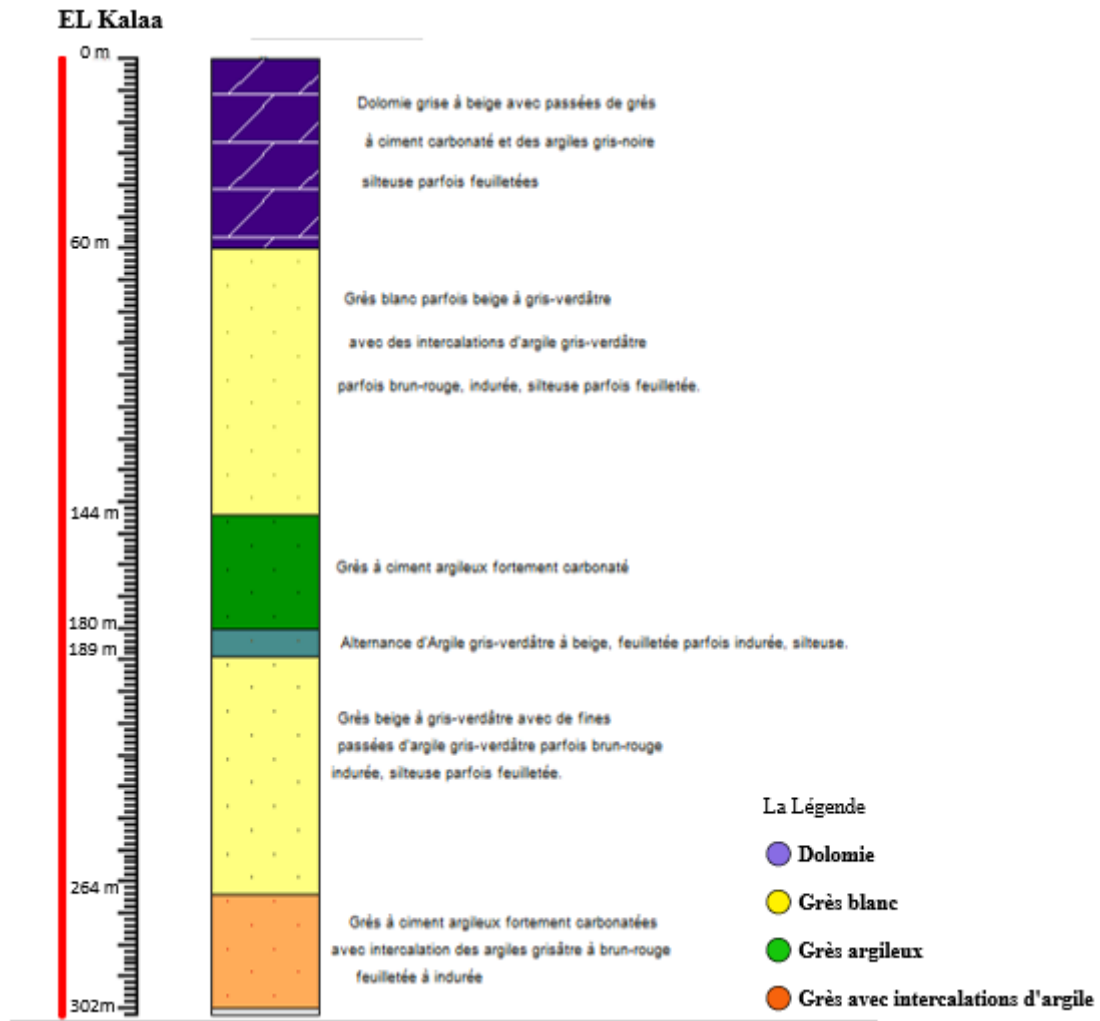


Figure 14 : Log lithologique détaillé du forage El Kalaa (Profondeur finale :302m).

d) Essai préliminaire à l'air-lift :

À l'issue de la reconnaissance, un essai préliminaire à l'air-lift a été réalisé pour fournir une première estimation de la réponse hydraulique du forage et apprécier la capacité de production des horizons traversés. Cet essai constitue une étape diagnostique importante, car il permet d'orienter la stratégie de complétion, de confirmer les niveaux potentiellement productifs et de vérifier l'intérêt hydraulique global de l'ouvrage, avant son équipement définitif.

e) Diagraphies de forage et interprétation hydrogéologique :

Les diagraphies de forage (figure n°15) ont été intégrées à la méthodologie d'étude afin de compléter les observations lithologiques issues des cuttings et de fournir une lecture continue des propriétés physiques des terrains traversés. Leur exploitation a permis de mieux discriminer

les niveaux imperméables, les zones fissurées, les intervalles karstifiés et les secteurs à plus forte potentialité hydrique, éléments indispensables à l'optimisation de l'équipement du forage.

e. 1) Objectifs et intérêt des diagraphies :

La diagraphie de forage a pour objectif de mesurer, le long du puits, un ensemble de paramètres physiques et géométriques permettant de caractériser les formations géologiques sans recourir uniquement à l'échantillonnage destructif. Dans le cas d'El Kalaa, elle a servi à identifier les niveaux perméables, différencier les horizons argileux des niveaux carbonatés, repérer les secteurs fracturés ou cavitaires et adapter l'implantation des crépines et des tubes pleins à la réalité hydrogéologique du terrain.

e. 2) Acquisition des diagraphies en forage :

Les enregistrements diagraphiques ont été réalisés sur une colonne d'environ 290 m et ont porté sur plusieurs paramètres complémentaires, notamment le gamma-ray, la polarisation spontanée, les résistivités en différentes configurations et le calibre du forage. L'acquisition simultanée de ces données a permis d'obtenir une vision détaillée de la nature des formations traversées, de leur degré d'altération, de leur compacité et de leur comportement vis-à-vis de l'eau souterraine.

e. 3) Présentation des enregistrements géophysiques :

Les logs enregistrés sur le site d'El Kalaa comprennent principalement le gamma-ray pour la discrimination lithologique, la résistivité et la polarisation spontanée pour l'analyse électrique et hydrodynamique, ainsi que le caliper pour l'évaluation du diamètre réel du trou et la détection des irrégularités de paroi. L'interprétation croisée de ces paramètres permet de distinguer les zones propres et perméables, les horizons argileux ou marneux plus imperméables, ainsi que les secteurs présentant une fracturation ou une karstification favorable à la circulation de l'eau.

e. 4) Interprétation hydrogéologique des résultats :

L'analyse conjointe des diagraphies Gamma Ray, de résistivité (N64, N16), de polarisation spontanée et de diamètre (caliper) met en évidence une alternance de zones à faible rayonnement gamma, correspondant globalement à des formations dolomitiques relativement propres et fissurées, et de secteurs à gamma plus élevé indiquant la présence d'intercalations argileuses ou de niveaux altérés. Jusqu'à 64 m (zone 1), les faibles valeurs de Gamma Ray

confirment l'existence de dolomies grises à beiges en bon état, telles que décrites par l'analyse des déblais.

Entre 64 et 144 m (zone 2), les pics élevés de Gamma Ray, observés notamment aux profondeurs 90, 94, 100, 126, 128 et 140 m, traduisent la présence d'horizons argileux imperméables en association avec des grès gris-blancs à teintes parfois beiges à gris-verdâtres, localement à intercalations argileuses brun-rouges indurées, ce qui se traduit par une faible potentialité hydrique.

De 144 à 180 m (zone 3), le signal Gamma Ray est globalement faible, à l'exception de la côte 151 m, et met en évidence une zone fissurée à bonne potentialité hydrique entre 146 et 150 m, suivie d'un niveau altéré entre 150 et 156 m, puis d'un intervalle 156–180 m caractérisé par un potentiel hydrique important en milieu fissuré, avec en outre une zone d'invasion de boue marquée entre 156 et 160 m.

