

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



**Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd**  
**Institut des Sciences de la Terre et de l'Univers**  
**Département de Géologie**



**Thèse**

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**Doctorat LMD 3<sup>ème</sup> cycle en Géologie**  
**Spécialité : Hydrogéologie**

*Géométrie et caractérisation hydrochimique d'un système aquifère en zone semi-aride. Application à l'aquifère de Hammam Bradaa, région de Guelma, Algérie nord orientale.*

Présentée par :

**KHADRI Rahma**

**Devant le jury :**

DRIAS Tarek	Prof	Univ - Batna 2	Président
KHEDIDJA Abdelhamid	Prof	Univ - Batna 2	Encadreur
BRINIS Nafaa	Prof	Univ - Batna 2	Co- Encadreur
BOUGHERIRA Nabil	Prof	Univ - Annaba	Examineur
GHRIEB Lassaad	Prof	Univ - Guelma	Examineur

**Année universitaire 2023-2024**

## *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail de thèse de recherche :

A mes parents pour votre soutien moral inébranlable, qui m'a ouvert les yeux sur une vie bien au-delà des formules mathématiques. Votre intelligence, votre confiance en moi, votre tendresse, vos prières et encouragements, ainsi que votre amour constant, sont les piliers qui me soutiennent et m'orientent chaque jour. Votre influence dépasse largement le cadre de cette thèse. Grâce à vous, j'ai compris que la vie est une aventure enrichissante, pleine de leçons et d'expériences, sculptée par la sagesse, la confiance et un amour inconditionnel. Un immense merci pour avoir façonné la personne que je suis aujourd'hui. Mon amour pour vous est aussi profond que sincère.

A mon cher frère et chères sœurs qui ont partagé ce voyage avec moi.

A mon frère Amin et sa femme Mona.

A ma sœur Nada et son mari Djamel.

A ma sœur Hiba et son mari Sofiane.

À la personne la plus chère et la plus précieuse de mon cœur, merci d'être avec moi et pour tous les efforts et tous les conseils que vous m'avez donnés.

Ainsi qu'à mes neveux et nièces Djihad, Iskander Abderrahmane, Chihab Eddine et Rihem qui ont apporté joie et inspiration dans chaque étape.

Ma famille, votre amour, votre soutien et votre compréhension ont été les forces motrices qui ont rendu cette réalisation possible.

Merci d'être pour moi ma source constante d'encouragement et de bonheur.

Une pensée émue conclut cette dédicace en mémoire de mon oncle Khadri Djamel, qui n'a malheureusement pas pu voir l'aboutissement de mon travail. J'ai la certitude qu'il aurait été extrêmement fier de moi, et je dédie ce succès à son esprit inspirant et bienveillant. Son absence est palpable, mais je porte en moi le souvenir de son soutien et de son encouragement constant. Ce travail est, en partie, le reflet de l'influence positive qu'il a eue sur ma vie. Merci, oncle Khadri Djamel, pour votre impact durable.

## *Remerciements*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **Allah** le tout-puissant pour m'avoir accordé la patience, l'énergie et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sa grâce infinie a été une source de force constante tout au long de cette aventure de recherche académique.

À mes parents, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance pour votre soutien moral, votre confiance, votre tendresse, vos prières, vos encouragements, et votre amour constant sont autant de forces qui me portent et me guident chaque jour. Merci infiniment à tous les deux d'avoir contribué à forger la personne que je suis aujourd'hui. Je vous aime du plus profond de mon cœur.

À mon directeur de thèse Mr Khedidja Abdelhamid, professeur à l'université de Mostefa Ben Boulaid Batna 2, qui a accepté d'encadrer cette thèse, je suis reconnaissante pour vos conseils éclairés et votre guidance qui ont façonné cette recherche du début et à la fin de ce travail.

Je dois énormément remercier Mr Brinis Nafaa, professeur à l'université de Mostefa Ben Boulaid, Batna2 d'avoir accepté d'être Co-encadreur de thèse, pour son appui et sa disponibilité, ses conseils précieux et son engagement inébranlable tout au long de mon parcours de recherche.

Je souhaite également exprimer mes remerciements chaleureux à tous les membres du jury pour leurs expertises et leurs commentaires constructifs sur mon travail. Leurs contributions ont grandement enrichi ma thèse, et je suis reconnaissante de l'attention et de l'énergie qu'ils ont consacrés à évaluer mon travail. Merci à chacun des membres du jury pour leurs précieuses contributions à cette étape importante de mon parcours académique.

- ✚ Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Drias Tarek pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse. Sa présence et son engagement dans cette fonction sont une source d'inspiration, et je suis honorée de bénéficier de son expertise et de sa guidance. Merci, Professeur Drias, pour avoir accepté ce rôle important dans l'évaluation de ma thèse.
- ✚ Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Bougherira Nabil et au Professeur Gherieb Lasaad pour avoir acceptés d'examiner ma thèse. C'est pour moi un grand honneur de bénéficier de leurs expertises et de leurs conseils dans cette étape

cruciale de mon parcours académique. Leurs contributions et leurs évaluations seront inestimables, et je suis reconnaissante de cette opportunité. Merci infiniment.

Je tiens à exprimer ma gratitude infinie envers le Dr. Brahmia Ali de l'Université de 08 Mai 45, Guelma, pour son précieux soutien, ses encouragements, son aide, et ses conseils tout au long du processus de rédaction de mes articles et de ma thèse. Sa contribution a été essentielle, et je suis reconnaissante de pouvoir bénéficier de son expertise. Merci infiniment, Dr. Brahmia Ali, pour votre générosité et votre engagement dans mon parcours.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance au Professeur Boubaya Djamel de l'Université de Tébessa pour sa rigueur et son expérience scientifique exceptionnelles. Son engagement et ses conseils ont grandement contribué à l'aboutissement du deuxième article de ma thèse. Merci infiniment, pour votre précieuse contribution à mon travail.

Je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse et plus particulièrement :

- ✓ Le personnel du Laboratoire mobilisation et gestion des ressources en eau (LMGRE), Batna2.
- ✓ Les enseignants de l'institut des sciences de la terre et de l'univers de l'université de Batna2.
- ✓ A.S Moulla et Mr Cherchali pour les analyses isotopes.
- ✓ Le personnel de l'Algérienne Des Eaux (ADE Guelma), notamment mon cher frère Khadri Amin Chef de centre de la région de Héliopolis, pour leur aide et encouragement.
- ✓ Le personnel de la Direction de Service Agricole (DSA Guelma) notamment Mr Douakha
- ✓ Le personnel du Laboratoire de l'Algérienne Des Eaux de la station de traitement de Hammam Débagh notamment Mr Amraoui Salah.
- ✓ Le personnel de la Conservation des forêts Guelma, notamment ma chère sœur Khadri Hiba inspectrice des forêts, pour leur aide et informations précieuses durant les sorties de terrain.
- ✓ Je ne pourrai oublier l'aide précieuse de Madi Lamia et Maizi Tahar de la Direction des ressources en eau Guelma.
- ✓ Mr Harrat Abdelhamid et toute l'équipes de travail Mr Madi Salah, Chouini Tarek et Mahieddine Fatima Zohra du Bureau d'étude dans la construction hydraulique pour leurs aides et orientations durant cette recherche.

- ✓ Je remercie le doctorant Mekkaoui Hafid, qui m'a beaucoup aidé pour réaliser ce travail de recherche.
- ✓ Mr Drissi Badreddine de l'Agence des Bassins Hydrographiques (ABH) Annaba.
- ✓ Mr Deffous Mourad, Mr Benmachiche Kamel de la Direction des ressources en eau Annaba pour leurs aides et documentation nécessaire afin de réaliser cette thèse.
- ✓ Les responsables de la station météorologique de Belkheir et Hammam Débagh pour les données climatiques.

Enfin, mes remerciements s'étendent à toutes les personnes qui, bien que non mentionnées nommément, ont contribué de manière significative à l'avancement de ma recherche. Je tiens à exprimer ma gratitude, mon respect et mes remerciements sincères envers chacune d'entre elles. Leur intervention a joué un rôle crucial dans le développement de ce travail, et je leur suis reconnaissante pour leur précieuse contribution.

Géométrie et caractérisation hydrochimique d'un système aquifère en zone semi-aride. Application à l'aquifère de Hammam Bradaa, région de Guelma, Algérie nord orientale.

## Résumé

La recherche développée dans cette thèse se concentre sur la région de Guelma au Nord-Est de l'Algérie, analysant la géologie, l'hydrogéologie, et la qualité des eaux souterraines, en mettant un accent particulier sur le champ captant de Hammam Bradaa qui est un maillon important dans le système d'alimentation en eau potable de la ville de Guelma et aussi la ville de Annaba. Les eaux sont captées dans un aquifère constitué des calcaires néritiques qui forment le Djebel Débagh (Sud-Est de Guelma). Il s'agit de structures profondes de système de grabens et de horsts dont l'identification a été possible en utilisant plusieurs méthodes de prospection électriques et de gravimétrique. Géologiquement, elle fait partie du domaine externe des Maghrébides, présentant une variété de terrains du Trias au Quaternaire.

L'objectif principal de cette recherche est d'arriver à dessiner une image synthétique de la géométrie de l'aquifère très affecté par la tectonique, de préciser les structures et la répartition des formations géologiques du sous-sol en utilisant l'outil géophysique ainsi que la caractérisation hydrochimique des eaux étudiées et l'identification d'une éventuelle connexion entre la nappe du néritique et superficielle.

Les résultats obtenus sont concluants et indiquent que la région d'étude présente un bassin subsident limitée par des failles d'une orientation Sud-Ouest, Nord-Est, formant un ensemble complexe de Horsts et de Grabens. La détection de contours multi-échelles des données de gravité, connue sous le nom de "worms", a permis de mettre en évidence les principales linéaments à travers la zone d'étude qui peuvent contribuer à la recharge de l'aquifère de Hammam Bradaa. L'inversion gravimétrique 3D a permis de cartographier la configuration spatiale des calcaires qui se caractérisent par un contraste de gravité positif par rapport aux roches hôtes. Une coupe de densité verticale extraite de l'inversion gravimétrique 3D, s'étendant sur une longueur de 14 km du nord au sud, révèle une épaisseur significative de calcaire sous Hammam Bradaa, suggérant un fort potentiel en ressources en eau souterraine. La section géo-électrique, construite à partir de l'interprétation des données du SEV et calibrée avec la lithologie des forages, a permis de cartographier la profondeur jusqu'au sommet du calcaire sous les alluvions conductrices et les marnes.

Par ailleurs, la caractérisation hydrochimique des nappes profonde et superficielle révèle des facies chimiques distincts ; bicarbonaté à 100% dans la première et essentiellement évaporitique avec 61% dans la deuxième, avec des indices de qualité dépassant parfois les normes de l'OMS, indiquant une possible pollution agricole. Les eaux sont bonnes à la consommation humaine et à l'irrigation, bien que des préoccupations liées aux teneurs de nitrates soient soulevées. Le suivi de l'état des eaux par rapport à la pollution a mis en évidence des traces d'une contamination par  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PO}_4$  dans la nappe superficielle. Les résultats indiquent que cette contamination ne touche pas la nappe profonde. Une tentative de vérification d'une éventuelle connexion entre les deux nappes, en utilisant plusieurs outils, montre une alimentation du bas vers le haut notamment en période de basses eaux. Les données isotopiques confirment une origine commune des eaux des deux nappes, liée aux précipitations de la mer Méditerranée.

**Mot clés :** Hammam Bradaa, géo électrique, indice de qualité, isotope, relation entre nappes.

Geometry and hydrochemical characterization of an aquifer system in a semi-arid zone. Application to the Hammam Bradaa aquifer, Guelma region, northeastern Algeria.

## Abstract

The research developed in this thesis focuses on the Guelma region in Northeast Algeria, analyzing the geology, hydrogeology, and the quality of groundwater. Special emphasis is placed on the Hammam Bradaa catchment area, an important link in the potable water supply system for the city of Guelma and surrounding regions. The waters are captured in an aquifer consisting of neritic limestones forming the Djebel Débagh (Southeast of Guelma). These are deep structures of graben and horst systems whose identification was possible using various electrical prospecting and gravimetric methods. Geologically, it is part of the external domain of the Maghrebides, presenting a variety of terrains from the Triassic to the Quaternary.

The main objective of this research is to draw a synthetic image of the geometry of the aquifer heavily affected by tectonics, to specify the structures and distribution of geological formations of the subsoil using geophysical tools, as well as the hydrochemical characterization of the studied waters and the identification of a possible connection between the neritic and superficial aquifers.

The results obtained are conclusive and indicate that the study region presents a subsiding basin limited by faults of a Southwest-Northeast orientation, forming a complex set of Horsts and Grabens. The detection of multi-scale contours of gravity data known as 'worms' has highlighted the main lineaments throughout the study area that may contribute to the recharge of the Hammam Bradaa aquifer. 3D gravimetric inversion has mapped the spatial configuration of the limestones, characterized by a positive gravity contrast relative to the host rocks. A vertical density section extracted from the 3D gravimetric inversion extending from north to south reveals a significant thickness of limestone under Hammam Bradaa, suggesting a strong potential for groundwater resources. The geo-electrical section constructed from the interpretation of VES data and calibrated with drilling lithology has mapped the depth to the top of the limestone under conductive alluvium and marls.

Furthermore, the hydrochemical characterization of the deep and superficial aquifers reveals distinct chemical facies; bicarbonate in the former and primarily evaporitic in the latter, with quality indices sometimes exceeding WHO standards, indicating possible agricultural pollution. The waters are suitable for human consumption and irrigation, although concerns related to nitrate levels are raised. Monitoring the state of the waters concerning pollution has revealed traces of contamination by NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub> in the superficial aquifer. The results indicate that this contamination does not affect the deep aquifer. An attempt to verify a possible connection between the two aquifers using various tools shows a bottom-up feeding, particularly in low water periods. Isotopic data confirm a common origin of the waters from both aquifers linked to Mediterranean precipitation.

Keywords: Hammam Bradaa, geo-electric, quality index, isotope, relation between aquifers.

يركز البحث الذي تم تطويره في هذه الأطروحة على منطقة قالمة في شمال شرق الجزائر، حيث يقوم بتحليل الجيولوجيا والهيدروجيولوجيا وجودة المياه الجوفية، مع التركيز بشكل خاص على حقل بئر حمام برادع الذي يعد حلقة وصل مهمة في نظام إمدادات مياه الشرب في الجزائر لمدينتي قالمة وعنابة. يتم احتجاز المياه في طبقة مياه جوفية مكونة من الحجر الجيري النبريتي الذي يشكل جبل الدباغ (جنوب شرق قالمة). هذه هي الهياكل العميقة لأنظمة الجرافين والهورست التي كان من الممكن التعرف عليها باستخدام العديد من طرق التنقيب الكهربائية والجاذبية. من الناحية الجيولوجية، فهي جزء من المجال الخارجي للسلسلة المغاربية (Maghrébides)، وتقدم مجموعة متنوعة من التضاريس من العصر الترياسي إلى العصر الرباعي.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو التمكن من رسم صورة تركيبية لهندسة طبقة المياه الجوفية المتأثرة بشدة بالتكتونيات، لتحديد تراكيب وتوزيع التكوينات الجيولوجية لباطن الأرض باستخدام الأداة الجيوفيزيائية وكذلك التوصيف الهيدروكيميائي. للمياه المدروسة وتحديد العلاقة المحتملة بين طبقات المياه الجوفية العميقة والسطحية.

النتائج التي تم الحصول عليها قاطعة وتشير إلى أن منطقة الدراسة تمثل حوضًا هبوطيًا محدودًا بالفوالق ذات اتجاه جنوبي غربي وشمال شرقي، مما يشكل مجموعة معقدة من هورستس وجرابينز. وقد سلط الكشف لبيانات الجاذبية، عبر منطقة الدراسة التي يمكن أن تساهم في إعادة تغذية طبقة المياه الجوفية في حمام برادع، حيث أتاح انعكاس الجاذبية ثلاثي الأبعاد إمكانية رسم خريطة للتكوين المكاني للأحجار الجيرية التي تتميز بتباين الجاذبية الإيجابي مقارنة بالصخور المضيفة. ويكشف قسم الكثافة العمودية المستخرج من انعكاس الجاذبية ثلاثي الأبعاد، والذي يمتد على طول 14 كيلومترًا من الشمال إلى الجنوب، عن سمك كبير من الحجر الجيري أسفل حمام برادع، مما يشير إلى وجود إمكانات قوية لموارد المياه الجوفية. إن القسم الجيوكهربائي، الذي تم إنشاؤه من خلال تفسير بيانات SEV ومعايرته باستخدام الصخور الخاصة بالآبار، جعل من الممكن رسم خريطة للعمق إلى أعلى الحجر الجيري أسفل الطمي والغرين.

علاوة على ذلك، يكشف التوصيف الهيدروكيميائي لطبقات المياه الجوفية العميقة والسطحية عن سحنات كيميائية متميزة؛ 100% بيكربونات في الأولى ومتبخرة بشكل أساسي مع 61% في الثانية، مع تجاوز مؤشرات الجودة في بعض الأحيان معايير منظمة الصحة العالمية، مما يشير إلى احتمال حدوث تلوث زراعي. المياه مناسبة للاستهلاك البشري والري، على الرغم من وجود مخاوف بشأن مستويات النترات. كشفت مراقبة حالة المياه فيما يتعلق بالتلوث عن آثار تلوث بـ NO<sub>3</sub>، NO<sub>2</sub>، PO<sub>4</sub> في منسوب المياه السطحية. وتشير النتائج إلى أن هذا التلوث لا يؤثر على منسوب المياه العميقة. وتظهر محاولة التحقق من وجود اتصال محتمل بين الطبقتين، باستخدام عدة أدوات، إمدادا من الأسفل إلى الأعلى، خاصة خلال فترات انخفاض المياه، وتؤكد البيانات الإشعاعية وجود أصل مشترك لمياه الطبقتين، مرتبط ب هطول الأمطار من البحر الأبيض المتوسط.

الكلمات المفتاحية: حمام برادع، الجيوكهربائية، مؤشر الجودة، الإشعاع، العلاقة بين الطبقات.

## Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
المخلص	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
Introduction générale	01

### Chapitre I : Cadre général

#### I. Introduction.

I.1. Situation géographique de la zone d'étude.	06
I.2. Géomorphologie.	07
I.2.1. Les montagnes.	07
I.2.2. Plaines et Plateaux.	08
I.2.3. Collines et Piémonts.	08
I.2.4. Autres.	08
I.3. Aspects sociaux et économiques.	08
I.3.1. Les activités.	08
I.3.1.1 Industrielles.	08
I.3.1.2. Agricoles.	09
I.3.1.3. Tourismes	10
I.4. Végétation.	10
I.5. Pédologie.	11
I.6. Sismicité.	11

### Chapitre II : Géologie

I. Introduction.	12
II. Géologie régionale du Nord-Algérien.	12
II.1. Domaine interne.	12
II.2. Domaine des flysch.	13
II.2.1. Les flysch Mauritanien.	13

II.2.2.Les flysch Massyliens.	13
II.3. Domaine externe ou bien domaine des nappes.	13
II.4.Les unités Ultra-Telliennes.	13
II.4.1.L'Unité Ultra - Tellienne de Djebel Houara.	13
II.4.2.L'Unité Ultra - tellienne de Djebel Bousbaa (J. C. Lahondère. 1987).	14
II.5.L'Ensemble Tellien Sensu Stricto -S.S-	14
II.6.L'avant pays para Autochtone.	15
II.6.1.Les séries néritiques Constantinoise.	15
II.6.2.Le sillon écaillé des Sellaoua.	17
III. Géologie locale.	17
IV. Esquisse litho stratigraphie de différentes unités structurales.	19
IV.1.Le Primaire.	19
IV.2.Le Trias.	19
IV.3.Formation du Néocomien.	19
IV.4.Les Formations D'Aptien.	20
IV.5.Les Formations D'Albien.	20
IV.6.Les Formations du Vraconien.	20
IV.7.Les Formations du Cénomanién.	20
IV.8.Les Formations du Turonien-Coniacien.	20
IV.9.Les Formations du Santonien.	20
IV.10.Les Formations du Campanien.	21
IV.11.Les Formations du Maestrichtien.	21
IV.12.Les Formations du Paléocène.	21
IV.13.Les Formations de L'Eocène inférieur et moyen.	21
IV.14.Les Formations de L'Eocène supérieur et de L'Oligocène.	21
IV.15.Les Flysch du Numidien.	21
IV.16.Les Formations du Mio-Pliocène (Continente Lacustre de Guelma).	22
IV.17.La mollasse de Guelma.	22
IV.18.Les Formations du Quaternaire.	22
IV.19.Les Formations du Pléistocène.	23

V. Evolution paléogéographique.	24
VI. Evolution tectonique.	24
VI.1.Orientation des plis.	25
VI.2.Contacts anormaux.	26
<b>VII. Conclusion.</b>	<b>26</b>

## **Chapitre III : Hydro Climatologie**

### **A/ Climatologie**

<b>I. Introduction.</b>	<b>28</b>
II. Analyse des facteurs climatiques.	28
II.1.Les précipitations.	29
II.2.Variation saisonniers et annuelles des précipitations.	30
II.3.Coefficient pluviométrique.	31
II.4.La température.	33
II.5.Diagramme Ombrothermique ( $P = 2T$ ).	34
III. Types de climats.	35
III.1.Détermination de l'indice d'Euverte.	35
III.2.Détermination de l'indice d'aridité de De Martonne.	36
III.3.Détermination de l'indice d'aridité mensuel de Martonne mensuelle.	37
III.4.Détermination de l'indice d'humidité et classification climatique de l'FAO-UNESCO.	38
III.5.Indice de Paul Moral.	39
III.6.Indice de Stewart.	39
III.7.Climagramme de Louis Emberger.	40
IV. Notion du bilan hydrologique.	41
IV.1.L'évapotranspiration.	42
IV.1.1.Evapotranspiration potentielle (ETP).	42
IV.1.2.Evapotranspiration réelle (ETR).	43
IV.2.Réserves facilement utilisables (RFU).	46
IV.3.Ruissellement (R).	46

IV.4.Infiltration (I).	47
IV.5.Bilan hydrique selon Thornthwaite.	50
IV.5.1.Interprétation du bilan hydrique.	51
<b>B/ Hydrologie</b>	
V. Situation géographique du Bassin Versant de la Moyenne Seybouse.	51
V.1.L'Organisation Administrative.	52
V.2.Les Caractéristiques Géométriques et morphométrique du Bassin Versant de la Moyenne Seybouse.	53
VI.2.1.Surface du Bassin Versant.	54
VI.2.2.Périmetre du Bassin Versant.	54
VI.2.3.Longueur Du Talweg Principal.	54
VI.2.4.Indice De Forme (Ou De Compacité) De Gravelius.	54
VI.2.5.Coefficient D'Allongement.	54
VI.2.6.Dimensionnement Du Rectangle Equivalent.	55
VI.2.6.1.Longueur Du Rectangle Equivalent.	55
VI.2.6.2.Largeur Du Rectangle Equivalent.	55
V.3.Topographie.	56
V.3.1.Courbe et carte hypsométrique.	56
V.3.2. Carte Des Pentés.	58
V.4.Indices De Pentés.	60
V.4.1.Indice De Pente Moyenne Du Bassin Versant (Im).	60
V.4.2.Indice De Pente Globale (Ig).	60
V.4.3.Indice De Pente De Roche (IP).	61
V.4.4.Denivelee Spécifique.	61
V.5.Characteristiques Hydrographiques.	62
V.5.1.Chevelu Hydrographique.	62
V.5.2.Densité De Drainage.	63
V.5.3.La Densité Hydrographique.	64
V.6.Coefficient De Torrentialité.	64
V.7.Temps De Concentration.	64

V.8.Rapport De Confluence.	66
VI.9.Récapitulation Des Caractéristiques Du Bassin Versant De La Moyenne Seybouse.	67
<b>VI. Conclusion.</b>	<b>68</b>

## **Chapitre IV : Hydrogéologie**

<b>I. Introduction.</b>	<b>69</b>
II. Caractéristiques hydrogéologique de la région de Guelma.	69
III. Identification des aquifères.	70
III.1.Le premier aquifère alluvionnaire datant du Mio-Plio-Quaternaire.	70
III.1.1.Description hydrogéologique de la nappe alluvionnaire.	71
III.2.Le deuxième aquifère des calcaires Néritiques et Sénoniens de la région d'Héliopolis.	72
A. Nappe Superficielle.	73
III.A.1.Piézométrie.	73
III.A.2.Inventaire des points d'eau.	74
III.A.3. Interprétation des cartes piézométriques réalisées lors des trois campagnes de Novembre 2019, de Septembre 2021 et de Mai 2022.	75
III.A.3.1.Evolution spatio-temporelle de l'état piézométrique de l'aquifère.	76
B. La nappe profonde des calcaires néritiques.	77
III.B.1.Coupes hydrogéologiques.	79
III.B.2.Caractéristiques hydrodynamique.	84
III.B.2.1.Interprétation des données des essais de pompages.	84
<b>IV. Conclusion.</b>	<b>89</b>

## **Chapitre V : Géométrie de l'aquifère**

<b>I. Introduction.</b>	<b>90</b>
II. Méthode électrique	90
<i>A/Méthode électrique par Sondage Electrique Vertical (SEV)</i>	<i>90</i>
III. Mesure de la résistivité.	91
IV. Sondage électrique.	92

V. Interprétation des sondages électriques.	93
VI. Représentation des résultats.	93
VI.1. Carte de résistivité apparente pour différents AB.	93
VI.2. Carte du toit du substratum.	94
VI.3. Coupes géoélectriques.	94
VII. Traitement des données.	94
VIII. Exécutions des mesures.	95
IX. Etalonnage des données.	96
IX.1. Etalonnage des sondages électriques.	96
IX.1.1. Interprétation des sondages électriques verticaux.	97
IX.2. Coupes géo électriques.	103
IX.3. Cartes de résistivités.	104
IX.4. Carte de la profondeur du toit de l'aquifère.	105
IX.5. Carte de la résistance transversale.	106
IX.6. Type de courbes de sondage électrique vertical (SEV) de la zone d'étude.	107
IX.7. Section de résistivité du modèle lisse 1D le long de la ligne G.	108
IX.8. Esquisse tectonique de la zone d'étude.	108
<i>B/Méthode et Modélisation Gravimétrique</i>	<i>109</i>
X. Rappels théoriques.	109
X.1. Calcul de l'anomalie gravifique ?	111
X.1.1. Calcul de g mesuré.	111
X.1.2. g modèle.	111
X.1.3. Anomalie de Bouguer.	112
XI. Levé gravimétrique.	112
XI.1. Spectre d'énergie radialement moyenné.	113
XI.2. Détection de contours à plusieurs échelles.	113
XI.3. Inversion gravimétrique tridimensionnelle.	114
XII. Analyses des cartes de gravité.	115
XII.1. Anomalies de Bouguer.	115
XII.2. Anomalies Régionales.	116

XII.3. Anomalies Résiduelle.	116
XII.4. Résultats du spectre d'énergie radialement moyenné.	118
XII.5. Résultats de détection de contours à plusieurs échelles.	118
XII.6. Inversion gravimétrique tridimensionnelle.	121
<b>XIII. Conclusion.</b>	<b>123</b>

## **Chapitre VI : Hydrochimie**

<b>I. Introduction.</b>	<b>125</b>
II. Echantillonnage et fiabilité des résultats.	125
II.1. Balance ionique.	126
III. Paramètres physiques, chimiques et de pollutions mesurés.	128
III.1. Paramètres physiques.	128
➤ Température de l'eau (TC°).	128
➤ Le potentiel d'hydrogène (pH).	128
➤ La conductivité électrique (CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).	128
III.2. Paramètres chimiques.	
➤ Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).	129
➤ Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ).	129
➤ Sodium ( $\text{Na}^+$ ).	129
➤ Potassium ( $\text{K}^+$ ).	129
➤ Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ).	130
➤ Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).	130
➤ Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).	130
III.3. Paramètres de pollutions (nutritifs).	130
➤ Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).	131
➤ Les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ).	132
➤ Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).	132
➤ Ortho phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).	132
IV. Présentation des résultats.	133
IV.1 Nappe superficielle.	133
1. Paramètres physiques.	133
➤ La température (TC°).	133
➤ Le potentiel d'hydrogène pH.	134
➤ La conductivité électrique CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).	135
2. Paramètres chimiques mesurés au laboratoire.	136
➤ Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).	136
➤ Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ).	137
➤ Sodium ( $\text{Na}^+$ ).	138

➤ Potassium ( $K^+$ ).	139
➤ Chlorures ( $Cl^-$ ).	140
➤ Sulfates ( $SO_4^{2-}$ ).	142
➤ Bicarbonates ( $HCO_3^-$ ).	143
3. Paramètres de pollution (nutritifs).	144
➤ Les nitrates ( $NO_3^-$ ).	144
➤ Les nitrites ( $NO_2^-$ ).	145
➤ Ammonium ( $NH_4^+$ ).	146
➤ Ortho phosphates ( $PO_4^{3-}$ ).	147
IV.2 Nappe profonde.	
1. Paramètres physiques.	149
➤ La température ( $TC^\circ$ ).	149
➤ Le potentiel d'hydrogène pH.	150
➤ La conductivité électrique CE ( $\mu S/cm$ ).	151
2. Paramètres chimiques mesurés au laboratoire.	152
➤ Calcium ( $Ca^{2+}$ ).	152
➤ Magnésium ( $Mg^{2+}$ ).	153
➤ Sodium ( $Na^+$ ).	154
➤ Potassium ( $K^+$ ).	155
➤ Chlorures ( $Cl^-$ ).	156
➤ Sulfates ( $SO_4^{2-}$ ).	157
➤ Bicarbonates ( $HCO_3^-$ ).	158
3. Paramètres de pollution (nutritifs).	159
➤ Les nitrates ( $NO_3^-$ ).	159
V. Interprétation des résultats.	160
V1. Identification des facies chimiques.	160
A. Nappe superficielle.	161
1.1. Formule ionique.	161
V.A.2. Diagramme de Piper.	163
🚧 Classification de Piper (campagnes des basses eaux 2021, et hautes eaux 2022).	163
B. Nappe profonde.	164
1. Formule ionique.	164
V.B.2. Diagramme de Piper.	165
🚧 Classification de Piper (campagnes de Janvier 2020, et Juin 2021).	165
V.2. Processus Hydrogéochimiques et origine de minéralisation.	166
V.2.1. Diagramme de Gibbs.	167

V.3.Phénomènes modificateurs.	169
V.3.1.Indice d'échange de base (I.E.B).	169
V.4.Modélisation géochimique inverse.	170
V.A.1.Indice de saturation (IS).	170
A. Nappe superficielle.	170
B. Nappe profonde.	174
V.5.Analyses statistiques des paramètres mesurés.	176
V.A.1.1.Matrice de corrélation.	178
A. Nappe superficielle.	178
B. Nappe profonde.	180
V.5.2. Analyse multivariée (multidimensionnelle).	181
🚦 Classification Ascendante Hiérarchique des eaux souterraines.	181
A. Nappe superficielle.	181
B. Nappe profonde.	183
V.6.Indices d'évaluation de qualité d'eau.	185
A. Nappe superficielle.	185
V.A.1.Indice de qualité de l'eau arithmétique (WQI).	185
B. Nappe profonde.	188
V.A.2.Indice de Qualité de l'eau pondéré par entropique (EWQI).	189
B.Nappe profonde.	191
V.A.3.Indice de pollution par les Nitrates (NPI).	192
B.Nappe profonde.	194
V.7.Indice d'irrigation.	195
V.A.1.Indice de perméabilité (IP).	195
B.Nappe profonde.	196
VI. Relation entre nappe superficielle et profonde.	197
🔗 Outil structural et géologique.	
🔗 Piézométrie.	198
🔗 Outil hydrochimique.	199
• Evolution des bicarbonates.	199
• Paramètre de pollution.	200
🔗 Outil isotopique.	201

• Rappel d'hydrologie isotopique.	201
✚ Résultats de l'analyse isotopique.	203
✚ Synthèse des arguments du contact entre nappes : superficielle et profonde.	203
<b>VII. Conclusion.</b>	204
<i>Conclusion générale et recommandation.</i>	206
<i>Références bibliographiques.</i>	212
<i>Annexe.</i>	

<b>N°</b>		<b>Page</b>
<b>Chapitre I. Cadre Général</b>		
Figure N°01.	Carte de situation géographique de la zone d'étude.	7
Figure N°02.	Représentation circulaire de la géomorphologie de la zone d'étude.	8
<b>Chapitre II. Cadre Géologique</b>		
Figure N°03.	Plan de position et coupures stratigraphiques des séries néritiques constantinoises (J.M.Vila, 1980).	16
Figure N°04.a.	Carte géologique simplifiée de la zone d'étude (cours en ligne de Ruault-Djerrab)	18
Figure N°04.b.	Coupe géologique (Vila, 1980, modifiée)	18
<b>Chapitre III. Hydro Climatologie</b>		
<b>A. Climatologie</b>		
Figure N°05.	Localisation de station météorologique dans la région de Guelma	29
Figure N°06.	Répartition des précipitations moyennes mensuelles – station météorologique de Belkheir /1981 - 2021.	30
Figure N°07.	Pourcentages saisonniers des précipitations pour la période de 1981 à 2021 à la station de Belkheir.	32
Figure N°08.	Variation des coefficients pluviométriques à la station météorologique de Belkheir 1981-2021.	33
Figure N°09.	Répartition des températures moyennes mensuelles selon la station de Belkheir.	34
Figure N°10.	Diagramme Ombrothermique à la station de Belkheir (1981-2021).	35
Figure N°11.	Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne.	37
Figure N°12.	Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de DE Martonne.	38
Figure N°13.	Climagramme de Louis. Emberger à la station de Belkheir.	41
Figure N°14.	Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement Algérie, d'après Wundt, modifié par Coutagne.	46
Figure N°15.	Représentation graphique des paramètres du bilan hydrologique / ou bien variations mensuelles des éléments climatiques.	49
Figure N°16.	Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Belkheir, wilaya de Guelma (1981 - 2021).	50
Figure N°17.	Représentation des paramètres du bilan hydrique sur la vue 3D.	50
<b>B. Hydrologie</b>		
Figure N°18.	Le découpage administratif des communes à l'intérieur du BV de la moyenne Seybouse.	53
Figure N°19.	Courbe hypsométrique des fréquences des altitudes dans le bassin versant de la moyenne Seybouse.	56

Figure N°20. Carte hypsométrique du bassin versant de la moyenne Seybouse.	57
Figure N°21. Carte des pentes du bassin versant de la moyenne Seybouse.	59
Figure N°22. Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la moyenne	63

#### **Chapitre IV. Hydrogéologie**

Figure N° 23. Coupe hydrogéologique Nord-Sud dans la plaine de Guelma (D'après, Gaud.B, 1974).	72
Figure N°24. Cartes piézométriques de la nappe superficielle de Hammam Bradaa (a.2019, b.2021 c.2022).	76
Figure N°25. Evolution spatio temporelle du niveau piézométrique pendant les trois campagnes.	77
Figure N°26. Carte d'inventaires des points d'eau échantillonnés et localisation des coupes hydrogéologiques réalisées dans la région d'étude.	78
Figure N°27. Coupe hydrogéologique n°01 entre les forages F3, F4 et F5.	80
Figure N°28. Coupe hydrogéologique n°02 entre les forages F7, F8 et F9.	81
Figure N°29. Coupe hydrogéologique n°03 entre les forages F1, F5 et F7.	82
Figure N°30. Coupe hydrogéologique n°04 entre les forages El Fedjoudj, Bouzitoune et Hammam Bradaa (D'après Saidia et Chaab, 2002. Modifiée).	83
Figure N°31. Coupe hydrogéologique n°05 entre les forages Maachou, Bouzitoune 1 et Bouzitoune 2 (D'après Saidia et Chaab, 2002. Modifiée).	84

#### **Chapitre V. Géométrie de l'aquifère**

Figure N°32. Carte d'implantation des SEV (E.N.A.G.E.O et HYDROSOL).	96
Figure N°33. Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV HB1.	97
Figure N°34. Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage HB1.	98
Figure N°35. Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV Bouzitoune.	98
Figure N°36. Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage Bouzitoune.	99
Figure N°37. Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV HB3	100
Figure N°38. Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage HB3.	101
Figure N°39. Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV HB2.	101
Figure N°40. Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage HB2.	102
Figure N°41. Coupe géoélectriques n°01 (Hydrosol, 2014).	103
Figure N°42. Coupe géoélectrique n°2 (Hydrosol, 2014).	104
Figure N°43. Carte de résistivité selon différentes longueurs de AB dans la région de Héliopolis.	105
Figure N°44. Carte de la profondeur du toit de l'aquifère des calcaires néritiques de Hammam Bradaa - El Fedjoudj.	106
Figure N°45. Carte de la résistance transversale.	107
Figure N°46. Type de courbes du sondage électrique vertical de la zone d'étude.	107
Figure N°47. Section de résistivité du modèle lisse 1D le long de la ligne G.	108
Figure N°48. Esquisse tectonique de la zone d'étude d'après les données des SEV (E.N.A.G.E.O, 1993-1994).	109

Figure N°49. Carte des anomalies de la gravité de Bouguer de la zone d'étude avec une densité de 2,4 g/cm <sup>3</sup> .	115
Figure N°50. Carte des anomalies gravimétriques régionales de la zone d'étude.	116
Figure N°51. Carte des anomalies gravimétriques résiduelles de la zone d'étude, CD est l'emplacement de la section de densité verticale Nord-Sud de la Figure 54.	117
Figure N°52. Carte du spectre d'énergie radialement moyenné.	118
Figure N°53. Carte des "Worms" gravimétriques de la zone d'étude.	120
Figure N°54.a. Le modèle de densité 3D obtenu à partir des données résiduelles d'anomalies gravimétriques.	122
Figure N°54.b. La coupe Est-Ouest passant par Bouzitoune-Hammam Bradaa, vue depuis le Sud.	121
Figure N°55. Tranche de densité verticale Nord-Sud extraite de l'inversion de la gravité en 3D.	123

## **Chapitre VI. Hydro chimie**

Figure N°56. Carte d'inventaire des points d'eau analysés dans la région d'étude.	126
Figure 57. Fiabilité (balance ionique) des résultats des analyses chimiques des eaux périodes (2020-2021-2022).	127
Figure N°58. Variation de la température dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	134
Figure N°59. Variation du pH dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	135
Figure N°60. Variation de la conductivité électrique dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	136
Figure N°61. Variation du calcium (Ca <sup>2+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	137
Figure N°62. Variation du magnésium (Mg <sup>2+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	138
Figure N°63. Variation du sodium (Na <sup>+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	139
Figure N°64. Variation du potassium (K <sup>+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	140
Figure N°65. Variation des chlorures (Cl <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	141
Figure N°66. Variation des sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	141
Figure N°67. Variation des bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022)	143
Figure N°68. Variation du nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	145

Figure N°69. Variation du nitrite (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	146
Figure N°70. Variation d'ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	147
Figure N°71. Variation d'ortho phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).	149
Figure N°72. Variation de la température dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	150
Figure N°73. Variation du pH dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	151
Figure N°74. Variation de la conductivité dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	152
Figure N°75. Variation du calcium (Ca <sup>2+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	153
Figure N°76. Variation du magnésium (Mg <sup>2+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	154
Figure N°77. Variation du sodium (Na <sup>+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	155
Figure N°78. Variation du potassium (K <sup>+</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	156
Figure N°79. Variation des chlorures (Cl <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	157
Figure N°80. Variation des sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	158
Figure N°81. Variation des bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	159
Figure N°82. Variation des nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).	160
Figure N°83. Représentation des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper des basses eaux 2021 et hautes eaux 2022.	164
Figure N°84. Représentation des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper de la nappe profonde durant les deux périodes Janvier 2020 et Juin 2021.	166
Figure N°85. Diagramme de Gibbs lors de deux campagnes de prélèvements dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa.	168
Figure N°86. Diagramme de Gibbs des deux campagnes 2020 et 2021 de la nappe profonde.	169
Figure N°87. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe superficielle durant la période des basses eaux 2021.	173
Figure N°88. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe superficielle durant la période des hautes eaux 2022.	174
Figure N°89. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et Evaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe profonde durant la période de 2020.	175
Figure N°90. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe profonde durant la période de 2021.	176

Figure N°91. Dendrogramme des variables de CAH de la nappe superficielle -Septembre 2021-	182
Figure N°92. Dendrogramme des variables de CAH de la nappe superficielle -Mai 2022-	183
Figure N°93. Dendrogramme des variables de CAH de la nappe profonde -Janvier 2020-	184
Figure N°94. Dendrogramme des variables de CAH de la nappe profonde - Juin 2021-	184
Figure N°95. Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau (WQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.	188
Figure N°96. Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau (WQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.	189
Figure N°97. Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau pondéré par l'entropie (EWQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.	191
Figure N°98. Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau pondéré par l'entropie (EWQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.	192
Figure N°99. Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau par les nitrates (NPI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.	194
Figure N°100. Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau par les nitrates (NPI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.	195
Figure N°101. Carte de distribution spatiale d'indice de perméabilité pour (IP) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.	196
Figure N°102. Carte de distribution spatiale d'indice de perméabilité (IP) pour l'irrigation à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.	197
Figure N°103. Différence de charge hydraulique entre nappe profonde et superficielle.	199
Figure N°104. Types des faciès en fonction des anions dominants (SO <sub>4</sub> +Cl)-(HCO <sub>3</sub> ).	200
Figure N°105. Evolution de (HCO <sub>3</sub> ) dans les nappes superficielle et profonde.	200
Figure N°106. Evolution des paramètres de pollution dans les nappes superficielle et profonde.	201
Figure N°107. Evolution en isotopes stables des eaux dans les nappes superficielle et profonde.	203

N°	Page
<b>A : Climatologie</b>	
Tableau 01. Caractéristiques géographiques de la station météorologique de Belkheir.	28
Tableau 02. Les précipitations moyennes mensuelles à la station météorologique de Belkheir /1981-2021.	29
Tableau 03. Les précipitations moyennes mensuelles et saisonnières à la station météorologique de Belkheir.	31
Tableau 04. Coefficient pluviométrique de la station météorologique de Belkheir.	32
Tableau 05. La température mesurée à la station météorologique de Belkheir	33
Tableau 06. Les différents types de régimes selon l'indice d'Euverte.	35
Tableau 07. Les résultats du rapport (P/T) à la station de Belkheir.	35
Tableau 08. Indice d'aridité de De Martonne (A).	36
Tableau 09. Indice mensuel d'aridité (I) moyen à la station météorologique de Belkheir, (1981-2021).	37
Tableau 10. Indice d'humidité selon l'FAO-UNESCO.	38
Tableau 11. Indice de Paul Moral.	39
Tableau 12. Indice de Stewart.	39
Tableau 13. Quotient pluvio-thermique de Louis Emberger.	40
Tableau 14. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle ETP.	43
Tableau 15. Les résultats de l'évapotranspiration réelle ETR.	44
Tableau 16. Vérification de la condition $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$	44
Tableau 17. ETR selon la formule de Coutagne.	44
Tableau 18. Les valeurs de l'évapotranspiration réelle ETR calculée par les différentes méthodes sont résumées	45
Tableau 19. Résultats du ruissellement.	47
Tableau 20. Résultats de l'infiltration.	48

Tableau 21. Les résultats de calculs du bilan hydrique à la station de Belkheir	49
Tableau 22. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle ETP, réelle ETR.	49
Tableau 23. Les valeurs de l'excédent, RFU et déficit.	50

## **B : Hydrologie**

Tableau 24. Données des superficies des communes dans le Bassin versant de la moyenne Seybouse (monographie de la wilaya de Guelma 2018).	52
Tableau 25. Les caractéristiques géométriques du bassin versant de la moyenne Seybouse.	55
Tableau 26. Les résultats de la répartition de la surface totale du bassin sur les différentes tranches d'altitude.	56
Tableau 27. Caractéristiques d'altitudes du bassin versant de la moyenne Seybouse.	58
Tableau 28. Classes des pentes dans le bassin versant de la moyenne Seybouse.	58
Tableau 29. Classification du relief selon l'indice de pente globale (I <sub>g</sub> ) par ORSTOM.	61
Tableau 30. Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.	62
Tableau 31. Les résultats obtenus du temps de concentration.	65
Tableau 32. Rapport de confluence du bassin versant de la moyenne Seybouse.	66
Tableau 33. Caractéristiques morpho métriques du bassin versant de la moyenne Seybouse.	67

## **Chapitre IV : Hydrogéologie**

Tableau 34. Localisation des points de prélèvements.	74
Tableau 35. L'inventaire des différents forages recensés et implantés dans notre région d'étude.	78
Tableau 36. Les résultats des essais de pompage réalisés au niveau des quatre forages.	88

## **Chapitre V : Géométrie de l'aquifère**

Tableau 37. Coordonnées topographiques de quelques sondages électriques verticaux dans la région d'Héliopolis, wilaya de Guelma.	94
--	----

Tableau 38. Echelle de résistivité.	101
Tableau 39. Principaux linéaments extraits de l'interprétation de la détection de contours multi-échelles des données gravitationnelles.	119

## **Chapitre VI : Hydro chimie**

Tableau 40. Localisation des points d'eau échantillonnés.	126
Tableau 41. Comparaison des valeurs des éléments physico chimiques et de pollutions analysées avec les normes OMS, 2017.	133
Tableau 42. Statistique descriptive de la température (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	134
Tableau 43. Statistique descriptive du pH (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	135
Tableau 44. Statistique descriptive de la conductivité électrique (Septembre, 2021	136
Tableau 45. Statistique descriptive du calcium (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	137
Tableau 46. Statistique descriptive du magnésium (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	138
Tableau 47. Statistique descriptive du sodium (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	139
Tableau 48. Statistique descriptive du potassium (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	140
Tableau 49. Statistique descriptive des chlorures (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	141
Tableau 50. Statistique descriptive des sulfates (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	142
Tableau 51. Statistique descriptive des bicarbonates (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	143
Tableau 52. Statistique descriptive des nitrates (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	144
Tableau 53. Statistique descriptive des nitrites (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	145
Tableau 54. Statistique descriptive de l'ammonium (Septembre, 2021 et Mai, 2022).	146
Tableau 55. Statistique descriptive de l'ortho phosphate (Septembre 2021 Mai 2022).	148
Tableau 56. Statistique descriptive de la température (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	149
Tableau 57. Statistique descriptive du pH (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	150

Tableau 58. Statistique descriptive de la conductivité électrique (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	152
Tableau 59. Statistique descriptive du calcium (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	153
Tableau 60. Statistique descriptive du magnésium (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	154
Tableau 61. Statistique descriptive du sodium (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	155
Tableau 62. Statistique descriptive du potassium (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	156
Tableau 63. Statistique descriptive des chlorures (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	157
Tableau 64. Statistique descriptive des sulfates (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	158
Tableau 65. Statistique descriptive des bicarbonates (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	159
Tableau 66. Statistique descriptive des nitrates (Janvier, 2020 et Juin, 2021).	160
Tableau 67. Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique - Basses eaux 2021-	161
Tableau 68. Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique - Hautes eaux 2022-	162
Tableau 69. Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique – Janvier 2020-	164
Tableau 70. Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique – Juin 2021-	165
Tableau 71. Les indices d'échange de base dans les eaux de la nappe superficielle.	170
Tableau 72. Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines.	171
Tableau 73. Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines.	173
Tableau 74. Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines.	174
Tableau 75. Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines.	175
Tableau 76. Matrice de corrélation de la nappe superficielle de Hammam Bradaa.	179
Tableau 77. Matrice de corrélation de la nappe superficielle de Hammam Bradaa.	180
Tableau 78. Matrice de corrélation de la nappe profonde de Hammam Bradaa.	180

Tableau 79. Matrice de corrélation de la nappe profonde de Hammam Bradaa.	181
Tableau 80. Poids et poids relatif des paramètres physico-chimiques de la nappe superficielle et profonde utilisé pour le calcul de l'indice de qualité(WQI).	186
Tableau 81. Classes de l'indice de qualité (WQI) - Basses eaux 2021-	187
Tableau 82. Classes de l'indice de qualité (WQI) - Hautes eaux 2022-	187
Tableau 83. Classes de l'indice de qualité (WQI).	188
Tableau 84. Classification des normes de qualité des eaux souterraines selon l'Indice de Qualité de l'Eau Pondéré par l'Entropie (EWQI) de la nappe superficielle.	190
Tableau 85. Classification des normes de qualité des eaux souterraines selon l'Indice de Qualité de l'Eau Pondéré par l'Entropie (EWQI).	191
Tableau 86. La classification des résultats obtenus à partir de l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI).	193
Tableau 87. La classification de la qualité de l'eau selon l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) de la nappe profonde.	194
Tableau 88. L'Indice de perméabilité permet de classier la qualité de l'eau pour l'irrigation en trois catégories distinctes.	196
Tableau 89. L'Indice de perméabilité permet de classier la qualité de l'eau pour l'irrigation en trois catégories distinctes.	196



*« L'importance de l'eau dans l'économie humaine ne cesse de croître et l'approvisionnement en eau douce devient de plus en plus difficile, tant en raison de l'accroissement de la population et de son niveau de vie que du développement accéléré des techniques industrielles modernes. Sous la pression des besoins considérables de la civilisation moderne où est passée de l'emploi des eaux de sources et des nappes, à une utilisation de plus en plus poussée des eaux de surface. Parallèlement, se sont développées les recherches des eaux souterraines, les méthodes de recyclage et maintenant, on se préoccupe de plus en plus du dessalement des eaux de la mer. Simultanément, les causes de pollution se sont étendues ; celles-ci sont devenues plus massives, plus variées et plus insidieuses, ce qui a fait écrire que « le temps des rivières est fini, celui des égouts commence ».*

***J. Rodier (1978) Analyse de l'eau.***

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément vital pour la subsistance de tout être vivant et une ressource naturelle très précieuse pour toute activité socioéconomique. Depuis l'aube de l'humanité la demande est en augmentation dans tous les secteurs, et les ressources en eau sont de plus en plus rares ([Brinis.N,2011](#)).

L'analyse des tendances actuelles met en lumière une imminente "crise de l'eau" dans de nombreuses régions, particulièrement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, ainsi que dans un nombre croissant de nations à travers le globe ([Mahieddine.F,2016](#)). À l'avenir, ce sera essentiellement l'accès à l'eau, plutôt qu'à la terre, qui constituera le principal facteur limitant le développement agricole des pays arides et semi-arides du bassin méditerranéen. Dans ces régions caractérisées par une pluviométrie irrégulière, diverses formes d'utilisation économique de l'eau ont déjà été mises en place ou sont en cours de développement. Il est indéniable qu'en l'absence d'un contrôle efficace et d'une gestion judicieuse de l'eau, l'autosuffisance alimentaire et énergétique demeurera une illusion pour la plupart de ces pays ([Brioua.A,2011](#)).

La question de l'eau se pose à la fois en termes de quantité et de qualité, englobant les aspects des ressources et de la pollution. En ce qui concerne les ressources, on peut distinguer d'un côté les eaux de surface caractérisées par un renouvellement rapide, et de l'autre les eaux souterraines qui s'écoulent beaucoup plus lentement ([Mahieddine.F,2016](#)).

Au cours des dernières années, la qualité des eaux à l'échelle mondiale a subi une détérioration significative, attribuable à des rejets industriels non réglementés, à une utilisation intensive d'engrais chimiques en agriculture, ainsi qu'à l'exploitation anarchique des ressources en eau. Ces activités ont engendré des altérations chimiques de l'eau, la rendant impropre à des usages souhaités. L'hydrogéologie des zones arides et semi-arides en Algérie constitue un sujet complexe ([Kachi.N,2015](#)).

La wilaya de Guelma se situe au Nord-Est du pays et constitue, du point de vue géographique, un point de rencontre, voire un carrefour entre les pôles industriels du Nord (Annaba et Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum El Bouaghi et Tébessa). Elle occupe une position médiane entre le Nord du pays, les Hauts plateaux et le Sud.

Elle s'étend sur une superficie de 3.686,84 Km<sup>2</sup> avec une population totale estimée à 543.552 habitants (2018) dont l'activité économique principale de 71 % est agriculture ([Monographie Guelma,2018](#)).

La wilaya a enregistré, ces dernières années, une demande croissante relative aux ressources hydriques dans les domaines traditionnellement consommateurs de l'eau (Agriculture, consommation humaine et industrie).

La wilaya de Guelma regorge de potentialités dans les différents domaines : agricole, agroalimentaire, industriel et touristique.

En effet, cette wilaya dispose d'une superficie agricole totale de 264.618 ha, soit 71,77% de la superficie totale, offrant, ainsi, différents créneaux d'investissement dans les cultures fruitières, maraichères, céréalières et d'arboriculture de montagne (**Monographie Guelma,2018**).

Dans le domaine industriel, la wilaya dispose de zones industrielles et de zones d'activités, ainsi que de plusieurs unités industrielles agroalimentaires. En outre, son sol regorge de richesses minières très importantes telles que le Kaolin (Hammam Débagh) et le marbre (Ben Djerrah). Ces potentialités ouvrent, aussi, différents créneaux d'investissement industriel et élargissent le périmètre du secteur de la sous-traitance (**Monographie Guelma,2018**).

Par ailleurs, la wilaya de Guelma constitue un pôle touristique par excellence au vu de ses sites archéologiques, ses monuments historiques ainsi que ses différentes sources thermales aux propriétés thérapeutiques. Ces différents atouts pourraient permettre à la wilaya de devenir une destination phare du tourisme thermal et médical et du tourisme haut de gamme (activités cynégétiques et spéléo-tourisme).

La position géographique de la wilaya, notamment sa proximité des ports économiques de Annaba et de Skikda, des aéroports de Constantine et de Annaba, la jonction qu'elle permet entre le littoral et les hauts plateaux ainsi que sa proximité de la Tunisie, lui permettent de jouer un rôle majeur dans le développement de l'économie aux niveaux régional et national. C'est, d'ailleurs, à ce titre que des initiatives sont déployées pour faire de la wilaya un pôle régional de l'industrie de transformation des produits agricoles et des produits d'élevage (**Brioua.A,2011**).

Par rapport au potentiel hydrique, la wilaya possède un volume mobilisable de 50 Millions m<sup>3</sup>/an en eaux souterraines répartis sur 5 nappes :

- Une nappe alluviale s'étalant sur trois communes (Guelma, Belkheir et Boumahra Ahmed),

- La nappe calcaire du crétacé supérieur (plaine de Tamelouka) ;
- Une nappe calcaire à Hammam Bradaa qui s'étend entre les villes d'Héliopolis et de Guelat Bousbaa ;
- La nappe d'Oued Halia ;
- La nappe de la plaine de Bouchegouf.

Et 1040 sources naturelles ainsi que 230 millions m<sup>3</sup> en eaux superficielles mobilisés par plusieurs barrages :

- Barrage de Bouhamdane (commune de Hammam Débagh) :184,3 Hm<sup>3</sup>
- Petit Barrage de Medjez El Begar (commune d'Ain Makhloof) :2,86 Hm<sup>3</sup>
- Petit Barrage de Hajar Guefata (commune de Nechmaya) :0,44 Hm<sup>3</sup>
- 15 retenues collinaires répartis sur le territoire de la wilaya.

Le champ captant de Hammam Bradaa est un maillon important dans le système d'alimentation en eau potable de la ville de Guelma et les régions limitrophes. Les eaux sont captées dans un aquifère constitué des calcaires néritiques qui forment le Djebel Débagh (Sud-Est de Guelma). Il s'agit de structures profondes de système de Grabens et de horsts dont l'identification a été possible en utilisant plusieurs méthodes de prospection géophysique.

De nombreuses études antérieures (géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et gravimétriques), orientées vers la recherche d'eau ont montré que les aquifères possibles semblent se localiser dans la région investiguée.

Aussi, il nous a paru nécessaire et intéressant d'exploiter dans la présente étude les mesures gravimétriques et électriques réalisées auparavant par **E.N.A.G.E.O (1993-1994)**, **HYDRO SOL(2014)** et **CRAAG (2004)**. En effet, les résultats obtenus par ces méthodes ont permis d'établir avec précision les extensions des formations aquifères.

Les levés gravimétriques et électriques ont pour but de suivre les horizons favorables à une accumulation d'eau, d'apporter des éléments nouveaux à l'approfondissement des connaissances géologiques de la région.

L'objectif principal de cette recherche est d'arriver à dessiner une image synthétique de la géométrie de l'aquifère néritique de Hammam Bradaa très affecté par la tectonique, de préciser les structures et la répartition des formations géologiques du sous-sol en utilisant l'outil géophysique.

Dans un autre contexte de ce travail, nous pensons que la problématique posée pour le champ captant n'est pas liée seulement à l'aspect descriptif donnant la forme et l'extension de l'aquifère, mais doit toucher aussi celui de la qualité de ses eaux, qui reste un facteur limitant pour une bonne exploitation de cette ressource dont dépendent plusieurs régions entre Guelma et Annaba. Pour cela, une caractérisation hydrochimique ainsi que des indices de qualité ont été développés en exploitant 4 campagnes d'échantillonnage qui ont touché à la fois la nappe profonde et superficielle. Par ailleurs, le suivi de l'état de la nappe nérétique du champ captant par rapport à la pollution a été pris en considération en cherchant d'éventuelles anomalies dans les paramètres de pollution :  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PO}_4$ . Nous pensons, qu'avant toutes investigations extérieures responsables d'éventuelles anomalies, la première source de contamination peut provenir, déjà, des eaux de la nappe superficielle soumise aux influences anthropiques. Cette contamination, si elle existerait, elle serait mise à jour par l'étude d'une connexion probable entre les deux nappes. Cette dernière est rendue possible, dans cette recherche, par la combinaison entre différents outils ; géologique, structural, piézométrique, hydrochimique et isotopique qui ont donné des résultats satisfaisants.

La thèse est organisée en six chapitres, encadrés par une introduction générale comme suit :

- ➔ Dans le premier chapitre, une présentation est faite du contexte global de la région d'étude, englobant une description détaillée des caractéristiques géomorphologiques, socio-économiques, agricoles, touristiques, de la végétation, de la pédologie et de la sismicité.
- ➔ Le deuxième chapitre aborde les aspects géologiques régionaux, locaux, structuraux et tectoniques, en se basant principalement sur la synthèse des travaux préalablement effectués dans la région de Guelma.
- ➔ Le troisième chapitre se consacre à l'analyse des paramètres climatiques en vue d'établir le bilan hydrique, d'estimer la recharge en eau de la nappe et d'explorer les caractéristiques hydrologiques du bassin versant de la moyenne Seybouse.
- ➔ Le quatrième chapitre traite l'hydrogéologie de la région de Guelma, en identifiant les aquifères existants dans le secteur d'étude, la direction d'écoulement des eaux souterraines et superficielles et les caractéristiques hydrodynamiques de quelques forages d'eau.
- ➔ Le cinquième est dédié à l'exploration de la géométrie de la structure géologique profonde à l'aide de différentes méthodes. La prospection par sondage électrique et la méthode gravimétrique ont été employées pour caractériser respectivement la

résistivité électrique et la densité du sous-sol sur des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres pour les deux méthodes, en utilisant un modèle gravimétrique tridimensionnel 3D. Les logs litho stratigraphiques des forages mécaniques ont été particulièrement utiles pour mettre en évidence la corrélation, à des profondeurs significatives, sous l'influence des failles avec une correspondance proportionnelle dans la couverture géologique.

- ➔ Le sixième chapitre traite l'hydrochimie des eaux de la nappe superficielle et profonde de Hammam Bradaa la qualité physico chimiques des eaux de l'aquifère néritique constantinois de Héliopolis, basé sur les interprétations des paramètres physico chimiques et de pollution, les indices de qualité des eaux et l'aptitude des eaux à l'irrigation. Une étude d'éventuelles connexions entre les deux nappes est développée.

En conclusion, cette thèse se clôture par une synthèse générale des résultats obtenus, accompagnée de recommandations issues des conclusions tirées au cours de l'étude.

*Partie 1 : conditions générales de  
la région d'étude.*

## **I. Introduction**

La région de Guelma dont fait partie la zone étudiée est située au Nord-Est Algérien et constitue, du point de vue géographique, un point de rencontre, voire un carrefour entre les pôles industriels du Nord (Annaba et Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum El Bouaghi et Tébessa). Elle occupe une position médiane entre le Nord du pays, les Hauts plateaux et le Sud.

Elle est limitrophe :

- Au Nord, par la wilaya d'Annaba ;
- Au Nord-Est, par la wilaya d'El Taref,
- À l'Est, par la wilaya de Souk Ahras,
- Au Sud, par la wilaya d'Oum El Bouaghi, et enfin
- À l'Ouest, par la wilaya de Constantine.

Elle appartient au sous bassin versant de la Seybouse précisément la moyenne Seybouse, limitée au Nord par la mer méditerranée, au Sud par le massif de la Mahouna, Ain Larbi et Sedrata, A l'Est par les formations triasiques de Nador N'baïl et enfin A l'Ouest par les massifs de Houara et Djebel Débagh qui s'étend depuis Medjez Ammar à l'Ouest jusqu'au village de Nador à l'Est sur 26 km.

### **I.1. Situation géographique de la zone d'étude**

La région de Guelma dont fait partie la zone étudiée est située au Nord-Est Algérien et constitue la partie Nord du bassin d'effondrement de la plaine de Guelma située entre la longitude 7 °18'00"E, 7 °33'00"E and latitude 36 ° 30'00" N,36°36'00 N. Elle est limitrophe au Nord par les monts de Djebel Bousbaa et Beni Ahmed, au Sud par Oued Seybouse, à l'Ouest par Oued Bouzitoune et à l'Est par Djebel Ragouba. (Fig. N°01).

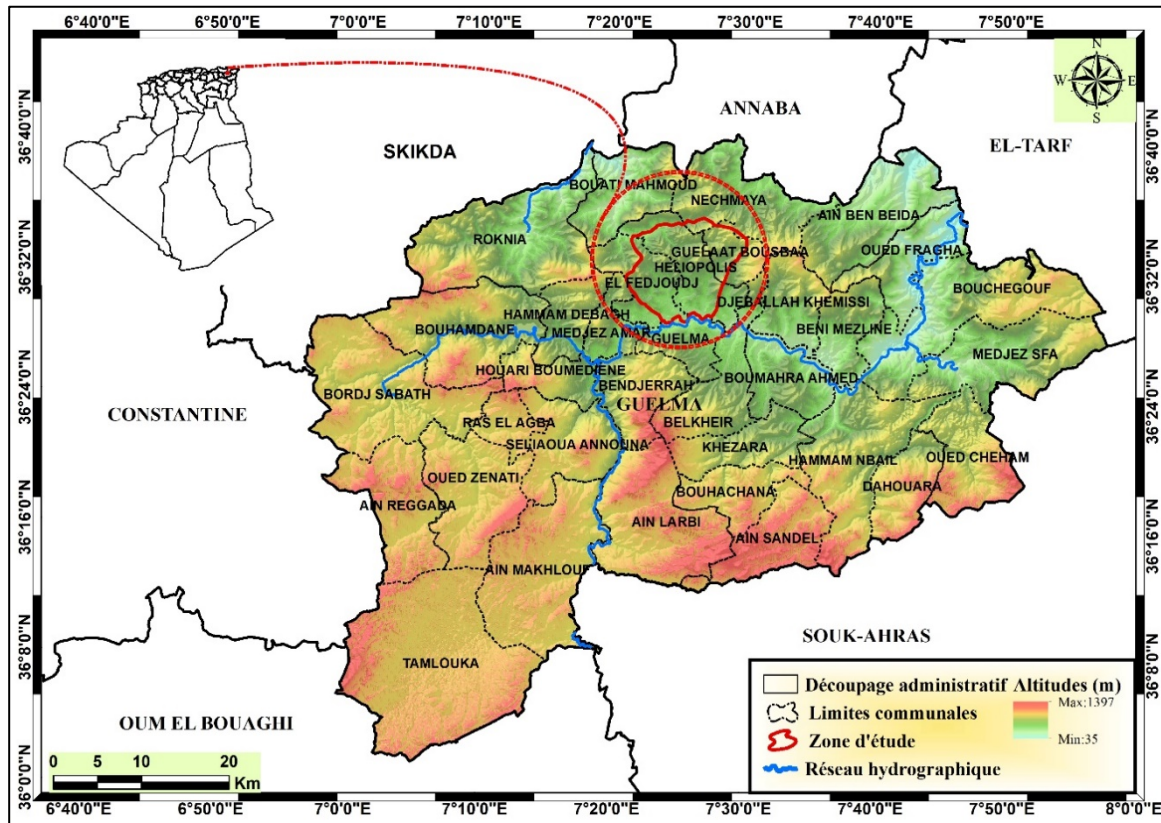


Fig. N°01 : Carte de situation géographique de la zone d'étude.

## I.2.Géomorphologie

Le relief de la wilaya de Guelma se caractérise par des reliefs montagneux et collinaires qui représentent la partie orientale des contreforts occidentaux des chaînes de la Medjerda et des monts de Constantine. Ces deux ensembles montagneux sont parcourus par des vallées profondes où s'écoulent les cours d'eau provenant des affluents situés à droite et à gauche de la Seybouse (Kachi.N, 2015).Ce relief se décompose comme suit : (Fig. N°02).

### I.2.1.Les montagnes constituent de 37.82% du relief dont les principales sont :

- Djebel Mahouna qui atteint le point le plus haut de 1411 m d'altitude à Ben Djerrah ;
- Djebel Houara qui atteint le point le plus haut de 1292 m d'altitude à Ain Ben Beida ;
- Djebel Taya qui atteint le point le plus haut de 1208 m d'altitude à Bouhamdane ;
- Djebel Débagh qui atteint le point le plus haut de 1060 m d'altitude à Hammam Débagh.
- Djebel Nador qui atteint le point le plus haut de 737 m d'altitude à Beni Mezline.

**I.2.2. Plaines et Plateaux** qui couvrent 27,22 % ;

**I.2.3. Collines et Piémonts** : 26,29 % ;

**I.2.4. Autres** : 8,67 %.

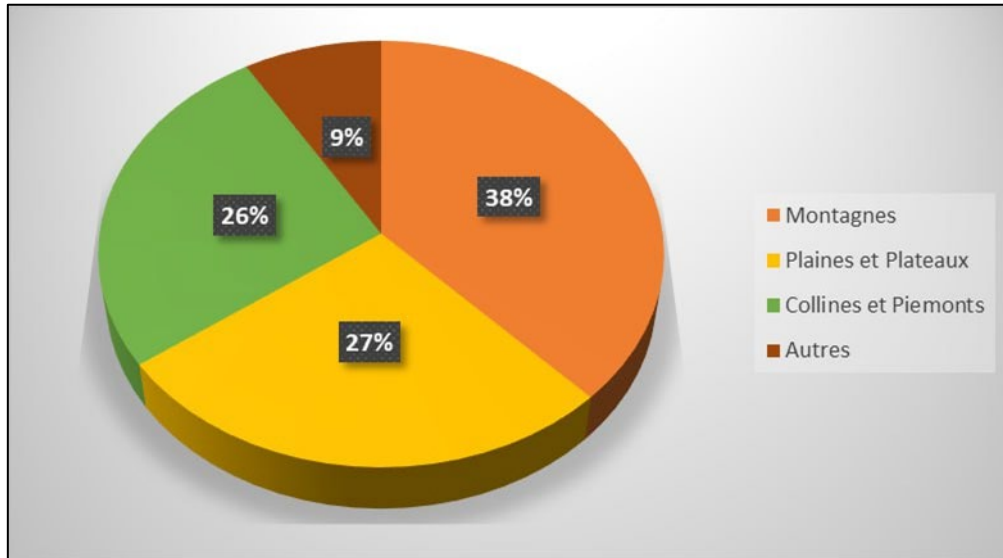


Fig. N°02 : Représentation circulaire de la géomorphologie de la région d'étude.

### **I.3. Aspects sociaux et économiques**

La wilaya de Guelma, qui englobe la zone d'étude, représente 0,17 % de la superficie totale de l'Algérie et comprend 34 communes réparties sur 10 daïras. Le recensement de la population de Guelma pour les années 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 s'élevait respectivement à 482 430, 494 097, 500 007, 506 007, 512 079 et 518 224 habitants.

En 2011, la population de l'agglomération du Chef-Lieu de la wilaya (**DPAT**) était de 126 753 habitants, et selon les projections démographiques de 2008 à 2015 issues du (**RGPH**), on estime une population de 132 020 en 2015. Le taux d'accroissement annuel moyen de la période 1998-2008 est de 1,2 %. La densité moyenne de la population pendant cette période est de 136 habitants par kilomètre carré (**Brioua.A, 2011**).

#### **I.3.1. Les activités**

Les principales sources de richesse de la wilaya de Guelma se manifestent à travers les activités suivantes :

##### **I.3.1.1 Industrielles**

L'importance de l'industrie au sein de la wilaya de Guelma ne peut être sous-estimée, car elle se positionne en tant que ville industrielle accueillant plusieurs unités industrielles (**Kachi.N, 2015**), parmi lesquelles les plus significatives sont :

- ✚ La raffinerie de sucre de la wilaya de Guelma est dotée de deux forages dédiés à son approvisionnement en eau. Le premier, le forage Boumahra, présente un débit de 60 m<sup>3</sup>/h, équivalent à 16,66 litres par seconde, et atteint une profondeur de 42 mètres. Quant au second, le forage Belkheir, il affiche un débit de 35 m<sup>3</sup>/h, soit 9,72 litres par seconde, avec une profondeur de 39 mètres.
- ✚ L'Unité de Céramique et Vaisselle (ECVE) de la wilaya est alimentée par un forage particulier dont le débit s'élève à 43,36 m<sup>3</sup>/h, équivalent à 12,6 litres par seconde. Ce forage atteint une profondeur de 117 mètres.
- ✚ La Sonacom, complexe dédié à la fabrication des cycles et cyclomoteurs (CYCMA) dans la wilaya de Guelma, est approvisionnée par un forage particulier. Ce forage présente un débit de 50 m<sup>3</sup>/h, équivalent à 13,88 litres par seconde.
- ✚ La Conserverie de tomate Zimba, située dans la wilaya de Guelma, est alimentée par un forage particulier. Ce forage présente un débit de 28,8 m<sup>3</sup>/h, équivalent à 8 litres par seconde.
- ✚ La Conserverie de tomate du Sud, implantée dans la wilaya de Guelma, est approvisionnée par un forage particulier dont le débit s'élève à 18 m<sup>3</sup>/h, équivalent à 5 litres par seconde.
- ✚ L'Unité de fabrication des pâtes Benamor, établie dans la wilaya, est alimentée par un forage particulier, présentant un débit de 3,6 m<sup>3</sup>/h, équivalent à 1 litre par seconde.
- ✚ Sur le plan minier, la région de Guelma représente une source substantielle de richesse pour l'activité industrielle en Algérie. Cette région est desservie par un réseau routier bien développé s'étendant sur une longueur totale de 1562,20 km, dont 266,20 km sont des routes nationales. L'activité minière y joue un rôle crucial, mettant en avant des ressources telles que le gisement d'argiles utilisé dans la fabrication de briques et de tuiles, des carrières fournissant des roches pour la production d'agrégats, le kaolin du Djebel Débagh, ainsi que l'unité de l'ENAMARBRE à Boumahra Ahmed, tous contribuant significativement à l'industrie locale ([Bouaicha.F, 2018](#)).

### **I.3.1.2.Agricoles**

Les zones agricoles sont principalement concentrées dans la plaine alluviale de la région d'étude. La fertilité de ces terres est grandement favorisée par la présence de la Seybouse, un vaste barrage qui garantit un étendu périmètre d'irrigation, ainsi qu'un nombre significatif de réservoirs. Les ressources agricoles de cette localité ont depuis longtemps constitué un élément de fierté, bénéficiant des avantages de ces aménagements hydrologiques ([Kachi.N, 2015](#)).

La wilaya de Guelma se caractérise par une pratique agricole diversifiée, adoptant principalement la polyculture. Les céréales occupent une place prédominante, représentant 45% des activités agricoles, suivies de l'arboriculture avec une part de 16%, et des cultures maraîchères qui contribuent à hauteur de 14%. En parallèle, l'élevage de volailles et de bétails est également une composante importante de l'activité agricole dans la région. Ces activités agricoles sont principalement localisées dans la plaine alluviale, bénéficiant ainsi des conditions favorables pour la production agricole.

### **I.3.1.3. Tourismes**

La wilaya de Guelma dispose de ressources touristiques notables, mettant en avant ses sources thermales, parmi lesquelles Hammam Débagh, Hammam Oulad Ali, Hammam N'bails, Hammam Belhachani, et Ain Larbi, sont particulièrement réputées pour leurs bienfaits rhumatismaux. En plus de ces stations thermales, la région offre un éventail de sites et de monuments touristiques, tels que le Théâtre romain et le Musée antique à Guelma, la Grande Cascade de Hammam Débagh, le Lac souterrain de Bir Ben Ousmane à Ain Hessainia, les Grottes de Taya à Bouhamdane, la Nécropole Musulmane de Roknia, les ruines romaines de Sellaoua Announa,

Ainsi que des sites historiques comme le jardin archéologique, le square, l'enceinte de l'Excaserne, et les vestiges de la muraille. En outre, la wilaya offre des expériences touristiques dans des sites forestiers, notamment la forêt de la Mahouna et la Forêt récréative de Beni Salah à Bouchegouf ([Bouaicha.F, 2018](#)).

### **I.4. Végétation**

La wilaya de Guelma, étendant ses frontières sur une superficie de 3 686,84 km<sup>2</sup>, se distingue par une couverture végétale substantielle occupant 107 704 hectares, ce qui équivaut à 28% de la superficie totale de la wilaya selon les données de la Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire ([DPAT](#)) de 2008. Les zones boisées prédominent principalement en altitude, avec des étendues remarquables comme celles du Djebel Mahouna et de Beni Salah à Bouchegouf. Ces régions sont caractérisées par la présence notable du Chêne-liège et du Chêne vert, qui constituent les essences dominantes des forêts naturelles, accompagnées de reboisements récents. On y trouve également des arbres tels que l'Olivier, l'Eucalyptus, le Cyprès, le Chêne Zen et le Pin d'Alep. Ces zones forestières abritent une diversité faunique riche, comprenant une variété d'oiseaux, de mammifères, d'insectes et de reptiles ([Kachi.N, 2015](#)).

### **I.5.Pédologie**

Dans la plaine alluviale de Guelma, on distingue quatre catégories de sols, dont les minéraux bruts, principalement constitués d'apports alluviaux qui occupent le lit majeur de l'Oued Seybouse et de ses affluents, formant ainsi la basse terrasse.

Une autre catégorie comprend les sols peu évolués d'origine non climatique, regroupés en trois types distincts : les sols d'érosion observés à l'est de Boumahra, les sols d'apport alluvial le long de l'Oued Seybouse, sur les rives droite et gauche à l'ouest de Guelma, et les sols d'apport mixte (alluvions-colluvions).

En outre, on rencontre les Vertisols à drainage externe, caractérisés par une structure argileuse sur au moins les 15 cm supérieurs. Ces sols, très répandus dans la région, sont localisés en larges bandes au nord-est de Guelma, entre Belkheir et Boumahra (**Kachi.N, 2015**).

Enfin, les sols calcimagnésiques bruns calciques vertiques se forment principalement en raison de la richesse en calcium de la roche mère, sous forme de carbonates tels que les calcaires et les marnes (**Djeraba en1973**).

### **I.6.Sismicité**

Selon le règlement parasismique algérien élaboré en 1999 (R.P.A 99 - version 2003), la wilaya de Guelma est catégorisée dans la zone IIa, caractérisée par une sismicité moyenne.

## I. Introduction

Les principaux travaux de recherche sur la géologie de la région de Guelma ont été effectués particulièrement par plusieurs études géologiques dont celle de : **Darest de la Chavanne en 1910, J. Blayac, 1912 ; L. Joleaud, 1912 ; M. Roubault, 1934 ; Durand Delga en 1955, M.Kiken en 1961, J.F.Raoult en 1974, Jean Marie Vila en 1980, J.C.Lahondere en 1987 et enfin Abdelmadjid Chouabi en 1987**, qui composent les références de base employées dans la synthèse géologique du Nord-Est-Algérien.

## II. Géologie régionale du Nord-Algérien

L'aire d'étude de notre recherche appartient à la chaîne alpine des Maghrébides, qui s'étire du Détroit de Gibraltar jusqu'au nord de la Calabre (Italie) sur une distance de plus de 2000 km. Elle traverse le Rif marocain, l'atlas littoral d'Algérie (Kabylie et Tell), et de Tunisie (Kroumirie-Nefza) (**Chouabi. A, 1987**).

Cette chaîne, positionnée entre la paléo-marge de la plaque Africaine au sud et la plaque Européenne au nord, se distingue par un empilement tectonique de nappes.

La chaîne des Maghrébides a subi des phases de déformations durant le Méso-Cénozoïque, conduisant à la formation de l'Atlas tellien. Ce processus a résulté en la création du domaine des nappes de charriage, également connu sous le nom de domaine allochtone.

On distingue trois (03) ensembles de caractéristiques principaux constituent la chaîne des maghrébides comme suit :

- Le domaine interne situé à l'intérieur de l'anneau et représenté aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne ;
- Le domaine des flysch sont des dépôts de mer profonde mis en place ;
- Le domaine externe situé à sa périphérie.

### II.1. Domaine interne

Il est formé de terrains cristallophylliens anciens de diverses natures (le socle kabyle), surplombés par un paléozoïque peu métamorphique. Du Trias à l'Oligocène supérieur, les massifs internes des Maghrébides ont formé une zone haute, souvent émergée. Ce système comprend une série de massifs littoraux, délimités au sud par leur couverture sédimentaire, principalement composée de roches carbonatées d'âge Secondaire-Tertiaire, connue sous le nom de dorsale kabyle ou chaîne calcaire. (=chaîne calcaire).

Beaucoup d'auteurs s'accordent que les différents massifs internes de la chaîne des maghrébides (zones internes bético-rifaines, Kabylies, massif péloritain de Sicile, socle calabrais) étaient à l'origine assemblés en un seul bloc, appelé l'**AIKa-PeCa** (**J. P. Bouillin. 1986**).

Cette dorsale calcaire s'étend de la Sicile jusqu'au Rif septentrional et à l'Ouest des cordillères bétiques. Elle est intensément écaillée.

## **II.2. Domaine des flysch**

Il est constitué par des sédiments de type flysch allant du Crétacé inférieur jusqu'à l'Oligo-Miocène, ce sont des dépôts de mer profonde mis en place, généralement sous la lysocline, par des courants de turbidité. Il semble s'agir surtout de formations de plaines abyssales (**J.P. BOUILLIN 1986**).

On distingue du Nord au Sud du bassin des flysch : Les flysch mauritaniens et les flysch massyliens, différant les uns des autres par leur position primitive et par leur alimentation. L'ensemble est surmonté par le Numidien d'âge Oligocène à Burdigalien basal. Ce dernier a rempli une dépression qui était l'héritière du bassin des flysch Crétacés-Paléogènes.

Généralement le numidien en Algérie est charrié sur les nappes telliennes et sur les flysch, parfois en rabotage basal ; il est localement renversé et surmonté par des formations carbonatées récentes comme au Djebel Mahouna (**J.M Vila 1980**).

### **II.2.1. Les flysch Mauritaniens**

Occupent une position relativement interne dans le domaine des flysch. La composition de ces flysch avec les séries de la dorsale maghrébide a permis de placer les dépôts des flysch mauritaniens au pied de cette dernière.

### **II.2.1. Les flysch Massyliens**

Occupent une position externe dans le domaine des flysch.

## **II.3. Domaine externe ou bien domaine des nappes**

Les unités telliennes constituent un empilement complexe de nappes à vergence sud, qui se superposent au sud à l'autochtone présaharien des hautes plaines. Ces zones hautes et rigides servent de séparation entre les chaînes littorales et l'Atlas saharien.

L'allochtone tellien est le résultat du décollement et du clivage de la couverture sédimentaire Mésozoïque-Cénozoïque, qui a été déposée sur la marge Nord de la plaque Afrique. Dans l'est de l'Algérie et aux frontières algéro-tunisiennes, on peut distinguer, du Nord vers le Sud :

### **II.4. Les unités Ultra-Telliennes**

La dénomination d'Ultra-Tellien a été proposée par **M. Durand Delga** pour représenter les séries superposées anormalement (étonnamment) au Crétacé néritique constantinois du Djebel

Débagh et du Douar Bouzitoune (**J.M.VILA, 1980**) dans la région du Nord-Est-Algérien(Guelma). Avec une variété de barres de micrites à microfaunes, le faciès dominant est celui des marnes et marno-calcaires. (**Durand Delaga et Al, 1968**).

La stratigraphie de l'Unité Ultra-Tellienne du bas en haut est la suivante :

- **Barrémien** : cet étage est caractérisé par la présence d'Ammonites au-dessus des marnes gris clair.
- **Campanien** : est constitué par des marnes bleutées parfois argileuses avec quelques niveaux biomécritiques.
- **Maestrichtien** : avec une lithologie marneuse de couleur grise à bleutée du calcaires biomécritiques.

#### **II.4.1.L'Unité Ultra - Tellienne de Djebel Houara**

Ces vastes affleurements se trouvent entre la forêt des Beni Ahmed et celle des Beni Mezline, au nord du Kef Ras Bardou et du Djebel Houara. Ces structures géologiques sont formées par l'alternance de marnes claires, beiges ou jaunes, et de marno-calcaires en petits bancs de la même couleur, riches en (Rosalines). La série stratigraphique de ces formations s'étend du Barrémien supérieur, caractérisé par la présence de *Phylloporachyeras Barodense* Cop, jusqu'au Sénonien inférieur.

#### **II.4.2.L'Unité Ultra - tellienne de Djebel Bousbaa (J. C. Lahondère. 1987)**

Cette série est principalement développée dans la région de Gueulaat Bousbaa. On observe également des indices de cette série dans la vallée de la Seybouse, près de Medjez Ammar, au Tebiebe Ammar, au sud-ouest de Guelma et près de la station de Nador à l'est. L'âge de cette série stratigraphique s'étend de l'Aptien au Lutétien.

Parmi les exemples notables, on peut mentionner un affleurement avec une microfaune de *Truncorotalia* gr, visible sur la berge est de l'Oued Seybouse près de Medjez Amar, comprenant *Globorotalia rex* Martin, et au nord de Djebel Débagh dans les marno-calcaires à cassure noire fétide et bitumineuse contenant *G.cf.Velascoensis*. (**Vila, J. M. et al, 1968**).