Entre 180 et 190 m (zone 4), les fortes valeurs de Gamma Ray accompagnées d'un potentiel hydrique faible témoignent d'un niveau altéré enrichi en fraction argileuse.

De 190 à 264 m (zone 5), les faibles gammas indiquent majoritairement des formations fissurées à bonne potentialité hydrique entre 190 et 230 m, tandis que l'intervalle 230–234 m correspond à une zone altérée à rayonnement élevé, avant de retrouver, entre 234 et 264 m, un potentiel hydrique important en milieu fissuré.

Enfin, entre 264 et 300 m (zone 6), la diagraphe révèle une forte émission de rayons gamma, à l'exception de la côte 275 m, associée à une potentialité hydrique limitée dans un milieu globalement altéré.

Cette lecture hydrogéologique intégrée a servi de base au positionnement des crépines et au choix des intervalles à valoriser ou à isoler dans l'équipement définitif du forage.

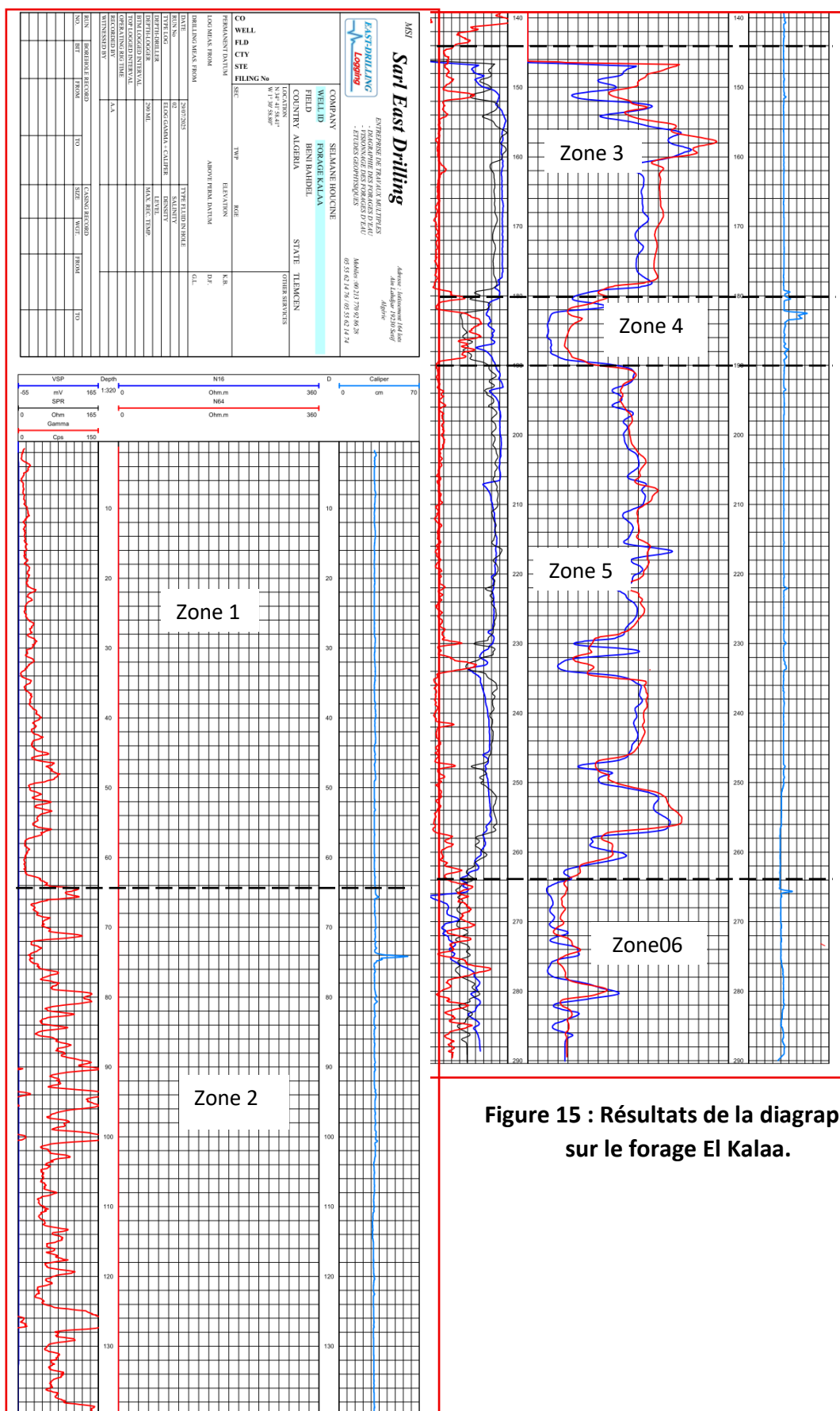


Figure 15 : Résultats de la diagraphie sur le forage El Kalaa.

VI.3. Complétion du forage : alésage, équipement et cimentation

Après validation des résultats de la reconnaissance et de l'interprétation géophysique, le forage a été complété en mode rotary afin d'assurer son dimensionnement final et sa préparation à l'exploitation. Cette phase a regroupé l'alésage en grand diamètre, la mise en place du tubage et des crépines, le gravillonnage de l'espace annulaire, puis la cimentation des zones à isoler, de façon à garantir la stabilité mécanique et le bon fonctionnement hydraulique de l'ouvrage.

a) Alésage en grand diamètre :

L'alésage a été réalisé de 10 à 250 m en diamètre 17"1/2, après confirmation des résultats de la phase de reconnaissance, afin de préparer l'ouvrage à recevoir l'équipement définitif. Ce surcreusement permet de ménager un espace annulaire suffisant pour la descente du tubage, la mise en place du massif filtrant et, le cas échéant, les opérations de cimentation dans de bonnes conditions techniques.

b) Mise en place du tubage et des crépines :

L'équipement définitif du forage a été conçu à partir des résultats lithologiques, diagraphiques et hydrauliques obtenus lors de la reconnaissance, avec mise en place d'une alternance de tubes pleins et de crépines en acier TNRS de diamètre 13"3/8 et d'épaisseur 6 mm, sur l'intervalle compris entre 0,50 m et 250 m. Cette disposition vise à isoler les horizons non productifs ou à risque, tout en favorisant l'admission de l'eau au droit des niveaux les plus perméables et hydrauliquement intéressants.

c) Mise en place du massif filtrant :

Après la pose de l'équipement, un massif filtrant constitué de graviers siliceux roulés, arrondis et calibrés a été introduit dans l'espace annulaire, avec recours à une circulation de boue adaptée lorsque les conditions d'exécution l'exigeaient. Ce gravillonnage assure à la fois le soutien des parois, la filtration des particules fines, la réduction des risques d'ensablement et l'amélioration des échanges hydrauliques entre l'aquifère et les crépines.

d) Cimentation de l'espace annulaire :

La phase de complétion s'est achevée par la cimentation de l'espace annulaire aux endroits requis, notamment en tête de forage et au droit des niveaux non aquifères ou à isoler. Cette opération a pour objectif d'assurer l'étanchéité de l'ouvrage, de prévenir les

communications verticales indésirables entre formations de qualité hydrique différente et de renforcer la protection sanitaire ainsi que la stabilité structurelle du forage.

e) Développement du forage : nettoyage mécanique et traitement chimique :