#### **II.5.L'Ensemble Tellien Sensu Stricto -S.S-**

Il s'agit d'un empilement (ensemble) complexe de nappes.

##### **➤ L'Unité Tellienne de Hammam Oulad Ali**

Elle affleure autour du pointement néritique du Djebel Débagh et au pied du Djebel Bousbaa. Cette unité s'emble en fait, tous les terrains coincés tectoniquement entre la série néritique constantinoise et l'Unité Ultra Tellienne du Djebel Bousbaa (**Jean.Marie.Vila 1971**). Ce regroupement est caractérisé par une prédominance notable de teintes noires dans les faciès. La

microfaune de cette série est représentée par des espèces telles que *Globotruncana stuartiformis*, *Rotalipora* sp, et *Hedbergella Washitensis*.

➤ **L'Unité Tellienne de la région de Ras El Agba-Sellaoua Announa**

Elle appartient au domaine tellien externe, formé de structures paléogènes. On y observe :

➤ **L'Unité Tellienne à Globigérines**

Cette unité Comprend un Paléocène formée de marnes, un Yprésien à calcaires en bancs à lumachelles et à Globigérines et un Lutétien inférieur à moyen avec des marnes noires à débris d'huîtres et à boules jaunes carbonatées à Kef Er Rih et Bouhachana.

➤ **Les Unités Méridionales à Calcaires à Nummulite**

Ces unités se composent d'une part des nappes Sud Sétifiennes, et d'autre part, à l'est, des lambeaux de Djebel Bardou et du versant sud de Zouara, ainsi que des klippes de Dekma et Djebel Bou Kebch. Le Crétacé n'est pas présent partout dans ces unités au sud de Guelma. En revanche, l'Éocène calcaire (Yprésien-Lutétien inférieur), riche en nummulites, et l'Éocène marneux (Lutétien supérieur) contenant des huîtres, sont présents. L'épaisseur de ce dernier niveau dépasse généralement les 3000 m.

**II.6.L'avant pays para Autochtone**

Ce sont des séries localement écaillées qui supportent les nappes du Télien externe, au Nord, et qui surmontent l'autochtone Nord Aurésien. De l'Ouest vers l'Est on distingue :

**II.6.1.Les séries néritiques Constantinoise**

Les affleurements néritiques dans la région de Guelma, représentent la terminaison orientale du domaine néritique. Ces affleurements sont isolés et de tailles variables.

Cependant pour ([J.M. Vila, 1980](#)), ce domaine aurait émergé à la fin du Crétacé et aurait ultérieurement subi un léger déplacement vers le sud (nappes néritiques constantinoises).

Les formations de la série néritique apparaissent au sommet oriental du Djebel Débagh, celui-ci s'ennoie à l'Est sous les nappes pour réapparaître à la faveur des fenêtres à Hammam Oulad Ali, au Douar Bouzitoune, à la piscine romaine d'Héliopolis (Hammam Bradaa) et enfin à l'Ouest de la station ferroviaire du Nador.

Il correspond à la chaîne carbonatée de la région de Constantine avec le caractère d'une plate-forme cachée, qui sont reportées à l'Ouest jusqu'aux chaînes Sud Sétifiennes. Il existe 03 catégories :

### 1- Catégorie du Nord Oriental

- ✓ A l'Est de Hammam Débagh (Hammam Maskhoutine) et Guelma ; Le Djebel Débagh fait partie du mole néritique constantinois qui présente des terrains autochtones datant du Jurassique et Crétacé qui soutiennent les formations allochtones des unités telliennes. Les formations autochtones essentiellement carbonatées correspondent avec les dépôts de plateforme interne qui sont parfois confinés à une nette tendance à l'ouverture au Crétacé supérieur.
- ✓ A Hammam Oulad Ali, à l'Est de la station thermique, affleure une fenêtre d'une série d'âge Sénonien sous les marno-calcaires de l'Unité Ultra-Tellienne à faciès carbonatés biodétriques (constituant des roches sédimentaires).
- ✓ A l'Ouest de la station ferroviaire de Nador et à Douar Bouzitoune à la piscine romaine d'Héliopolis.

### 2- Catégorie Central

- ✓ Autour de Djebel Oum Settas, Djebel.Mezla, Djebel. Ain El Hajar et de Constantine.

### 3- Catégorie méridional

- ✓ A l'Est, autour d'Ain Mlila, en Ouest les monts de Djebel Djaffa, Djebel Fortass et Djebel Gueriou.

Ces formations constituent un siège de nombreuses formes de Karst, près de Hammam Débagh et aussi au Bir Ben Ousmane.

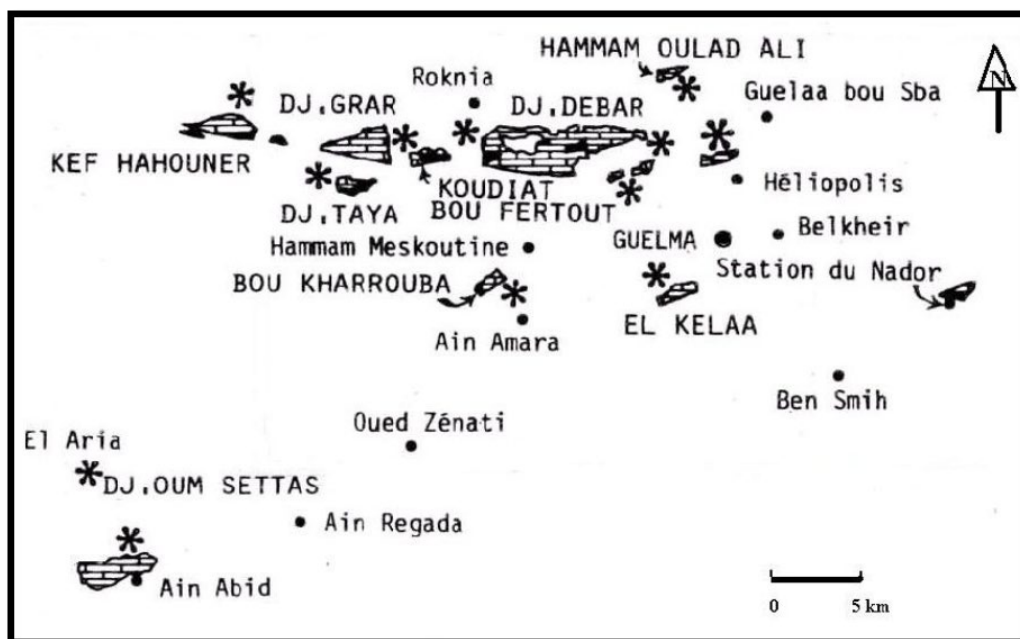


Fig. N°03 : Plan de position et coupures stratigraphiques des séries néritiques constantinoises (J.M.Vila, 1980).

### II.6.2. Le sillon écaillé des Sellaoua

Ces formations ont été étudiées par **L. David (1956)** dans les monts de la haute Medjerda et par **C. Voute (1967)**, on les rencontre dans les régions de la Chebket des Sellaoua, Ain Fakroun, Ain Babouche, Ain M'Lila et elles s'exposent (s'étalent) à Souk Ahras énormément de Ksar Sbihi.

Elles se sont déposées dans un large sillon de direction Nord-Est, Sud-Ouest, se trouve entre la plateforme atlasique au Sud et le domaine alpin au Nord. C'est un complexe de marno-calcaire monotone et marneux dominé par le Crétacé. En **1993, Chadi** estime que les séries néritiques constantinoises et des Sellaoua proviennent du même domaine.

## III. Géologie locale

Du point de vue géologique, la nature des terrains qui composent le sol et le sous-sol sont variés et leurs âges oscillent entre le Trias et le Quaternaire. Du point de vue géomorphologique, la région de Guelma correspond à une dépression de bassin allongé E-W, dans laquelle ils sont accumulées les dépôts récents du Néogène, Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud, à des reliefs constitués de terrains, allochtones, appartenant, pour l'essentiel, au domaine Tellien, constitué de marnes et de carbonates d'âge méso cénozoïque et dont la sédimentation, de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique. L'édifice structural, qui est tectoniquement fortement accidenté est bien exposé entre Guelma et Guelaat Bousbaa. Il comporte un empilement de nappes où on reconnaît aisément plusieurs unités continues, d'Est en Ouest, entre lesquelles s'intercalent des écaillés discontinues.

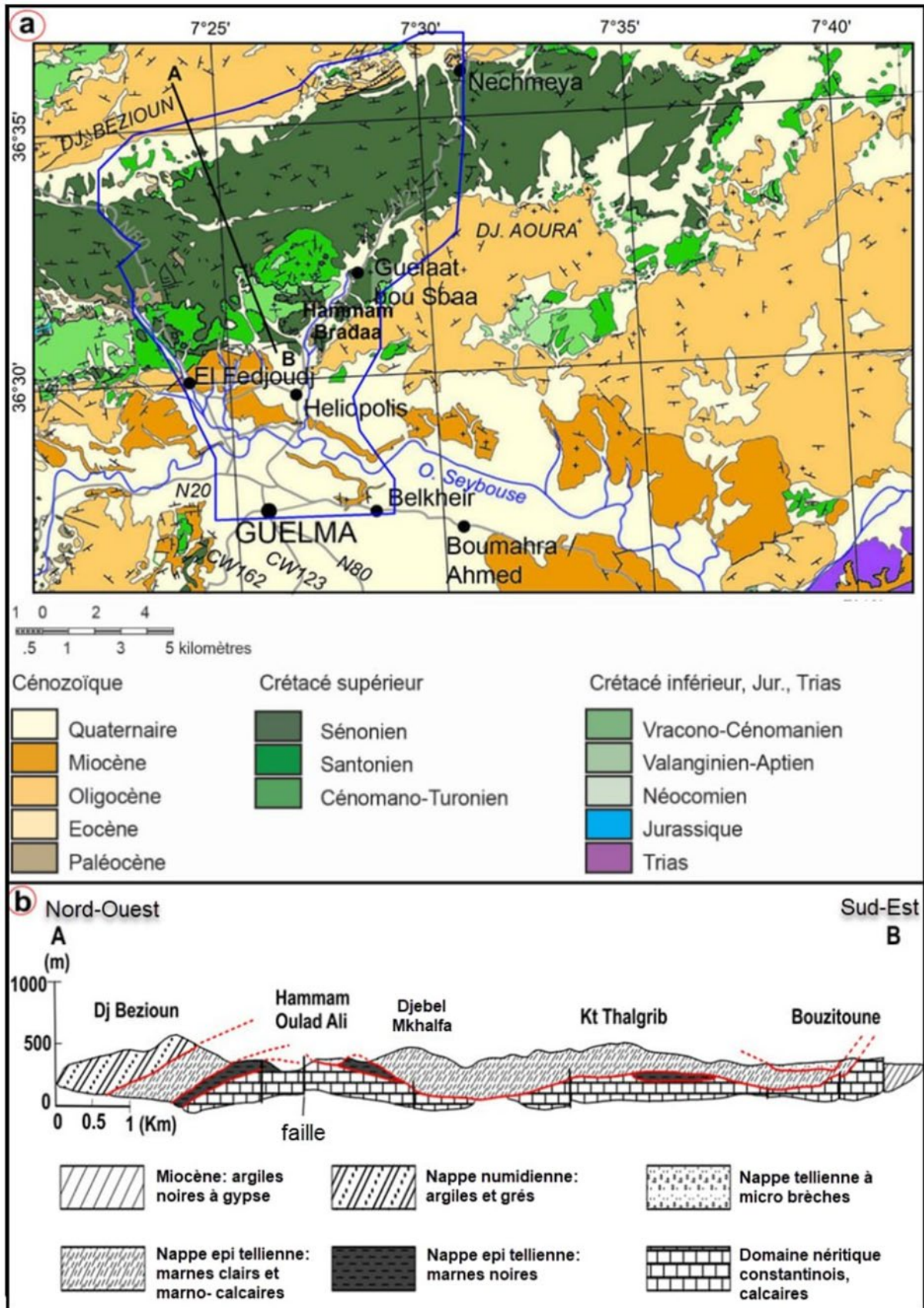


Fig. N°04 : (a) Extrait de la carte géologique simplifiée de la zone d'étude (cours en ligne de [Ruault-Djerrab](#)), (b) Coupe géologique ([Vila, 1980](#), modifiée).

#### IV. Esquisse litho stratigraphie de différentes unités structurales

L'échelle stratigraphique des formations géologiques affleurant dans la région de Guelma se répartit par des terrains allant d'âge plus ancien (Primaire) au plus récent (Quaternaire).

##### IV.1.Le Primaire

Les terrains primaires ne contiennent pas beaucoup d'affleurements, ils sont réduits et trouvés au Nord du bloc N'Bails Nador à l'entrée des gorges de l'Oued Seybouse. Ces affleurements sont faits de roche (schiste) satinée alternant avec de petits bancs de grès.

##### IV.2.Le Trias

Les formations triasiques sont situées à la base des structures géologiques de la région du Nador N'Bails et de la Mechrouha, on les trouve, uniquement à l'extrémité Est de la plaine alluviale. Elles se présentent comme une association d'argiles bariolées injectées de gypse, cargneules et de bancs disloqués de calcaires dolomitiques sombres, de schistes et de grès, englobés dans des argiles rouges et des gypses (A. Chouabi, 1987). Une étude détaillée des contours montre que le Trias jalonne aux contacts anormaux qui ont données naissance au grand bassin molassique à Guelma et c'est le cas dans le bassin du Mechrouha - Ain Tahmamine

Au Sud de la station du Nador et sur les molasses Néogènes du bassin de Guelma (J.M Vila, 1972), le Trias apparaît souvent en position chevauchante sur les terrains avoisinants.

##### IV.3.Formation du Néocomien

Plus à l'Est, au niveau du Douar Bouzitoune, près du village « Héliopolis ». On retrouve un affleurement de calcaires sombres, parfois micritiques, et/ou dolomitiques. Ces calcaires formants un alignement Est-Ouest sur une longueur d'environ 2.5 km. Ces calcaires dont les strates plongent vers le Nord et sont surmontées en concordance par la série marneuse Crétacé complète (Barrémien, Aptien, Sénonien, Danien) (Dareste de la Chavane. J.C, 1910).

Toutefois, vers les extrémités Est et Ouest de la bande de calcaire, la série Crétacé, formée de marnes et de marno-calcaires a dû être étirée et comprimée de telle sorte que les calcaires à inocérames du Sénonien viennent reposer presque directement les calcaires Néocomiens (Dareste de la Chavane. J.C, 1910).

Ces étapes d'étirements et de décollements de couches semblent être à l'origine de la mise à jour des minéralisations (calamine (mélange d'oxyde de zinc et d'oxyde ferrique), galène, antimoine et barytine), qui apparaissent principalement aux extrémités de ce massif calcaire, notamment à la nappe aquifère de Hammam Bradaa.

Deux autres petits affleurements de calcaires similaires aux précédents, ont été trouvés à l'Ouest d'Héliopolis.

#### **IV.4. Les Formations D'Aptien**

Ces formations d'Aptien comprennent des calcaires bleu gris, parfois oolithiques en banc atteignent une épaisseur de 6 mètres, et dans lequel viennent des calcaires bleus micritiques en banc plus épais et contenant une riche faune et affleurant à Bouzitoune, Djebel Djabana et Koudiat Enchir.

#### **IV.5. Les Formations D'Albien**

Dans la partie inférieure de cette série Albienne, on rencontre des marnes « schisteuses » noires ou grises, renfermant des petits lits de calcaires fins noires, repéré sur le versant Sud-Est du Djebel Bousbaa, son épaisseur dépasse les 50 mètres.

L'Albien est représenté par des bancs de calcaires de 25 à 50 cm d'épaisseur, ces calcaires sont de couleurs grises à bleutée qui atteint les 25 m d'épaisseur, et par des marnes brunes à petits bancs micritiques avec une épaisseur inférieure à 15m. (J.C.Lahondere, 1987).

#### **IV.6. Les Formations du Vraconien**

Les formations du Vraconien affleurent à l'extrémité Est de Djebel Débagh. Elles sont constituées par une dizaine de mètre de marnes vertes à bancs décimétriques de micrites de couleur verte. Ces marnes ont débuté par quelques gros bancs de micrites bleutées à radiolaires. (J. C. Lahondère, 1987).

#### **IV.7. Les Formations du Cénomaniien**

Les formations du Cénomaniien affleurent à l'Ouest de Djebel Bousbaa. (J.M. Vila, 1980). Il débute par une alternance de petits bancs décimétriques de micrites verts et de niveaux marneux de même couleur peuvent dépasser 50 m d'épaisseur. Le niveau supérieur est représenté par des marnes à lits micritiques espacés plus d'un mètre. Les teintes restent vertes, l'épaisseur varie entre 10 à 20m. (J.C.Lahondere, 1987).

#### **IV.8. Les Formations du Turonien-Coniacien**

Ces deux étages sont représentés par une alternance de bio micrites vertes à patine jaunâtre et de marnes très claires d'une épaisseur d'environ 60m. (J.C.Lahondere, 1987).

#### **IV.9. Les Formations du Santonien**

A la base on a des marnes feuilletées de calcaires marneux bleutés, leur épaisseur dépasse les 50 m. Vers le sommet, les marnes deviennent plus argileuses, renfermant des petits bancs de

calcaires. L'épaisseur de cette partie est d'environ 50 m. Les formations de cet étage affleurent à Djebel Bousbaa. (J.C.Lahondere, 1987).

#### **IV.10.Les Formations du Campanien**

Le Campanien affleure au Sud-Ouest du Djebel Bousbaa, il est constitué par les mêmes marnes bleutées parfois argileuses avec quelques niveaux bio micritiques de teintes grises. Plus haut la série devient plus argileuse, d'une teinte plus vive avec fréquents niveaux bio micritiques plus claires. Enfin, le sommet de cette série est présenté par des marnes argileuses de teinte claire. L'épaisseur du campanien peut atteindre une centaine de mètre. (J.C.Lahondere, 1987).

#### **IV.11.Les Formations du Maestrichtien**

Il affleure tout autour du Djebel Bousbaa avec une lithologie marneuse de couleur grise à bleutés du calcaire bio micritiques clairs. (J.C.Lahondere, 1987).

#### **IV.12.Les Formations du Paléocène**

Le Paléocène affleure au-dessus du massif de Bouzitoune d'âge Maestrichtien, ces formations sont représentées par des marnes noires à Globigerina et Globorotalia avec une épaisseur varie de 20 à 25 m.

#### **IV.13.Les Formations de L'Eocène inférieur et moyen**

Au Nord de la vallée de la Seybouse, au-dessus des couches inférieures du Paléocène affleure une session de calcaires importante et de marno-calcaires gris bleue à noire, avec intercalation de lits de silex noirs, mentionné par J.C de la Chavane pour la première fois en 1910. (J.C.Lahondère, 1987).

#### **IV.14.Les Formations de L'Eocène supérieur et de L'Oligocène**

Elles sont constituées, par un ensemble de couches de grés plus au moins grossiers et quartzeux et par des argiles souvent feuilletées et schisteuses, intercalées parfois de bancs de quartzites et/ou de marno-calcaires en plaquettes.

Ces formations couvrent de vastes étendues dans la zone de Guelma et sont montrées par des formations de flysch avec faciès gréseux et argilo-gréseux. (J. C. Lahondère, 1987).

#### **IV.15.Les Flysch du Numidien**

Sous le faciès argilo-gréseux à Tubotomaculum de la nappe numidienne affleurent des formations attribuées au domaine des flysch en l'occurrence de Djebel Beni Mazeline, Beni Marmi, Djebel Mahouana et Djebel Haouara. Ce dernier se situé dans la partie Est de la région étudiée, surmontant l'Unité d'El Fedjoudj. Cette unité est représentée par des argiles et des grés

en bancs d'âge allant de l'Oligocène inférieur à supérieur jusqu'au Miocène inférieur (Burdigalien inférieur).

La base de la série Numidienne est représentée par des argiles, marnes et silexites et localement à Hammam Débagh par des grès grossiers à dragées de quartz. (J.C.Lahondere, 1987).

#### IV.16. Les Formations du Mio-Pliocène (Continente Lacustre de Guelma)

Le Mio-Pliocène est représenté par des formations de marnes à gypse, argile et de conglomérats rouges. Ces formations du Mio-Pliocène sont considérées comme formations post-nappe. (J.C.Lahondere, 1987), ayant une orientation d'Est vers l'Ouest, occupant des grandes dépressions, et qui apparaissent aux bassins anciens de dépôts de flysch.

Les affleurements de cet étage s'observent au niveau de Belkheir et Mechtat El Acheche se remarquant à 03 km au Sud-Est de Héliopolis sur la rive gauche de l'Oued Seybouse.

#### IV.17. La mollasse de Guelma

Bien développé dans le Sud de la région de Guelma. Il s'agit d'une épaisse série de grès jaunâtres friables, rarement grossiers, montrant de nombreuses intercalations argilo-marneuse grises ou jaunes, parfois gypseuses, lui conférant une allure « rythmique » cette formation remanie d'abondantes microfaunes du Sénonien, de l'Eocène inférieur et de l'Eocène moyen. Sur la bordure Nord, de nombreux galets du Numidien, formation qu'elle surmonte localement en discordance nette. Il s'agit donc d'un premier cycle sédimentaire post-nappe car les argiles rouges et les conglomérats supportant la série Sulfo-Gypseuse de Guelma, la recouvre à leur tour discordance. En fonction des données qui précèdent, la comparaison avec le premier cycle post-nappe Tunisien de type Oued Mellah –Kechabta (Burolet, 1951) s'impose. En Tunisie, ces séries sont clairement fini ou post-Tortonienne.

#### IV.18. Les Formations du Quaternaire

Au niveau de cette région de Guelma, le Quaternaire se localise au centre de la plaine où on distingue :

1. **Alluvions anciennes** : ce sont des éboulis de grès numidien.

Ces formations alluvionnaires anciennes atterrissent tout le long du versant Ouest de la vallée de la Seybouse. Toutefois, ces formations sont parfois seules, parfois hétéroclites par des argiles numidiennes. (J.C.Lahondere, 1987).

- **Dans les basses terrasses (Soltanien)** : ces alluvions dominent le lit actuel de la Seybouse et ses affluents à 15 mètres d'épaisseur.

- **Dans la moyenne terrasse (Tensiftien) :** composées de sable, limons et des blocs roulées dans une matrice argileuse, son épaisseur varié de 30 à 60 mètres
- **Dans la moyenne terrasse (Salétien) :** au-dessus de l'Oued Seybouse, l'épaisseur peut varier de 35 à 60 mètres. Ces alluvions sont formées de gravier, de calcaire et galets roulés rarement à ciment marneux.

Au Sud, ce sont les tufs et calcaires lacustres datant du Pliocène supérieur à Quaternaire ancien occupant de grandes surfaces. Les croûtes calcaires qui apparaissent également au centre d'Héliopolis sont parfois tuffacés ou massifs gris à blanc rosé riches en oogones de (Charophytes). (J.M.Vila ,1980).

2. **Alluvions récentes :** ces formations sont peut importantes. Elles sont constituées de cailloutis, galets et gravier de calcaire qui sont parfois avec un ciment marneux. (J.C.Lahondere, 1987).

Les formations Quaternaires sont les plus intéressantes du point de vue hydrogéologique, car elles forment avec les formations Pliocènes le réservoir souterrain de la région de Guelma ou est axé notre étude.

#### IV.19.Les Formations du Pléistocène

Les formations Quaternaires ainsi que les formations Pliocène forment la roche réservoir souterraine de Guelma. Elles sont représentées dans cette région, par des dépôts fluvio-continentaux et présentent également, deux types de faciès l'un travertineux et l'autre alluvionnaire.

##### ✚ Le faciès travertineux

Les sédiments travertineux s'observent au Nord de la vallée de la Seybouse près de Héliopolis, à Hammam Débagh et au niveau de Hammam N'Bail. Ces dépôts de travertins se produisent en de nombreux points, soit sous forme de carapaces ou sous forme de dômes tuffacés, soit sous forme de nappes épousant la surface du sol. (Bouaicha.F, 2018).

##### ✚ Les faciès alluvionnaires

Les alluvions récentes se composent de cailloux roulés de tailles variables, appartenant en grande partie au flysch gréseux. Ces éléments, souvent assez volumineux, sont soit noyés dans un limon argileux, soit dans une matrice gréso-calcaire. (Kachi.N, 2015). Ces alluvions récentes et anciennes, représentent un développement significatif dans la vallée de l'Oued Seybouse.

## V. Evolution paléogéographique

Le paysage actuel de la wilaya de Guelma s'est formé à la suite d'événements tectoniques qui ont donné lieu à la disposition actuelle des différentes unités allochtones. L'évolution du relief a débuté pendant le Miocène inférieur en raison de la compression de la structure géologique et d'une transgression de la mer Miocène. Ce processus a conduit à la formation des unités telliennes allochtones dans le sillon écaillé de Sellaoua, ainsi que sur le domaine Néritique, suivies des formations Numidiennes. Au cours du Miocène supérieur, la mer Miocène a régressé de manière synchrone avec des mouvements de réajustement de la structure, donnant ainsi naissance au bassin actuel de Guelma.

La formation du phénomène d'éventrement, favorisé au début du Quaternaire, a été facilitée par la présence de reliefs imposants délimitant le bassin de Guelma au nord avec le Djebel Haouara et au sud avec le Djebel Mahouna. L'érosion persistante qui a affecté cette structure a exposé les alluvions qui recouvraient la vallée, donnant ainsi lieu à la formation des terrasses.

- **Miocène supérieur** : naissance et remplissage du bassin ;
- **Plio-Quaternaire** : éventrement du bassin- naissance de la vallée de la Seybouse ;
- **Quaternaire ancien** : - écoulement - érosion dans le bassin ;
- **Quaternaire récent** : dépôts des alluvions.

## VI. Evolution tectonique

La région de Guelma, située entre le littoral et les abords des hauts plateaux se caractérise par un dispositif structural assez complexe. C'est précisément dans cette zone que se sont manifestés successivement à toutes les époques avec le plus d'intensité les mouvements orogéniques qui ont affecté cette partie de l'Afrique du Nord. Cette région qui correspond à la chaîne de l'Atlas tellien, au Tell et à la chaîne numidique, se trouve par contre extrêmement tourmentée et on y trouve représentés des exemples d'accidents tectoniques de tous les genres.

(J.C.Darest De La Chavane ,1910).

Les efforts tectoniques dans la région de Guelma se sont traduits surtout par des phénomènes de compression et de refoulement intense des plis qui sont en général déversés dans la direction du Sud et du Sud-Est. Ces plis sont souvent empilés, alors ils chevauchent et se recouvrent à la façon d'écaillés imbriquées. Ce phénomène de structure écaillée(Schuppenstruktur) est fréquent dans la chaîne Atlasique ; dans ces plis déversés, les flancs inverses ont été le plus souvent supprimés par compression et par étirement. (J.C.Darreste de la Chavane, 1910).

Les contacts anormaux sont particulièrement nombreux au voisinage des affleurements Triasique. Les synclinaux s'observent dans certaine zone de cette région, que les efforts orogéniques ont moins directement affectées. Quant aux voûtes anticlinales, elles sont assez rares, et quand elles existent, elles se trouvent plutôt à l'état de brachyanticlinaux ou de dômes, structurés en Horst et Graben, dont l'une des retombées périphériques, et quelquefois les deux, sont restées en surélévation, tandis que la partie centrale s'est effondrée.

### **VI.1.Orientation des plis**

Les mouvements tectoniques du Tertiaire, en particulier les mouvements post-Éocène moyen, qui coïncident avec les mouvements pyrénéens, semblent avoir été particulièrement significatifs dans cette zone.

Ces mouvements ont été caractérisés par la formation d'alignements tectoniques, comprenant des plis ordinaires, des plis déversés, des plis imbriqués, des dômes en chapelet, ainsi que des affleurements anormaux de Trias en lame et en ellipse. Ces structures présentaient une orientation principale Est-Ouest, avec une légère inflexion vers le Sud-Ouest et le Nord-Est.

Pendant cette période, certains axes de plissement Nord-Sud, probablement déjà formés à l'ère Hercynienne ou Mésozoïque, reprennent leur activité et engendrent des plis orientés dans la direction Nord-Sud. Cependant, ces plis sont moins prononcés que ceux orientés Sud-Ouest ; Nord-Est.

L'un des principaux plis orientés Est-Ouest dans la région de Guelma correspond à la chaîne du Taya-Débagh, s'étendant vers l'est à travers le massif du Bouzitoune et le Djebel Haouara.

En ce qui concerne les alignements Nord-Sud, les exemples remarquables comprennent la boutonnière barrémienne de Guelma et celle du Djebel Bousbaa, offrant une illustration significative. Un autre alignement, situé plus à l'est, est clairement défini par les affleurements triasiques du Djebel Tifech, de Ras El Alia, de Hammam N'Bail et du massif du Nador.

Dans ce système, il est remarqué que l'orientation de chaque tronçon de plis tend d'Est-Ouest, en allant vers l'Est, à s'infléchir vers le Nord-Est, en se rapprochant des plis Nord-Sud, qui jouent le rôle d'axes de rebroussement. Cet infléchissement successif des tronçons de plis de direction Est-Ouest vers le Nord, détermine la direction générale des lignes orographiques qui sont sensiblement Sud-Ouest ; Nord Est. (**J.C.Daresté de la Chavane ,1910**).

## VI.2. Contacts anormaux

Les contacts anormaux que l'on peut observer dans cette région sont de plusieurs sortes (**J.C.Daresté de la Chavane, 1910**) :

### ✓ Les failles

Ils s'observent qu'autour des dômes et des brachyanticlinaux (dômes structuraux) constitués par les calcaires récifaux eocétacique (Eocènes et Crétacés) de la chaîne du Taya -Débagh. On en rencontre particulièrement dans les massifs du Taya et Djebel El Grar, ou par suite d'un effondrement de la partie centrale du dôme de calcaires récifaux, les retombées périphériques de ce dôme, viennent buter contre les assises marneuses du Barrémien.

### ✓ Les chevauchements

Ce groupe de contacts anormaux est fournie par l'existence, en certains points de la région, de plis déversés et imbriqués, dont le flanc inverse a disparu par étirement et compression et qui reposent en série monoclinale sur le pli sous-jacent (cas du chevauchement par pli déversé dans le massif de Djebel Bousbaa, Hammam Bradaa et au Nord d'El Fedjoudj).

Et d'autre part, par la montée diapirique des formations du Trias, qui traversent des terrains de différente nature et de différents âges (depuis le Lias jusqu'au Miocène).

### ✓ Les discordances

Sont essentiellement représentées par la discordance des flysch sur les formations Crétacées et Miocènes et celle des formations Pliocènes sur les formations du Miocène supérieur de la région de Guelma.

## VII. Conclusion

La zone d'étude fait partie du domaine externe de la chaîne des Maghrébides de L'Algérie orientale. Les terrains qui constituent le sol et le sous-sol sont variés et leurs âges oscillent entre le Trias et le Quaternaire, présentant ainsi une lithologie très variée.

La géologie du bassin de Guelma comprend :

- L'unité néritique (autochtone) du crétacé, composée principalement par une formation calcaire épaisse et massive (**Toubal, 1984**) ;
- L'unité tellienne composée de marnes et calcaire d'âge Crétacé,
- Le flysch mauritanien d'Ain Berda, d'âge oscille entre le Cénomaniens à L'Oligocène, est composé de diverse lithologie : grès micacé brèche, calcaire marne et schiste ;

- la Dorsale Kabyle est composée de deux unités : l'une inférieure (Néocomien à Eocène) constituée de formations pélagiques et une l'autre supérieure (Eocène à Oligocène) composée de formations néritique ;
- Le flysch Massylien du crétacé est constitué de marnes, de grès et de schiste ;
- Enfin, le flysch numidien est composé de grès d'âge Oligo-Miocène.

La majeure partie de ces roches sédimentaires est recouverte par une couverture Quaternaire (d'alluvions, de graviers et de sables), par des formations Miocène et du Pliocène.

Du point de vue géomorphologique, la région de Guelma correspond à une dépression à valeur de bassin allongé E-W, dans laquelle ce sont accumulées les dépôts récents du Néogène, Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud, à des reliefs constitués de terrains, allochtones, appartenant, pour l'essentiel, au domaine Tellien, connu pour être géologiquement constitué de marnes et de carbonates d'âge méso cénozoïque et dont la sédimentation, de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique. L'édifice structural de ce pays, qui est tectoniquement fortement accidenté est bien exposé entre Guelma et Guelaat Bousbaa. Il comporte un empilement de nappes où on reconnaît aisément plusieurs unités continues, d'Est en Ouest, entre lesquelles s'intercalent des écailles discontinues.

Les formations néritiques constantinoises qui représentent la terminaison orientale du domaine, apparaissent à la faveur de fenêtres, à Djebel Débagh, à l'Est de Hammam Oulad Ali, à Héliopolis et à Nador. D'Ouest en Est ces formations carbonatées constituent le substratum des nappes telliennes de Guelma.

## A/ CLIMATOLOGIE

### I. Introduction

Les caractéristiques climatiques influencent les variations des réserves en eaux souterraines, de ce fait, il est impératif de connaître leurs évolutions dans l'espace et dans le temps.

Aujourd'hui, de nombreuses questions se posent concernant l'avenir de la planète terre vis-à-vis des changements climatiques. Pour mieux comprendre le fonctionnement et les influences d'un système hydraulique de surface dans la région de Guelma, il est nécessaire d'établir un bilan hydrique. L'évaluation de ce bilan exige la connaissance des paramètres suivants : les précipitations, températures, l'infiltration, l'évaporation et le ruissellement afin de déterminer le taux d'infiltration nécessaire à l'alimentation et au renouvellement des réserves d'eaux souterraines de la région en question.

Du point de vue hydrologique la zone d'étude représente une partie intégrante du bassin versant de l'Oued Seybouse avec une superficie de l'ordre de 1796 Km<sup>2</sup>. Dans cette approche hydro climatique, nous avons utilisé les données des précipitations et des températures recueillies auprès de la station météorologique de Belkheir, wilaya de Guelma, et qui est réparties sur une période de 40 ans.

### II. Analyse des facteurs climatiques

Dans cette étude climatologique, les données de précipitations, de températures sont récoltées au niveau de station météorologique de Belkheir, localisée respectivement au Centre de la région étudiée.

La période d'observation est de 40 années hydrologiques (1981- 2021) pour la station de Belkheir, dont les coordonnées sont résumées dans le tableau 1 suivant.

**Tableau 01** : Caractéristiques géographiques de la station météorologique de Belkheir :

Station météorologique	Coordonnées		Altitude (m)	Période d'observations
	Longitude	Latitude		
Guelma / Belkheir	07°28'E	36°28'N	227	1981-2021

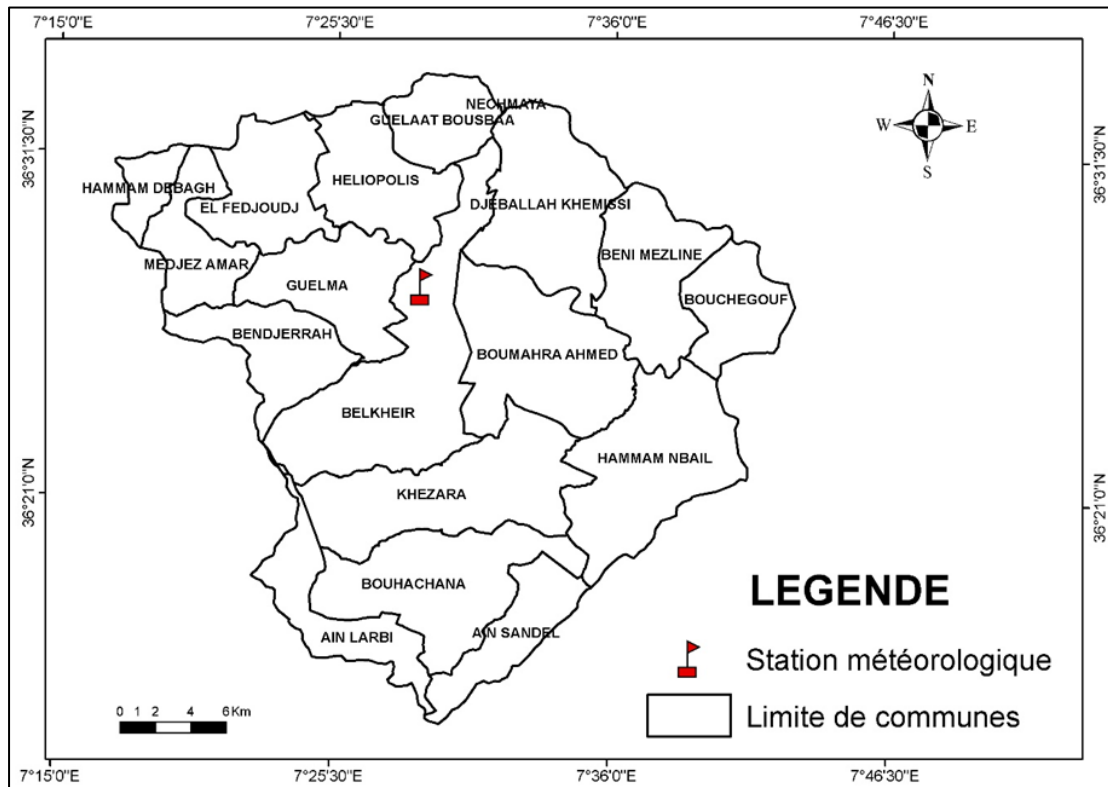


Fig. N°05 : Localisation de station météorologique dans la région de Guelma (Khadri.R,2023).

Les principales caractéristiques climatologiques du bassin versant de la moyenne Seybouse concernent essentiellement les précipitations moyennes ( $P_{moy}$  en mm) et les températures correspondantes en ( $^{\circ}C$ ), et qui sont déterminées comme suit :

### II.1. Les précipitations

Les précipitations (pluies) jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'eau. Elles permettent le renouvellement total ou partiel des nappes au moyen d'infiltrations et conditionnent l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eaux. Les pluies augmentent avec l'altitude et diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

#### Station météorologique de Belkheir

Les précipitations sont réparties sur une longue période d'observations moyennant **700mm/an**, au niveau de la station de Belkheir et dont les données sont mentionnées comme suit :

**Tableau 02** : Les précipitations moyennes mensuelles à la station météorologique de Belkheir /1981-2021.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<b>P moy (mm)</b>	54,46	60,25	75,20	88,87	86,68	65,94	72,14	62,08	55,62	25,83	10,69	25,77

La représentation moyenne mensuelle des précipitations sur une période de quarante- ans, nous a permis de constater que le mois le plus arrosé correspond au mois de Décembre avec une

moyenne mensuelle égale à 88,87 mm alors que le mois le plus sec correspond au mois de juillet avec une moyenne mensuelle égale à 10,69 mm. La moyenne interannuelle des précipitations pour la période de 1981 à 2021 est de **683,52 mm** (TAB. 02).

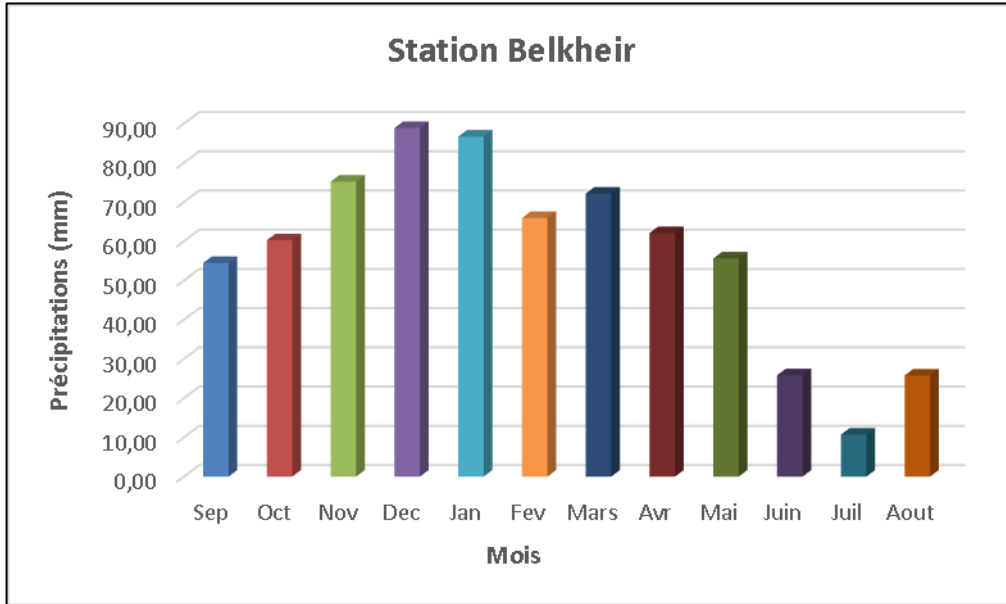


Fig. N°06 : Répartition des précipitations moyennes mensuelles – station météorologique de Belkheir /1981 - 2021.

## II.2.Variation saisonniers et annuelles des précipitations

Les précipitations sont réparties suivant les saisons agricoles [Automne (Septembre, Octobre et Novembre), Hiver (Décembre, Janvier et Février), Printemps (Mars, Avril et Mai) et enfin Eté (Juin, Juillet et Aout)].

Les pourcentages moyens des précipitations tombées chaque saison durant les périodes (1981/2021), sont calculés par l'équation suivante :

$$P\% = \frac{\bar{P}_S}{P_T} \times 100 \quad ; \quad \bar{P}_S = \frac{1}{N} \sum p_i \quad (1)$$

Avec :

P% : Pourcentage moyen des précipitations tombées chaque saison.

$\bar{P}_S$ : Pluviométrie moyenne pour chaque saison (mm).

P<sub>T</sub> : Pluviométrie totale de la période observé (mm).

✓ **Station météorologique de Belkheir**

**Tableau 03** : Les précipitations moyennes mensuelles et saisonnières à la station météorologique de Belkheir /1980-2021.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>P (mm/an)</b>	54,46	60,25	75,20	88,87	86,68	65,94	72,14	62,08	56,52	25,83	10,69	25,77
<b>saison</b>	<b>Automne</b>			<b>Hiver</b>			<b>printemps</b>		<b>Eté</b>			
<b>P %</b>	27,78			35,33			27,77		9,11			
<b>P mm</b>	189,91			241,49			189,84		62,28			

L'étude des précipitations saisonnières montre que les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver avec 35,33% des pluies moyennes annuelles et le printemps avec 27,77%. L'automne représente 27,78% et l'été avec seulement 9,11% des précipitations moyennes annuelles. (Fig. N°07).

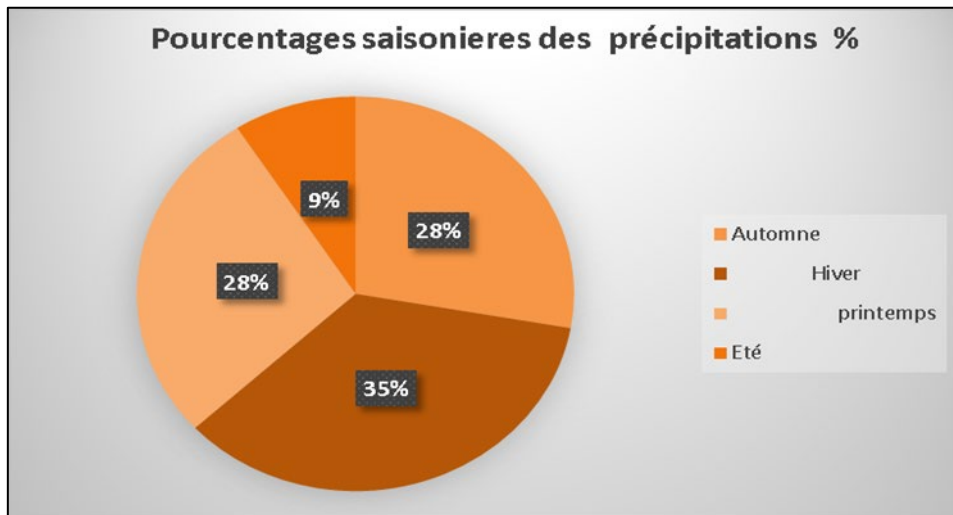


Fig. N°07 : Pourcentages saisonniers des précipitations pour la période de 1981 à 2021 à la station de Belkheir.

**II.3.Coefficient pluviométrique**

Le coefficient pluviométrique (CP) est un paramètre climatique qui permet de déterminer les années déficitaires et les années excédentaires. Il est défini comme étant le rapport de la pluviométrie de l'année considérée à pluviométrie moyenne pour une station donnée.

$$Cp = \frac{P}{Pa} \quad (2)$$

Où

Cp : Coefficient pluviométrique ;

P : pluviométrie de l'année considérée (mm) ;

Pa : pluviométrie moyenne pour une période d'année (mm).

Si : - CP > 1 ⇒ on a une année excédentaire.

- CP < 1 ⇒ on a une année déficitaire.

Les données du coefficient pluviométrique sont mentionnées sur le tableau 04 ci-dessous :

**Tableau 04** : Coefficient pluviométrique de la station météorologique de Belkheir

Année hydrologique	Station de Belkheir	
	Cp	Observation
1981-1982	1,09	Ann, Exc.
1982-1983	0,71	Ann, Déf.
1983-1984	0,87	Ann, Déf.
1984-1985	1,06	Ann, Exc.
1985-1986	0,84	Ann, Déf.
1986-1987	1,16	Ann, Exc.
1987-1988	0,74	Ann, Déf.
1988-1989	0,84	Ann, Déf.
1989-1990	0,89	Ann, Déf.
1990-1991	1,15	Ann, Exc.
1991-1992	1,08	Ann, Exc.
1992-1993	1,00	Ann, Exc.
1993-1994	0,70	Ann, Déf.
1994-1995	0,89	Ann, Déf.
1995-1996	1,21	Ann, Exc.
1996-1997	0,65	An, Déf.
1997-1998	1,11	Ann, Exc.
1998-1999	0,96	Ann, Déf.
1999-2000	0,93	Ann, Déf.
2000-2001	0,77	Ann, Déf.
2001-2002	0,74	Ann, Déf.
2002-2003	1,40	Ann, Exc.
2003-2004	1,25	Ann, Exc.
2004-2005	1,33	Ann, Exc.
2005-2006	1,00	Ann, Exc.
2006-2007	0,97	Ann, Déf.
2007-2008	0,91	Ann, Déf.
2008-2009	1,30	Ann, Exc.
2009-2010	1,03	Ann, Exc.
2010-2011	1,26	Ann, Exc.
2011-2012	1,21	Ann, Exc.
2012-2013	0,91	Ann, Déf.
2013-2014	1,02	Ann, Exc.
2014-2015	1,16	Ann, Exc.
2015-2016	0,86	Ann, Déf.
2016-2017	0,74	Ann, Déf.
2017-2018	0,46	Ann, Déf.
2018-2019	1,20	Ann, Exc.
2019-2020	1,49	Ann, Exc.
2020-2021	1,09	Ann, Exc.

D'après les valeurs des coefficients pluviométriques représentées dans le tableau 04, ci-dessus, on constate que pour la station de Belkheir, les années excédentaires (arrosées) sont supérieures aux années déficitaires (sèche) sur toute la période d'observation (1981/1982 à 2020/2021).

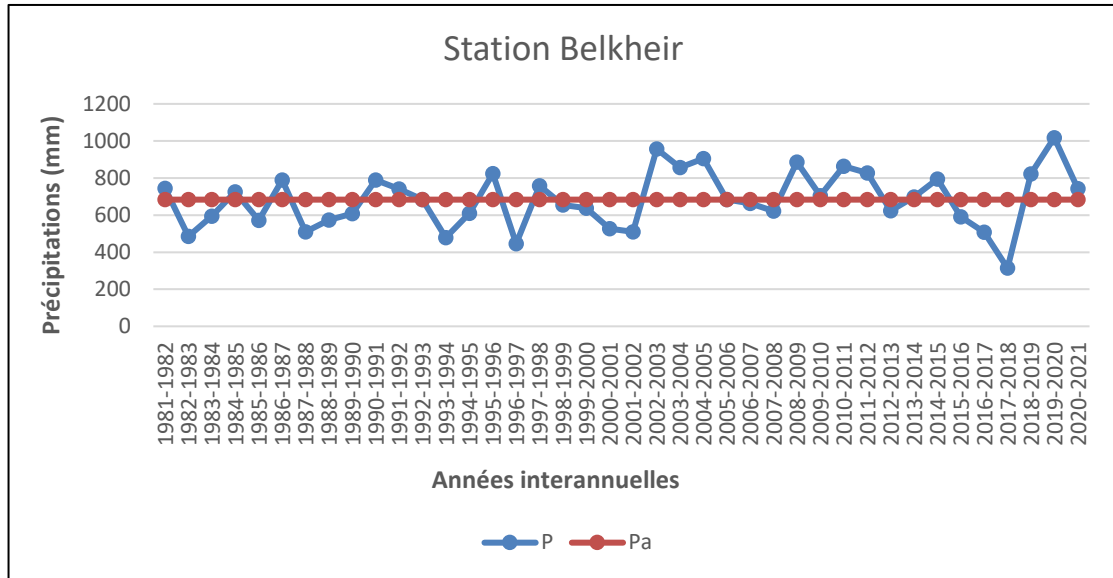


Fig. N°08 : Variation des coefficients pluviométriques à la station météorologique de Belkheir 1981-2021.

#### II.4.La température

La température est un facteur très important régissant le phénomène d'évapotranspiration et donc le déficit d'écoulement.

La température mesurée à la station météorologique de Belkheir (1981/2021), est illustrées dans le **tableau 05** suivant :

Mois Station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	T moy
Belkheir	22,08	17,87	12,18	8,49	7,92	8,73	11,12	14,38	18,41	23,08	26,35	26,34	<b>16,41</b>

Le **tableau 05** des températures moyennes mensuelles de la station fait ressortir le mois le plus froid, qui correspond au mois de Janvier avec une température moyenne de l'ordre de 7,92 C° pour la station de Belkheir ,alors que le mois le plus chaud correspond au mois de Juillet et Aout avec une température moyenne de 26,35 C°.

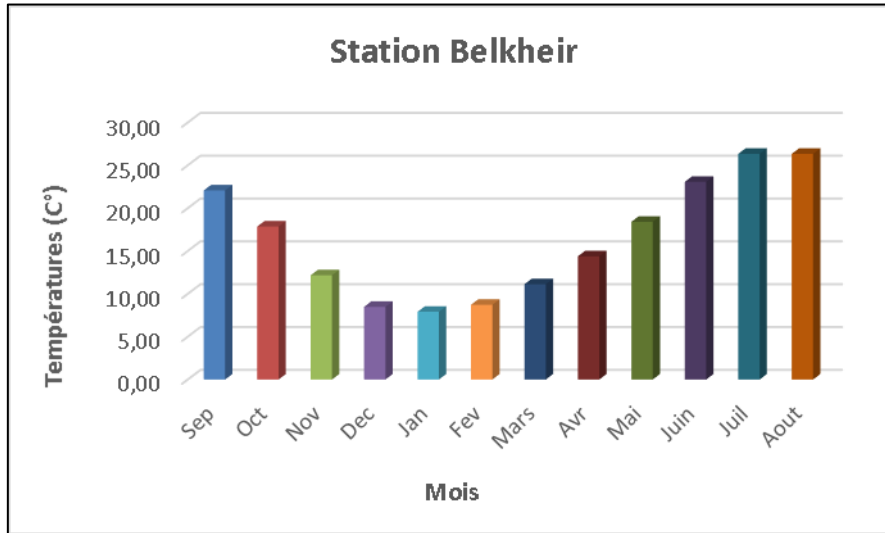


Fig. N°09 : Répartition des températures moyennes mensuelles selon la station de Belkheir.

### II.5. Diagramme Ombrothermique ( $P = 2T$ )

Un diagramme Ombrothermique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures ( $P = 2T$ ). Selon la définition de Gausson et Bagnouls, un mois humide où la somme de précipitations est supérieure ou égale au double de la température moyenne mensuelle  $P \text{ (mm)} \geq 2T \text{ (°C)}$ , et un mois sec où la somme totale de précipitations est égale ou inférieure au double de la température moyenne mensuelle  $P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ (°C)}$ ,

Cette méthode permet de déterminer la période sèche qui s'étale sur quatre mois environ, du mois de juin au mois de septembre alors que la période humide s'étale sur le reste de l'année.

#### ✓ Station météorologique de Belkheir

Le diagramme Ombrothermique établi pour la station de Belkheir montre l'existence de deux saisons bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du mois de Juin avec une valeur de température moyenne de (23,1°C), jusqu'au mois d'Octobre avec une valeur de (17,9°C).
- Une saison humide plus longue qui s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai avec des valeurs de température qui varient entre (17,9°C) et (18,4 °C).

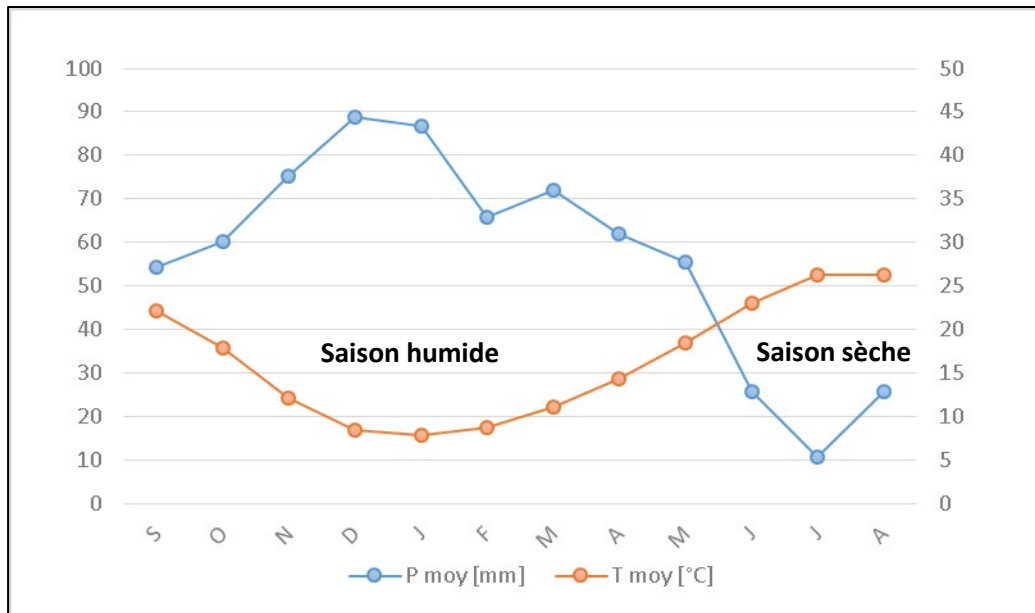


Fig. N° 10 : Diagramme Ombrothermique à la station de Belkheir (1981-2021).

### III. Types de climats

#### III.1. Détermination de l'indice d'Euverte

La méthode de l'indice d'Euverte fait appel à deux paramètres essentiels qui sont la température et la précipitation établies mensuellement où le rapport P/T permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol.

Le rapport permet également de définir plusieurs types de régimes dont ils sont mentionnés dans le **tableau 06** suivant

Types de régime	Indice d'Euverte
régime très sec	$(P/T) < 1$
régime sec	$1 < (P/T) < 2$
régime subhumide	$2 < (P/T) < 3$
régime humide	$(P/T) > 3$

Où

**P** : précipitation moyenne mensuelle (mm) ;

**T** : température moyenne mensuelle (°C).

#### ✓ Station météorologique de Belkheir 1981/2021

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>P (mm)</b>	54,46	60,25	75,20	88,87	86,68	65,94	72,14	62,08	55,62	25,83	10,69	25,77
<b>T (°C)</b>	22,08	17,87	12,18	8,49	7,92	8,73	11,12	14,38	18,41	23,08	26,35	26,34
<b>P/T</b>	2,47	3,37	6,18	10,47	10,95	7,55	6,49	4,32	3,02	1,12	0,41	0,98

Les résultats obtenus du rapport (P/T) à la station de Belkheir mentionnés dans le **tableau 07** ci-dessus, montrent que la période humide commence du mois d’Octobre jusqu’au mois de Mai, la période subhumide correspond au mois de Septembre, ainsi que la période sèche correspond au mois de Juin, le régime très sec présenté par le mois de Juillet et le mois de Août.

### III.2.Détermination de l’indice d’aridité de De Martonne

Pour déterminer le type du climat de la région étudiée, De- Martonne a établi une formule de l’indice d’aridité en se basant sur les températures et les précipitations.

$$IDA = \frac{P}{(T+10)} \quad (3)$$

Avec :

A : indice de Martonne ;

P : précipitations moyennes annuelles ;

T : températures moyennes annuelles ;

Pour :

- $A < 5$  : climat hyperaride.
- $5 < A < 7.5$  Climat désertique.
- $7.5 < A < 10$  Climat steppique.
- $10 < A < 20$  Climat semi-aride.
- $20 < A < 30$  **Climat tempéré ou subhumide.**
- $30 < A < 55$  Humide.

**Tableau 08** : Indice d’aridité de De Martonne (A)

Station	P (mm)	T (°C)	IDA	Remarque
Belkheir (1981/1982-2020/2021)	683,52	16,41	25,88	<b>Climat Tempéré</b>

Selon De-Martonne, les valeurs de l’indice d’aridité (**IDA**) de la station de Belkheir sont mentionnées dans le **tableau 08** ci-dessus, comprise entre 20 et 30 indiquent que le climat de la région de Guelma sur laquelle est axée notre étude est de type **tempéré**.

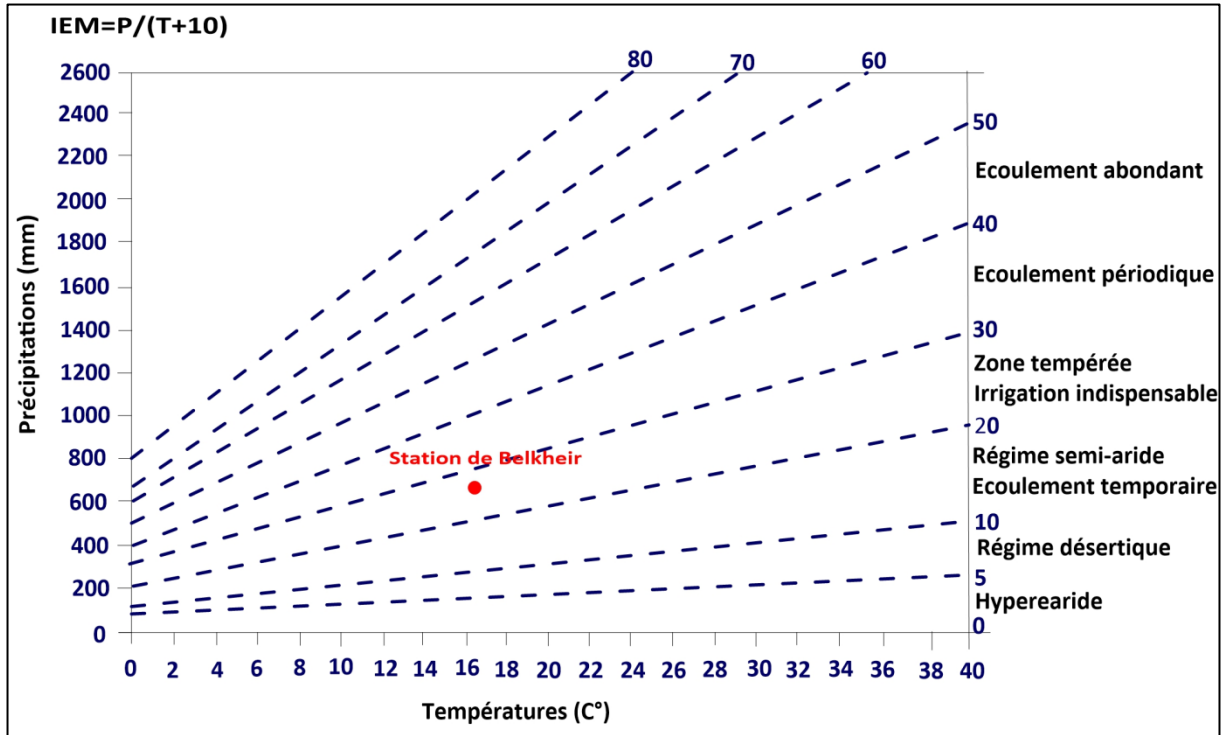


Fig. N°11 : Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martonne.

### III.3.Détermination de l'indice d'aridité mensuel de Martonne mensuelle

L'indice mensuel (i), donné par la formule :

$$IDM = \frac{12 \cdot P}{(T + 10)} \quad (4)$$

Avec :

P : moyenne mensuelle des précipitations en mm ;

T : moyennes mensuelles des températures en °C ;

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année, donne les résultats de station de mesure qui sont présentés dans le tableau 09 suivants :

**Tableau 09** : Indice mensuel d'aridité (I) moyen à la station météorologique de Belkheir, (1981-2021).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>IDM Belkheir</b>	20,37	25,94	40,69	57,68	58,04	42,25	40,99	30,56	23,49	9,37	3,53	8,51

Selon les résultats des valeurs de l'indice mensuel d'aridité à la station de Belkheir, les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars et Avril présentent un climat humide, les mois de Juin et Aout indiquent un climat steppique, les mois de Septembre, Octobre et Mai montrent un climat tempéré et le mois de Juillet représente un climat hyperaride.

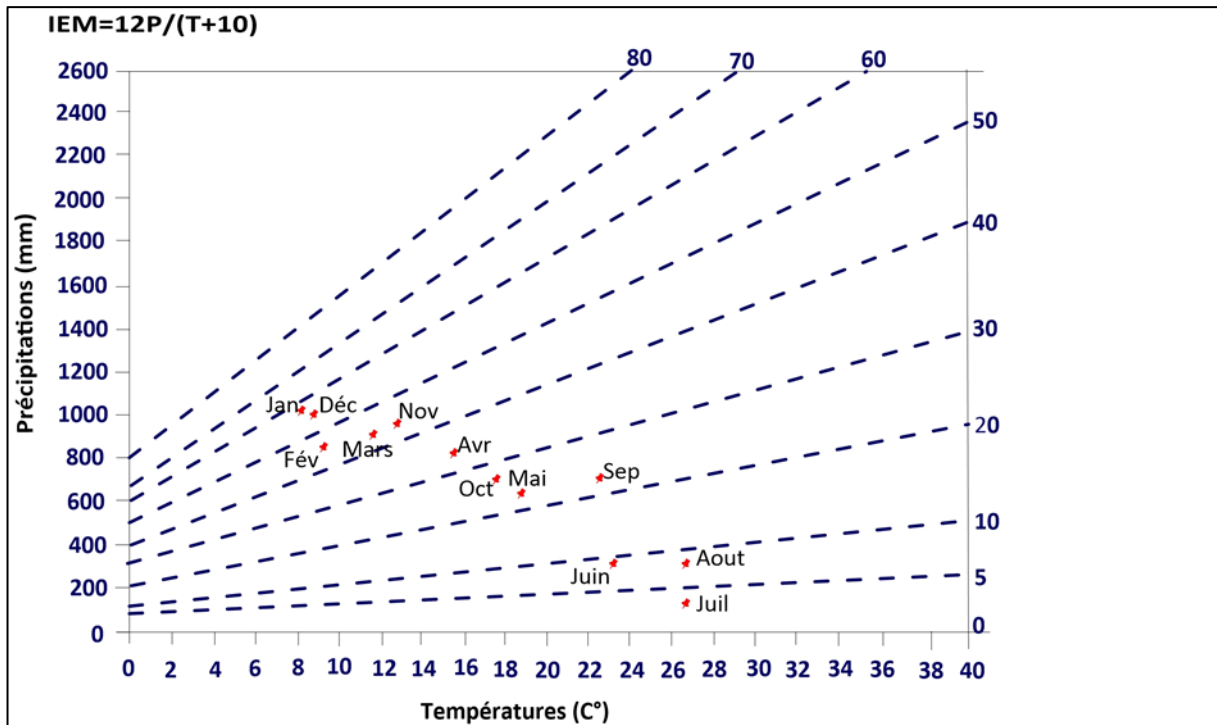


Fig. N°12 : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de DE Martonne.

### III.4. Détermination de l'indice d'humidité et classification climatique de l'FAO-UNESCO

L'indice d'humidité utilisé par l'**F.U.N.E.S.C.O** et la **F.A.O** durant l'année 1977, pour délimiter les zones semi-arides et les zones arides, à partir du rapport des précipitations annuelles et l'évapotranspiration, selon la formule de Howard Penman (1948) suivante :

$$IH = \frac{P}{ETP} \quad (5)$$

Les catégories de délimitation des zones arides et semi arides sont les suivantes :

Pour,

- $IH < 0.03$  : climat Hyperaride :
- $IH = 0.03$  à  $0.2$  : climat Aride
- $IH = 0.2$  à  $0.5$  : climat Semi-aride
- $IH = 0.5$  à  $0.75$  : climat Subhumide.

**Tableau 10** : Indice d'humidité selon l'FAO-UNESCO

Station	P (mm)	ETP (mm)	IH	Observations
Belkheir (1981/1982-2020/2021)	683,52	869,9	0,7	<b>Climat subhumide</b>

Les résultats de l'indice d'humidité utilisé par l'**P.U.N.E.S.C.O** et la **F.A.O** dans la station météorologique de Belkheir indiquent que le climat de la région de Guelma est **subhumide** selon la formule de Howard Penman.

### III.5.Indice de Paul Moral

L'indice de Paul Moral est déterminé à partir des précipitations annuelles (mm) et des températures moyennes annuelles (°C). La valeur de cet indice permet de distinguer un climat sec ( $IM < 1$ ) et un climat humide ( $IM > 1$ ) selon la formule suivante :

$$IM = \frac{P}{(T2-10T+200)} \quad (6)$$

**Tableau 11** : Indice de Paul Moral

Station	P (mm)	T (C°)	IM	Observations
Belkheir (1981/1982-2020/2021)	683,52	16,41	2,24	<b>Climat subhumide</b>

Les valeurs de l'indice de Paul Moral pour la station de Belkheir confirment que le climat de la wilaya de Guelma est de type subhumide.

### III.6.Indice de Stewart

L'indice de Stewart tient compte des précipitations moyennes annuelles et des températures moyennes des minima du mois le plus froid et maxima du mois le plus chaud.

$$Q2 = \frac{3.43 P}{(M-m)} \quad (7)$$

P : précipitations moyennes annuelles en mm ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en (°C) ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid en (°C) ;

Pour :

$10 < Q2 < 50$  : climat semi-aride.

$Q2 < 2$  : climat désertique.

$Q2 > 50$  : climat subhumide.

**Tableau 12** : Indice de Stewart

Station	P (mm)	M	m	Q <sub>2</sub>
Belkheir	683,52	35,45	2,53	71,26

Le Q<sub>2</sub> calculé pour la station de Belkheir est égal à donc un climat subhumide.

### III.7.Climagramme de Louis Emberger

L'indice climatique de Louis Emberger permet de définir les différents types de climats méditerranéens, depuis le saharien, jusqu'à le climat humide et est défini par la relation suivante :

$$Q_2 = \frac{2000 P}{(M^2 - m^2)} \quad (8)$$

Où :

Q: Quotient pluvio-thermique d'Emberger ;

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

M<sup>2</sup>: la température moyenne maximum du mois le plus chaud, en degré (C°) ou kelvin (K°).

m<sup>2</sup> : la température moyenne minimum du mois le plus froid, en degré(C°) ou Kelvin

$$(K^\circ).T (K^\circ) = (TC^\circ) + 273,2 \quad (9)$$

**Tableau 13** : Quotient pluvio-thermique de Louis Emberger

Station	P (mm)	M		m		Q <sub>2</sub>
		T (C°)	T (K°)	T (C°)	T (K°)	
Belkheir	683,52	35,45	308	2,53	275,73	71,06

Selon les valeurs de **Q** et **m**, on peut distinguer plusieurs zones de climat :

60 < **Q** < 100 ; climat **subhumide**, p= 600-900 mm/an ;

30 < **Q** < 60 : climat semi-aride, p= 300-600 mm/an ;

12 < **Q** < 30 : climat aride, p= 100-300 mm/an ;

**Q**< 100 mm/an : climat saharien ou désertique.

Les valeurs du quotient pluviométrique (Q<sub>2</sub>) pour la station météorologique de Belkheir permettent de dire que le climat est subhumide.

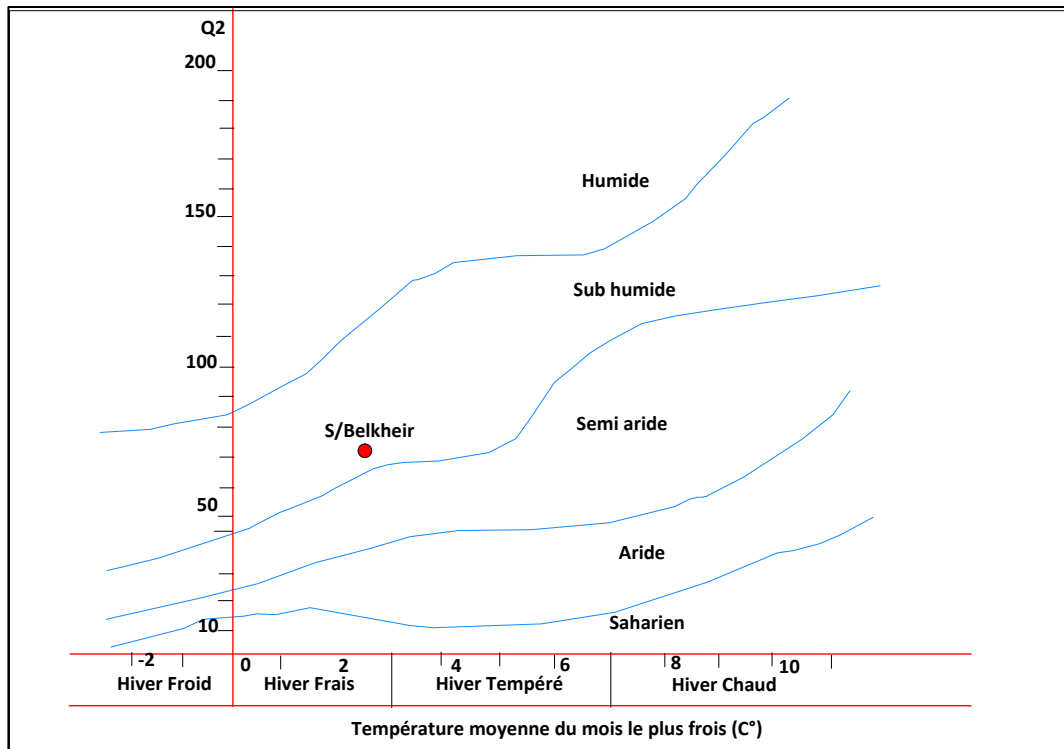


Fig. N°13 : Climagramme de LOUIS. Emberger à la station de Belkheir.

#### IV. Notion du bilan hydrologique

Le bilan d'eau global correspondant à une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan du bassin versant autrement dit de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations. Il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration). Pour cela, on va se baser sur les données de station de Belkheir, wilaya de Guelma qui possèdent respectivement des séries d'observations homogènes et continues de 40ans (1981-2021).

L'équation générale du bilan au niveau d'un bassin versant s'écrit de la manière suivante :

$$P(mm) = Ex(mm) + ETR(mm) \quad (10)$$

Avec :  $(Ex\ mm) = I(mm) + R(mm) + \Delta V \quad (11)$

Où :

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

Ex : excédent moyen annuel (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm) ;

I : Infiltration (mm) ;

R : ruissellement (mm).

$\Delta V$  : variation de la réserve, généralement très faible.

#### IV.1.L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un paramètre très important du bilan hydrologique ainsi que les réserves d'eau souterraines, ce processus d'évapotranspiration dépend de plusieurs facteurs, de la température, de la couverture végétale, de l'humidité et de l'insolation. Elle correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau par deux phénomènes, l'un physique qui est l'évaporation à partir des surfaces libres et l'autre biologique qui est la transpiration des plantes.

##### IV.1.1.Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et être transpirer sur une surface donnée pendant une période bien définie, en considérant les apports d'eau suffisants.

De nombreuses formules ont été établies par différents auteurs pour calculer l'évapotranspiration potentielle ETP à partir des éléments climatiques comme la température, la précipitation, le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i).

Dans notre cas, nous avons utilisé la formule de Thornthwaite qui est déterminée comme suit :

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.5} \quad (12)$$

$$I = \sum_i^{12} i, \quad a = \frac{1.6I}{100+0.5} \quad (13)$$

$$ETP = 16 * \left(10 \frac{T}{I}\right)^a * K \quad (14)$$

$$K = \left(\frac{n*H}{360}\right) \quad (15)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré en mm ;

i : Indice thermique mensuel ;

I : Indice thermique annuel ;

T : Température moyenne du mois considéré en °C ;

K : correction pour la latitude ;

n : nombre de jours dans le mois considéré ;

H : nombre moyen d'heures de jours (entre le levé et le coucher du soleil).

a : Exposant climatique.

✓ **Station météorologique de Belkheir**

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle ETP à la station de Belkheir, wilaya de Guelma au moyen de la méthode de Thornthwaite sont mentionnées dans le **tableau 14** ci-dessous suivant :  $i=77,2$   $a=1,73$

Période	T (°C)	i	K	ETP <sub>C</sub> (mm)	P (mm)
S	22,1	9,5	1,03	102,1	54,5
O	17,9	6,9	0,97	66,6	60,2
N	12,2	3,8	0,86	30,4	75,2
D	8,5	2,2	0,81	15,3	88,9
J	7,9	2,0	0,87	14,6	86,7
F	8,7	2,3	0,85	16,9	65,9
M	11,1	3,4	1,03	31,1	72,1
A	14,4	5,0	1,10	51,8	62,1
M	18,4	7,2	1,21	87,5	55,6
J	23,1	10,1	1,22	130,6	25,8
J	26,4	12,4	1,24	167,0	10,7
A	26,3	12,4	1,16	156,1	25,8
<b>Année</b>	<b>16,4</b>	<b>77,2</b>		<b>869,9</b>	<b>683,5</b>

**IV.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)**

Par définition l'évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) est la somme de la transpiration réelle et de l'évaporation pour une période définie et une surface donnée. Cette dernière est en fonction de la quantité de pluie tombée dans le bassin de la réserve maximale en eau du sol.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), nous avons essayé de calculer ce paramètre réel par les formules suivantes :

- ✚ Méthode de Turc.
- ✚ Méthode de Coutagne.
- ✚ Méthode de Wundt.
- ✚ Méthode de Thornthwaite.

↳ **Méthode de Turc**

Cette formule de L. Turc permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne et tenant compte de la durée réelle de l'insolation. Elle est applicable pour tous les climats et est donnée de la façon suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{(0,9 + \frac{P^2}{L^2})}} : L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (16)$$

Avec :

ETR :Evapotranspiration réelle annuelle en mm ;

P :Précipitation annuelle en mm ;

T :Température moyenne annuelle en °C ;

L :Pouvoir évaporant.

Les résultats de l'ETR sont portés dans le **tableau 15** ci-dessous.

Paramètres	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Station de Belkheir	683,52	16,41	931,20	569,84

#### ↳ Méthode de Coutagne

Coutagne a défini une formule empirique permettant de calculer l'ETR qui est la suivante :

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (17)$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

$\lambda$  : coefficient dépendant de la température

Cette formule n'est valable que si la quantité des précipitations en(m) répond à la condition suivante :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \quad \text{pour } \lambda = \frac{1}{0.8+0.14T} \quad (18)$$

**Tableau 16** : Vérification de la condition  $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$

Paramètres	$\lambda$	$\frac{1}{8\lambda}$	$< P (m) <$	$\frac{1}{2\lambda}$
Station de Belkheir	0,32	0,3872	0,6835	1,5625

Ces valeurs permettent de déterminer les valeurs de l'ETR pour la station météorologique de Belkheir dont les résultats sont portés dans le tableau 17 suivant :

**Tableau 17** : ETR selon la formule de Coutagne

Paramètres	P (m)	T (°C)	$\lambda$	ETR (m)	ETR(mm/an)
Station de Belkheir	0,6835	16,41	0,32	0,5326	532,67

#### ↳ Méthode de Wundt

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne, permet de déduire la valeur de l'ETR en prenant en considération la température moyenne annuelle (T°) et les précipitations annuelles (P).(voir **abaque**).

↳ **Méthode de C.W Thornthwait**

L'évaluation de l'évapotranspiration réelle par l'établissement du bilan hydrique peut s'effectuer selon deux cas. :

**Premier cas** : Si  $P > ETP$ , L'évaporation réelle sera égale à l'ETP ( $ETR = ETP$ ), la quantité d'eau qui reste ( $P - ETR$ ) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe (constitution de réserves), soit sous la forme de ruissellement ; la période sera dite excédentaire.

**Deuxième cas** : Si  $P < ETP$ , l'évaporation réelle sera égale à P ( $ETR = P$ ), il y aura prélèvement sur les réserves, absence d'écoulement ; la période sera dite déficitaire.

Ce deuxième cas est subdivisé en deux sous cas :

↳  $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$

↳  $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

Si  $RFU = 0$ , la quantité ( $DA = ETP - ETR$ ) représente le déficit agricole, c'est-à dire la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes, c'est le besoin des cultures à l'irrigation.

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle **ETR** calculée par les différentes méthodes sont résumées dans le **tableau 18** suivant :

Méthodes	ETR (mm)
Turc	569,84
Coutagne	532,67
Thornthwaite	492,6
Wundt	550

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle d'après les différentes méthodes sont proches, alors que celles de la méthode de Thornthwaite sont faibles par rapport aux valeurs des autres méthodes, mais restent acceptables et n'excluent en rien la fiabilité de ces résultats.

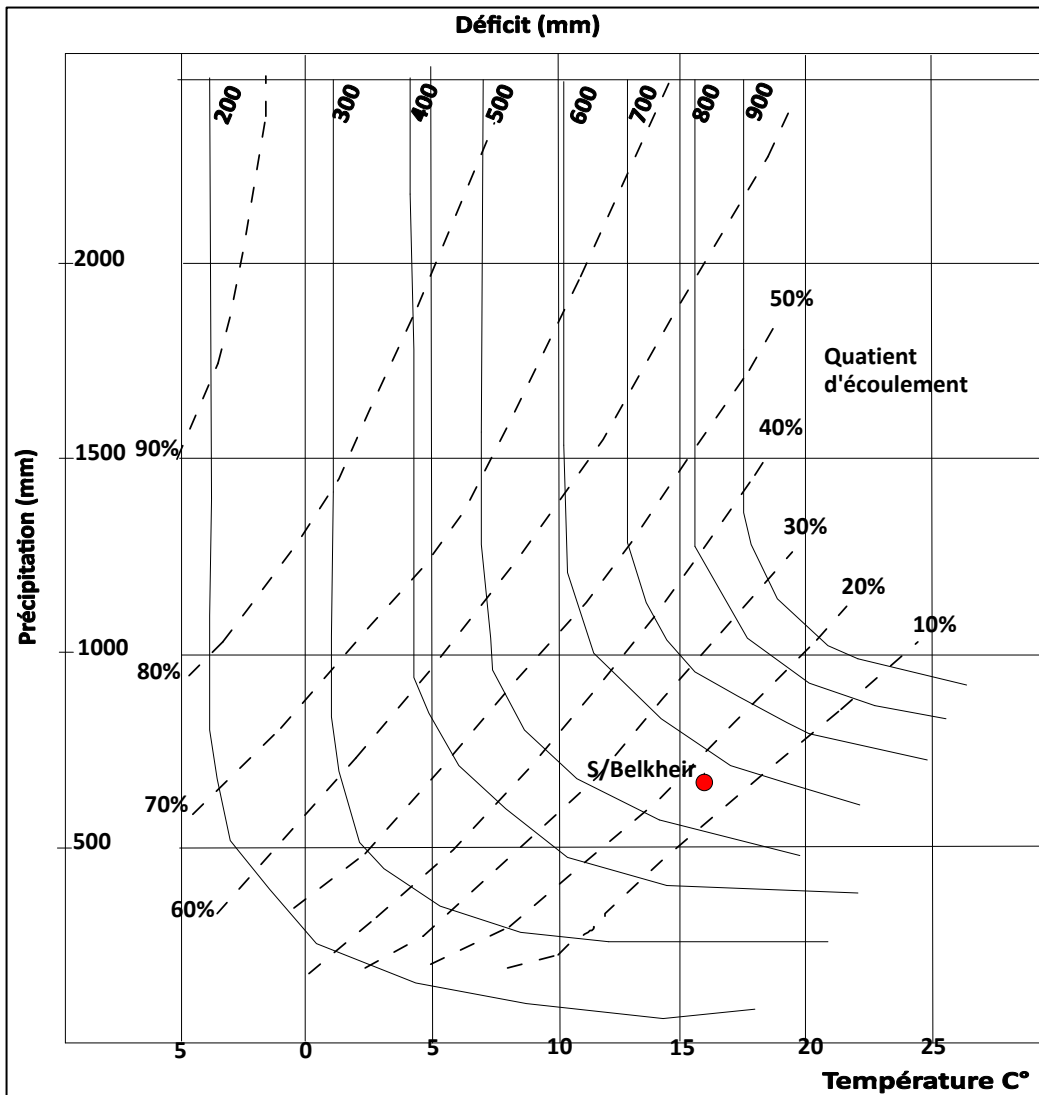


Fig. N°14 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement Algérie, d'après Wundt, modifié par Coutagne.

#### IV.2. Réserves facilement utilisables (RFU)

Réserves facilement utilisables, est un paramètre lié à la densité apparente du sol, sa capacité de rétention (humidité équivalente) et la profondeur de la terre parcourue par les racines.

Notre région de Guelma est caractérisée par un climat tempéré, d'où la réserve facilement utilisable est égale à **100 mm/an**.

#### IV.3. Ruissellement (R)

Par définition, le ruissellement correspondant à la part des précipitations qui s'écoule directement sur le sol lors des précipitations.

La lame d'eau ruisselée sera estimée à l'aide de deux formules :

- La formule de Tixeront – Berkaloff, pour  $P < 600 \text{ mm}$

$$R = \frac{P^3}{3 \cdot \text{ETP}} \quad (19)$$

- **La formule de Tixeront – Berkaloff, modifiée par Romantchouk en 1974 pour P > 600 mm**

$$R = \frac{P^3}{3} \quad (20)$$

Avec :

R : Ruissellement en m ;

P : Précipitation moyenne mensuelle en m ;

ETP : Evapotranspiration potentielle en m.