Le développement du forage d'El Kalaa a d'abord consisté en un nettoyage mécanique par air-lift, basé sur l'injection d'air comprimé dans la colonne d'exhaure, afin de remonter la boue, les particules fines et les éléments du massif filtrant jusqu'à clarification de l'eau, la circulation étant maintenue pendant et après la mise en place du gravier pour favoriser le tassement du massif filtrant, évacuer les fines particules et améliorer la perméabilité au droit des crépines, ce qui augmente le rendement spécifique du forage et réduit les pertes de charge, ce développement à l'air-lift, dont le principe repose sur la création d'un courant ascendant évacuant mécaniquement déblais et fluides résiduels, joue à la fois un rôle de nettoyage (libération de l'aquifère de ses particules fines, protection de la pompe contre l'usure sableuse) et de diagnostic de la capacité de débit avant équipement définitif, en suivant une méthodologie structurée comprenant l'installation du chantier, le retrait éventuel de la pompe, l'identification de la profondeur et de l'emplacement des crépines, l'évaluation de l'ensablement ou de la turbidité, l'insertion d'une colonne d'exhaure (rising main) et d'une ligne d'air comprimé jusqu'à la base, puis la mise en œuvre du soufflage par injections d'air continues ou par coups à-coups, qui réduit la densité de la colonne d'eau et entraîne vers la surface les débris, sables et résidus de fluide de forage, l'ensemble étant poursuivi par cycles jusqu'à obtention d'une eau limpide et d'un rendement hydraulique amélioré, avec un réglage fin de la pression et du rythme d'injection selon le diamètre et le matériau du tubage ; cette opération est ensuite complétée par un traitement chimique comprenant deux injections successives de 100 kg d'hexamétaphosphate de sodium au droit des crépines, suivies d'un temps de contact puis d'une extraction à l'air-lift, avant l'injection d'environ 2 m³ d'acide chlorhydrique dans les horizons carbonatés karstifiés, afin de dissoudre les dépôts calcaires, d'élargir les fissures et d'augmenter la transmissivité autour de l'ouvrage, un nettoyage final par pompage ou air-lift intensif permettant enfin d'évacuer les résidus de traitement et d'obtenir une eau claire et chimiquement stabilisée.

f) Essais de pompage, contrôle de l'ouvrage et caractérisation des eaux :

La validation finale du forage a reposé sur une série d'essais et de contrôles destinés à apprécier ses performances hydrauliques, son état structural interne et la qualité de l'eau captée. Un essai de pompage par paliers, comprenant quatre paliers de trois heures enchaînées, a été

effectué afin d'établir la relation débit-rabattement, d'estimer les pertes de charge et de déterminer le comportement hydraulique de l'ouvrage, sous sollicitations croissantes. Cette investigation a été complétée par un essai de longue durée de 72 heures pour vérifier la stabilité du niveau dynamique, estimer le débit d'exploitation et mieux caractériser la réponse de l'aquifère dans le temps. En parallèle, un contrôle par caméra sur toute la profondeur du forage, jusqu'à 250 m, a permis d'examiner l'état du tubage, des crépines et du massif filtrant, tandis que des analyses physico-chimiques complètes ont été réalisées pour statuer sur la qualité de l'eau et sur son aptitude aux usages envisagés, notamment l'alimentation en eau ou l'irrigation.

VII. Caractéristiques techniques de l'équipement du forage :

Le choix de l'équipement définitif du forage d'El Kalaa repose sur la nécessité d'assurer simultanément la stabilité mécanique de l'ouvrage, la protection de la ressource et l'optimisation des performances hydrauliques. Les décisions relatives au tubage, aux crépines et au massif filtrant sont directement conditionnées par la lithologie traversée, les résultats des diagraphies, la profondeur du forage, la nature de l'aquifère karstifié et le débit recherché en exploitation.

a) Tubage plein et rôle de soutènement :

Le tubage plein constitue l'élément principal de soutènement du forage, en assurant la consolidation des parois, la protection des niveaux traversés et le maintien de l'intégrité structurelle de l'ouvrage. À El Kalaa, le choix d'un tubage en acier TNRS de diamètre 13"3/8 et d'épaisseur 6 mm (figure n°16) répond à des exigences de robustesse mécanique, de durabilité et de compatibilité avec les contraintes imposées par les formations carbonatées fissurées et localement cavitaires.

C'est un tubage plein en acier TNRS de diamètre 13"3/8 est une colonne de forage en acier épais, destinée avant tout au soutènement et à la protection des parois du puits. Il s'agit d'un tube cylindrique d'environ 339 mm de diamètre extérieur, à paroi continue (sans fentes ni perforations), utilisé dans les tronçons où l'on ne souhaite pas l'entrée d'eau (niveaux stériles, instables ou à mauvaise qualité). L'acier TNRS offre une bonne résistance mécanique à la compression, au flambement et aux contraintes de mise en place, ce qui permet au tubage de supporter les charges importantes liées à la profondeur et aux variations de pression. Ce type de tubage assure aussi l'isolation hydraulique entre différents horizons, limite les risques d'effondrement et sert de support aux sections crépinées et à la pompe immergée, tout en garantissant la durabilité et la sécurité de l'ouvrage.

Le positionnement du tube plein est déterminé en fonction des niveaux improductifs, instables ou hydrauliquement indésirables, afin d'isoler les horizons ne devant pas contribuer à la production d'eau. Son choix dépend également du débit projeté, du type de pompe envisagé, de la profondeur totale du forage, des risques de déformation et des caractéristiques mécaniques des terrains traversés, avec pour objectif de garantir une exploitation durable et sécurisée.

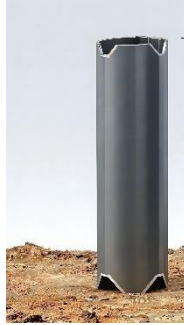


Figure 16 : Photo du tubage TNRS.

b) Crépines : fonction, dimensionnement et implantation :

Les crépines, parties ajourées de la colonne de tubage permettant l'entrée de l'eau souterraine tout en limitant l'entrée des particules fines, ont leur implantation à El Kalaa définie à partir des résultats lithologiques, des diagraphies et des essais hydrauliques, afin de cibler prioritairement les secteurs les plus perméables, fissurés ou karstifiés ; leur dimensionnement repose sur des considérations granulométriques et hydrauliques (analyse D10, D60) pour sélectionner l'ouverture (slot) et la longueur utile nécessaires à un débit satisfaisant sans compromettre la stabilité de l'ouvrage, d'où un agencement alterné de tubage plein et de crépine entre 0,5 et 250 m selon les horizons productifs repérés (logs, tests air-lift) et en excluant les niveaux à risque ou pollués. La crépine utilisée dans le forage d'El Kalaa est de type TNRS, Ø13''3/8, épaisseur 6 mm (figure 17).



Figure 17 : Les crépines en TNRS.

La classification des crépines dépend de leur géométrie, des matériaux et de la configuration des perforations ; elles mesurent généralement au moins 3 m et leur conception découle des propriétés hydrauliques observées lors de la surveillance du forage, avec des matériaux courants tels que l'acier, l'acier inoxydable (figure n°18) ou le PVC (figure n°19).

Les crépines en acier présentent diverses morphologies (perforations allongées ou à auvents, ouvertures rondes, structures à nervures, technologie Johnson avec fente continue) tandis que les crépines en PVC, légères et faciles à poser, possèdent des fentes étroites (0,5–1 mm), sont résistantes à la corrosion chimique et inertes d'un point de vue sanitaire ; toutefois le choix final dépend de la profondeur, de la nature des sols, de la minéralisation et de la texture des sables, le PVC étant déconseillé pour les ouvrages de plus de 500 m en raison des contraintes mécaniques et thermiques.

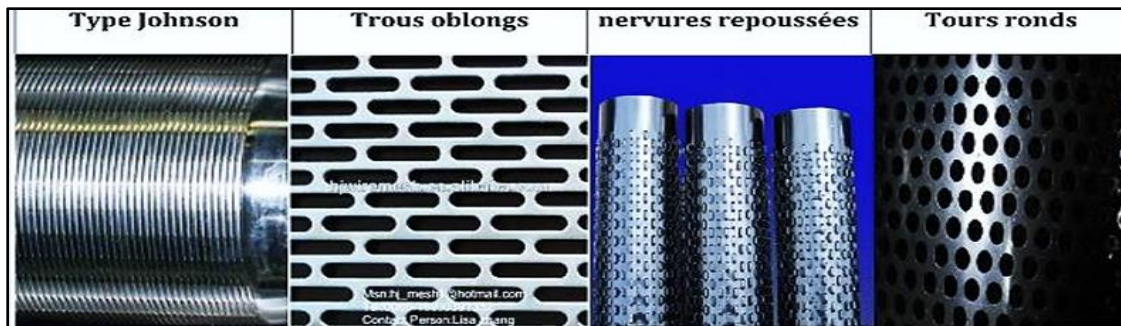


Figure 18 : Les différents types des crépines en acier.

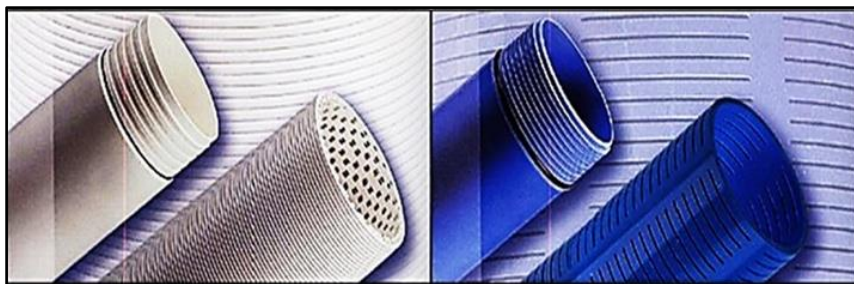


Figure 19 : Les crépines en PVC.

c) Massif filtrant et protection de l'ouvrage :

Le gravillonnage siliceux est une composante clé qui assure la pérennité du forage en stabilisant les parois et en purifiant l'eau à son entrée. Sa taille de grain est calculée pour s'intercaler parfaitement entre la granulométrie de l'aquifère et les ouvertures de la crépine. À El Kalaa, l'emploi de graviers de 0,5 à 1 cm est préconisé pour faire face aux spécificités des

zones karstifiées. Ce massif est mis en œuvre sous circulation de boue de forage, et son niveau peut être ajusté, suite aux mouvements provoqués par le développement du puits et les pompages intensifs.

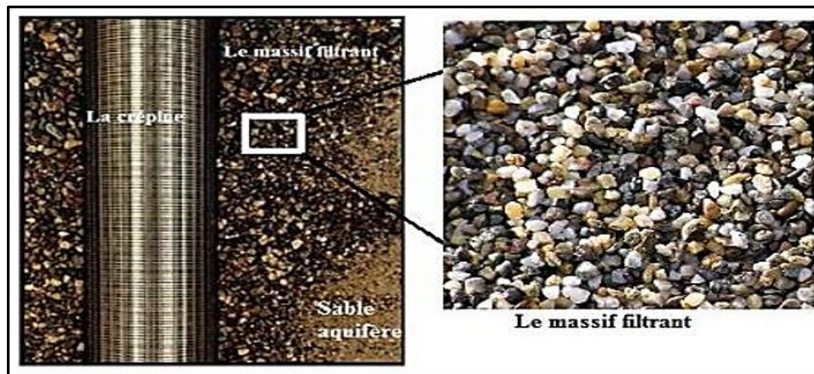


**Figure 20 : Massif filtrant (gravier additionnel, massif de gravier)
(Bousselsal , 2021).**

VIII. Qualité physico-chimique des eaux du forage El Kalaa :

VIII.1. Introduction :

L'analyse hydrochimique vise à approfondir la compréhension des mécanismes de circulation des eaux souterraines et de leurs interactions avec les structures géologiques. Elle permet également d'évaluer l'impact des pressions anthropiques sur la dégradation des propriétés physico-chimiques de la ressource. Cette partie examine spécifiquement la qualité des eaux du forage El Kalaa, afin de déterminer son aptitude à la consommation et à l'usage agricole, en s'appuyant sur l'exploitation des bulletins d'analyses disponibles (2025).

VIII.2. La balance ionique :

$$BI = \frac{|\Sigma r^+ - \Sigma r^-|}{|\Sigma r^+ + \Sigma r^-|} \times 100 (\%)$$

Avec :

r : Quantité en réaction, en meq/l.

r^- : Somme des quantités en réaction des anions.

r^+ : Somme des quantités en réaction des cations.

BI : Balance ionique, en %.

Si :

$BI \leq 2\%$: Bonne analyse.

$2\% < BI < 5\%$: Analyse acceptable.

$BI > 5\%$: Mauvaise analyse.

La balance ionique calculée pour l'eau de forage EL Kalaa est acceptable (3,1 %).

VIII.3. Interprétations et discussions :

a. Aptitude à la consommation humaine :

-Analyse des paramètres physico-chimiques :

L'analyse physico-chimique de l'échantillon datée de 05 / 08 / 2025 vise à évaluer la qualité de l'eau au regard des critères de potabilité en vigueur en Algérie. Les paramètres mesurés (pH, conductivité cations et anions) . Les résultats obtenus sont comparés aux limites réglementaires pour vérifier la conformité de la ressource, selon le tableau N°01 (annexes).

↳ pH :

Le pH mesure l'acidité ou l'alcalinité de l'eau et indique son agressivité chimique vis-à-vis des matériaux ; la norme algérienne accepte entre 6,5 et 9.

Le pH mesuré est de 7,16, indiquant une eau neutre qui limite l'agressivité chimique. Cette valeur se situe dans la plage réglementaire algérienne entre 6,5 et 9. L'eau est donc conforme du point de vue de l'acidité/alcalinité.

↳ Conductivité :

La conductivité renseigne sur la minéralisation totale (sels dissous) ; la limite algérienne est de 2800 $\mu\text{S/cm}$.

La conductivité est de 790 $\mu\text{S/cm}$, ce qui reflète une faible minéralisation. Ce résultat reste largement inférieur à la limite algérienne de 2800 $\mu\text{S/cm}$. L'eau présente ainsi une bonne qualité physico-chimique.

Tableau 2 : Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier J.,2009).

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/l)
Conductivité <100	Très faible
100 < Conductivité < 200	Faible
200 < Conductivité < 333	Moyenne
333 < Conductivité < 666	Moyenne à accentuée
666 < Conductivité < 1000	Importante
Conductivité > 1000	Elevée

↳ Minéralisation :

La composition minérale de l'eau dépend directement de la nature géologique des sols et des roches avec lesquels elle entre en contact. C'est pourquoi les eaux souterraines, affichent généralement une concentration en minéraux bien plus forte un lien direct entre la quantité de sels dissous dans l'eau et sa capacité à conduire le courant électrique, appelée conductivité.

Tableau 3 : Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier J., 2009)

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/l)
Conductivités <50	1,365079 x conductivités
50<Conductivités< 166	0,947658 x conductivités
166<Conductivités< 333	0,769574 x conductivités
333<Conductivités < 833	0,715920 x conductivités
833<Conductivités < 10000	0,758544 x conductivités
Conductivités >10000	0,850432 x conductivités

D'après tableau 2 la minéralisation est important, alors le calcul de la minéralisation selon tableau 3 est de **565,57 mg/L**.

↳ **Ca²⁺** :

Le calcium traduit la dureté liée aux roches carbonatées ; la norme est de 200 mg/L.

La concentration en calcium est de 102,70 mg/L. Ce niveau est bien en dessous du repère indicatif de 200 mg/L. L'eau reste adaptée à la consommation humaine.

↳ **Mg²⁺** :

Le magnésium participe aussi à la dureté ; la norme est de 50 mg/L.

Le magnésium est à 29,52 mg/L. Ce taux est inférieur à la valeur guide de 50 mg/L. L'échantillon respecte donc les standards habituels.

↳ **Na⁺** :

Le sodium influe sur le goût et les régimes pauvres en sel ; la limite réglementaire est 200 mg/L.