Les précipitations enregistrées dans la région de Guelma dépassent **600** mm pour la station météorologique de Belkheir, donc la formule utilisée est celle de Tixeront– Berkaloff, modifiée par Romantchouk.

La lame d'eau ruisselée des précipitations tirée de la station de Belkheir, wilaya de Guelma est reportée dans le tableau **19** qui suit :

**Tableau 19 : Résultats du ruissellement**

Station \ Paramètres	P (m)	ETP (m)	R(m)
Belkheir	0,6835	0,8699	0,10644

#### IV.4.Infiltration (I)

L'estimation de l'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va alimenter les écoulements souterrains et participer aussi à la recharge des nappes souterraines.

L'infiltration est calculée par la formule suivante du bilan global d'eau :

$$P = R + I + ETR \quad (21)$$

$$I = P - R - ETR \quad (22)$$

Avec :

P : Précipitation moyennes mensuelles (mm) ;

R : Ruissellement (mm) ;

I : L'infiltration (mm).

- ❖ Si  $I > 0$  : Les entrées sont supérieures aux sorties.
- ❖ Si  $I < 0$  : Les entrées sont inférieures aux sorties.

**Tableau 20** : Résultats de l'infiltration

Station	Paramètres	P (m)	ETR (m)	R(m)	I (mm)
Belkheir		0,6835	0,4926	106,44	84,48

#### IV.5. Bilan hydrique selon Thornthwaite

Le bilan hydrique établi pour notre région d'étude sur une période de 40 ans (1981-2021) (**Tab.21, 22 et 23**), repose sur la détermination et la comparaison entre les apports et les pertes en eau selon la méthode de Thornthwaite où les résultats sont beaucoup plus proches de la réalité.

Les valeurs obtenues de l'évapotranspiration potentielle et réelle, le déficit agricole et l'excédent sont reportés par les graphiques (**fig15 et 16**) et révèlent les constatations suivantes :

✓ **Station météorologique de Belkheir (1981-2021)**

- Une période **déficitaire** qui s'étend du mois de juin jusqu'à le mois d'octobre et se caractérise par :
  - Un déficit agricole égal à  $DA = 377,3\text{mm}$ .
  - Une absence d'alimentation du stock ou  $RFU = 0$ .
  - Une forte évapotranspiration potentielle mensuelle qui atteint  $167,0\text{ mm}$
  - Une température élevée de l'ordre de  $26,40\text{ °C}$ .
- Une autre période **excédentaire** caractérisée par :
  - Une pluviométrie importante qui atteint  $88,87\text{mm}$  enregistré au mois de Décembre,
  - Faibles températures et fortes évapotranspirations.
  - Une recharge du stock, où la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum ( $100\text{ mm}$ ) de décembre à avril, période pendant laquelle il y a un excédent d'eau qui va contribuer à l'alimentation de la nappe aquifère.

Les résultats de calculs sont consignés dans les tableaux 21, 22 et 23 suivants :

Période	T (°C)	i	K	ETP <sub>c</sub> (mm)	P (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
S	22,1	9,5	1,03	102,1	54,5	-47,6	0,0	54,5	47,6	0,0
O	17,9	6,9	0,97	66,6	60,2	-6,4	0,0	60,2	6,4	0,0
N	12,2	3,8	0,86	30,4	75,2	44,8	44,8	30,4	0,0	0,0
D	8,5	2,2	0,81	15,3	88,9	73,6	100,0	15,3	0,0	18,4
J	7,9	2,0	0,87	14,6	86,7	72,1	100,0	14,6	0,0	72,1
F	8,7	2,3	0,85	16,9	65,9	49,1	100,0	16,9	0,0	49,1
M	11,1	3,4	1,03	31,1	72,1	41,1	100,0	31,1	0,0	41,1
A	14,4	5,0	1,10	51,8	62,1	10,3	100,0	51,8	0,0	10,3
M	18,4	7,2	1,21	87,5	55,6	-31,9	68,1	87,5	0,0	0,0
J	23,1	10,1	1,22	130,6	25,8	-104,8	0,0	93,9	36,7	0,0
J	26,4	12,4	1,24	167,0	10,7	-156,3	0,0	10,7	156,3	0,0
A	26,3	12,4	1,16	156,1	25,8	-130,4	0,0	25,8	130,4	0,0
<b>Année</b>	<b>16,4</b>	<b>77,2</b>		<b>869,9</b>	<b>683,5</b>	<b>-186,4</b>		<b>492,6</b>	<b>377,3</b>	<b>190,90</b>

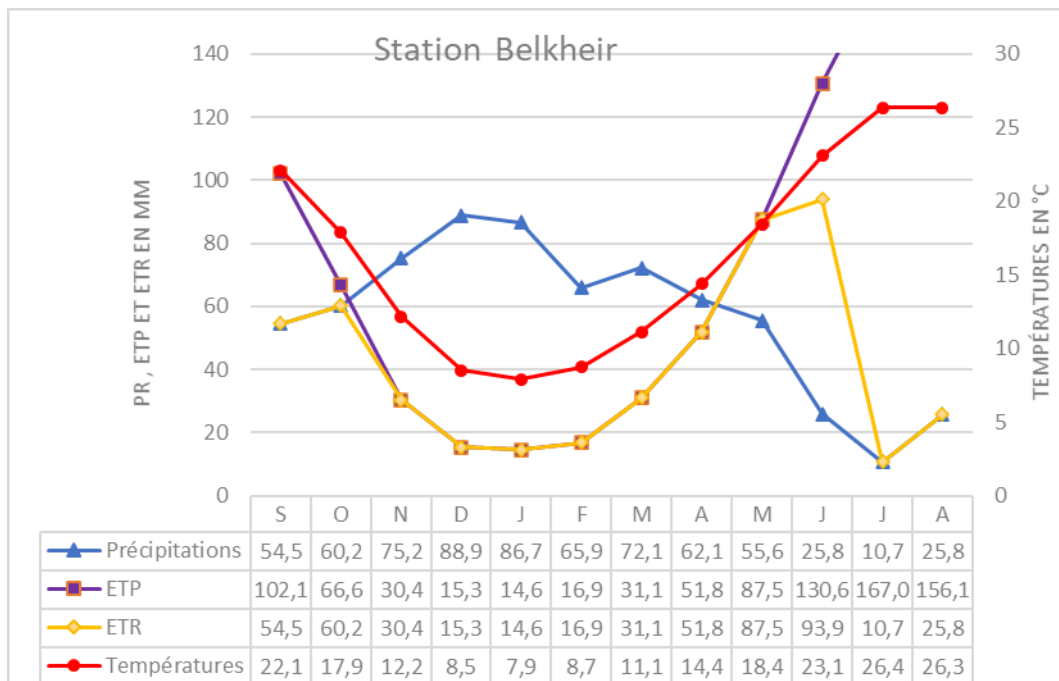


Fig. N°15 : Représentation graphique des paramètres du bilan hydrologique/ ou bien variations mensuelles des éléments climatiques.

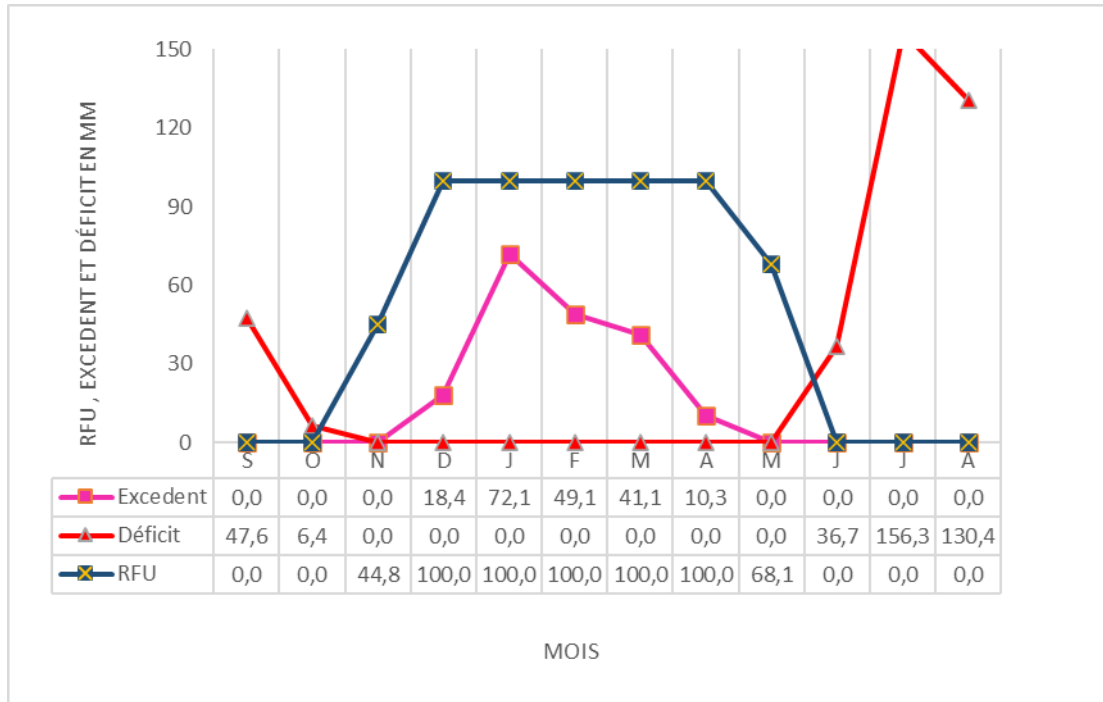


Fig. N°16 : Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Belkheir, wilaya de Guelma (1981 - 2021).

❖ **Formule de vérification :**

$$P = \Sigma ETR + \Sigma EX ; P = 492,6 + 196,8 = \mathbf{683,5mm.}$$

$$ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA.$$

$$ETP = 492,6 + 377,3 = \mathbf{869,9mm.}$$

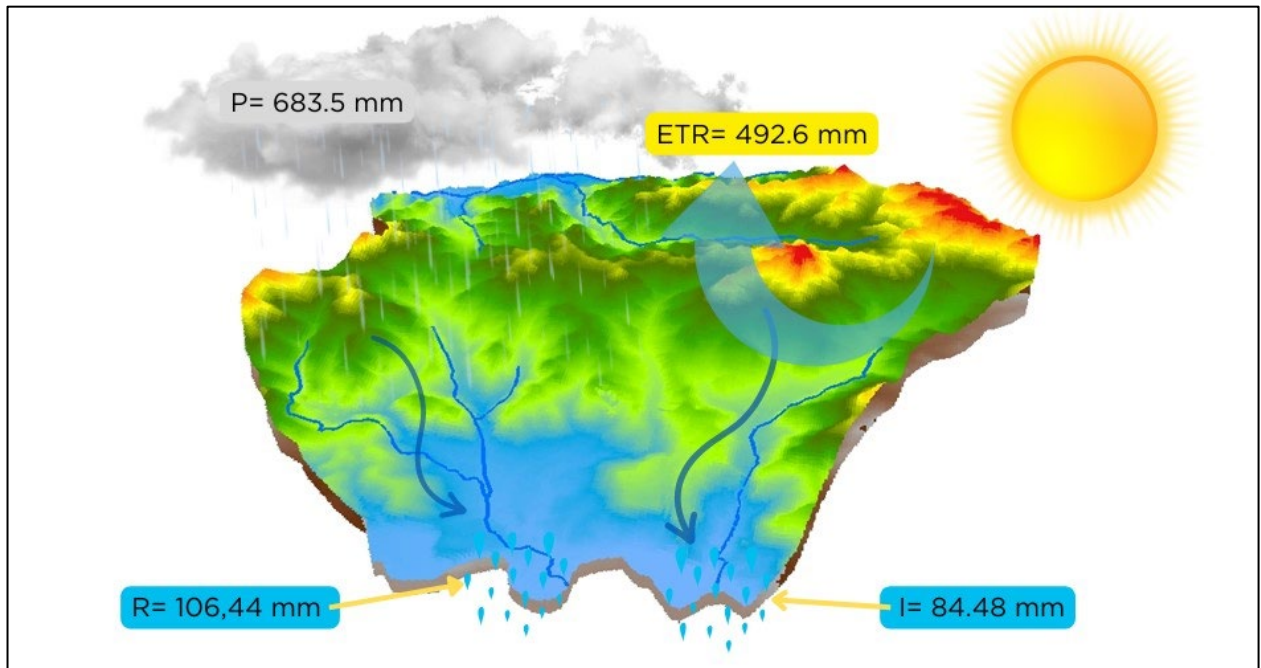


Fig. N°17 : Représentation des paramètres du bilan hydrique sur la vue 3D.

#### IV.5.1. Interprétation du bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite a pour but, de connaître les différents paramètres climatiques comme : ETP, ETR, RFU, DA, Exc qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrauliques de surface.

Les tableaux **21, 22 et 23** permettent de tirer les observations suivantes :

- L'année hydrologique se divise en deux périodes : la première où les précipitations (P) dépassent l'évapotranspiration potentielle (ETP), correspond au mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril.
- Durant cette période, les précipitations atteignent leur maximum et l'ETP enregistre ses valeurs les plus faibles.
- La deuxième période où l'évapotranspiration potentielle (ETP) dépassent les précipitations (P), correspond au mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre.
- Durant cette période, l'ETP atteint leur maximum et les précipitations enregistrent ses valeurs les plus faibles.
- Lorsque la RFU est totale, il y a un excédent d'eau, dès qu'elle diminue, il y a un épuisement du stock qui s'accompagne par un déficit agricole. Pour notre station, le déficit commence à partir du mois de Juin et se poursuit jusqu'au mois d'Octobre.

## B / HYDROLOGIE

### V. Situation géographique du Bassin Versant de la Moyenne Seybouse

Le bassin versant de l'Oued Seybouse constitue l'un des principaux collecteurs des eaux pluviales tombées sur les régions de l'extrême Nord Est de l'Algérie. Il est situé au Nord de l'Atlas Tellien, une zone à vocation agricole, et se caractérise par un relief fort et contrasté à pentes fortement inclinées. Selon la nouvelle restructuration des unités hydrologiques en Algérie, le bassin versant de l'oued Seybouse appartient à l'ensemble du littoral constantinois (d'après le découpage de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques [ANRH](#)).

Le bassin de la Seybouse est divisé en 03 parties à savoir : La haute Seybouse, la moyenne Seybouse et la basse Seybouse ([Brahmia.N, 2016](#)).

Le bassin de la Seybouse moyenne est une zone montagneuse formée d'une imposante chaîne, au relief accidenté, c'est l'Atlas Tellien, il est constitué par 06 sous bassin :

Oued Charef amont (14-01), Oued Charef aval (14-02), Oued Bouhamdane (14-03), moyenne Seybouse (14-04) présente notre région d'étude, Oued Mellah (14-05) et Oued Maritime (14-06).

La Seybouse moyenne autrement dit bassin de Guelma (code 14-04) se situe entre les 4043921,075 de l'attitude et 350383,004 m de longitude, s'étend sur la totalité de la wilaya de Guelma, draine une superficie de 820,23km<sup>2</sup>.Après un parcours de deux kilomètres dans des gorges encaissées ; l'Oued débouche dans une autre plaine, c'est la dépression de Bouchegouf, où converge un autre système hydrographique qui vient de se jeter dans la Seybouse au Sud-Ouest de Bouchegouf (Brahmia.N, 2016).

### V.1.L'Organisation Administrative

Sur l'organisation administrative, le bassin versant de la moyenne Seybouse (Guelma) occupe la partie centrale de la wilaya de Guelma, dix (10) daïras appartiennent à ce bassin, englobant trente-quatre (34) communes. La commune de Guelma est le centre urbain le plus important du bassin, avec un taux d'urbanisation autour de 98%.

**Tableau 24** : Données des superficies des communes dans le Bassin versant de la moyenne Seybouse ([monographie de la wilaya de Guelma 2018](#)).

Daïra	Commune	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Observation
Guelma	Guelma	45	Urbaine
	Ben Djerrah	79,37	Rurale
Guelaat Bousbaa	Guelaat Bousbaa	36,25	Semi Urbaine
	Boumahra Ahmed	71,25	Urbaine
	Beni Mezline	63,25	Rurale
	Djeballa Khemissi	66,62	Rurale
	Nechmaya	121,75	Semi Urbaine
	Belkheir	94	Urbaine
Héliopolis	Héliopolis	76,87	Urbaine
	Bouati Mahmoud	88,70	Semi Urbaine
	El Fedjoudj	66,25	Semi Urbaine
Bouchegouf	Bouchegouf	193,55	Urbaine
	Ain Ben Beida	131,25	Semi-Urbaine
	Oued Fragha	99,26	Rurale
Oued Zenati	Medjez Sfa	142,03	Rurale
	Oued Zenati	135.00	Urbaine
	Ain Regada	118.79	Semi Urbaine
Hammam Débagh	Bordj Sabath	198.70	Rurale
	Hammam Débagh	58.75	Urbaine
	Roknia	201.87	Semi Urbaine
	Bouhamdane	159.62	Fortement Rurale
Khezara	Khezara	71,22	Semi Urbaine
	Bou Hachana	63,62	Rurale (fortement)
	Ain Sandel	91.57	Rurale (fortement)
	Ain Makhlouf	190.08	Semi Urbaine

<b>Ain Makhlouf</b>	Ain Larbi	167.50	Rurale
	Tamlouka	303.17	Rurale
<b>Ain Hessainia</b>	Ain Hessainia	50.18	Semi Urbaine
	Ras El Agba	37.27	Rurale
	Sellaoua Announa	93.55	Rurale
	Medjez Amar	38.67	Semi Urbaine
<b>Hammam N'Bail</b>	Hammam N'Bail	164.22	Rurale
	Oued Cheham	98.26	Semi Urbaine
	Dahouara	68.90	Rurale
<b>Total</b>	34	3686,8km <sup>2</sup>	

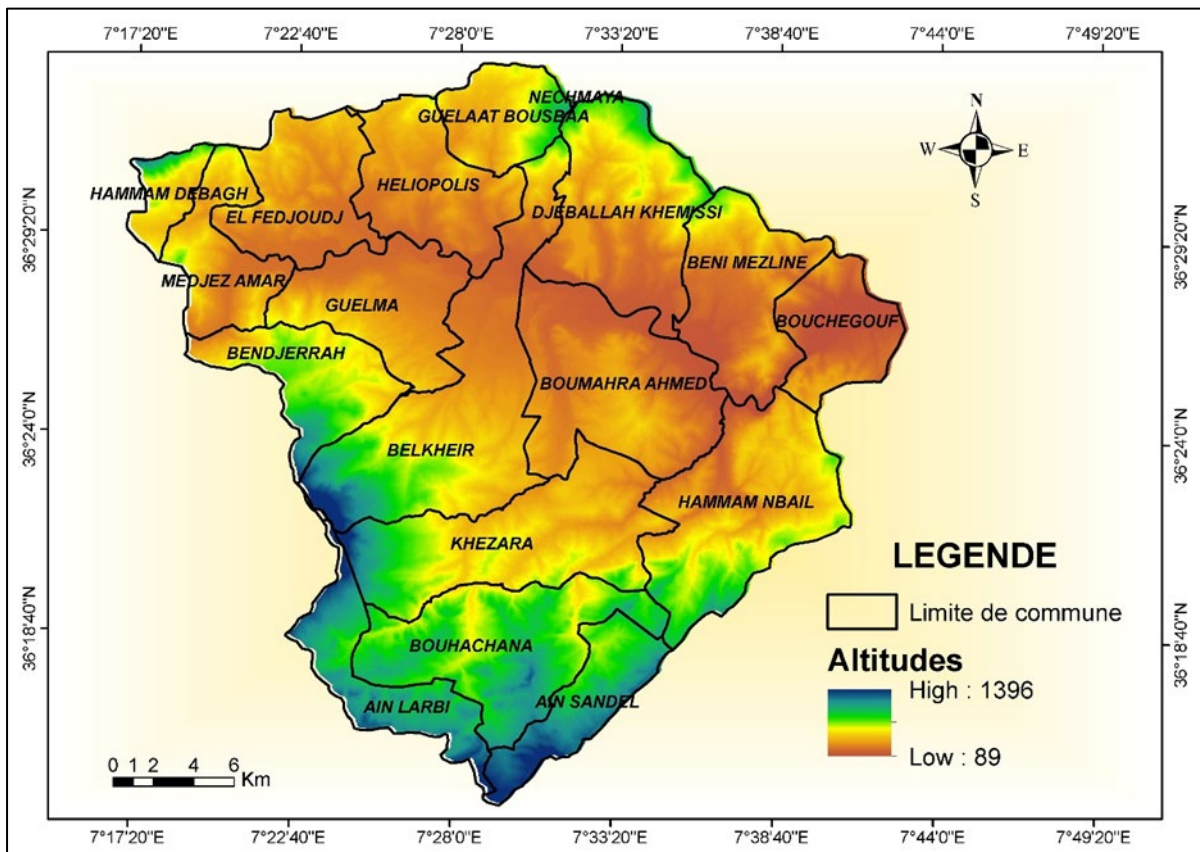


Fig. N° 18 : Le découpage administratif des communes à l'intérieur du BV de la moyenne Seybouse (Khadri.R,2023).

## V.2. Les Caractéristiques Géométriques et Morphométriques du Bassin Versant de la Moyenne Seybouse

Les caractéristiques géométriques du bassin de la moyenne Seybouse ont été calculées en utilisant le logiciel « ArcGIS 10.3 »

Les paramètres géométriques concernent essentiellement :

- La superficie du bassin versant (A) ;
- Le périmètre du bassin versant (P) ;
- La longueur du talweg principal (LTP) ;

- L'indice de forme ou de compacité ( $K_G$ ) du bassin versant ;
- Coefficient d'allongement
- Le rectangle équivalent ;

Et sont déterminés comme suit :

#### V.2.1.Surface du Bassin Versant

La surface du bassin versant de la moyenne Seybouse est de  $A = 820,23 \text{ Km}^2$ .

#### V.2.2.Périmètre du Bassin Versant

Le périmètre du bassin versant de la moyenne Seybouse est de  $P = 138,8 \text{ Km}$ .

#### V.2.3.Longueur Du Talweg Principal

La longueur du talweg principal de la moyenne Seybouse est de  $LTP = 54,37 \text{ Km}$ .

#### V.2.4.Indice De Forme (Ou De Compacité) De Gravelius

La valeur de cet indice permet d'avoir une idée sur la forme du bassin versant ;

L'indice de compacité  $K_G$  est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, elle est donnée de la manière suivante :

$$K_G = \frac{0,28 P}{\sqrt{A}} \quad (23)$$

Où :

$K_G$  : indice de compacité de Gravelius ;

$A$  : Surface du bassin versant en ( $\text{Km}^2$ ),  $A = 820,23 \text{ Km}^2$  ;

$P$  : Périmètre du bassin versant en ( $\text{Km}$ ),  $P = 138,8 \text{ Km}$  ;

Il est à noter que la classification de forme des bassins versants est fonction du coefficient de Gravelius et est donnée comme suit :

Si :  $k_G = 1.128$  Le bassin parfaitement circulaire ;

Si :  $k_G \leq 1.128$ . Le bassin ramassé ;

Si :  $k_G \geq 1.128$ . Le bassin allongé.

#### IMPORTANT

Le bassin versant de la moyenne Seybouse est de forme allongée et ce compte tenu de son indice de compacité.  $K_G = 1,36 \geq 1.128$ .

#### V.2.5.Coefficient D'Allongement

Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

$$CA = \frac{LTP * LTP}{A} \quad (24)$$

Où :

$LTP$  : longueur du talweg principal,  $LTP = 54,37 \text{ Km}$ .

$A$  : surface du bassin versanten ( $\text{Km}^2$ ),  $A = 820,23 \text{ Km}^2$ .

Le bassin versant de la moyenne Seybouse à un coefficient d'allongement de **Ca= 3,60**.

### V.2.6.Dimensionnement Du Rectangle Equivalent

Le dimensionnement du rectangle équivalent consiste en la détermination de sa largeur et longueur respectives ;

La longueur et la largeur du rectangle équivalent sont données par les relations suivantes :

#### VI.2.6.1.Longueur Du Rectangle Equivalent

La longueur du rectangle équivalent est déterminée par la formule suivante :

$$Lr = \frac{KG\sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2} \right] \quad (25)$$

$K_G$  : indice de forme de Gravelius,  $K_G = 1,36$  ;

A : superficie du bassin versant en  $km^2$  ,  $A = 820,23 km^2$  ;

$L_r$  : longueur du rectangle équivalent en km ;

Pour  $K_G = 1,36$  et  $A = 820,23 km^2$   $L_r = 55,03 Km$ .

#### VI.2.6.2.Largeur Du Rectangle Equivalent

La largeur du rectangle équivalent est déterminée par la formule suivante :

$$lr = \frac{KG\sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2} \right] \quad (26)$$

Avec :

A : superficie du bassin versant en  $km^2$ ,  $A=820,23 km^2$  ;

$l_r$  : largeur du rectangle équivalent en km.

$K_G$  : indice de forme de Gravelius  $K_G = 1,36$  ;

Pour  $K_G = 1,36$  et  $A = 820,23 km^2$   $l_r = 14,90 Km$ .

Les caractéristiques géométriques du bassin versant de la moyenne Seybouse sont portées dans le **tableau 25** suivant :

Désignation	Symbole	Unité	Valeur	
Superficie	A	$Km^2$	820,23	
Périmètre	P	km	138,8	
Longueur du talweg principal	LTP	km	54,37	
Indice de compacité de Gravelius	$K_G$	/	1,36	
Rectangle équivalent	Longueur	$L_r$	km	55,03
	Largeur	$l_r$	km	14,90
Altitude maximale du bassin versant	$H_{max}$	m	1350	
Altitude minimale du bassin versant	$H_{min}$	m	90	

### V.3.Topographie

#### V.3.1.Courbe et carte hypsométrique

La courbe hypsométrique est tracée selon les résultats des mesures de la répartition du bassin versant par tranches d'altitudes, et surfaces partielles, cette courbe fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief.

Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Le **tableau 26** suivant représente les résultats de la répartition de la surface totale du bassin sur les différentes tranches d'altitude :

Altitudes (m)	Surface partielle	Surface partielle	Surface cumulées	Dénivelée	$(H_{i-1} + H_i) / 2$ "hi"
	(km <sup>2</sup> )	%	%	d <sub>i</sub>	
90-220	102,43	12,49	12,49	130	155
220-350	147,14	17,94	30,43	130	285
350-400	167,62	20,44	50,86	50	375
400-500	114,78	13,99	64,86	100	450
500-620	73,45	8,95	73,81	120	560
620-800	59,43	7,25	81,06	180	710
800-900	72,12	8,79	89,85	100	850
900-1060	38,56	4,70	94,55	160	980
1060-1200	31,96	3,90	98,45	140	1130
1200-1350	12,75	1,55	100,00	150	1275
Total	<b>820,23</b>	<b>100</b>			

La courbe hypsométrique est la représentation graphique des couples (superficie cumulée en % Altitudes en (m)), elle est représentée sur la figure ci-après :

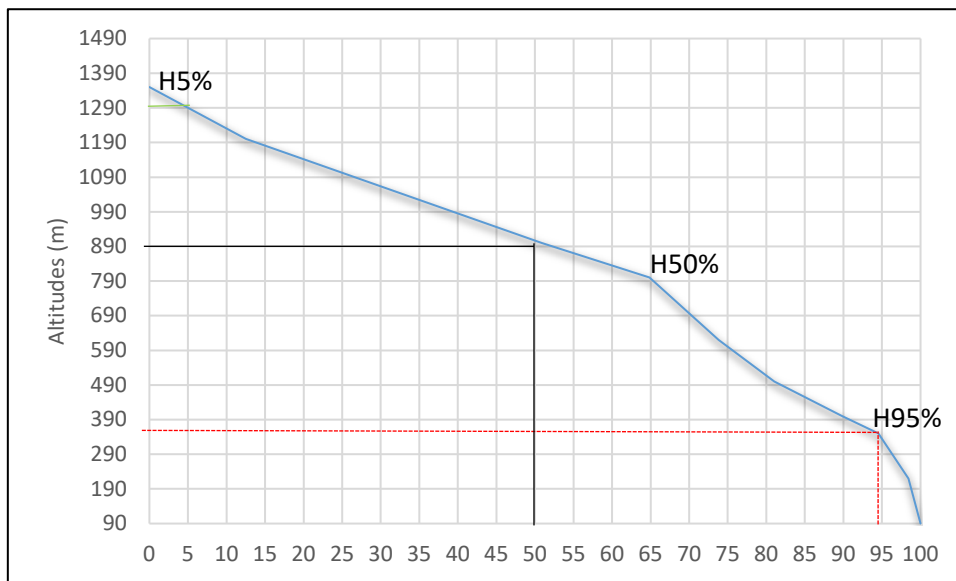


Fig. N°19 : Courbe hypsométrique des fréquences des altitudes dans le bassin versant de la moyenne Seybouse.

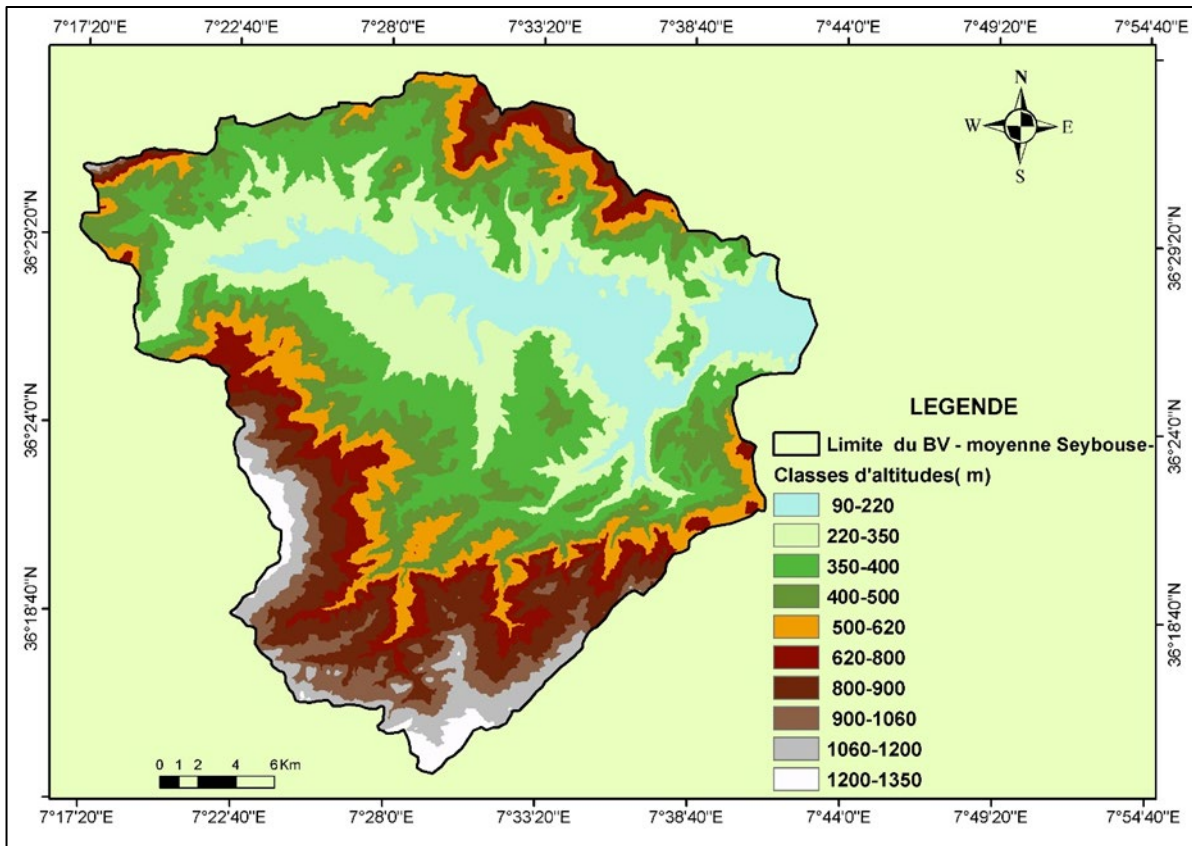


Fig. N°20 : Carte hypsométrique du bassin versant de la moyenne Seybouse (Khadri.R,2023).

#### Altitude Médiane

Est correspond à celle lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin versant sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin versant présente une pente régulière.

D'après la courbe hypsométrique, l'altitude médiane est donnée :

$$H_{50\%} = 890\text{m.}$$

#### Altitude Moyenne

L'altitude moyenne est donnée par la relation :

$$H_{\text{moy}} = \frac{1}{A} \cdot \sum \left( A_i \cdot \frac{H_{i-1} + H_i}{2} \right) \quad (27)$$

$$H_{\text{moy}} = (1/820,23) \cdot \sum [(102,43 \cdot 155) + (147,62 \cdot 285) + (167,62 \cdot 375) + (114,78 \cdot 450) + (73,45 \cdot 560) + (59,43 \cdot 710) + (72,12 \cdot 850) + (38,56 \cdot 980) + (31,96 \cdot 1130) + (12,75 \cdot 1275)]$$

$$H_{\text{moy}} = 496,32 \text{ m}$$

Où :

$A_i$  : Surface partielle ;

$A_T$  : Surface totale du bassin versant ;

$H_{i-1}$  : Altitude d'ordre (i-1) ;

$H_i$  : Altitude d'ordre (i).

**Tableau 27** des altitudes caractéristiques du bassin versant de la moyenne Seybouse :

Altitude	Valeur (m)
Médiane 50%	890
Moyenne	496,32
Altitude à 5 %	1290
Altitude à 95 %	355
Altitude max	1350
Altitude min	90

**Altitude à 95%**

Obtenue à partir de la courbe hypsométrique, elle correspond à l'altitude 95% de la superficie totale du bassin versant ; **H95% = 355 m**

**Altitude à 5%**

Obtenue à partir de la courbe hypsométrique, elle correspond à l'altitude 5% de la superficie totale du bassin versant ; **H5% = 1290 m.**

**VI.3.2. Carte Des Pentés**

La pente topographique est un paramètre capital dans tout travail d'aménagement ; elle conditionne le drainage ([Abbassi, 2002](#)). La carte des pentes du bassin versant de la moyenne Seybouse a été traitée et établie à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) sous un système d'information géographique (ArcGIS). Nous avons ensuite adopté la classification suivante (Fig. N° 21).

La carte des pentes établie fait ressortir Cinq (05) classes des pentes dans le bassin versant de la moyenne Seybouse représentées dans le **tableau 28** ci- dessous

Classes des pentes (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)	Observations
0 - 4	301,78	36,79	Très faibles
4 - 10	244,99	29,87	Faibles
10 - 15	202,61	24,70	Moyennes
15 - 20	61,54	7,50	Assez fortes
20 - 68	9,30	1,13	Fortes à très fortes
<b>TOTALE</b>	<b>820,23</b>	<b>100</b>	

➔ **Classe des pentes très faibles (0 – 4%)**

Occupe une superficie de 301,78 km<sup>2</sup>, soit 36,79 % de la superficie totale de la zone d'étude. Cette faible inclinaison et l'importance de l'épaisseur des formations superficielles réduisent l'érosion. Ces terrains sont destinés à l'agriculture.

➔ **Classe des pentes faibles (4– 10%)**

Couvre une superficie de 244,99 km<sup>2</sup>, soit 29,87 % de la superficie totale de la zone d'étude.

➔ **Classe des pentes moyennes (10 – 15%)**

Occupe une superficie de 202,61 km<sup>2</sup>, soit 24,70 % de la superficie totale de la zone d'étude

➔ **Classe des pentes assez fortes (15 – 20%)**

Occupe une superficie moyennement importante de 61,54 km<sup>2</sup>, soit 7,50 % de la superficie totale de la zone d'étude.

➔ **Classe des pentes fortes à très fortes (20 – 68 %)**

S'étendant sur une surface de 9,30 km<sup>2</sup>, elle équivaut à 1,13 % de la superficie totale de la zone d'étude. Cette région correspond principalement aux zones montagneuses, particulièrement concentrées dans la partie méridionale du bassin versant. Elle est caractérisée par la prédominance de terres couvertes de forêts et de maquis.

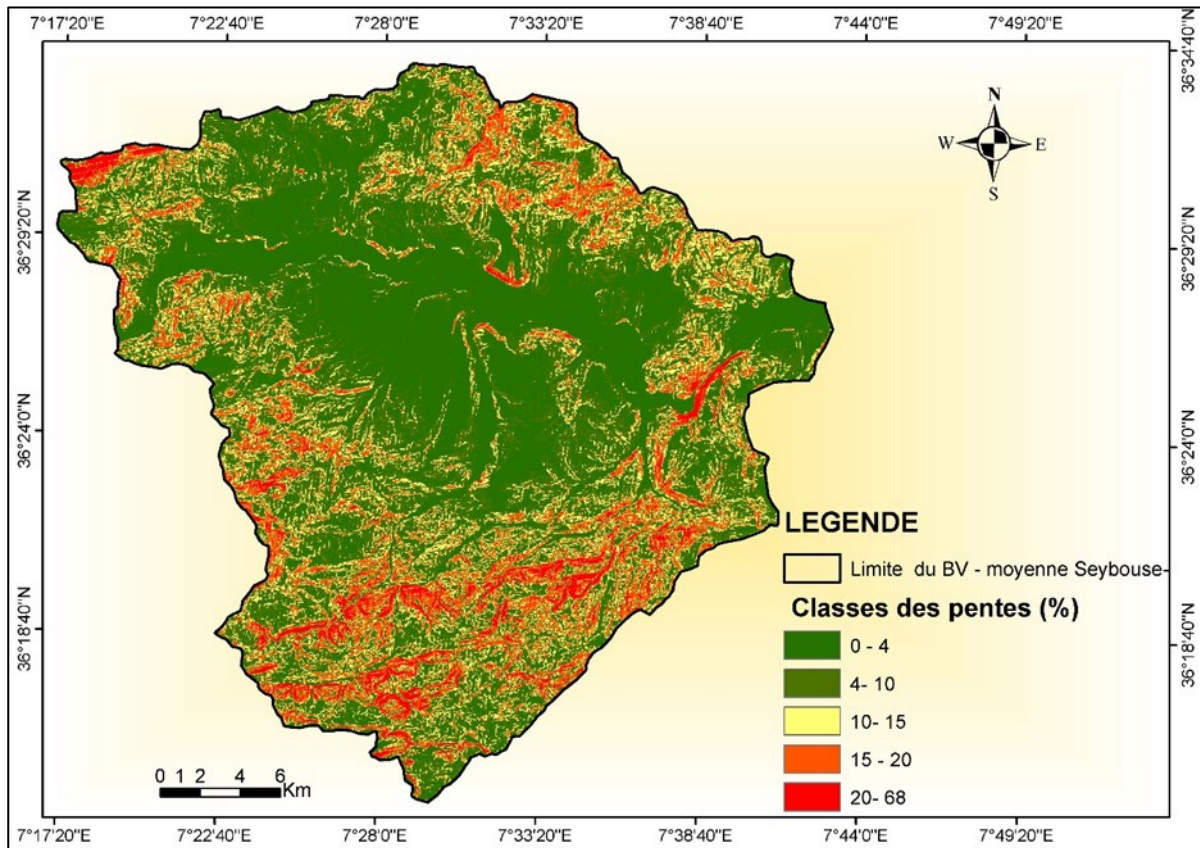


Fig. N°21 : Carte des pentes du bassin versant de la moyenne Seybouse (Khadri.R,2023).

#### V.4.Indices De Pentes

Les indices de pente permettent de caractériser les pentes d'un bassin versant ainsi que les comparaisons et classifications, et se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrie sur le bassin.

- ✚ Indice De Pente Moyenne Du Bassin Versant( $I_m$ ) ;
- ✚ Indice Global (IG) ;
- ✚ Indice De Pente De Roche (IP).

Les indices de pentes sont calculés, comme suit :

##### V.4.1.Indice De Pente Moyenne ( $I_m$ )

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct donc sur le temps de concentration  $t_c$  et influence directement le débit de pointe lors d'une averse, et est calculée à partir de la relation suivante :

$$I_{mp} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_e} \quad (28)$$

$$I_{mp} = 1260 / 55,03 = 22,85 \text{ m/km}$$

Où :

$\Delta H_{max}$  : différence entre les points extrêmes du cours d'eau principal du bassin versant ;

$H_{max}$  : 1350 m.

$H_{min}$  : 90 m.

$L_e$  : Longueur du rectangle équivalent ( $L_r = 55,03$  kms).

$I_m$  : Indice de pente moyenne du BV (m/km).

##### V.4.2.Indice De Pente Globale ( $I_g$ )

L'indice de pente globale est donné par la relation suivante :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_e} \quad (29)$$

Où :

$L_e$  : longueur de rectangle équivalent (**55,03 km**).

$H_{5\%}$  : altitude à 5% = **1290,0 m**.

$H_{95\%}$  : altitude à 95% = **355,0 m**.

$$I_g = (1290 - 355) / 55,03; I_g = 16,99 \text{ m/km}$$

Dans le bassin versant de la moyenne Seybouse, cette valeur reflète donc un relief **modéré**.

**Tableau 29** : Classification du relief selon l'indice de pente globale (Ig) par ORSTOM  
(Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer).