Le sodium est très faible (8 mg/L). Il se situe loin de la limite réglementaire de 200 mg/L. L'eau est chimiquement saine sur ce paramètre.

↳ **K⁺** :

Le potassium est généralement présent en faibles concentrations ; valeur indicative 12 mg/L.

La teneur en potassium est de 2 mg/L. Cette valeur reste notablement inférieure à la borne indicative de 12 mg/L.

↳ HCO_3^- :

Les bicarbonates définissent le pouvoir tampon et l'alcalinité, influencés par un contexte géologique calcaire ; pas de limite stricte.

Les bicarbonates atteignent 451 mg/L. Cette concentration s'explique par le contexte géologique calcaire local.

↳ SO_4^{2-} :

Les sulfates proviennent souvent de gypse ; un excès (>250 mg/L) peut altérer le goût.

Les sulfates sont à 24 mg/L, bien en dessous du plafond de 250 mg/L. Ce faible niveau exclut tout risque d'amertume ou de problème sanitaire lié aux sulfates. L'eau est conforme pour ce paramètre.

↳ Cl^- :

Les chlorures permettent de détecter une intrusion saline ou pollution ; limite algérienne 500 mg/L.

La concentration en chlorures est de 20 mg/L, indiquant l'absence d'intrusion saline ou de pollution chlorée. Ce chiffre est largement inférieur à la limite de 500 mg/L.

↳ NO_3^- :

Les nitrates surveillent les contaminations agricoles ou domestiques ; seuil maximal 50 mg/L.

Aucun nitrate n'a été détecté (0 mg/L), ce qui élimine le risque de pollution agricole ou domestique. Le résultat est très inférieur au seuil de 50 mg/L. La ressource est donc protégée vis-à-vis des nitrates.

↳ NO_2^- :

Les nitrites sont toxiques à faibles concentrations ; limite algérienne 0,1 mg/L.

Aucun nitrite n'a été trouvé (0 mg/L), valeur bien en dessous de la limite de 0,1 mg/L. L'absence de nitrites indique une sécurité sanitaire optimale.

Donc :

Tous les paramètres analysés respectent les normes algériennes de potabilité. L'eau est globalement conforme et apte à la consommation.

-Représentation graphique selon Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est pratique pour identifier rapidement le type du faciès chimique d'une eau souterraine. Il repose sur les concentrations des éléments majeurs, tracées sous forme de colonnes à échelles logarithmiques. Les valeurs apparaissent en mg/L au centre du graphique et en meq/L sur les côtés.

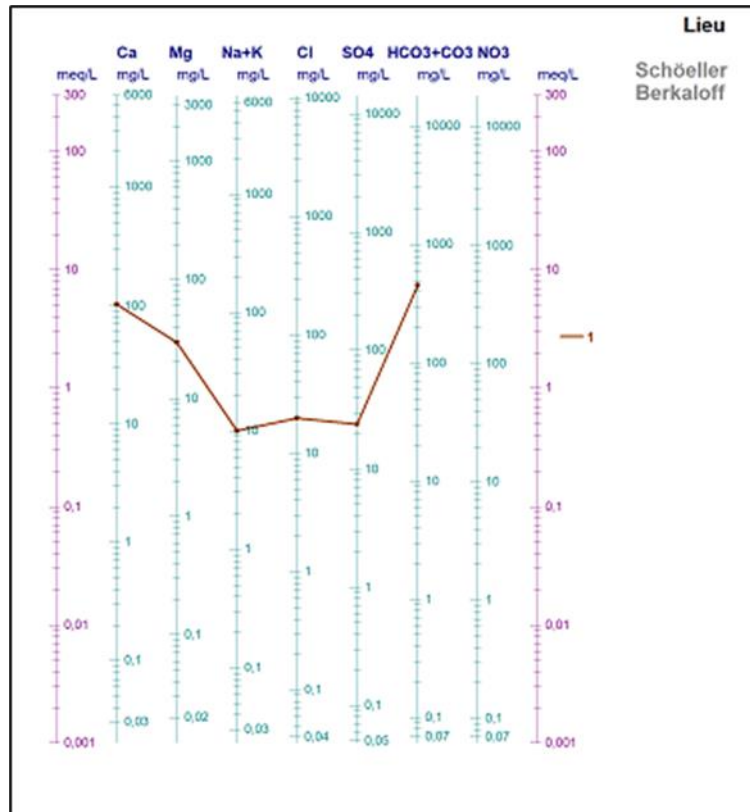


Figure 21 : Classification de l'eau selon Schoeller-Berkaloff.

L'interprétation des données visibles sur ce diagramme montre les formules caractéristiques suivantes :

Pour les anions : $r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}$

Pour les cations : $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$

Donc, le faciès chimique est **bicarbonaté calcique**.

-Le diagramme de Stabler :

Le diagramme de Stabler est un outil graphique pour visualiser la composition chimique d'un échantillon d'eau. Il permet de représenter clairement l'équilibre ionique entre les cations, chargés positivement, et les anions, chargés négativement.

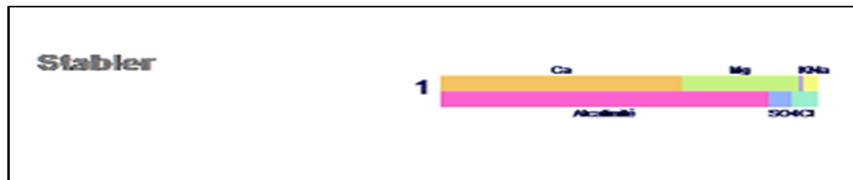


Figure 22 : Diagramme de Stabler.

La figure N°22, nous permet de conclure que cet échantillon présente un faciès chimique *bicarbonaté calcique*.

-Représentation graphique selon PIPER :

Le diagramme de Piper est un outil classique en hydrochimie pour afficher et comparer la composition chimique des eaux. Il se compose de deux triangles côte à côte : celui de gauche pour les cations principaux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$), et celui de droite pour les anions ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} et Cl^-). Dans chaque triangle, un point montre la répartition relative de ces ions dans l'échantillon d'eau. Au centre, un losange permet d'identifier le type chimique dominant de l'eau.

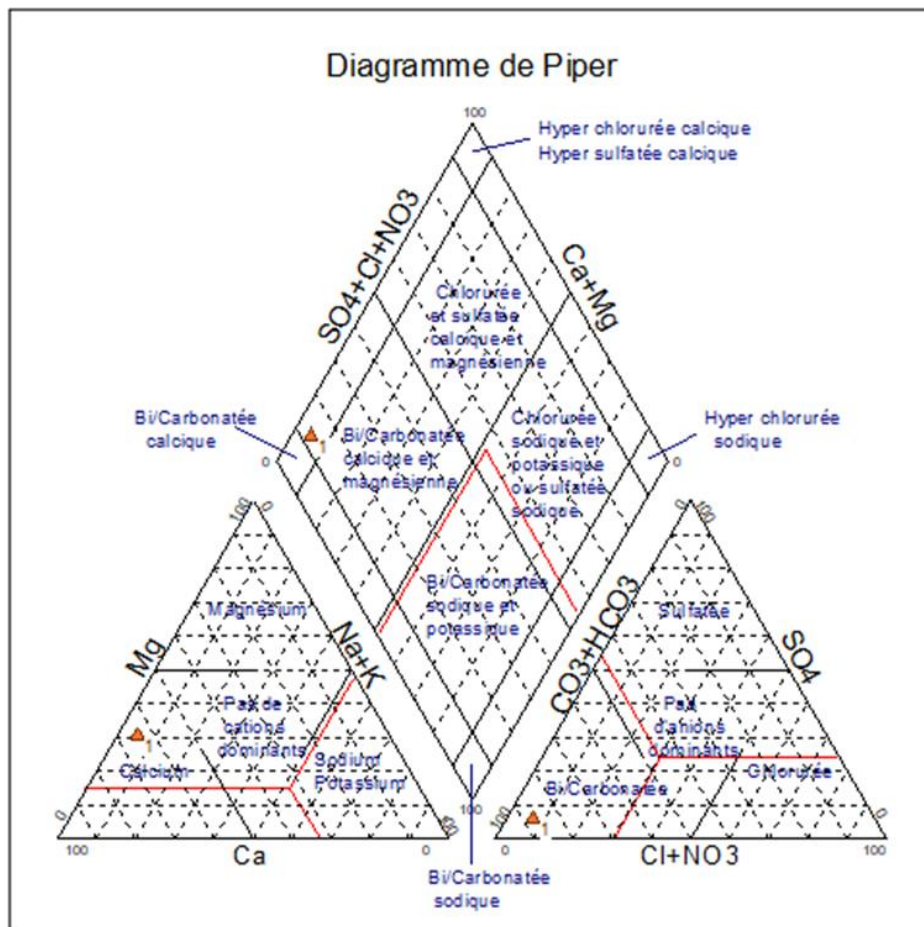


Figure 23 : Diagramme de Piper.

L'examen du diagramme de Piper révèle que l'échantillon d'eau analysé (forage El Kalaa) est de type *bicarbonaté calcique et magnésien*.

b. Aptitude à l'irrigation :

Afin de déterminer si l'eau était adaptée à l'irrigation durant la phase d'étude, nous avons mobilisé différents indicateurs et outils graphiques, notamment :

↳ L'indice de Kelly's Ratio (KR) :

Fondé sur les travaux de Paliwal (1967), cet indice permet de juger la qualité de l'eau en comparant le taux de Na^+ à celui de Ca^{2+} et Mg^{2+} . L'excès de sodium étant un facteur limitant pour l'irrigation, son évaluation repose sur l'équation suivante :

$$KR = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$$

Si : $KR < 1$: l'eau est bonne pour l'irrigation.

Si : $KR > 1$: l'eau est mauvaise pour l'irrigation.

L'analyse montre que le rapport de Kelly's Ratio est de 0,04. Puisque ce résultat est inférieur à 1, nous pouvons conclure que la qualité de l'eau est satisfaisante pour l'arrosage des cultures.

↳ Pourcentage du sodium (Na^+) et classification des eaux par la méthode de Wilcox :

La qualité des eaux d'irrigation repose essentiellement sur leur salinité totale et leur taux de sodium comparé à l'ensemble des sels en solution (Wilcox, 1955).

$$\text{Na}^+ = \frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \times 100\%$$

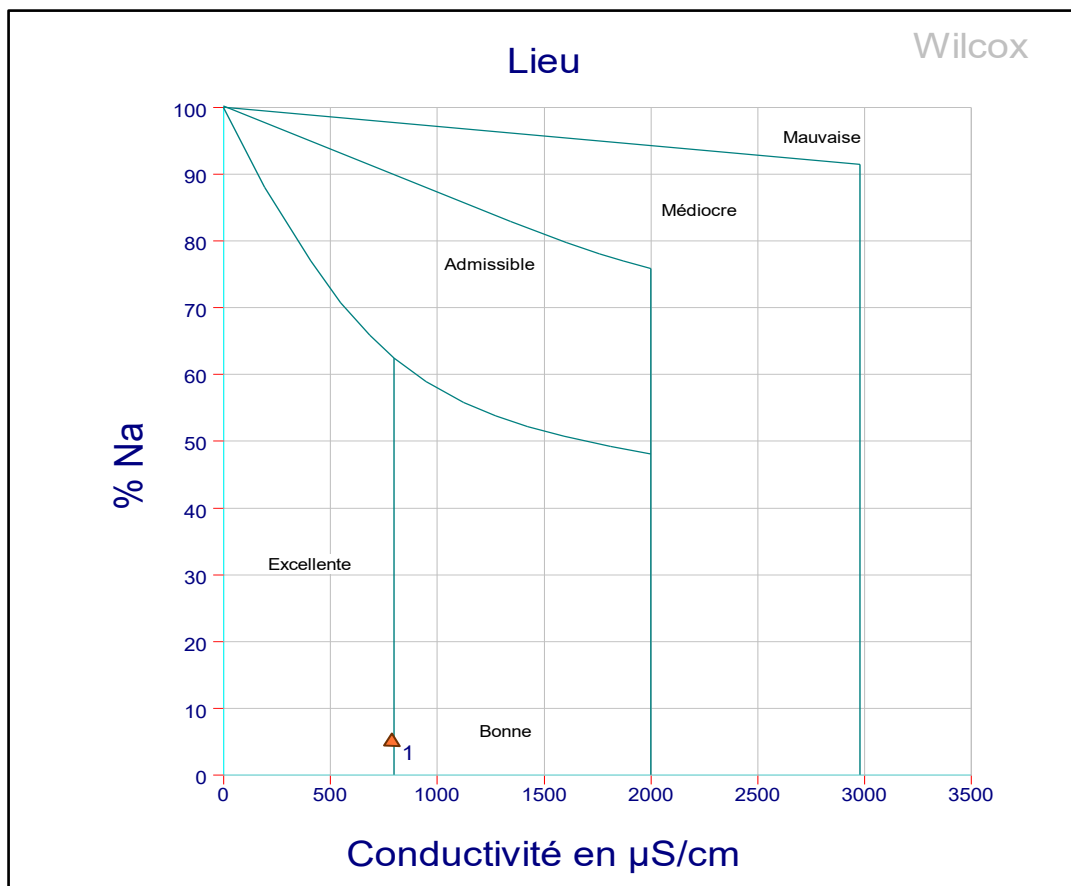
$\text{Na}^+ = 7\%$. Lorsque la proportion de sodium est inférieure à 20 %, l'eau est classée dans la catégorie "très bonne" selon le tableau 01, alors la qualité de l'eau est jugée optimale pour l'irrigation.

Tableau 4 : Classification des eaux d'irrigation, selon le pourcentage en sodium.

Classe	Eau très bonne	Eau bonne	Eau admissible	Eau médiocre	Eau mauvaise
Na ⁺ (%)	< 20	20-40	40-60	60-80	> 80

👉 **Le diagramme de Wilcox :**

Pour évaluer la qualité des eaux, ce diagramme croise les valeurs du SAR et de la conductivité électrique. Cette approche définit cinq niveaux d'aptitude à l'irrigation, allant d'une qualité « excellente » à « mauvaise ».

**Figure 24 : Diagramme de Wilcox.**

Sur le graphique, le repère (triangle orange) correspond à une eau excellente pour l'irrigation.

👉 Le diagramme de Riverside :

Le diagramme de Riverside sert pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation qui croise deux paramètres essentiels : la salinité et le risque de sodicité, il aide à décider si un point d'eau est approprié pour l'irrigation : il permet d'anticiper les risques liés à l'accumulation de sels et à l'excès de sodium qui détériore la porosité et la structure des sols.