R1	IG<0.002	Relief Très faible
R2	0.002<Ig<0.005	Relief faible
R3	0.005 <Ig<0.01	Relief assez faible
R4	<b>0.01 &lt;Ig&lt;0.02</b>	<b>Relief modéré</b>
R5	0.02<Ig<0.05	Relief assez fort
R6	0.05<Ig<0.1	Relief fort
R7	0,1<Ig	Relief très fort

#### V.4.3.Indice De Pente De Roche (IP)

La pente de roche se calcule à partir du rectangle équivalent. IL est égal à la somme des racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondéré par la surface comprise entre deux courbes de niveaux, et est donnée par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_e}} \sum_1^n \sqrt{A_i \Delta h} \quad (30)$$

$$I_p = (1/\sqrt{55032}) * \sum [\sqrt{(12,49*130)} + \sqrt{(17,94*130)} + \sqrt{(20,44*50)} + \sqrt{(13,99*100)} + \sqrt{(8,95*120)} + \sqrt{(7,25*180)} + \sqrt{(8,79*100)} + \sqrt{(4,70*160)} + \sqrt{(3,90*140)} + \sqrt{(1,55*150)}]$$

$$I_p = 1,37$$

Le : longueur du rectangle équivalent (m) **(55,03) kms = 55032 m** ;

Ai : surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives ;

Δh : Dénivelée entre deux courbes de niveau.

#### V.4.4.Denivelee Spécifique

La dénivelée spécifique dépend de l'hypsométrie (D = H5% - H95 %) et de la forme du bassin (l/L).

$$D_s = I_g \sqrt{A} \quad (31)$$

$$D_s = 16,99 * \sqrt{820,23} = 486,59 \text{ m/km};$$

Ds : Dénivelée spécifique (m/km) ;

A : surface du bassin versant (km²);

Ig : Indice de pente globale (m/km).

Une deuxième subdivision en sept classes de nature du relief selon la dénivelée spécifique (Ds) a été établie par le service hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. (**tableau 30**). Cette classification ne tient pas compte de la superficie du bassin versant, elle est applicable à tout bassin quel que soit sa superficie.

**Tableau 30** : Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M

DS<10m	relief très faible
10m<Ds<25m	relief faible
25m<Ds<50m	relief assez faible
50m<Ds<100m	relief modéré
100m<Ds<250m	relief assez fort
<b>250m&lt;Ds&lt;500m</b>	<b>relief fort</b>
Ds>500m	relief très fort

D'après les tableaux de classification des reliefs en fonction des dénivelées spécifiques, il ressort que le relief du bassin versant de la moyenne Seybouse présente un relief fort ; et comme :  $250 \text{ m} \leq D_s \leq 500 \text{ m}$  ;  $D_s = 486,59 \text{ m/km}$ , donc le relief est **fort**.

### V.5.Caracteristiques Hydrographiques

Le réseau hydrographique, constitué par l'ensemble des cours d'eau, qu'ils soient naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, joue un rôle crucial dans le bassin. Il représente l'une des caractéristiques prépondérantes de cette région. La configuration du réseau hydrographique peut revêtir une diversité de formes, et cette diversification découle de quatre principaux facteurs : la géologie, le climat, la topographie (pente du terrain), l'influence humaine, ainsi que la couverture végétale. L'analyse du réseau hydrographique permet d'obtenir des informations sur la complexité de sa structure (ramification dense ou dispersée), sa configuration, sa hiérarchie, sa densité de drainage, et le rapport de longueur des cours d'eau (Brahmia.N, 2016).

#### V.5.1.Chevelu Hydrographique

Pour quantifier la ramification du réseau hydrographique, chaque cours d'eau est attribué à un numéro en fonction de son importance. Cette numérotation, appelée "ordre du cours d'eau", varie en fonction de la hiérarchie. La classification de Stahler est largement adoptée à cet effet. Cette classification offre une description claire du développement du réseau de drainage d'un bassin, de l'amont vers l'aval, en se basant sur les règles suivantes :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est désigné comme d'ordre un.
- Le cours d'eau résultant de la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du cours d'eau le plus élevé parmi les deux.
- Si deux cours d'eau de même ordre convergent, le cours d'eau résultant voit son ordre augmenté de un.

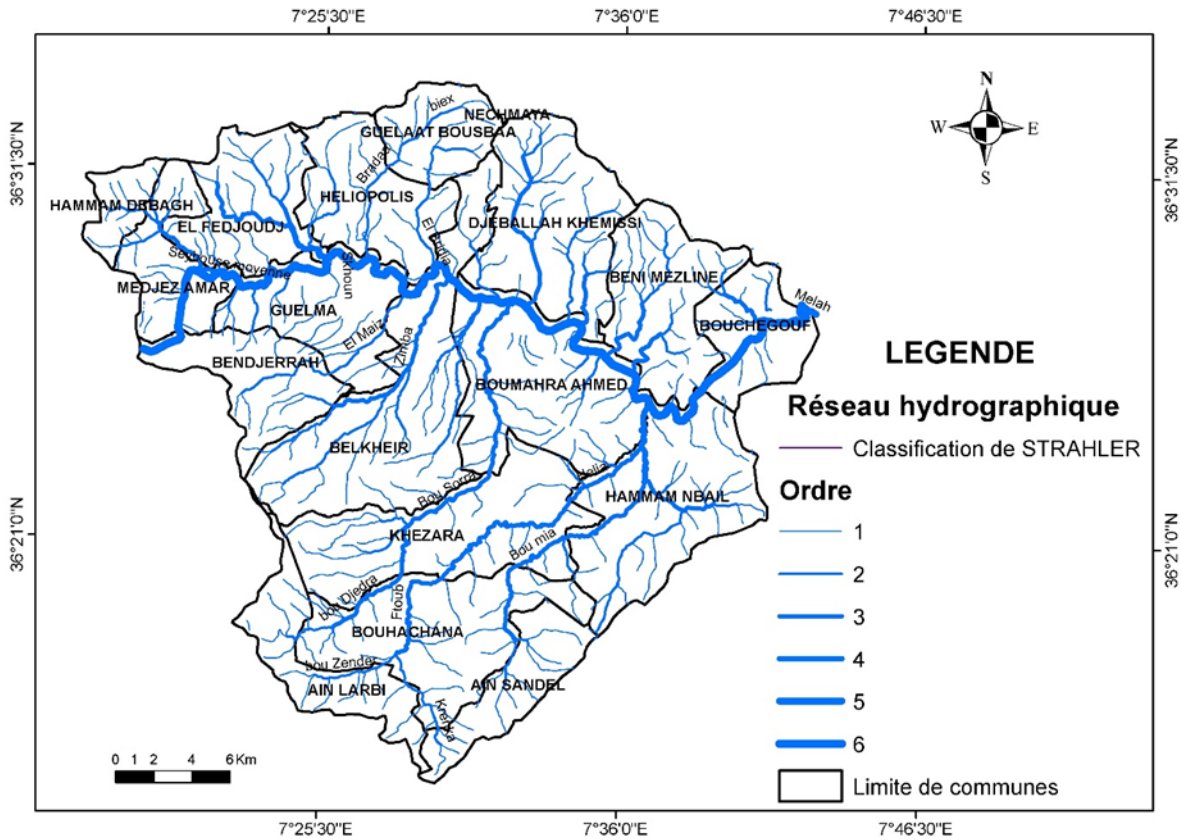


Fig. N°22 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la moyenne Seybouse (Khadri.R,2023).

### V.5.2.Densité De Drainage

La densité de drainage reflète la dynamique du bassin versant, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement de surface et est exprimée en km/km<sup>2</sup>.

La relation de la densité de drainage est donnée par la formule suivante :

$$Dd = \Sigma Li/A \quad (32)$$

Où :

Li : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal,(km)/  
(Li=901,93 Km)

A : La surface du bassin versant.

#### Important :

Li : somme des longueurs des cours d'eau – tirée de la carte hydrographique et ce d'après la classification de Schum

Longueur des affluents d'ordre n=1	L1 = 565,475303 km ;
Longueur des affluents d'ordre n=2	L2 = 158,289899 km ;
Longueur des affluents d'ordre n=3	L3 = 115,486864 km ;
Longueur des affluents d'ordre n=4	L4 = 7,30090089 km ;
Longueur des affluents d'ordre n=5	L5 = 877,915722 km ;
Longueur des affluents d'ordre n=6	L6 = 54502,1562 km
	<b>Total = 901,933038 km</b>

Dans le cas du bassin versant de la moyenne Seybouse :  $L_i = 901,933038 \text{ Km}$  et  $A = 820,33 \text{ Km}^2$ ,

$$D_d = 1,099 \text{ Km/Km}^2$$

### V.5.3. La Densité Hydrographique

La densité hydrographique présente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{N_i}{A} \quad (33)$$

Où :

F : densité hydrographique [ $\text{km}^{-2}$ ] ;

$N_i$  : nombre de cours d'eau **391** ;

A : superficie du bassin [ $\text{km}^2$ ] **820,23  $\text{km}^2$** .

La densité hydrographique du bassin versant de la moyenne Seybouse est égale à **0,48  $\text{km}^{-2}$** .

La densité de drainage et la densité hydrographique obtenues indiquent que notre sous bassin versant est moyennement imperméable.

### V.6. Coefficient De Torrentialité

Le coefficient de torrentialité ( $C_t$ ) indique la nature de l'écoulement superficiel sur les versants du bassin (reflète la torrentialité des averses dans le bassin). Il est déterminé par la formule suivante :

$$C_T = D_d * F \quad (34)$$

Où :

$C_t$  : Coefficient de torrentialité ;

F : Fréquence des talwegs élémentaires [ $\text{km}^{-2}$ ] ;

$D_d$  : Densité de drainage [ $\text{km}/\text{km}^2$ ].

$$C_T = D_d \times F = 1,099 * 0,48 = \mathbf{0,52}$$

Le bassin versant de la moyenne Seybouse à un coefficient de torrentialité de l'ordre de **(0,52)**.

### V.7. Temps De Concentration

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire.

Plusieurs méthodes simplifiées sont utilisées pour estimer le temps de concentration sur les bassins versants. Chaque méthode convient à des conditions distinctes de type de sol, de pentes et de superficies de bassins versants.

Les formules utilisées, en tenant compte des caractéristiques physiques des sous bassins versants, sont les suivantes :

❖ **Calcul du temps de concentration**

Le temps de concentration est déterminé comme suit :

↳ **Formule de GIANDOTTI(1937)**

$$Tc = \frac{4\sqrt{A}+1,5Ltp}{0,8\sqrt{Hmoy-Hmin}} \quad (35)$$

**Tc = 12,16 heures = 729,6 min**

Avec

Tc : Temps de concentration ;

Ltp : Longueur du talweg principal (**54,37 kms**).

A : superficie du bassin (**820,23 km<sup>2</sup>**) ;

Hmoy : Altitude moyen du bassin versant (**496,33 m**) ;

H min : Altitude minimale du bassin versant (**90m**).

Le temps de concentration du bassin versant de la moyenne Seybouse est(**12,16**) heures.

↳ **Formule D'Espagnole**

$$Tc = 18(Ltp \frac{Ltp}{1000})^{0,77} * P^{0,1925} \quad (36)$$

**Tc = 3,49 heures = 209,4 min**

Où :

A = Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>) = **820,23 km<sup>2</sup>** ;

Ltp : Longueur du talweg principal (Km) = **54,37 km** ;

P (Im) : La pente moyenne du bassin versant= **22,89 m/Km**.

↳ **Formule DE VENTURA**

$$Tc = 7,632(\frac{A}{P})^{1/2} \quad (37)$$

**Tc = 45,68 heures. = 2740,8 min**

Les résultats obtenus du temps de concentration sont illustrés dans le tableau 31 suivant :

**Tableau 31** des résultats obtenus du temps de concentration :

Formule	Temps	Unité
Formule de <b>Giandotti</b>	12,16	Heure
Formule <b>d'Espagnole</b>	3,49	Heure
Formule de <b>Ventura</b>	45,68	Heure

❖ **Vitesse Moyenne De Transfert Des Eaux**

Cette vitesse est donnée par la formule suivante

$$Vr = Ltp \frac{Ltp}{Tc} \quad (38)$$

$$Vr = 54,37 / 20,44 = 2,66 \text{ km/h}$$

Où :

LTP : longueur due talweg principal **54,37 en (km)** ;

Vr : vitesse moyenne de transfert des eaux ;

Tc : temps de concentration moyenne **20,44 en heures** ;

**V.8.Rapport De Confluence**

Le rapport de confluence **Rc**, appelé aussi rapport de bifurcation est égal au quotient du nombre de talwegs d'ordre i par celui des talwegs d'ordre supérieur i + 1, est sensiblement constant : Le rapport de confluence du bassin versant de la moyenne Seybouse est égal à 4.1.

$$Rc = \frac{Ni}{Ni+1} \quad (39)$$

Avec :

Rc : rapport de confluence des cours d'eau ("bifurcation ratio") ;

Ni : nombre des cours d'eau d'ordre n ;

Ni+1 : nombre des cours d'eau d'ordre suivant ;

Ce taux de bifurcation est lié au temps de concentration des sédiments dans le réseau de drainage, plus ce rapport est faible, moins il y aura de confluence au niveau de réseau de drainage et plus les évacuations des sédiments vers l'aval se feront rapidement (Gravelius H).

Dans notre cas, la région sur laquelle est axée notre étude, le rapport de confluence varie entre **0,03 et 19,83**.

On peut dire que la géologie de la région a une grande influence sur l'écoulement des eaux superficielles.

**Tableau 32** : Rapport de confluence du bassin versant de la moyenne Seybouse

Ordre	Nombre	RC
1	612	/
2	215	2,84
3	235	0,92
4	12	19,83
5	10	1,15
6	399	0,03

**V.9.Récapitulation Des Caractéristiques Du Bassin Versant De La Moyenne Seybouse**

Toutes les caractéristiques physiques du bassin versant de la moyenne Seybouse sont reprises dans le **tableau 33** récapitulatif ci-dessous.

**Tableau 33** : Caractéristiques morfo métriques du bassin versant de la moyenne Seybouse.

<b>Principales caractéristiques techniques du BV d'Oued Seybouse moyenne</b>	
<b>BASSIN VERSANT (MOYENNE SEYBOUSE)</b>	
<b>Paramètres géométriques (paramètres physiques) :</b>	<b>Valeur</b>
Surface du bassin versant de la moyenne Seybouse	820,23 km <sup>2</sup>
Périmètre du BV de la moyenne Seybouse	138,8 Kms
Longueur du talweg principal	54,37 Kms
Rectangle équivalent	55,03 Kms
	14,19 Kms
Indice d'allongement	3,60
Indice de compacité de Gravelius KG	1,36
<b>Paramètres morfo métriques :</b>	<b>Valeur</b>
Altitude minimale H <sub>min</sub>	90 m
Altitude maximale H <sub>max</sub>	1350 m
Altitude moyenne H <sub>moy</sub>	496,32 m
Altitude médiane H <sub>méd</sub>	890,00 m
Altitude à 5 %	1290,00 m
Altitude à 95 %	355,00 m
Dénivelée spécifique D <sub>s</sub>	486,59 m
<b>Indices de pentes :</b>	<b>Valeur</b>
Indice de Pente moyenne du bassin versant	22,89 m/km
Indice de pente global	16,99 m/km
Indice de pente de roche	1,37 m/km
<b>Paramètres hydrographiques :</b>	<b>Valeur</b>
Densité de drainage	1,099 m/km <sup>2</sup>
Coefficient de torrentialité	0,52
Temps de concentration	12,16 Heures
Vitesse moyenne de transfert des eaux	3,25 km/h

## **VI. Conclusion**

L'étude climatologique de la région d'étude sur une période d'observation de 40 ans (1981-2021) pour la station de Belkheir, nous a permis de définir un climat tempéré caractérisé par des précipitations annuelles de 683,52 mm, avec une température moyenne de l'ordre 16,41°C. L'évolution annuelle des précipitations et des températures, permet de distinguer deux saisons : l'une hivernale pluvieuse et froide et l'autre d'été chaude et sèche.

L'établissement du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite a permis l'estimation de la valeur de l'ETR qui montre qu'une grande partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration réelle de l'ordre de 492,6 mm.

Le calcul du bilan hydrologique permet d'évaluer tous les éléments d'apport et de sortie d'eau au-dessus d'une surface donnée.

La lame d'eau ruisselée et infiltrée sont très faibles comparées à celles représentent respectivement 15,57% et 12,36% des précipitations.

Ceci laisse supposer que l'alimentation de la nappe ne se fait pas uniquement par infiltration efficace, mais qu'une bonne partie de l'eau d'alimentation provienne par les formations carbonatées bordent la nappe.

Du point de vue hydrologique la région d'étude fait partie du bassin versant de la moyenne Seybouse qui correspond principalement aux zones montagneuses, particulièrement concentrées dans la partie méridionale, dont il présente une forme allongée avec une superficie de l'ordre de 820,23 km<sup>2</sup>. Le relief est modéré à fort. Le bassin versant de la moyenne Seybouse à un coefficient de torrentialité de l'ordre de 0,52, une densité de drainage de 1,099 Km/Km<sup>2</sup> et un temps de concentration égal à 12 heures.

*Partie 2 : Géométrie de  
l'aquifère.*

## I. Introduction

L'étude hydrogéologique d'une région, est consacrée à l'identification des systèmes aquifères existants, ses natures lithologiques, ses structures, ses géométries, ses limites, à la détermination des caractéristiques hydrogéologiques ainsi que les conditions d'écoulements des eaux souterraines.

D'après l'examen des différentes études antérieures géologiques, géophysiques, hydrogéologiques (Benmares.K,2015, Mahieddine.F,2016, Kachi.N,2015, Tahar.N, Brahmia ,A,2018, Drissi.B,1987, Béchiri.N,2011 et Mouassa.S,2017...) et les investigations menées au niveau de la zone d'étude, il ressort que les informations tirées de ces documents sont nécessaires à l'élaboration de la présente étude hydrogéologique pour apprécier quantitativement et qualitativement les ressources en eau souterraine au niveau de cette région d'étude.

## II. Caractéristiques hydrogéologiques de la région de Guelma

La région de Guelma est composée de terrains sédimentaires datant du Crétacé au Mio-Plio-Quaternaire. Au fond du bassin se trouve une plaine alluviale avec une structure synclinale qui est remplie par des grès numidiens, des marno-calcaires, des calcaires lacustres, des argiles et des conglomérats (Mahieddine.F et Mihoub.M, 2016).

Dans la partie Sud, les grès numidiens et les calcaires Yprésiens sont des formations géologiques dominantes. Cette région est marquée par une forte tectonisation, ce qui crée de nombreuses unités aquifères.

Les bancs de calcaires Yprésien sont largement exposés dans la partie Sud de Guelma jusqu'à la région de Sedrata. Ces calcaires sont fortement fissurés, ce qui favorise l'alimentation directe de différents aquifères par l'infiltration des eaux de précipitations. Des dépôts de travertins se trouvent sur le long des bords du bassin , en particulier sur sa bordure Sud, épousant ainsi les formes de la topographie de ruissellement. On peut observer ces dépôts de travertins de manière continue depuis Guelma jusqu'au pied du massif de la Mahouna (Béchiri.N, 2011).

Dans la partie Nord notamment à Héliopolis, El Fedjoudj et Guelaat Bousbaa, ils affleurent des formations de marnes et de schistes imperméables. A l'Ouest de cette zone, les calcaires sénoniens du Djebel Débagh et Djebel Taya s'élèvent, où l'infiltration est probablement importante. On observe également des affleurements des calcaires néritiques de Bouziotune qui font partie du groupe Nord oriental des séries néritiques. Il est possible que la source de Hammam Bradaa avec un débit de 100 l/s, soit une résurgence issue de ces formations. Cette

source est déjà exploitée pour l'approvisionnement en eau de Guelma et d'Héliopolis (Benmares.K, 2015).

Le centre du bassin est occupé par des dépôts Quaternaires qui forment plusieurs terrasses. La dépression de Bouchegouf est entourée à l'Ouest et au Nord par des grès, au Sud par des formations triasiques de marnes et de gypses et au centre, elle est comblée par les alluvions déposées par la Seybouse formant ainsi trois terrasses : la haute, la moyenne et la basse Seybouse (Aissaoui, 2018).

Le bassin de Guelma présente une variété d'unités géologiques qui se différencient par leurs caractéristiques hydrogéologiques. Dans la partie Sud, il affleure des formations calcaires fissurées qui favorisent l'infiltration de l'eau et la formation de nappes aquifères. En revanche, sur la rive gauche du bassin versant de la Seybouse, on observe des formations lithologiques moins perméables, ce qui entraîne une infiltration d'eau plus faible (Brahmia.N, 2016).

### III. Identification des aquifères

La détermination des différents aquifères dans la plaine de Guelma a été faite sur l'analyse lithostratigraphique et structurale des formations géologiques ainsi que sur les données géophysiques. À partir de cette analyse, il existe deux systèmes aquifères distincts ; le premier qui présente une perméabilité élevée et est composé d'alluvions Quaternaires (marnes, graviers, galets, limons et poudingues), se localise au centre du bassin versant. Cet aquifère est connu sous le nom de la nappe alluvionnaire de Guelma datant du Mio-Plio-Quaternaire. Le deuxième aquifère des calcaires Néritiques et Sénoniens de la région d'Héliopolis est appelée aussi la nappe des calcaires de Hammam Bradaa. Ces deux aquifères abritent les principales ressources en eau souterraine du bassin versant de la moyenne Seybouse.

#### III.1. Le premier aquifère alluvionnaire datant du Mio-Plio-Quaternaire

L'aquifère alluvionnaire se trouve du côté droit de la vallée de la Seybouse. Il s'étend depuis Medjez Amar jusqu'à Nador, avec une orientation Ouest-Est. Cette zone, d'une superficie de 106 km<sup>2</sup>, est en réalité une zone d'effondrement. Elle est représentative des dépôts miocènes tels que les argiles, les marnes contenant du gypse, ainsi que des dépôts Quaternaires sous forme d'alluvions hétérogènes se présentant sous forme de terrasses (Mouasa.S, 2017). On distingue les hautes terrasses (hautes Seybouse) d'une superficie de 50 km<sup>2</sup>, le tell méridional (moyenne Seybouse) couvrant une superficie de 44 km<sup>2</sup>, et le tell septentrional (basse Seybouse) d'une superficie de 27 km<sup>2</sup> (Aissaoui.M, 2018).

Les alluvions présentes dans cette zone sont caractérisées par leur perméabilité et sont alimentées par les apports latéraux provenant du bassin versant de la Seybouse ainsi que par les eaux d'infiltration résultant des précipitations (Béchiri.N, 2011).

### III.1.1.Description hydrogéologique de la nappe alluvionnaire

Des coupes hydrogéologiques ont été réalisées pour observer et analyser la forme et la configuration de la nappe aquifère.

#### ✚ Coupe hydrogéologique d'orientation Nord-Sud

Cette coupe hydrogéologique, orientée du Nord au Sud a été établie par B.Gaud en 1974, dans la région Est de Belkheir, a permis d'observer les caractéristiques lithologiques suivantes :

- ✓ Au Nord, la basse terrasse formant la nappe actuelle de la Seybouse. Elle est constituée par des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 10 m reposant sur un substratum marneux à gypse ;
- ✓ La moyenne terrasse est constituée d'un matériel relativement fin en alternance avec des passages argileuses d'une épaisseur plus au moins importantes d'environ 40 m et repose sur un substratum marneux à gypse.
- ✓ La haute terrasse a une épaisseur plus importante (plus de 90 m), grâce à un remplissage alluvionnaire, composé essentiellement de sables, graviers et de cailloutis avec de petites intercalations argileuses.
- ✓ La forme du substratum marneux témoigne de l'ancien lit de la Seybouse qui été positionné plus au Sud que son parcours actuel. L'affleurement des marnes à gypse du Miocène forme un seuil qui sépare les nappes aquifères des vallées ancienne et actuelle.
- ✓ La partie sud est occupée par les calcaires travertineux du Pliocène qui sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses. D'après la colonne stratigraphique du piézomètre P3, il s'agit de tufs vacuolaires ou spongieux, de calcaires blancs crayeux fissurés avec de nombreuses recristallisations de calcite.

L'interprétation de cette coupe montre que les calcaires travertineux sont absents et reculent au Sud de la plaine vers les monts de la Mahouna.

Au niveau de la nappe des travertins, les valeurs de transmissivité, augmentent vers le Nord, à la limite avec la haute terrasse, où elles atteignent la valeur de  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$  (Mouassa.S, 2017).

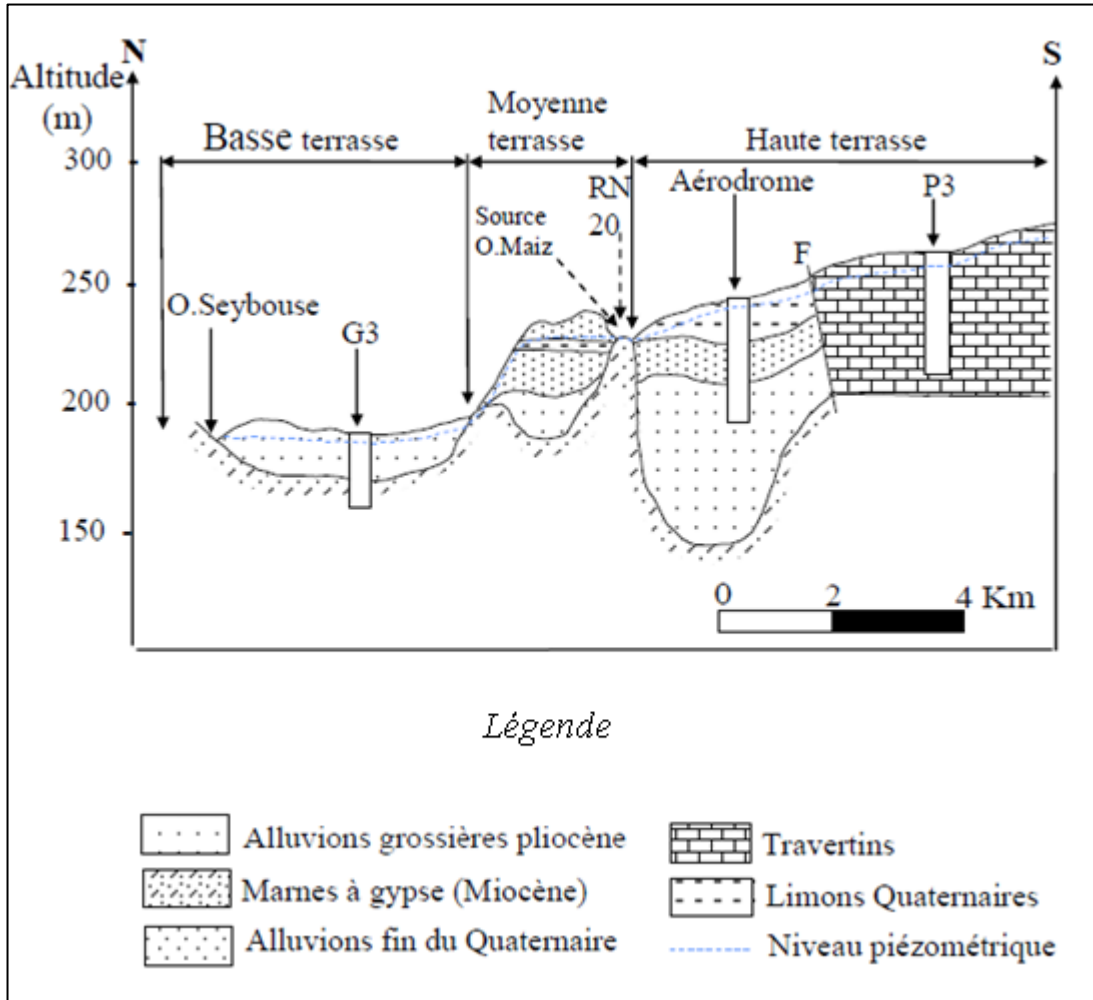


Fig. N° 23 : Coupe hydrogéologique Nord-Sud dans la plaine de Guelma (D'après, Gaud.B, 1974).

### III.2. Le deuxième aquifère des calcaires Néritiques et Sénoniens de la région d'Héliopolis

Les formations géologiques principales étudiées dans notre analyse consistent principalement par des calcaires néritiques et des marno-Calcaires du Campanien et du Maëstrichtien. Ces formations sont fortement fissurées et karstifiées, ce qui crée un milieu favorable à l'accumulation des eaux souterraines.

Les limites exactes de cette nappe sont inconnues car qu'elle est recouverte par les nappes telliennes et ultra telliennes. Cependant, on peut identifier trois zones dont ces formations potentiellement aquifères :

#### ✓ La nappe de Hammam Bradaa

Dans la nappe de Hammam Bradaa, les formations de la série néritique apparaissent au sommet oriental du Djebel Débagh, celui-ci s'ennoie à l'Est sous les nappes de charriage pour réapparaître à la faveur des fenêtres à Hammam Oulad Ali, au Douar Bouzitoune, à la

piscine romaine d'Héliopolis (Hammam Bradaa) et enfin à l'Ouest de la station ferroviaire du Nador (J.M.Vila, 1980).

✓ **La nappe de Héliopolis (Bouzitoune)**

Les formations carbonatées du calcaire néritique de la nappe de Héliopolis (Bouzitoune) qui font partie du groupe nord oriental des séries néritiques, sont isolés et de tailles variables (J.M.Vila, 1980).

✓ **La nappe d'El Fedjoudj et Oulad Ali**

Dans la nappe d'El Fedjoudj et Hammam Oulad Ali, les formations carbonatées sont représentées par quelques dizaines de mètres d'un calcaire Sénonien supérieur, calcaire biodétritique ou micritique et calcaro-dolomitiques susceptibles d'être aquifères (Durand.D.1910) analogue à celui de Douar Bouzitoune (Héliopolis). Ces formations plongent en profondeur vers l'Est, sous les nappes de charriage pour réapparaître d'abord dans la région de Bouzitoune, puis en petite fenêtre près de la source romaine au niveau de Hammam Bradaa (Dareste .Ch.1910). Les affleurements néritiques sont visibles dans le Djebel Débagh qui culmine les 1411 m et peuvent être la zone d'alimentation des autres affleurements qui apparaissent en mamelons Sud de Hammam Meskhoutine (Débagh), à Hammam Bradaa (Héliopolis), au Sud-Ouest de Guelma et à l'Ouest de Nador (J.M.Vila, 1980).

**Pour voir s'il y a une relation entre la nappe superficielle et profonde, nous avons étudié les deux nappes**

Dans un premier stade on s'intéresse à la nappe superficielle.

**A. Nappe Superficielle**

L'étude de l'écoulement souterrain des eaux dans la région est très importante, car il est conditionné par la connaissance de plusieurs facteurs tels que : la piézométrie, le gradient hydraulique, la perméabilité et la transmissivité.

**III.A.1.Piézométrie**

L'étude de la carte piézométrique permet de visualiser l'allure de la surface piézométrique, de comprendre l'hydrodynamique de l'aquifère en question, les niveaux d'eau sont montrés par des courbes d'égale altitude de la morphologie de la surface piézométrique. La forme et l'espacement des courbes isopièzes détermine le sens et la vitesse d'écoulement, le gradient hydraulique, les conditions aux limites ainsi que les zones d'alimentation et d'accumulation des eaux souterraine dans la région en question.

### III.A.2. Inventaire des points d'eau

Durant les mois de Novembre 2019, Septembre 2021 et Mai 2022, nous avons effectué un recensement de tous les points d'eau implantés dans la zone d'étude. En parallèle, nous avons mesuré les niveaux piézométriques dans les différents points d'eau. 20 points d'eau ont été inventoriés durant notre campagne piézométrique pour les années 2019, 2021 et 2022 (20 points d'eau par année). Les puits réalisés sont pour la plupart des ouvrages récents, forés à la main et soutenus par du parpaing, ayant une profondeur qui s'étale de 1.00 m jusqu'à 14.00 m. la plupart de ces puits ne sont pas couverts et équipés par des pompes électriques. Tous ces points d'eau sont destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation des cultures maraîchères. Nous signalons que la majorité des puits sont imparfaits.

Nous avons établi 3 cartes piézométriques, deux se rapportant au période de basses eaux (2019 et 2021) et une concerne la période des hautes eaux de l'année 2022.

La construction de ces 3 cartes a été réalisée à partir du logiciel ArcGIS version 10.2.

Les points de prélèvements ont été déterminés à l'aide d'un GPS de marque Garmin D010-02258-01 et localisés comme suit dans le **tableau 34** suivant :

N° du puits	Profondeur (m)	Localisation
P1	10	El Fedjoudj
P2	12	El Fedjoudj
P3	6	El Fedjoudj
P4	6	El Fedjoudj
P5	1,8	El Fedjoudj
P6	6	Héliopolis
P7	9	Héliopolis
P8	8	Héliopolis
P9	10	Héliopolis
P10	12	Héliopolis
P11	9	Héliopolis
P12	8	Héliopolis
P13	8	Héliopolis
P14	10	Héliopolis
P15	6	Guelaat Bousbaa
P16	4	Guelaat Bousbaa
P17	14	Héliopolis
P18	11	Héliopolis
P19	9	Héliopolis
P20	12	Héliopolis

### **III.A.3. Interprétation des cartes piézométriques réalisées lors des trois campagnes de Novembre 2019, de Septembre 2021 et de Mai 2022**

Les trois cartes piézométriques réalisées durant les années du mois de Novembre **2019**, du mois de Septembre **2021** et du mois de Mai **2022** (Fig. n°24), sont totalement identiques, avec un petit changement dans l'allure des courbes isopièzes entre les périodes des basses et hautes eaux. L'examen de ces isopièzes montre une surface piézométrique assez régulière. Le sens d'écoulement se fait dans toutes les directions (du Nord vers le Sud (Oued Seybouse), du Nord vers l'Ouest (les calcaires néritiques de Djebel Débagh) et du Nord vers l'Est) et l'espacement des courbes augmentent progressivement dans cette direction due à la topographie.

Le dépouillement de cette carte présente un dôme piézométrique visible vers les carrières de Bouziotune, ce sont des calcaires fissurés faillés qui affleurent à la surface ou sont exploités les graviers, après ces calcaires deviennent plus profonde et recouverte par des alluvions (remplissage), ces derniers alimentent la nappe alluviale depuis Héliopolis vers Oued Seybouse.

Les courbes piézométriques sont serrées dans la partie amont de la région traduisant un fort gradient hydraulique ( $1,6 \cdot 10^{-2}$ ), ils marquent un écoulement rapide dû à la pente et une perméabilité faible. Vers la partie aval de la région d'étude, les courbes sont plus espacées avec un gradient hydraulique faible de ( $3,5 \cdot 10^{-3}$ ) ce qui indique une forte perméabilité et un écoulement lent.

L'alimentation se fait en grande partie par les formations carbonatées du Crétacé. Le fait que l'Oued Seybouse soit permanent indique que les apports de la nappe à l'Ouest sont importants, ce qui implique l'existence d'une relation entre la nappe et l'Oued.

Les sources de bordures sont soit captées pour l'utilisation domestique et agricole, soit leurs eaux se réinfiltrent en partie dans la nappe superficielle.

Il est important de signaler qu'il y a une relation hydraulique de la nappe avec les eaux de surface.

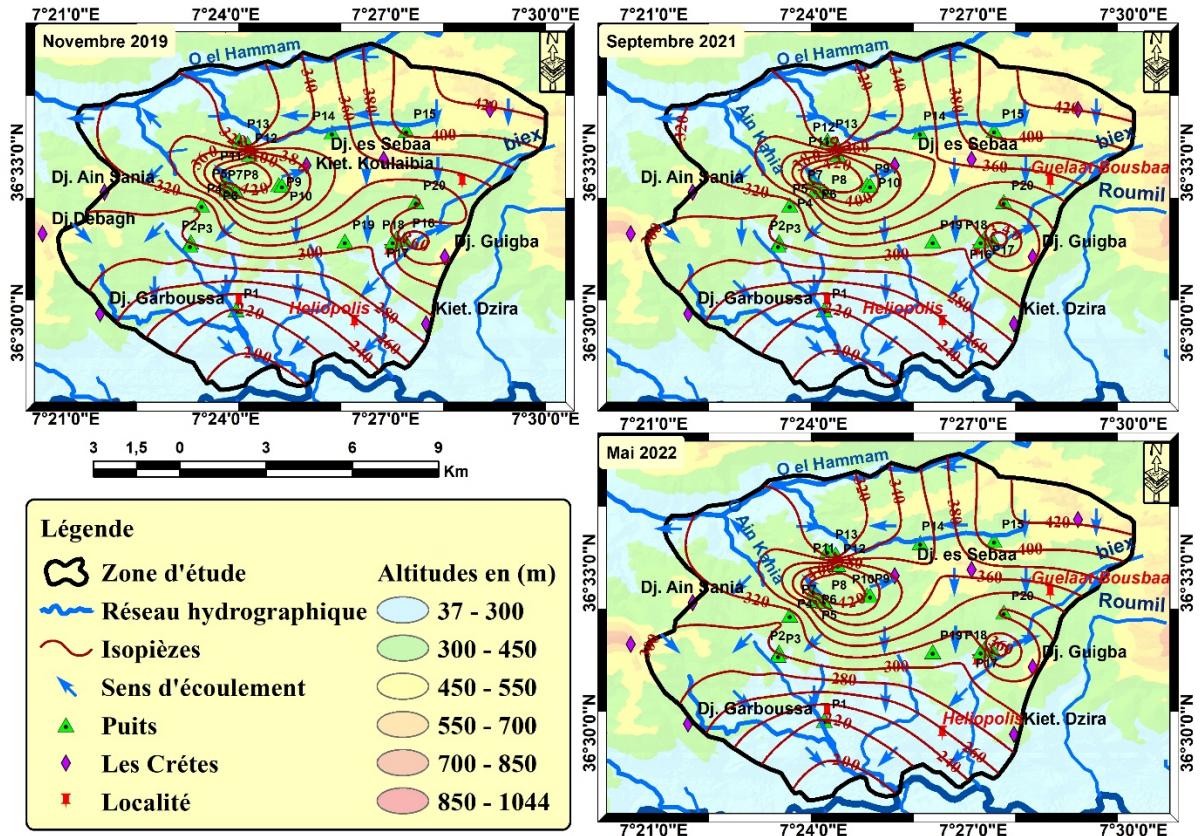


Fig. N°24 : Cartes piézométriques de la nappe superficielle de Hammam Bradaa (a.2019, b.2021 c.2022).

### III.A.3.1. Evolution spatio-temporelle de l'état piézométrique de l'aquifère

L'allure générale des isopièzes entre la période de Mai 2022 et celle de Septembre 2021 ainsi que la période de Novembre 2019 reste presque identique, l'écoulement se fait généralement du Nord vers le Sud.

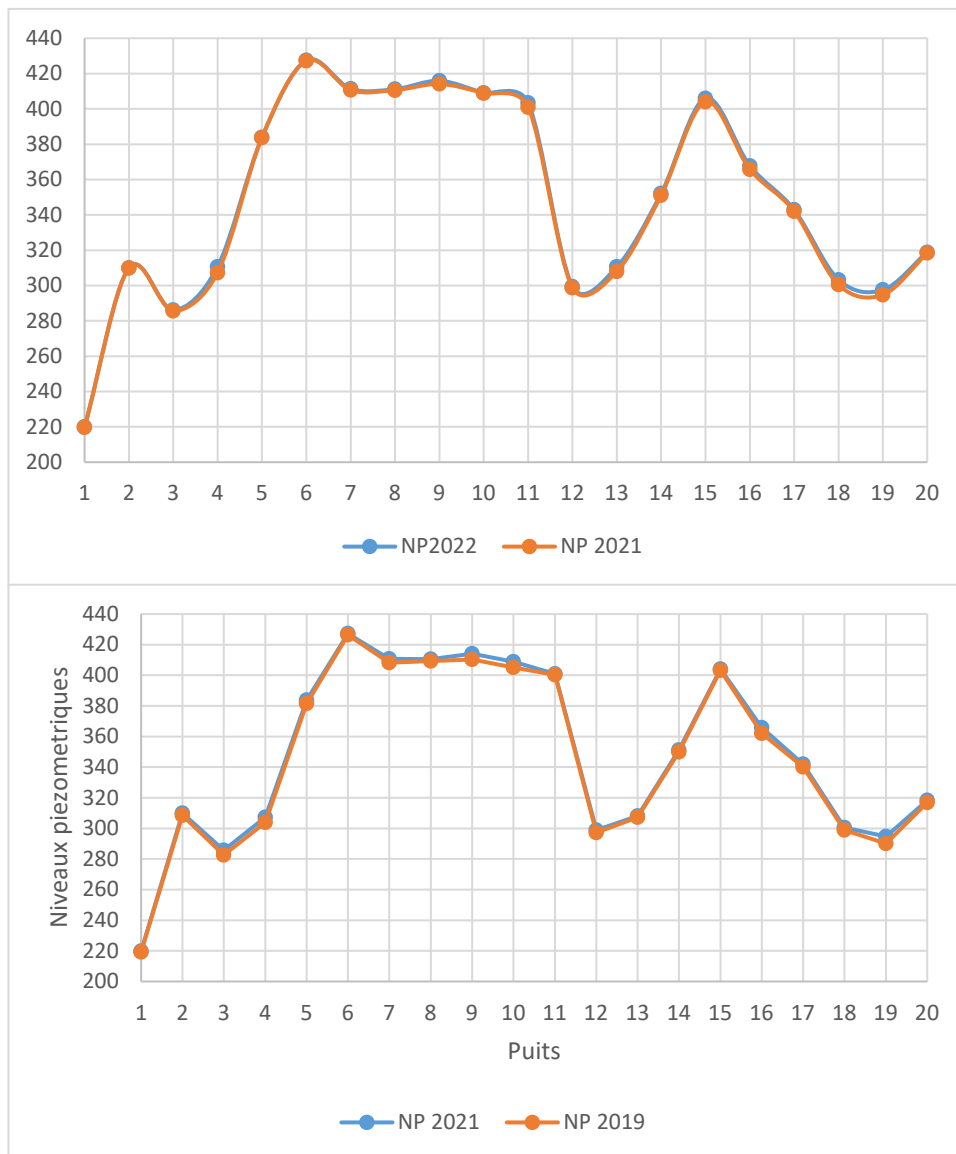


Fig. N°25 : Evolution spatio temporelle du niveau piézométrique pendant les trois campagnes.

### B. La nappe profonde des calcaires néritiques

Dans notre étude, nous disposons des données provenant de 14 forages d'eau implantés dans la région d'étude. Ces forages ont principalement traversé les calcaires fissurés, et il est fréquent d'observer une perte totale de la boue pendant leurs réalisations ([Drissi.B, 1988](#)).

En particulier, la perte totale de la boue indique la présence des fissures et des fractures dans les calcaires, ce qui suggère la possibilité d'une circulation importante des eaux souterraines.

L'analyse des données de forage, combinée à d'autres données hydrogéologiques, nous permettra de mieux comprendre le fonctionnement de la nappe profonde et d'évaluer son potentiel comme ressource en eau souterraine.

L'inventaire des différents forages implantés dans notre région d'étude sont mentionnés dans le **tableau 35** ci-dessous comme suit :

<i>Communes</i>	<i>N° du forage</i>	<i>P(m)</i>
<i>Hammam Bradaa</i>	1	90
	2	127
	3	177
	4	410
	5	50
	6	292
<i>Héliopolis</i>	7	240
	8	400
	9	202
<i>El Fedjoudj</i>	10	180
	11	226
<i>Guelaat Bousbaa</i>	12	580
	13	560
	14	400

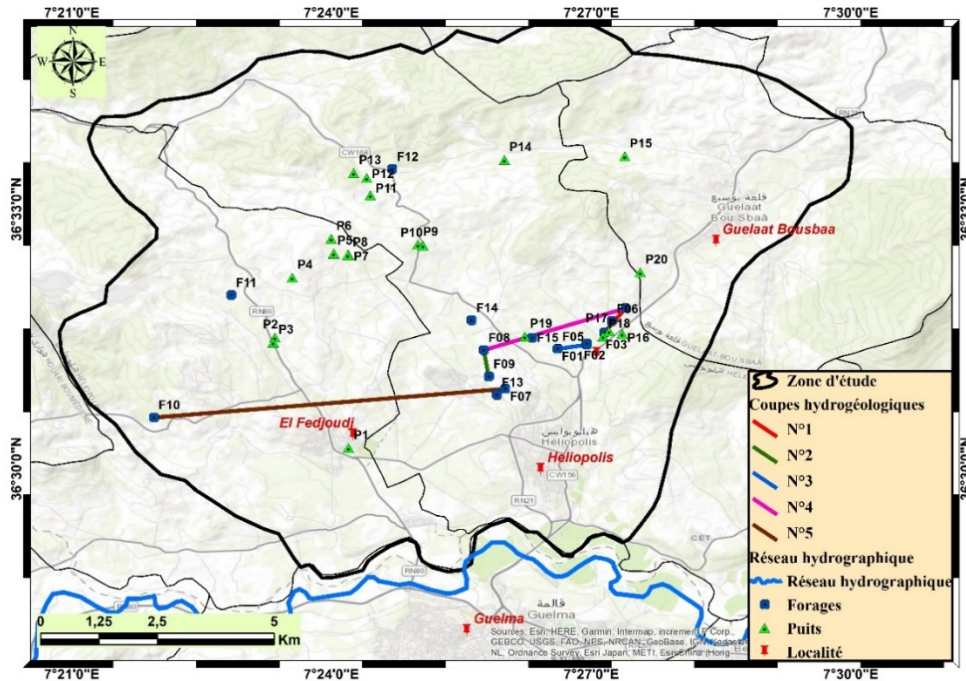


Fig. N°26 : Carte d'inventaires des points d'eau échantillonnés et localisation des coupes hydrogéologiques réalisées dans la région d'étude.

### **III.B.1. Coupes hydrogéologiques et litho stratigraphique**

Dans notre étude, nous avons réalisé des coupes hydrogéologiques et litho stratigraphique dans la région d'intérêt, en particulier au niveau de l'aquifère carbonaté. Ces coupes nous ont permis de déterminer l'étendue de l'aquifère des calcaires néritiques, de reconstituer sa géométrie, d'identifier le type et la nature de cet aquifère, ainsi que d'étudier son évolution latérale.

#### **Coupe litho stratigraphique n°01 au niveau de Hammam Bradaa (Fig. N°27)**

Cette coupe litho stratigraphique a été tracé au niveau des forages F5, F4 et F3, orientée Nord-Est-Sud-Ouest, ce qui nous a permis de découvrir la présence de la nappe des calcaires néritiques. Cette nappe se caractérise par une formation fissurée dont les profondeurs varient entre 10 m pour le forage F5, 218 m pour le forage F4 et 20 m pour le forage F3. De plus, grâce au forage F4 situé à Hammam Bradaa, nous avons pu identifier cette formation qui plonge vers le Nord-Est.

Près du forage F3, dans cette coupe, nous observons la présence d'une formation alluvionnaire lenticulaire composée de galets, de graviers et de sable.

Cette coupe révèle également un degré élevé de karstification, plus profondément dans les trois forages, ce qui a entraîné une perte totale de boue et indique donc la présence d'un aquifère.

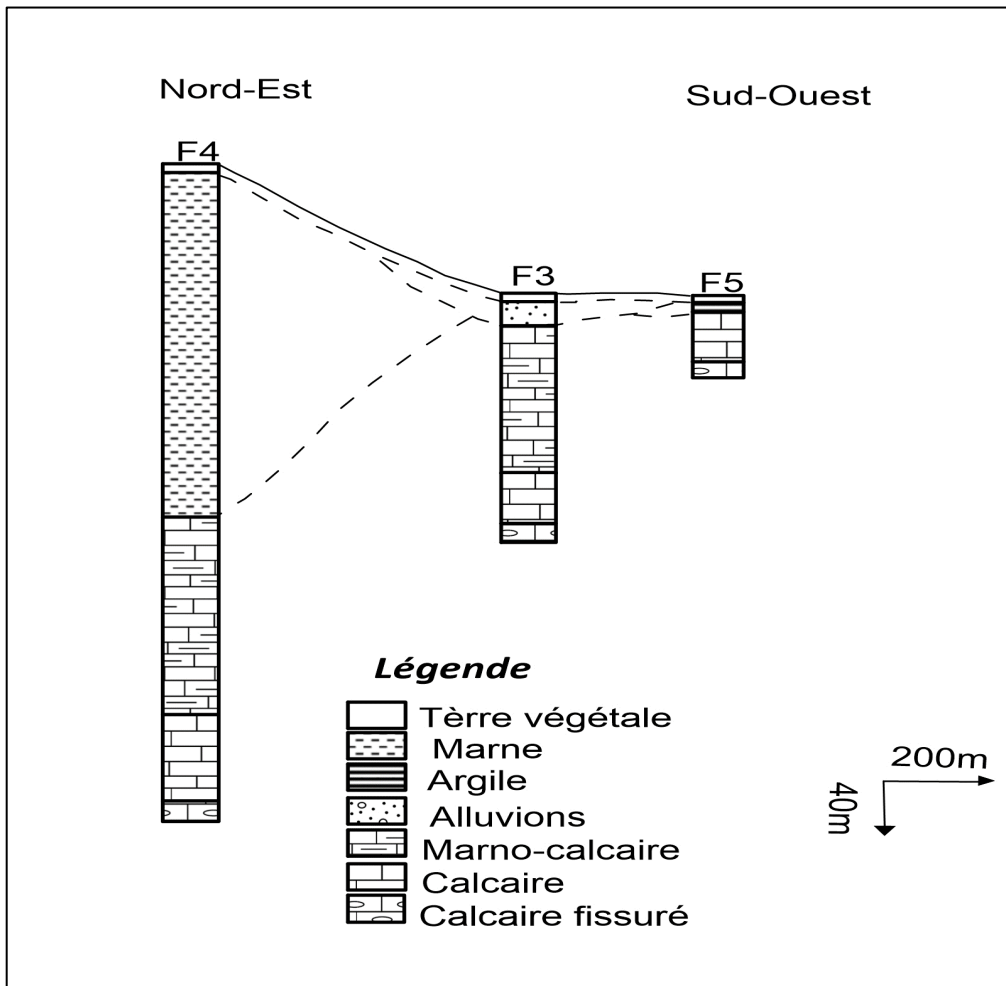


Fig. N°27 : Coupe litho stratigraphique n°01 entre les forages F3, F4 et F5.

➤ **Coupe litho stratigraphique n°02 au niveau de Bouzitoune (Fig. N°28)**

L'orientation de cette litho stratigraphique n°02 est de Nord-Ouest, Sud-Est, dans la zone située entre les forages F7, F8 et F9. Elle met en évidence que le toit des calcaires devient plus profond en allant du Nord vers le Sud, atteignant une profondeur de 300 m au niveau du forage F8. Au-dessus de cette nappe aquifère se trouve une couche de marne qui, à son tour, s'épaissit de plus en plus dans la même direction.

Dans le forage F8, nous avons constaté une karstification qui a été confirmée par une perte totale de la boue, ce qui indique la présence d'un aquifère potentiel.

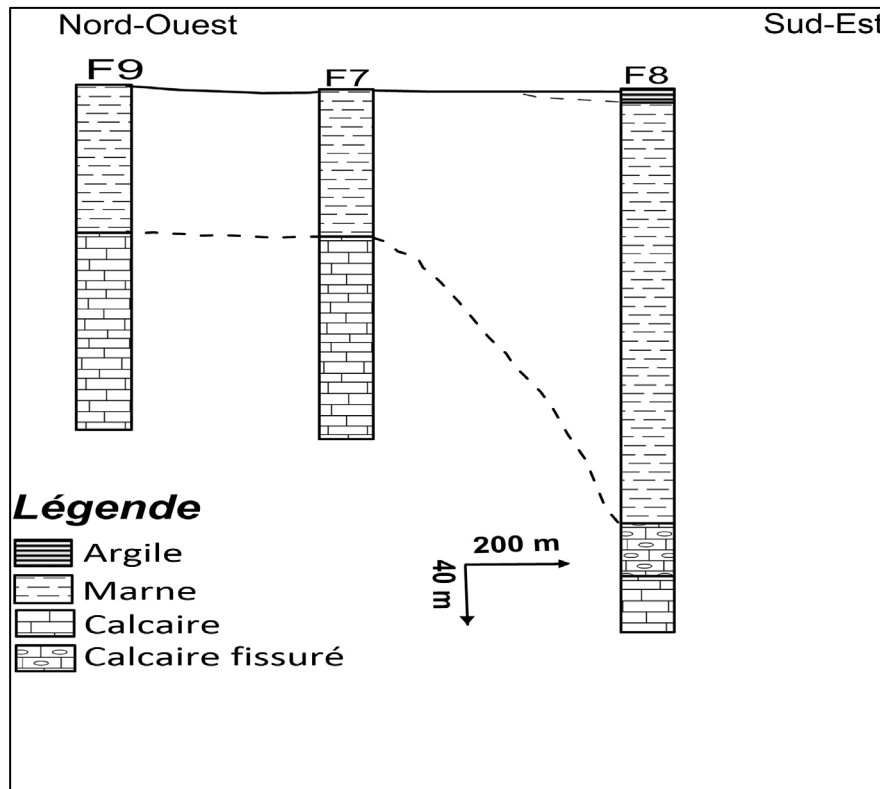


Fig. N°28 : Coupe litho stratigraphique n°02 entre les forages F7, F8 et F9.

➤ **Coupe litho stratigraphique n°03 au niveau de Hammam Bradaa et Bouzitoune (Fig. N°29)**

Cette coupe est orientée Est-Ouest, entre les forages F5, F1 et F7. Nous observons que les calcaires fissurés dans la partie Est de la zone d'étude se trouvent à quelques mètres de profondeur et plongent progressivement vers l'Est (jusqu'à une profondeur de 102 m au niveau du forage F7).

Dans cette coupe, nous pouvons constater une karstification significative très profonde dans les forages F5 et F1. Cette karstification est expliquée par la présence d'une perte totale de la boue durant la réalisation de ces forages.

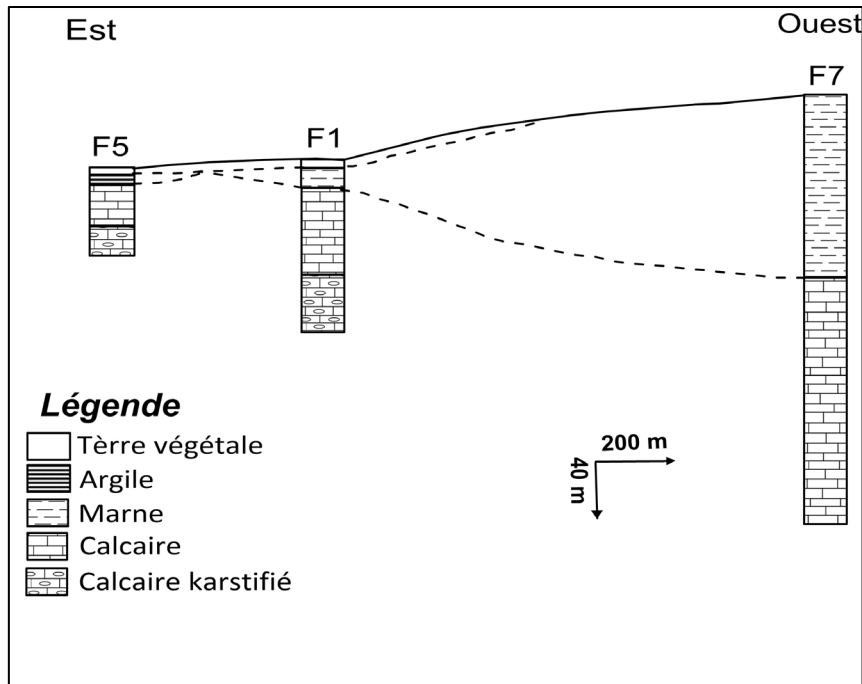


Fig. N°29 : Coupe litho stratigraphique n°03 entre les forages F1, F5 et F7.

➤ **Coupe Hydrogéologique n°04 au niveau d'El Fedjoudj, Bouzitoune et Hammam Bradaa (Fig. N°30)**

Cette coupe est orientée Ouest - Est, entre les forages F10, F7 et F5. Nous pouvons observer que le toit du calcaire devient plus profond en allant de l'Est vers l'Ouest pour atteindre 220 m au niveau du forage F7.

Dans cette coupe, nous remarquons une karstification moins profonde au niveau du forage F5, ce qui se traduit par une perte totale de la boue.

Cependant, il convient de noter que la karstification est superficielle pour les deux autres forages, F7 et F10. Au niveau du forage F7, le calcaire karstifié devient compact en profondeur et est recouvert d'une couche argileuse, ce qui entraîne la captivité de l'aquifère.

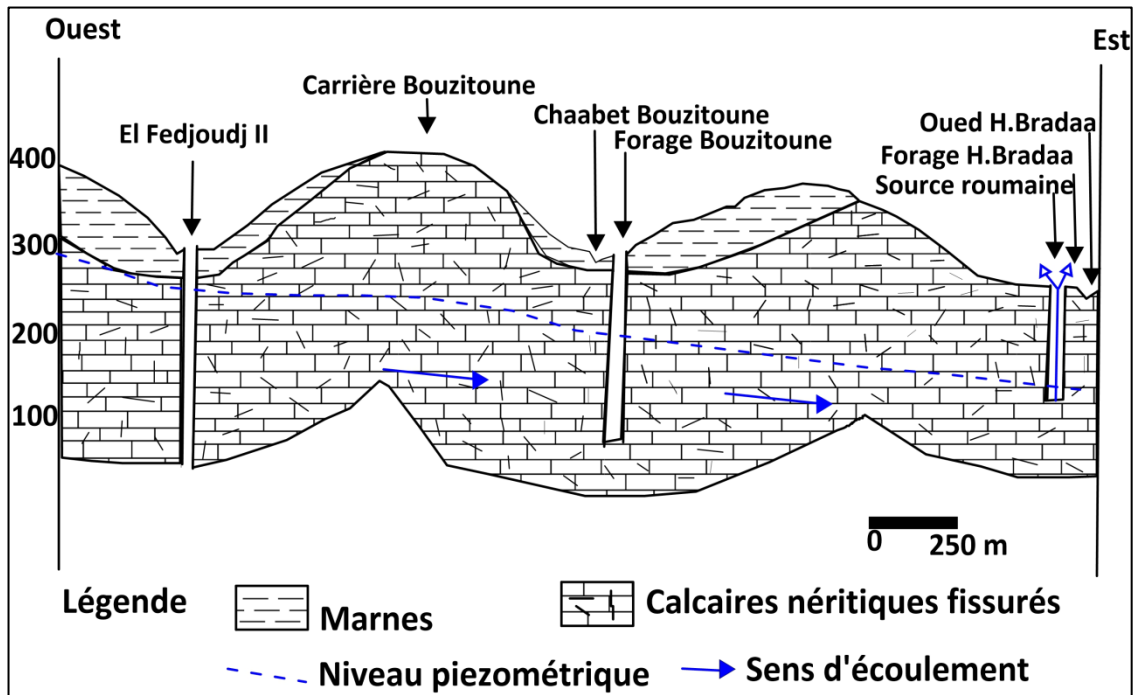


Fig. N°30 : Coupe hydrogéologique entre les forages El Fedjoudj, Bouzitoune et Hammam Bradaa (D'après [Saidia et Chaab, 2002. Modifiée](#)).

➤ **Coupe Hydrogéologique n°05 au niveau de Hammam Bradaa et Bouzitoune (Fig. N°31)**

Cette coupe hydrogéologique est orientée Sud- Est, Nord- Ouest dans la région de Bouziotune, le toit des calcaires néritique se situe à 500 mètres entre les forages F4 et F8. ), Tandis que dans la partie centrale, les calcaires se trouvent à une profondeur de 98 mètres au niveau du forage F7. La continuité de ces formations constitue l'aquifère de Hammam Bradaa. La continuité de cet aquifère jusqu'à Hammam Bradaa est également confirmée par les interférences enregistrées dans les forages F1 et la source roumaine suite à la mise en service des forages F7 et F8.

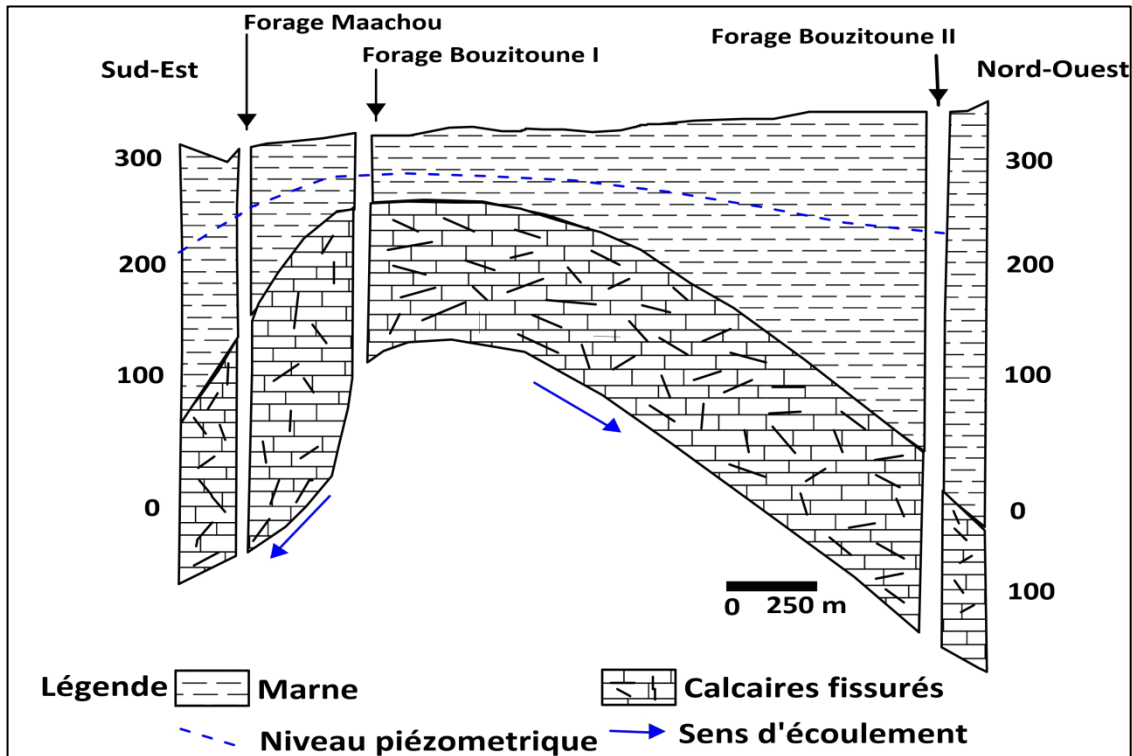


Fig. N°31 : Coupe hydrogéologique entre les forages Maachou, Bouzitoune 1 et Bouzitoune 2(D'après [Saidia et Chaab, 2002](#). Modifiée).

### III.B.2.Caractéristiques hydrodynamique

Dans le but d'obtenir une meilleure compréhension du comportement hydrodynamique de l'aquifère, une série d'essais de pompage (courte et longue durée) a été effectuée sur quatre forages. Les forages ont été sélectionnés en fonction de leur équipement et de leur position dans la région étudiée. La durée des pompages varie d'environ de 2 heure à 4 heures pour la phase de descente, et de 2 heures à 4 heures pour la phase de remontée.

La rareté et l'absence des essais de pompages dans la majorité des forages étudiés dans la région en question constitue l'une des lacunes en termes de paramètres hydrodynamiques qui caractérisant mieux le comportement hydrodynamique de l'aquifère des calcaires néritiques de Héliopolis.

A partir des données des essais de pompage réalisés sur les quatre forages repartis dans la région (données de [DHW](#) de Guelma), on a pu de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe profonde (transmissivité et perméabilité).

#### II.B.2.1.Interprétation des données des essais de pompages

Le forage F4 étant le premier réalisé en 1985 a une profondeur de 410 mètres, avec un débit d'exploitation de 90 litres/seconde.

En 1986, le forage F5 est réalisé dans le but de capté la source de Hammam Bradaa pour l'alimentation en eau potable de la ville de Guelma, le forage à une profondeur de l'ordre de 50 mètres et un débit de 120 litres/seconde.

Le forage F1 a été réalisé au début de l'année 1988 dont la profondeur est de 90 mètres et le débit de 90 litres/seconde.

Enfin un dernier forage F11 a été réalisé en 1998 dont la profondeur est de 226 mètres et le débit de 73 litres/seconde.

D'après les colonnes stratigraphiques et leurs descriptions géologiques, on a établi le calcul suivant :

### **Transmissivité**

La transmissivité est le produit du coefficient de perméabilité (k) horizontale, par l'épaisseur (e) de la couche aquifère. Elle s'exprime en m<sup>2</sup>/s (**G.Castany**).

$$T = K * e \quad (40)$$

T : transmissivité en m<sup>2</sup>/s ;

K : perméabilité en m /s ;

e : épaisseur de la couche en m.

Ce paramètre caractérise l'aptitude de la nappe à transmettre l'eau.

### **Coefficient de perméabilité**

Il est défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire en m<sup>3</sup> traversant une unité de temps (une seconde), sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, une unité de section en m<sup>2</sup> orthogonale à la direction de l'écoulement dans les conditions de validité de la loi de Darcy (à la température de 20°C). Il a la dimension d'une vitesse et s'exprime en m/s (**G.Castany**).

### **Pertes de charge**

Le rabattement mesuré dans l'ouvrage à un instant (t) est la somme de deux composantes nommées pertes de charge, exprimées en (m) de hauteur d'eau (**G.Castany**).

#### ❖ **Perte de charge linéaire (A.Q)**

Il est provoqué par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage du puits (loi de **Darcy**).

#### ❖ **Perte de charge quadratique (B.Q<sup>2</sup>)**

Elle est provoquée par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, crépine, et dans le tubage, ainsi le rabattement total à l'instant (t) est donné par l'expression de (C.E.Jacob, 1946).

$$\Delta = AQ + BQ^2 \quad (41)$$

$\Delta$  : rabattement total calculé ;

Q : débit en  $m^3/s$ ,

A et B : coefficient de Jacob.

Cette expression est établie pour l'aquifère à nappe captive.

Un essai de trois paliers a été réalisé à l'aide d'une pompe immergée à 65 mètres. Chaque palier est d'une durée de huit heures avec un débit croissant.

↳ Premier palier 45 l/s

↳ Deuxième palier 50 l/s

↳ Troisième palier 60 l/s

L'essai définitif a été effectué avec un débit de 40 l/s avec une durée de quarante heures.

### III.B.2.1.1. Interprétation des trois paliers

#### ▪ Courbe rabattement – Temps

L'ensemble des mesures réalisées sur le forage F4, nous a permis de construire la courbe rabattement – fonction du temps (**Fig. N°01**, voir annexe)

La nappe a été testée suivant trois débits différents :

- ✓  $45 \cdot 10^{-3} m^3/s$  pendant 8 heures
- ✓  $50 \cdot 10^{-3} m^3/s$  pendant 8 heures
- ✓  $60 \cdot 10^{-3} m^3/s$  pour une durée égale à 8 heures

Après chaque essai on a obtenu une stabilisation, ce qui nous a mener à changer de débit, le rabattement été très important.

- ✓ Pour un débit de  $45 \cdot 10^{-3} m^3/s$  on a un rabattement égal à 24,95 m.
- ✓ Pour un débit de  $50 \cdot 10^{-3} m^3/s$ , le rabattement est de l'ordre de 30,87 m.
- ✓ Pour  $60 \cdot 10^{-3} m^3/s$ , le rabattement est de 33,98 m.

L'utilisation des données du (**tableau 01**, voir annexe), nous ont permis de tracer la courbe débit rabattement (**Fig. N°02**, voir annexe) afin de déterminer le débit d'exploitation. Ce dernier est de l'ordre de  $0,045 m^3/s$ , soit 45 l/s pour un rabattement de 24,95 m.

On note que le débit d'exploitation fixé par la direction d'hydraulique de la wilaya de Guelma (**DHW**) est le même 45 l/s.

#### ▪ Droite débit - rabattement spécifique

Le rabattement spécifique (S/Q) est la hauteur de rabattement mesurée dans le forage projeté au débit qui correspond à ce rabattement (**G.Castany**). Il est exprimé en ( $m^3/s$ ) (**tableau 02**, voir annexe).

▪ **Calcul des pertes de charge**

La droite débit - rabattement spécifique, nous permet de calculer les pertes de charge linéaire (AQ) et quadratique (BQ<sup>2</sup>) après avoir déterminé les coefficients A et B de l'équation 41 ci-dessus.

Où :

A : est obtenu par l'intersection de la droite représentative avec l'axe des rabattements spécifiques. Dans notre cas **A=50**

B : est égale à la pente de la droite représentative.

$$B = tg = \frac{\left(\frac{S}{Q}\right)_2 - \left(\frac{S}{Q}\right)_1}{Q_2 - Q_1} = 12592 \quad (42)$$

Donc l'équation de la droite représentative est donnée comme suit :

$$S = 50Q + 12592Q^2 \quad (43)$$

Le rabattement correspondant à chaque palier est calculé par cette expression, les valeurs obtenues sont mentionnées sur le (tableau 03 et Fig. N°03, voir annexe).

▪ **Calcul de transmissivité à l'aide de la courbe de remonté définitif**

Connaissant tp (temps totaux de l'essai) et t (temps écoulé depuis l'arrêt du pompage), on peut tracer la droite rabattement résiduelle Δr, fonction du logarithme du temps sur un papier semi log, en portant en abscisse le temps (tp/t+1) en seconde et en ordonnée les valeurs du rabattement résiduel Δr correspondante, on obtient alors une droite dont la pente (C), calculée sur un cycle logarithmique permet de déterminer la transmissivité T d'après la formule de (JACOB).

$$T = 0,183 * \frac{Q}{C} \quad (44)$$

Avec

Q : débit final avant l'arrêt de la pompe en m<sup>3</sup>/s.

Les valeurs du rabattement résiduel et du temps (tp/T+1) sont consignées dans le (tableau 04 et Fig. N°04, voir annexe).

La courbe de remontée montre deux segments de droite

Le segment n°01 correspondant à la remontée très rapide qui suit l'arrêt du pompage. Le second segment est le plus intéressant pour le calcul de la transmissivité.

Segment n°02, le coefficient angulaire de la droite pris dans un cycle logarithmique est

C= 0,225

La formule de Jacob, nous donne :

$$T = 0,183 * \frac{40*10^{-3}}{0,225} \quad (45)$$

$$T = 3,253 * 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

D'où la perméabilité est calculée de la formule suivante :

$$T = K * e \quad (46)$$

Donc  $K = T/e \quad (47)$

Où

T : transmissivité (m<sup>2</sup>/s).

e : épaisseur de la partie crépinée 58m.

$$K = 3,253 * 10^{-2} / 58 \quad (48)$$

$$K = 5,608 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

Ces bonnes valeurs de transmissivité (3,253\*10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s) et de la perméabilité (5,608\*10<sup>-4</sup> m/s) caractérise la formation karstique.

Le **tableau 36** suivant montre les résultats des essais de pompage réalisés au niveau des quatre forages.

N° de forages	X (m)	Y (m)	Z (m)	NS (m)	ND (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
F4	361826	4043650	320	50	57,76	3,253*10 <sup>-2</sup>	5,608*10 <sup>-4</sup>
F5	360639,74	4042802,15	280	63	74	4,1175*10 <sup>-1</sup>	2,745*10 <sup>-2</sup>
F1	361145	4042889	305	2,8	15	6,1*10 <sup>-2</sup>	1,525*10 <sup>-3</sup>
F10	353655	4041456	321	56,8	52	6,49*10 <sup>-3</sup>	2,16*10 <sup>-4</sup>

#### IV. Conclusion

Les données hydrogéologiques de certains forages réalisés sur la région d'El Fedjoudj, Héliopolis et Hammam Bradaa indiquent la présence de deux aquifères distincts :

- ✓ **Un aquifère alluvionnaire** d'âge Mio-Plio-Quaternaire, d'une épaisseur de 15 m se trouve à une profondeur de 5 m et est situé entre les forages F4 et F5 à proximité du forage F3. Cet aquifère a une forme lenticulaire alluvionnaire et est constitué de galets, de graviers et de sable.
- ✓ **Un aquifère carbonaté néritique** est principalement constitué de calcaire dolomitique du Sénonien supérieur et de calcaire bio-détritiques. Il présente des caractéristiques favorables pour être aquifère.

Ces aquifères jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable pour la population et les agglomérations avoisinantes.

La piézométrie effectuée dans la zone d'étude révèle une direction générale d'écoulement des eaux souterraines du Nord au Sud. L'interprétation des cartes piézométriques met en évidence la relation entre la nappe et l'Oued (Oued Seybouse). L'aquifère alluvionnaire est principalement alimenté par les précipitations et les formations carbonatées du néritique par le biais des accidents tectoniques.

Selon les coupes litho stratigraphique et hydrogéologiques effectuées dans la région d'Héliopolis, des formations calcaires affleurent par endroit, de manière isolée et avec des dimensions variables. Elles sont recouvertes par des formations plus récentes telles que les formations quaternaires, les flysch, les nappes telliennes et ultra-telliennes. Les forages mécaniques réalisés dans la région traversent ces formations à différentes profondeurs, permettant ainsi d'observer leur géométrie et leur orientation le long de l'axe El Fedjoudj, Hammam Bradaa et Mechtat Bouzitoune. Cette zone représente une importance significative du point de vue aquifère en raison de l'extension et de l'épaisseur des formations néritiques, ainsi que du débit d'eau souterraine prélevé.

La zone d'étude présente une karstification notable dans le néritique, observable à des profondeurs variantes entre 50 et 350 mètres. Cette karstification offre des opportunités d'étude et d'exploitation significatives du système aquifère. Actuellement, une dizaine de forages exploitent cet aquifère, générant un débit total de 357 litres par seconde.

L'interprétation de l'essai de pompage du forage Maachou, qui capte la nappe profonde prouve que cette nappe possède une fissuration développée en karst selon les paramètres de la perméabilité et de transmissivité estimés.

## I. Introduction :

La prospection électrique consiste à identifier et évaluer les effets générés par le passage d'un courant électrique à travers le sous-sol. Plusieurs méthodes électriques diverses sont employées dans ce domaine (**Brahmia.A, 2009**).

L'objectif de cette étude géophysique est d'identifier les diverses couches géologiques situées en sous-sol, dans le contexte de la caractérisation des sols présentant une hétérogénéité. L'objectif final est de localiser et de vérifier sur site le comportement géo-électrique des formations propices à l'accumulation des eaux souterraines (**Brioua.A, 2011**).

Dans le domaine considéré, diverses techniques de mesure sont disponibles. Actuellement, les méthodes basées sur la mesure de la "résistivité" sont les plus largement utilisées, les plus avancées et les plus diversifiées. Ces méthodes, conçues en 1912 par les frères Schlumberger, occupent une place prépondérante (**Khedidja.A, 2016**).

L'Entreprise Nationale de Géophysique (E.N.A.G.E.O) a mené des campagnes de géophysique par sondage électrique vertical dans la région d'Héliopolis de 1993 à 1994. De plus, le bureau d'étude Hydrosol, situé à Souk Ahras dans la région de Gueulaat Bousbaa, wilaya de Guelma, a également réalisé des sondages électriques verticaux en 2014.

Afin d'obtenir une caractérisation plus précise du sous-sol par le biais de la mesure de la résistivité, il est pertinent de noter que ce paramètre peut présenter des variations significatives :

- ✓ Il peut varier de 1 à plusieurs dizaines d'Ohm.m pour les argiles et les marnes.
- ✓ Pour les sables et les grès marneux, la résistivité peut osciller entre une dizaine et quelques centaines d'Ohm.m.
- ✓ Quant aux calcaires et aux roches éruptives, la plage de résistivité s'étend de quelques centaines à plusieurs milliers d'Ohm.m (**Astier, 1971 ; Boudoukha, 2008**).

## II. Méthode électrique

### A/Méthode électrique par Sondage Electrique Vertical (SEV)

La prospection électrique se focalise sur la détection des structures et des propriétés des terrains en se basant sur la mesure d'un paramètre physique spécifique : **la résistivité électrique**.

La résistivité électrique d'un matériau dépend de sa composition pétrographique, de la structure des roches et de la concentration en eau, cette dernière pouvant être plus ou moins saline. En réalité, la conductibilité du sous-sol est principalement influencée par la teneur en eau. La résistivité électrique d'une roche est ainsi influencée par des facteurs tels que la porosité, le

degré de cimentation, le taux de saturation des pores en eau, et la résistivité de l'eau d'imbibition (Hydro Sol, 2014). Cette relation est formalisée par la loi d'Archie (1942).

$$\rho_r = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-2} \quad (50)$$

Avec :

$\rho_r$  : résistivité électrique de la roche, en ohm-m ;

$\rho_w$  : résistivité électrique de l'eau d'imbibition, en ohm-m ;

$\phi$  : porosité en % ;

$S_w$  : degré de saturation des pores, en % ;

$m$  : facteur de cimentation ; il dépend de la forme de pores, des liaisons entre pores et varie entre 1.3 et 2.2 ;

$a$  : facteur caractérisant la lithologie et varie entre 0.6 et 2.

Si la formation est complètement saturée en eau, c'est à dire  $S_w = 1$ , alors on aura plus simplement :

$$\rho_r = a\rho_w\phi^{-m} \quad (51)$$

On a l'habitude de regrouper sous le terme de facteur de formation :  $F = a\phi^{-m}$  ce qui donne :

$$\rho_r = F\rho_w \quad (52)$$

Dans la pratique on admet pour les formations meubles la formule d'Humble

$$\rho_r = 0,62\phi^{-2,15} \rho_w \quad (53)$$

Et pour les roches bien cimentées :

$$\rho_r = \phi^{-2} \rho_w \quad (54)$$

Il est important de souligner que la fiabilité de la formule d'Archie est limitée pour les formations argileuses et ne peut être appliquée de manière directe. Néanmoins, la formule d'Archie demeure adéquate pour une première évaluation. Lorsque le facteur de formation (F) est inférieur à 2,5, la présence d'argile est très probable.

Les mesures de résistivité permettent ainsi d'identifier aisément les formations les plus poreuses. Cependant, pour que ces formations puissent être considérées comme des réservoirs exploitables, une perméabilité satisfaisante est également nécessaire.

### III. Mesure de la résistivité

La méthode employée pour mesurer la résistivité électrique fait usage de divers dispositifs, parmi lesquels nous avons opté pour le quadripôle Schlumberger. Le principe de cette méthode consiste à introduire un courant électrique continu  $I$  dans le sous-sol via des électrodes

d'émission A et B. La différence de potentiel  $\Delta V$  générée est ensuite mesurée entre deux électrodes de réception, M et N (**Fig. °05**, voir annexe).

En connaissant l'intensité du courant émis (I) et la tension enregistrée ( $\Delta V$ ), la résistivité de la formation traversée par le courant peut être déduite à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (55)$$

Cette méthode implique l'injection d'un courant électrique continu ou alternatif d'intensité I généré par un générateur, entre deux électrodes d'injection A et B, et la mesure d'une différence de potentiel  $\Delta V$  provoquée par le passage du courant entre deux électrodes de réception M et NN.

Où :

$\rho_a$  : résistivité apparente en Ohmmètres ;

K : coefficient géométrique dépendant de la position des électrodes AMNB pour le dispositif

De Schlumberger :

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (56)$$

$\Delta V$  : tension enregistrée ;

I : intensité du courant émis.

L'examen des variations de la résistivité apparente en fonction du demi - allongement AB, conduit à la connaissance des résistivités vraies des différentes couches et de leurs épaisseurs respectives. (**Fig. N°06**, voir annexe).

En général, les lignes de courant traversent plusieurs horizons distincts. Dans cette configuration, la résistivité est influencée par les résistivités spécifiques des différents types de terrains traversés ainsi que par leurs épaisseurs respectives. Les résistivités mesurées sont qualifiées de résistivités apparentes, et à partir de ces valeurs, nous cherchons à déduire les résistivités véritables et les épaisseurs caractérisant chaque horizon distinct (**Fig. N° 07**, voir annexe).

#### IV. Sondage électrique

Lors de la réalisation d'un sondage électrique vertical (SEV), une série de mesures de la résistivité apparente est effectuée à partir d'un point fixe en augmentant graduellement les dimensions du dispositif de mesure, tout en maintenant constant le centre et la direction. En supposant que la résistivité spécifique et l'épaisseur du terrain superficiel (où se situent généralement les électrodes) ne varient pas significativement d'une mesure à l'autre, les variations de la résistivité apparente sont principalement attribuables aux changements

verticaux de la résistivité spécifique. Ainsi, la profondeur d'investigation augmente en fonction de l'espacement entre les électrodes A et B.

Lors de la réalisation de sondages avec un dispositif Schlumberger, le défi principal réside dans le maintien d'une différence de potentiel  $\Delta V$  suffisamment élevée pour être mesurée. À mesure que les points A et B s'éloignent,  $\Delta V$  tend à diminuer. Pour surmonter ce problème, plusieurs solutions sont envisageables, notamment :

- ✓ Augmenter la tension à la source pour accroître l'intensité du courant I et la différence de potentiel  $\Delta V$ .
- ✓ Multiplier le nombre d'électrodes en A et B.
- ✓ Arroser les électrodes A et B, au besoin avec de l'eau salée, afin d'accroître l'intensité I et la différence de potentiel  $\Delta V$ .
- ✓ Augmenter la distance entre les électrodes M et N pour accroître la différence de potentiel  $\Delta V$  mesurée.

Les données de mesure sont représentées graphiquement en plaçant les valeurs des résistivités apparentes correspondantes (exprimées en ohms-m) sur l'axe des ordonnées, tandis que les longueurs ( $AB/2$  en mètres) sont positionnées sur l'axe des abscisses, en utilisant une échelle bi-logarithmique. Ce tracé donne lieu à la courbe du sondage électrique vertical (SEV), illustrant de manière spécifique la succession de couches de résistivité.

## V. Interprétation des sondages électriques

L'interprétation des sondages électriques verticaux vise à déterminer les résistivités réelles ( $\rho$ ) et les épaisseurs ( $h$ ) des différentes couches constituant la section géologique.