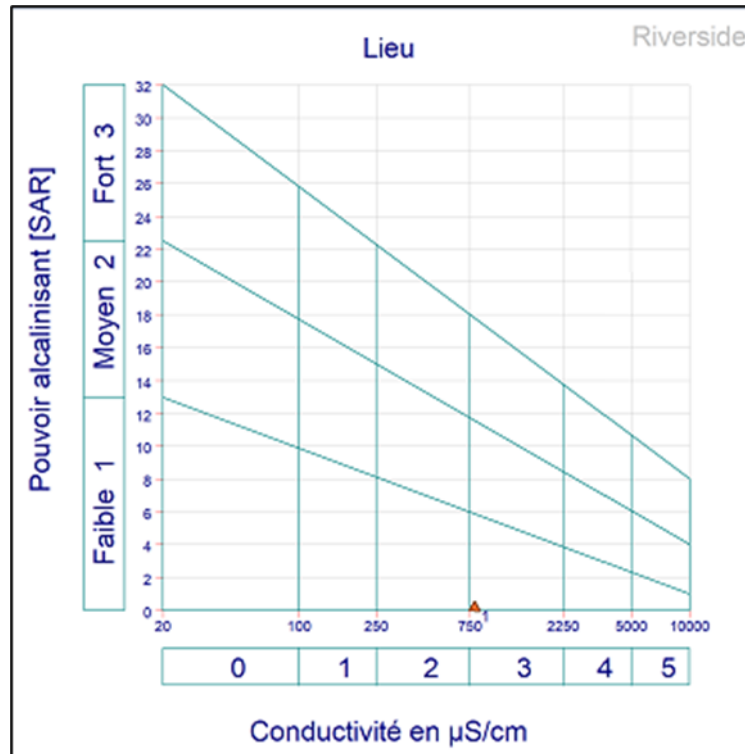


Figure 25 : Diagramme de Riverside.

Description des axes :

- Abscisse : Conductivité électrique (CE) : exprimée en $\mu\text{S/cm}$, la CE reflète la concentration en sels dissous. Une conductivité élevée signale une eau saline, susceptible de provoquer un stress osmotique chez les plantes et de gêner leur absorption d'eau. Le diagramme classe la CE en plusieurs catégories de salinité (de 0 à 5).
- Ordonnée : SAR (Sodium Adsorption Ratio) : ce ratio est décrit comme « pouvoir alcalinisant », évalue la tendance du sodium à remplacer le calcium et le magnésium du sol. Un SAR élevé indique un risque de détérioration de la structure du sol (compaction, baisse de la perméabilité et difficultés pour les racines).

Le sodium est un métal alcalin qui exerce une influence majeure sur la qualité de l'eau d'arrosage, car il conditionne directement la capacité du sol à laisser filtrer et circuler l'eau.

Le SAR, sera calculé par la formule suivante :

$$S.A.R. = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

S.A.R. < 10 : eau excellente, à faible danger d'alcalinisation des sols.

10 < S.A.R. < 18 : eau de bonne qualité, danger d'alcalinisation assez appréciable.

18 < S.A.R. < 26 : eau convenable, danger d'alcalinisation important.

S.A.R. > 26 : eau de qualité médiocre, danger de forte alcalinisation.

Analyse du point observé :

- L'échantillon est placé dans la classe C3-S1 : qualité admissible pour l'irrigation. En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le forage d'El Kalaa, implanté dans la commune de Béni Bahdel est caractérisé par une pluviométrie annuelle de 413.3mm et une température moyenne de 17.7°C et s'inscrit dans un contexte géologique, structural et hydrogéologique complexe, dominé par les dolomies jurassiques karstifiées et les travertins associés. Les investigations menées par le CTH, combinées aux diagraphies et aux analyses géo-structurales, ont permis d'identifier un site d'implantation favorable et de concevoir un ouvrage adapté aux contraintes du milieu.

La méthode de réalisation, articulant une phase de reconnaissance par battage, une complétion par rotary, des diagraphies détaillées et un équipement en tubage plein, crépines et massif filtrant, offre un cadre technique robuste pour l'exploitation de l'aquifère. L'ouvrage ainsi conçu est en mesure de contribuer significativement à la sécurisation de l'alimentation en eau de la localité d'El Kalaa et à la valorisation des ressources en eau de la commune de Béni Bahdel, à condition que son exploitation soit réalisée de manière raisonnée et suivie.

En croisant les perspectives de l'hydrogéologue, de l'ingénieur de forage et du responsable de l'AEP (gestionnaire), il apparaît que ce forage ne doit pas être considéré comme une solution isolée, mais comme un élément d'un système hydrique intégré, où la connaissance des aquifères, le dimensionnement technique et la gouvernance de l'eau sont étroitement liés. Ce mémoire met ainsi en évidence l'importance d'une approche pluridisciplinaire pour garantir une exploitation durable des ressources souterraines dans les régions de montagne, soumises à la variabilité climatique et à la pression croissante des usages.

Recommandation technique et de gestion :

La gestion durable du forage d'El Kalaa et de la nappe de Béni Bahdel appelle une série de mesures intégrées, consistant

- à poursuivre et renforcer le suivi hydrogéologique de la zone en instrumentant le forage et les principales sources (suivi piézométrique, mesures de débit et de qualité),
- à ajuster le débit d'exploitation en fonction des résultats des essais de pompage et des observations à long terme de façon à ne pas dépasser un rabattement critique,
- à programmer des opérations régulières de développement et de nettoyage (air-lift, traitements chimiques maîtrisés) pour maintenir la productivité et limiter l'encrassement des crépines,

- à intégrer le forage dans un schéma directeur de l'eau à l'échelle de la commune en articulation avec le barrage, les sources et les autres captages, tout en promouvant une gestion participative associant usagers, élus, services techniques et experts.

Compte tenu de la valeur stratégique de l'ouvrage pour l'AEP et de la fragilité de la nappe karstique, il est en outre recommandé de sanctuariser la tête de puits par la mise en place immédiate d'une zone de protection de 10 mètres strictement clôturée, de délimiter un périmètre tampon de protection rapprochée de plusieurs centaines de mètres en fonction des axes d'écoulement préférentiels afin de restreindre les installations à risque (fosses septiques, dépôts d'hydrocarbures, activités mécaniques), d'inscrire ces périmètres dans une expertise hydrogéologique approfondie appuyée sur la modélisation numérique (trajectoires de particules, temps de séjour) pour ajuster les rayons de protection, d'instaurer un protocole de vigilance sanitaire continue par analyses périodiques (nitrates, bactéries, indicateurs de pollution organique) et d'impliquer durablement les acteurs locaux et les citoyens afin de consolider la compréhension et l'appropriation des enjeux de protection de la ressource.

Bibliographie

I. Bibliographie :

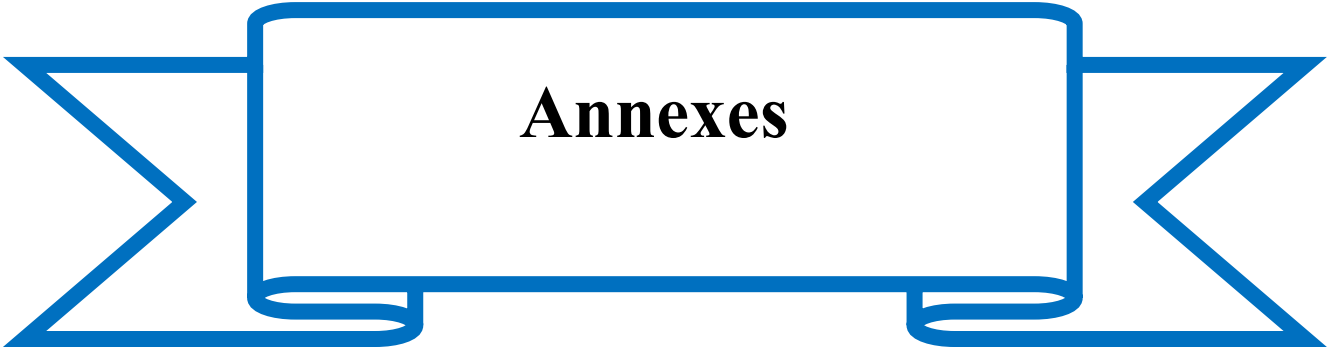
La bibliographie concerne les références citées dans le texte et consultées.

- BALLESIO, R.; BODERGAT, Anne-Marie; ALMÉRAS, Yves. Géologie 1983 (rapport annuel). Travaux et Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, 1983, 91.1: 3-133.
- BEDOU, F., BENCHAABANE, H. R., & SAID, R. (2021) : CONTRIBUTION À L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE DU DJEBEL ZACCAR (ASPECTS HYDROLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE).
- BENEST, M., BENSALAH, M., BOUABDELLAH, H., & Ouardas, T. (1999). La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine Tlemcénien (Avant-Pays Tellien d'Algérie Occidentale): stratigraphie, paléoenvironnements, dynamique sédimentaire et tectogenèse alpine. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, 10(2), 127-157.
- BENSALOULA, F., BENSALAH, M., & ADJIM, M. (2005). Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Larhyss Journal, 5(1), 7-15.
- CASTANY, G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Paris : Dunod.
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M. R. (1983). Hidrología subterránea (2 vols.). Barcelona : Omega.
- DJELLOULI, F., BOUANANI, A., & BABA-HAMED, K. (2013). MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR UNE APPROCHE GLOBALE: CAS DU BASSIN VERSANT D'OUED LOUZA (OUED EL HAMMAM-MACTAA-NW ALGERIEN).
- DRISCOLL, F. G. (1986). Groundwater and Wells (2nd ed.). St. Paul, MN : Johnson Screens.
- DARCY, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris : Dalmont.
- FREEZE, R. A., & CHERRY, J. A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- FETTER, C. W. (2001). Applied Hydrogeology (4th ed.). Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall.
- GHENIM, A. N., MEGNOUNIF, A., SEDDINI, A., & TERFOUS, A. (2010). Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'oued Tafna à Béni Bahdel (Nord Ouest algérien). Sécheresse, 21(2), 115-120.
- HEATH, R. C. (1998). Basic ground-water hydrology (Vol. 2220). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- JACOB, CE (1947). Essai de rabattement pour déterminer le rayon effectif d'un puits artésien. Transactions of the American Society of Civil Engineers , 112 (1), 1047-1064 .
- KEYS, W. S. (1990). Borehole Geophysics Applied to Ground-Water Investigations. USGS Techniques of Water-Resources Investigations, Book 2, Chapter E2.
- KRUSEMAN, G. P., DE RIDDER, N. A., & VERWEIJ, J. M. (1970). Analysis and evaluation of pumping test data (Vol. 11, p. 200). Wageningen, The Netherlands: International institute for land reclamation and improvement.
- OUELLABI, M., & MOSSA, L. (2023). Département de forage et mécanique des chantiers pétroliers. Université de Oued Smar (ressource pédagogique interne, non paginée). (Utilisée pour les masses-tiges et la garniture de forage.)
- SACI, D., BENSALOULA, F ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DE LA REGION DE TLEMCEEN.
- TOURE, Y , M. A. (2016). Analyse des données de la mission Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) sur des bassins versants choisis au Canada pour la caractérisation des eaux souterraines.
- THIEM, G. (1906). Hydrologische Methoden: Leipzig. JM Gebhart, 56.

- YEBDRI., L. Etude de la vulnérabilité des eaux du bassin versant de la Tafna (Algérie, Nord Occidentale). 2023. PhD Thesis. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.

Webographie :

- DB-City. (s. d.). Beni Bahdel, Beni Snous, Tlemcen, Algérie : Toutes les informations sur la ville. Consulté le 30 avril 2026, à partir de DB-City – Beni Bahdel



Annexes

II. Annexes :

Tableau 1 : Normes de potabilité (JORA 2011 et 2014).

Paramètre	Unité	Valeurs limites
pH	/	6,5 et 9
Conductivité	µs/cm	2800
Nitrite	Mg/L	
Nitrate	Mg/L	50
Sulfate	Mg/L	400
Chlorure	Mg/L	500
Potassium	Mg/L	12
Sodium	Mg/L	200
Magnésien	Mg/L	150
Calcium	Mg/L	200

Tableau 2 : Bulletin des analyses de forage EL Kalaa.

Cond	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
790	7.16	451	20.00	0.00	0.00	24.00	102.70	29.52	8.00	2.00

Tableau 3 : Classification des eaux d'irrigation d'après Servent 1975.

Degré	Qualité	Classe	Description
1	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels, sur sol s ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au Sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux).
3	Admissible	C3-S1	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C4-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables ,bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel



Photo 1 : Préparation d'un échantillon rocheux pour l'observation microscopique au laboratoire



Photo 2 : la calcimètre



Photo 3 : forage EL Kalaa

الملخص

مساهمة في تحليل تقنية اختيار موقع وإنجاز وتجهيز بئر مائي بمنطقة بني بهدل، دائرة بني سنوس، ولاية تلمسان (الشمال الغربي الجزائري)

يتناول هذا العمل دراسة إنجاز بئر مائي يقع في منطقة بني بهدل، وتحديدًا بئر القلعة.

يتمثل الهدف الرئيسي في تحليل مختلف مراحل إنجاز البئر، وكذلك التجهيزات المستعملة أثناء عمليات الحفر. وتشمل الدراسة وصفًا مفصلاً لمراحل الحفر، بدءًا من تحضير الموقع وصولاً إلى مرحلة الاستغلال، مرورًا بالتقنيات والأدوات المستخدمة. كما تم إيلاء اهتمام خاص لتقييم جودة المياه الجوفية من خلال تحاليل فيزيائية-كيميائية.

أظهرت النتائج المتحصلة عليها أن مياه البئر تتميز بخصائص مطابقة للمعايير، مما يجعلها صالحة للاستهلاك البشري (صالحة للشرب) وكذلك للري الزراعي.

تبرز هذه الدراسة أهمية الآبار المائية في تأمين الموارد المائية الجوفية ودورها الأساسي في التنمية المحلية.

الكلمات المفتاحية: بني بهدل، بئر مائي، المياه الجوفية، الصلاحية للشرب، الري، الحماية.

Résumé

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA TECHNIQUE D'IMPLANTATION, DE REALISATION ET DE EQUIPEMENT DU FORAGE DE BENI BAHDEL DAIRA DE BENI SENOUS WILAYA DE TLEMCEN (NORD-OUEST ALGERIEN)

Ce travail Porte sur l'étude de réalisation d'un forage hydraulique, situé dans la région de Beni Bahdel, précisément le forage d'El Kalaa.

L'objectif principal est d'analyser les différentes étapes de réalisation du forage, ainsi que les équipements utilisés lors des opérations de foration. L'étude comprend une description détaillée des étapes de foration, depuis la préparation du site jusqu'à la mise en exploitation, en passant par les techniques et outils employés. Une attention particulière est accordée à l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à travers des analyses physico-chimiques.

Les résultats obtenus montrent que l'eau du forage présente des caractéristiques conformes aux normes, ce qui la rend adaptée à la consommation humaine (potabilité) ainsi qu'à l'irrigation agricole.

Cette étude met en évidence l'importance des forages hydrauliques dans la valorisation des ressources en eau souterraine et leur rôle essentiel dans le développement local.

Mots-clés : Beni Bahdel, Forage hydraulique, eaux souterraines, potabilité, irrigation, protection

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF THE TECHNIQUE OF SITING, CONSTRUCTION, AND EQUIPMENT OF THE BENI BAHDEL BOREHOLE, BENI SNOUS DISTRICT, TLEMCEN PROVINCE (NORTH-WESTERN ALGERIA)

This work focuses on the study of the construction of a hydraulic borehole located in the Beni Bahdel region, specifically the El Kalaa borehole.

The main objective is to analyze the different stages of borehole construction, as well as the equipment used during drilling operations. The study includes a detailed description of the drilling stages, from site preparation to commissioning, including the techniques and tools employed. Particular attention is given to the evaluation of groundwater quality through physico-chemical analyses.

The obtained results show that the borehole water presents characteristics that comply with standards, making it suitable for human consumption (potable) as well as for agricultural irrigation.

This study highlights the importance of hydraulic boreholes in the valorization of groundwater resources and their essential role in local development.

Keywords : Beni Bahdel, hydraulic borehole, groundwater, potability, irrigation, protection.