Les géophysiciens prospecteurs ont développé diverses méthodes d'interprétation des SEV, parmi lesquelles on peut mentionner :

## VI. Représentation des résultats

Les résultats des sondages électriques verticaux réalisés sur le terrain sont présentés sous forme de graphiques où la demi-longueur AB (soit  $OA = AB/2$ ) est représentée à une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses, tandis que la valeur de la résistivité apparente correspondante est représentée sur l'axe des ordonnées. Ces courbes bi-logarithmiques sont sujettes à une analyse approfondie.

À partir des données recueillies sur le terrain, plusieurs documents peuvent être élaborés.

### VI.1. Carte de résistivité apparente pour différents AB

Pour obtenir une perspective qualitative globale de l'étude, nous pouvons choisir une distance AB spécifique et attribuer à chaque point de mesure électrique la résistivité apparente

correspondante. Ensuite, nous pourrions construire une carte d'iso-résistivité à une échelle adaptée pour la distance d'émission AB choisie, en utilisant une interpolation linéaire entre les valeurs.

### **VI.2. Carte du toit du substratum**

La cartographie du toit du substratum est réalisée en ajustant à une échelle appropriée la valeur de la profondeur du toit pour chaque point de sondage, suivi de l'application d'une interpolation linéaire pour obtenir la représentation cartographique.

### **VI.3. Coupes géoélectriques**

Les coupes géoélectriques sont élaborées en plaçant les stations sur l'axe des abscisses à l'échelle de l'étude, tandis que les épaisseurs ( $h_i$ ) des formations géologiques identifiées pour chaque sondage sont représentées sur l'axe des ordonnées à une échelle linéaire appropriée. Les valeurs de résistivité vraie de chaque horizon sont également indiquées. Ensuite, une tentative de corrélation entre les différentes formations est entreprise en se basant sur leurs résistivités. Ce travail implique également l'utilisation des coupes verticales ( $\rho_a$ ) et des profils de résistivité pour différentes longueurs d'émission AB.

## **VII. Traitement des données**

La méthode de résistivité électrique employée dans cette étude est une approche traditionnelle couramment utilisée pour la détection des aquifères (**Guellala. R, 2016**). Notre tâche consiste à interpréter les données brutes des sondages électriques verticaux (SEV) afin de générer des coupes géoélectriques, offrant ainsi des informations sur l'étendue et la configuration des calcaires néritiques. Pour atteindre cet objectif, nous avons exploité les données d'une étude géophysique basée sur la méthode électrique, ainsi que les informations géologiques disponibles telles que les cartes, les logs stratigraphiques des forages dans la région d'étude, et les coupes géologiques du terrain.

Le principe fondamental de la prospection électrique, basé sur la loi d'Ohm, consiste à établir, à partir de mesures effectuées à la surface du sol, des caractéristiques géoélectriques des couches souterraines et à en déduire des informations sur leur composition (**Gilli et al, 2004**). Le sondage électrique représente une méthode d'investigation permettant une évaluation quantitative des variations de la résistivité électrique des formations souterraines en fonction de la profondeur (**Boudouka.A, 2014**).

La méthode de sondage électrique vertical a facilité l'estimation de la résistivité apparente le long de la longueur AB. À cet effet, une fiche de sondage électrique vertical a été complétée en utilisant un dispositif quadripôle de type SHLUMBERGER.

Au cours de cette campagne électrique, 78 sondages électriques verticaux ont été exécutés et interprétés. Le dispositif utilisé présente une profondeur d'investigation variable, couvrant des plages de 100 m à 250 m, de 200 m à 500 m, et de 500 m à 1250 m (AMS. A, 2018).

Les mesures de différence de potentiel  $\Delta V$  ainsi que les mesures de résistivité apparente ont été effectuées à l'aide d'un résistivimètre de type Iris Instruments. L'injection du courant dans le sol a été réalisée au moyen d'un convertisseur interne de 600 W AC/CC alimenté par une batterie externe de 12 volts (ENAGEO 1993-1994 et Hydrosol 2014). Des sondages étalons ont été entrepris pour établir une échelle de résistivité et sont répartis le long de coupes géoélectriques orientées Nord-Ouest/Sud-Est et Nord-Est/Sud-Ouest.

### VIII. Exécutions des mesures

Dans la zone d'étude, les levés géophysiques par sondage électrique vertical ont inclus l'exécution de 78 SEV (voir tableau 37 et Fig.32), répartis le long de 7 profils désignés F, G, H, I, J, K, L. Ces sondages ont été disposés selon des profils s'étendant dans la direction Nord-Ouest /Sud-Est. Les profils sont espacés de 1,5 km, avec un pas de mesure variant de 300 m à 1000 m. Les SEV ont été réalisés en utilisant des lignes d'émission AB de 1000 m à 5000 m.

**Tableau 37** : Coordonnées topographiques de quelques sondages électriques verticaux dans la région d'Héliopolis, wilaya de Guelma.

N°SEV	Longitude (X)	Latitude (Y)	Altitude (Z)
SEV1	361553,245	4043443,722	289
SEV2	361511,951	4043567,68	295
SEV3	361478,278	4043701,379	300
SEV4	361401,457	4043766,112	303
SEV10	361440,069	4043351,838	289
SEV11	361317,853	4043254,86	288
SEV12	360564,813	4043209,372	324
SEV34	360085,361	4044033,359	352
SEV37	360479,649	4044248,896	375
SEV38	360605,755	4044325,146	361
SEV77	363446,9962	4044705,147	355
SEV78	363592,4296	4044475,206	375

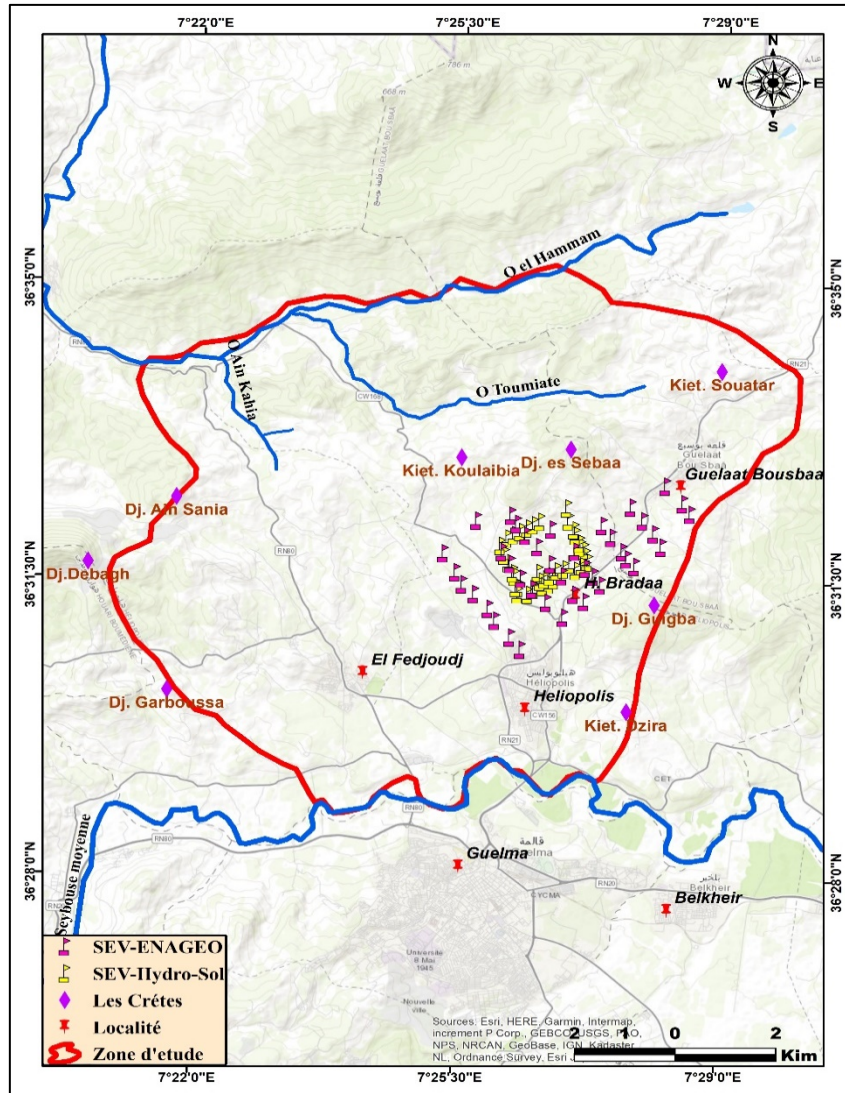


Fig. N°32 : Carte d'implantation des SEV (E.N.A.G.E.O et HYDROSOL).

## IX. Etalonnage des données

### IX.1. Etalonnage des sondages électriques

Des sondages électriques étalons ont été conduits sur les emplacements des forages mécaniques existants sur le terrain (Brioua, A, 2011). En corrélant simplement la coupe lithologique fournie par le forage avec la courbe du sondage électrique vertical réalisé à proximité, il est possible d'attribuer aisément les couches électriques détectées par le SEV aux couches géologiques du forage mécanique.

Les valeurs moyennes de résistivité des formations géologiques peuvent être déduites en réalisant plusieurs de ces sondages standards, conformément à la méthode décrite par (Brioua, A, 2011). Quelques exemples de ces sondages étalons sont présentés ci-dessous :

### IX.1.1. Interprétation des sondages électriques verticaux

Un sondage électrique étalon d'une longueur de ligne AB égale à 1000 mètres a été effectué à proximité d'un forage d'une profondeur de 90 mètres dans la région de Hammam Bradaa, dont les coordonnées sont les suivantes : X = 36145.00 m, Y = 4042889.00 m.

#### ➤ Sondage étalon du forage carrière HB1

La lithologie du terrain d'après le log du forage (DHW Guelma 2020) révèle les formations suivantes :

- ✚ 0.00 m – 14.00 m : terre rouge végétale à dominante marneuse et plastique à la base avec passage de niveau calcaires gris clairs ;
- ✚ 14.00 m – 28.00 m : calcaires blancs très résistants et abrasifs de teinte gris foncé ;
- ✚ 28.00 m – 35.00 m : zone d'alternance marnes grises et de calcaire ;
- ✚ 35.00 m – 73.00 m : calcaires noirs très dur, très fissuré avec perte totale de boue à 40 m.

Les données physiques recueillies sur le terrain sont représentées à l'aide du logiciel IPI2WIN sous la forme de courbes bi logarithmiques qui reflètent la variation de la résistivité apparente ( $\rho_a$ ) en fonction de la moitié de la longueur AB (Mahmoud. Y, 2018).

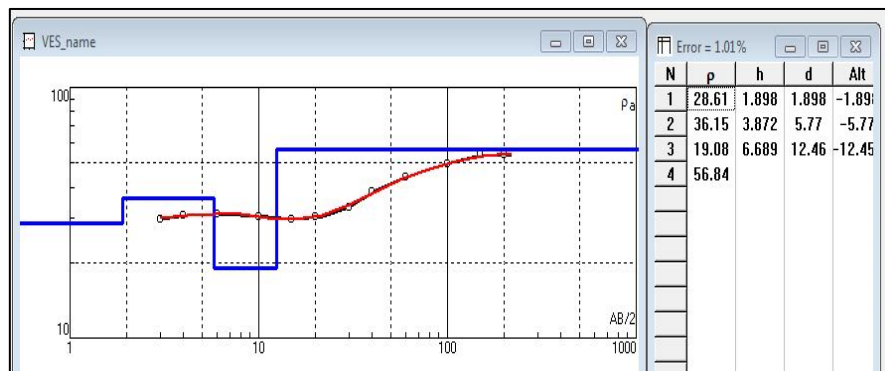


Fig. N°33 : Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV HB1.

L'interprétation du sondage électrique HB1 montre :

- ✚ Une couche d'épaisseur 2m et de résistivité de 28.00  $\Omega$ .m que l'ont associé à des argiles ;
- ✚ Une deuxième couche d'épaisseur 4 m et de résistivité de 36.00  $\Omega$ .m que l'ont associé à des marnes ;
- ✚ Une troisième couche d'épaisseur 10 m et de résistivité de 19.00  $\Omega$ .m que l'ont associé à des argiles marneuses ;
- ✚ La coupe se termine par un substratum résistant de 56.00  $\Omega$ .m que l'ont fait correspondre à des calcaires fissurés.

Il est important de noter que la corrélation était pratiquement parfaite avec les données de forage de la carrière HB1.

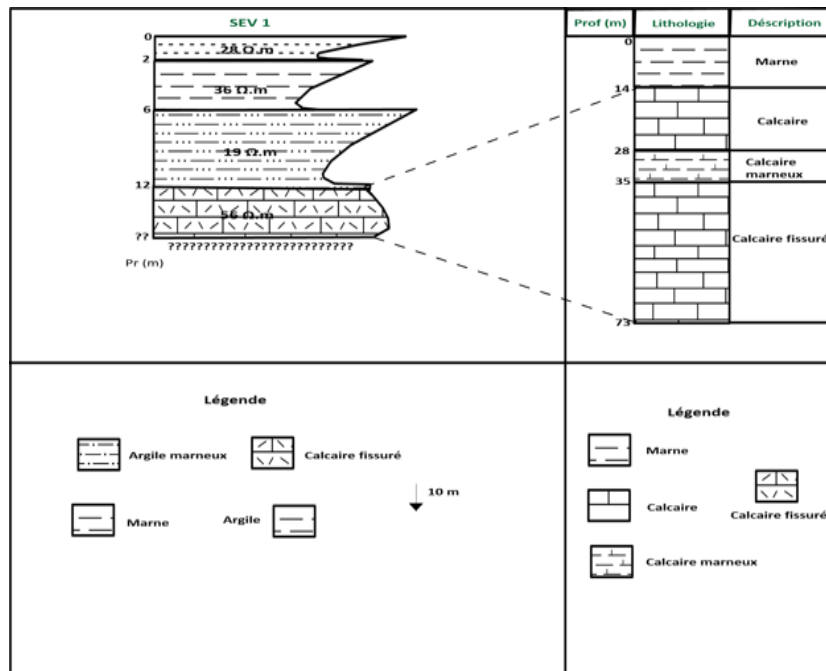


Fig. N°34 : Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage HB1.

➤ **Sondage étalon du forage Bouzitoune**

Un sondage électrique étalon en ligne AB= 2000m, a été réalisé à côté d'un forage d'une profondeur de 240 m dans la région de Bouziotune avec les coordonnées suivantes : X =359725.00 m, Y = 4041969.00m.

L'examen de la lithologie du terrain (El Kanti.S, 2013) d'après la fiche du log de forage (DHW Guelma 2020) se résume comme suit :

- ✚ 0.00 m – 100.00 m : marnes grises ;
- ✚ 100.00 m –132.00 m : calcaires compacts, gris clairs résistants ;
- ✚ 132.00 m – 240.00 m : calcaire gris friable facilement broyable à l'outil : zone fissurée présence de pertes totales de boue benthonique.

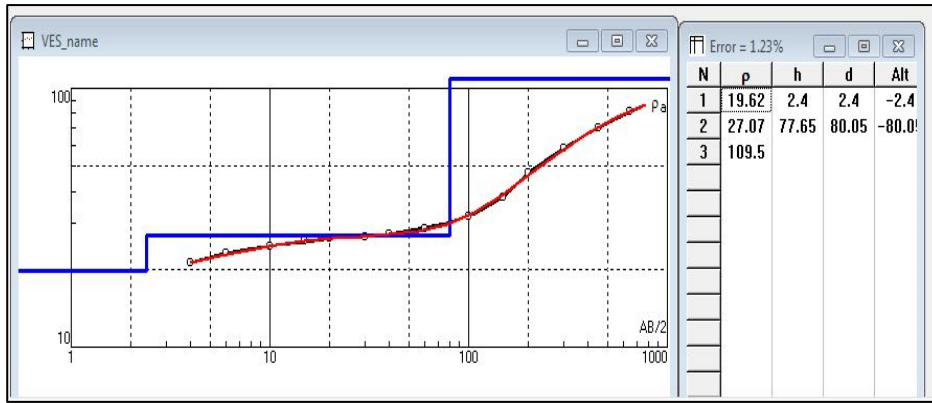


Fig. N°35 : Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV Bouzitoune.

L'interprétation du sondage électrique étalon du forage Bouzitoune met en évidence deux couches suivantes :

- ✚ Une première couche conductrice de résistivité moyenne de 23, 34  $\Omega.m$  et d'épaisseur de 80.00 m ;
- ✚ Une deuxième couche résistante de résistivité de 109.00  $\Omega.m$ .

Ces deux formations correspondent respectivement aux marnes grises et aux calcaires fissurés décrits sur le log du forage Bouzitoune(ENAGEO 1993- 1994).

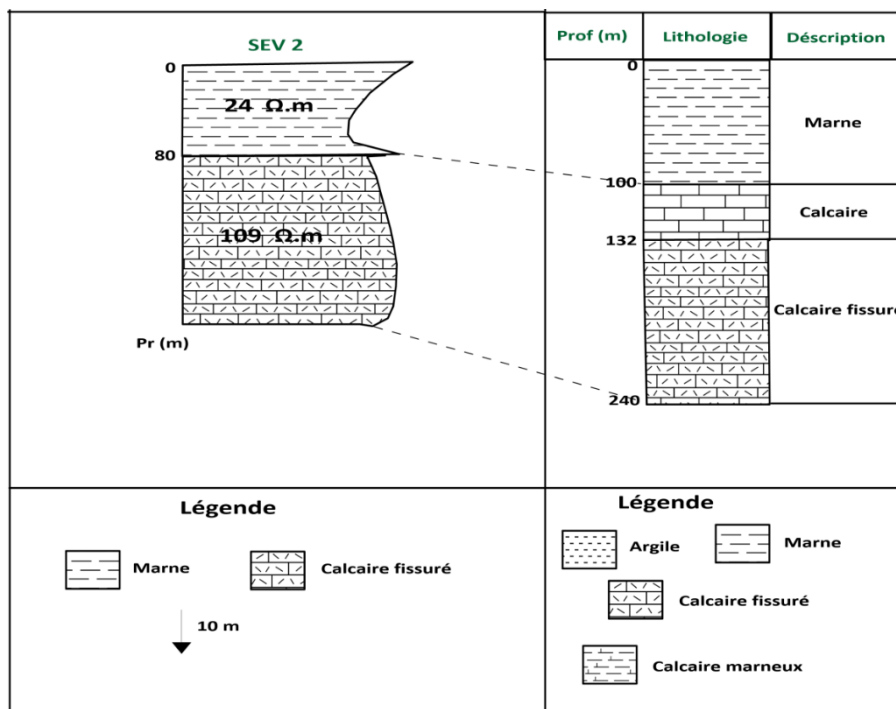


Fig. N°36 : Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage Bouzitoune.

### ➤ Sondage étalon du forage Maachou HB3

Un SE étalon en ligne AB= 5000m, a été réalisé à côté d'un forage d'une profondeur de 410 m dans la région de Hammam Bradaa aux coordonnées suivantes : X =359367.00 m ,Y= 4042801.00 m.

La fiche technique du forage (DHW Guelma 2020) présente les formations suivantes :

- ✚ 0.00 m – 10.00 m : terre végétale, argile noire ;
- ✚ 10.00 m – 200.00 m : marnes noires feuilletées ;
- ✚ 200.00 m – 270.00 m : marnes grises plastiques avec des débris de calcaire (5%) ;
- ✚ 270.00 m – 360.00 m : marnes grises avec passage de niveau calcaires gris clairs et présence de filaments de calcite blanc ;
- ✚ 360.00 m – 400 m : calcaires noirs bleutés très résistants et abrasifs avec pertes totales de boue à 399.00 m.

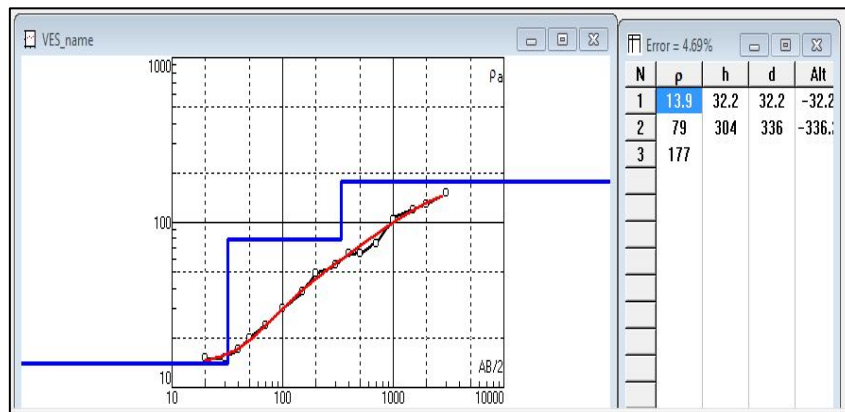


Fig. N°37 : Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV HB3.

L'interprétation du sondage électrique HB3 montre :

- ✚ Une première couche superficielle d'épaisseur 32.00 m et de résistivité 13.90  $\Omega$ .m que l'ont associé à des argiles ;
- ✚ Une deuxième couche d'épaisseur 304.00 m et de résistivité 79.00  $\Omega$ .m associer à des formations des calcaires avec des passages marneux.
- ✚ La coupe se termine par une formation résistante de 177.00  $\Omega$ .m que l'on fait correspondre à des calcaires fissurés.

Il est à signaler que la corrélation avec les données du forage n'a pas été parfaite surtout au niveau de la deuxième couche ou le SEV indique une épaisseur de marnes de 304 m, valeur largement inférieure à celle donnée par le log de forage qui est 350 m (Hydrosol, 2014).

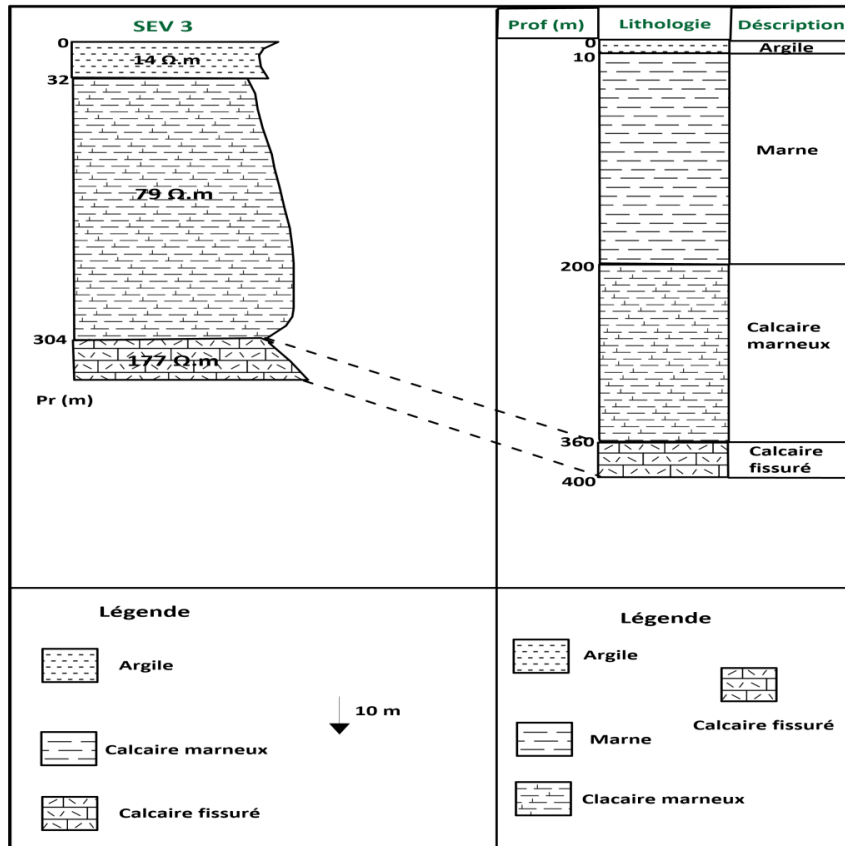


Fig. N°38 : Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage HB3.

➤ **Sondage étalon du forage Piscine HB2**

Un SE étalon en ligne AB= 1000m, a été réalisé à côté d'un forage d'une profondeur de 50 m dans la région de Hammam Bradaa aux coordonnées suivantes : X = 360639,74 m, Y = 360639,74 m.

Les formations géologiques qui recoupent ce forage se résument comme suit :

- ✚ 0.00 m – 10.00 m : terre végétale, argile noire plastiques ;
- ✚ 10.00 m – 30.00 m : calcaire gris clair, durs et compact riche en microfaune ;
- ✚ 30.00 m – 38.50 m : calcaires noirs bleuté très résistant à cassure rugueuse et fissuré ;
- ✚ 38.5.00 m – 50.00 m : zone caverneux (absence de cuttings perte totale de la boue).

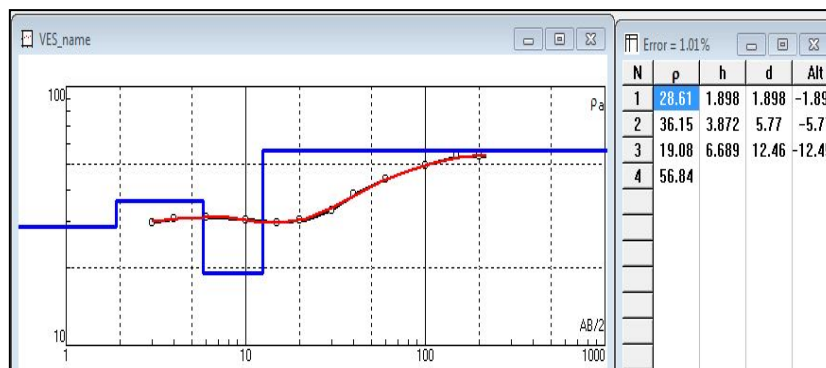


Fig. N°39 : Modèle de courbe géoélectriques pour le SEV HB2.

L'interprétation du sondage électrique indique :

- ✚ Une formation conductrice d'argile de résistivité allant de 12.00  $\Omega.m$  à 19.00  $\Omega.m$  et d'épaisseur de 11.00 m ;
- ✚ Une couche épaisse d'épaisseur 69.00 m avec une résistivité de 46.00  $\Omega.m$  sous la formation conductrice, associés à des calcaires à cassure rugueuse et fissurés.

Un substratum peu résistant de résistivité non atteint par le forage. La description géologique indique la présence de zone caverneuse d'où l'absence de cuttings.

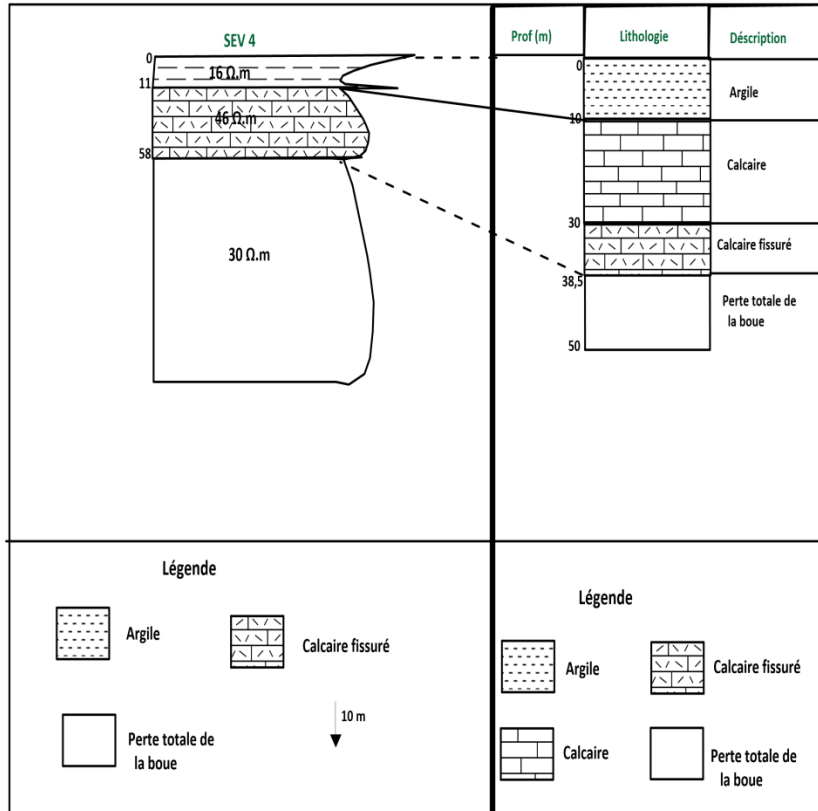


Fig. N°40 Corrélation d'un sondage étalon avec le log du forage HB2.

L'examen de ces sondages électriques étalons nous a permis d'élaborer une échelle de résistivité présentée (Brioua.A, 2011) dans le **tableau 38** suivant :

Formations	Résistivité ( $\Omega.m$ )
Marne grises, Argile marneuse	19-36
Calcaire résistant	190
Calcaire fissuré	46-56
Argile	13-16

D'après l'échelle de résistivité, on peut dire que les calcaires compacts se distinguent par leurs résistivités élevées supérieures à 190  $\Omega.m$  par contre les calcaires fissurés présentent des résistivités au voisinage de 56  $\Omega.m$ (Hydrosol, 2014).

Les contrastes de résistivités sont suffisants pour pouvoir différencier les marnes de 19-36  $\Omega\text{m}$  à des argiles 13-16  $\Omega\text{m}$ .

### IX.2. Coupes géo électriques

Les coupes géoélectriques permettant de détecter la géométrie des horizons électriques des différentes résistivités et suivre l'extension horizontale (Guellala.R, 2016), nous avons basés sur 2 coupes géoélectriques et ce en utilisant les résultats d'interprétation des SEV.

#### ➤ Coupe géoélectrique n° 01 dans la région de Hammam Bradaa

La première coupe géoélectriques réalisée le long du profil SEV n°1 - SEV n°24 à Hammam Bradaa est orientée Nord-Est - Sud-Ouest. Cette coupe révèle un compartiment calcaire étendu, traversé par plusieurs failles, et surplombé par une couche marneuse significative (Hydrosol, 2014).

Au Sud-Ouest, dans la zone des SEV 16, 23 et 24, la présence des calcaires en surface est soudainement interrompue, atteignant des profondeurs de 400 à 500 mètres aux SEV 14 et 15. En revanche, aux SEV 1, 10, 11, 12 et 13, ces calcaires varient entre 200 et 400 mètres de profondeur.

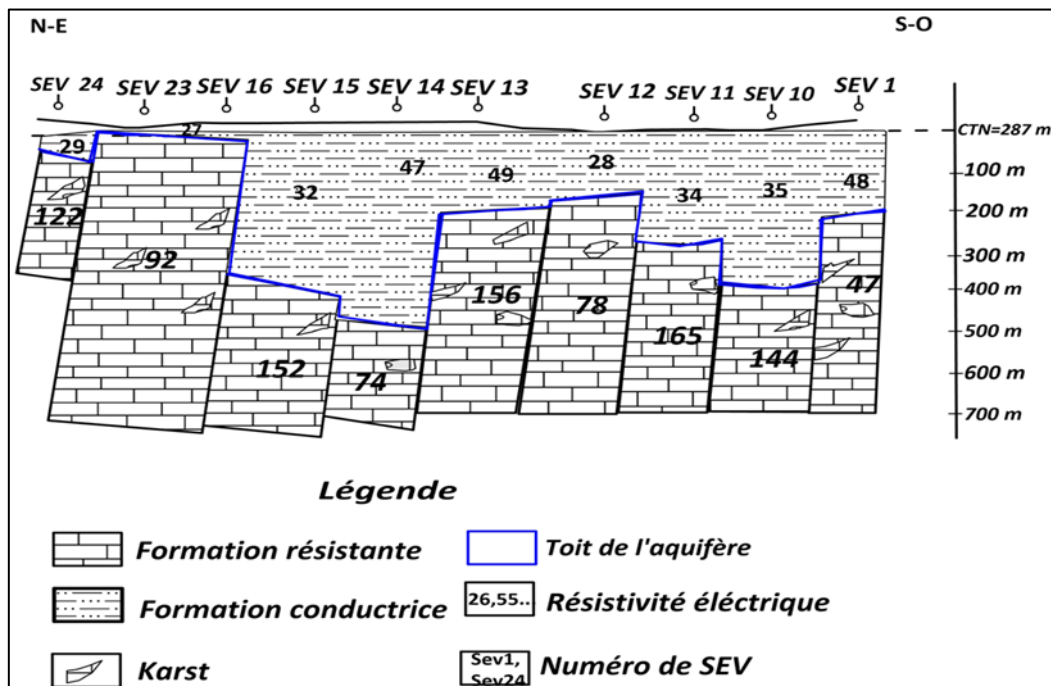


Fig. N°41 : Coupe géoélectriques n°01 (Hydrosol, 2014).

#### ➤ Coupe géoélectrique n° 02 au niveau de Hammam Bradaa

La deuxième coupe géoélectriques, tracée le long du profil SEV1-SEV9 et orientée Nord-Ouest - Sud-Est, révèle un compartiment calcaire étendu affecté par une série de failles et surmonté par une couche marneuse importante, comme documenté dans l'étude Hydrosol de 2014. On observe que les calcaires s'enfoncent progressivement du Sud-Est vers le Nord-Ouest,

atteignant des profondeurs dépassant 500 mètres au niveau des SEV 7, 8 et 9. On peut conclure que ces coupes géoélectriques montrent :

- ➔ Une très grande extension latérale des calcaires du néritique constantinois.
- ➔ Une épaisseur des calcaires très importante qui peut aller jusqu'à 800 m.
- ➔ Une structure affectée par une série de failles faisant apparaître les calcaires sous forme de Horst et de Graben.
- ➔ Une profondeur variable du toit de l'aquifère.
- ➔ Une couche marneuse très épaisse notamment au Nord-Ouest qui repose sur les calcaires.

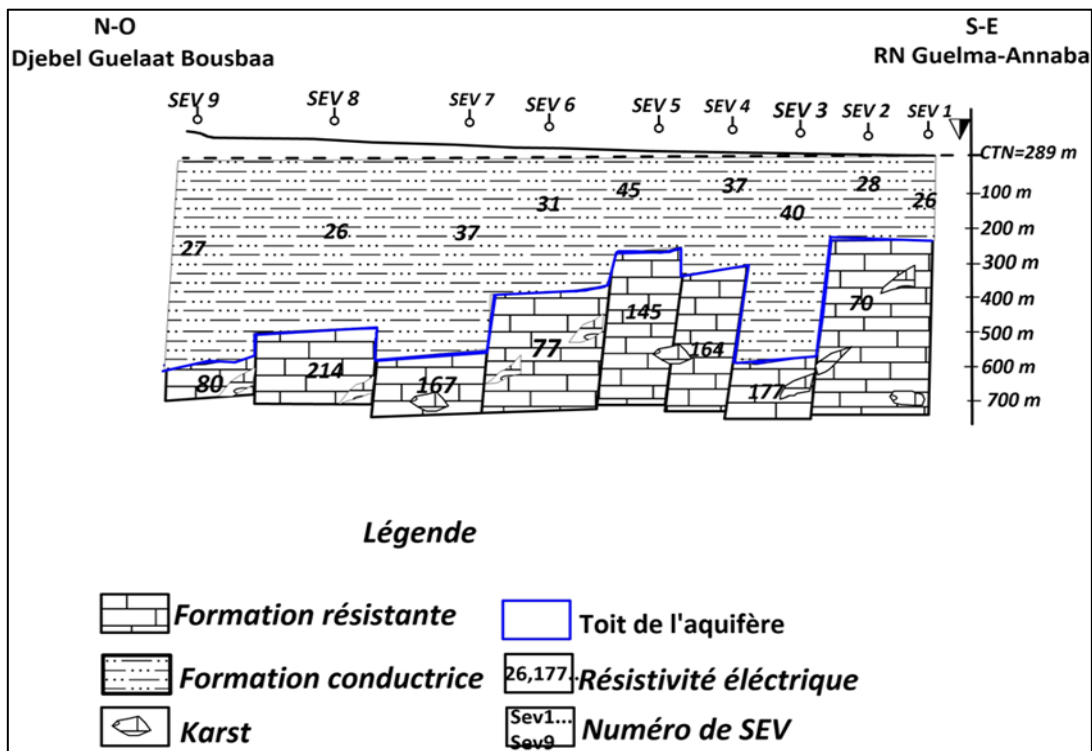


Fig. N°42 : Coupe géoélectrique n°2 (Hydrosol, 2014).

### IX.3. Cartes de résistivités

En se basant sur les lignes d'injection AB mis en œuvre lors de la campagne géophysique (J. O, 2020), plusieurs cartes de résistivités ont été générées, à savoir AB 400 m, AB 1000 m et AB 2500 m, correspondant respectivement à des profondeurs d'investigation moyennes de 40 m, 100 m et 250 m (ENAGEO 1993-1994 et Hydrosol, 2014).

La carte d'iso-résistivité pour **AB=400 m**, correspondant à une profondeur d'investigation entre 40 m et 100 m (c'est-à-dire AB/10 et AB/4), présente une zone de résistivités apparentes égales ou supérieures à 70  $\Omega.m$  dans les régions de Héliopolis et Hammam Bradaa, au Sud et au Sud-Est. Cette tranche de résistivité correspond aux calcaires fissurés du Crétacé. En revanche, les

valeurs les plus faibles, avoisinant les 22  $\Omega.m$ , se trouvent au niveau de Guelaat Bousbaa, correspondant aux formations du Mio-Plio-Quaternaire (argile et marne) (Fig.43.a).

La carte pour la ligne **AB=1000 m** (Fig.43.b) montre une répartition similaire des plages de résistivité à celle de AB=400 m. La partie Nord-Est du terrain présente des calcaires néritiques du Crétacé avec une résistivité moyenne d'environ 60  $\Omega.m$ . Le reste du terrain est occupé par des formations du Mio-Plio-Quaternaire, avec une résistivité d'environ 20  $\Omega.m$ , pour les profondeurs d'investigation allant de 100 m à 250 m.

Quant à la carte pour **AB=2500 m** (Fig.43.c), elle indique des valeurs de résistivité apparente d'environ 155  $\Omega.m$ , caractérisant les formations de calcaires fissurés du Crétacé dans la partie Sud et à l'Est. Les valeurs les plus faibles, autour de 25  $\Omega.m$ , correspondent aux formations du Mio-Plio-Quaternaire (argile et marne) avec une profondeur d'investigation allant de 250 m à 625 m.

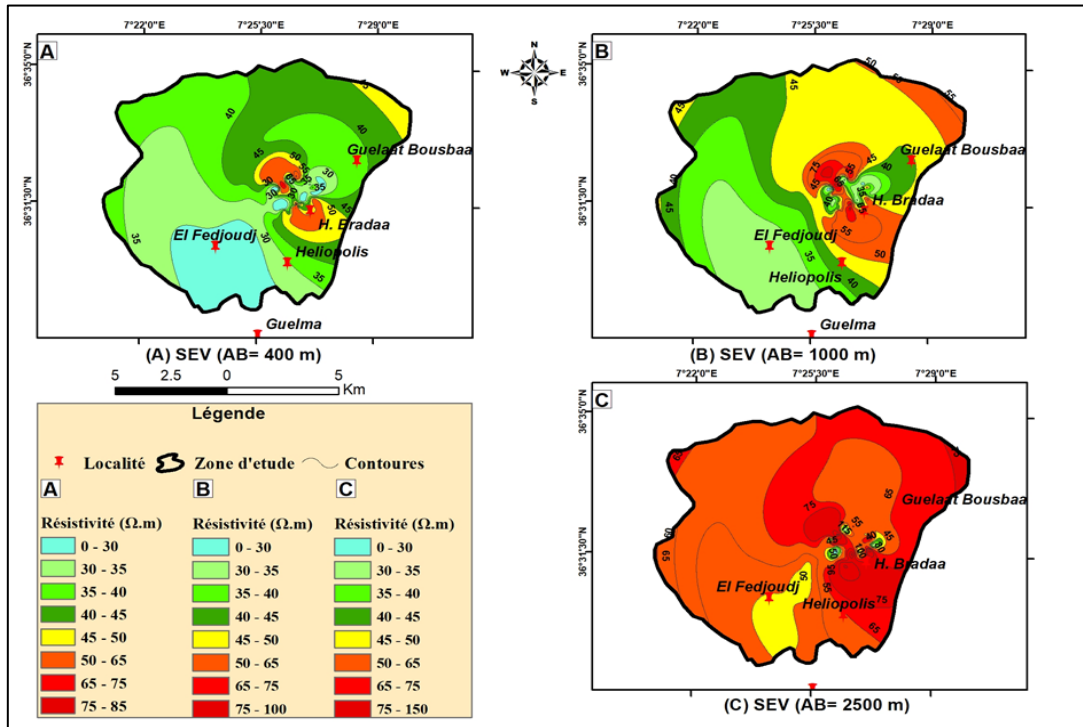


Fig. N°43 : Carte de résistivité selon différentes longueurs de AB dans la région de Héliopolis.

#### IX.4. Carte de la profondeur du toit de l'aquifère

L'intégration des données géophysiques, des logs de forages et de la carte géologique de Guelma (J. O, 2020) a permis l'établissement d'une carte de la profondeur du toit des calcaires du Crétacé.

L'analyse de cette carte révèle la présence des calcaires néritiques dans les régions de Héliopolis et El Fedjoudj, situées dans la wilaya de Guelma. Selon cette représentation de la profondeur

du toit, ces calcaires sont visibles en affleurement dans la partie Sud-Ouest de la zone d'étude, plongeant progressivement vers l'Est et le Nord-Est jusqu'à atteindre une profondeur de 500 m au col d'El Fedjoudj, sous une couverture significative des dépôts Mio-Plio-Quaternaires.

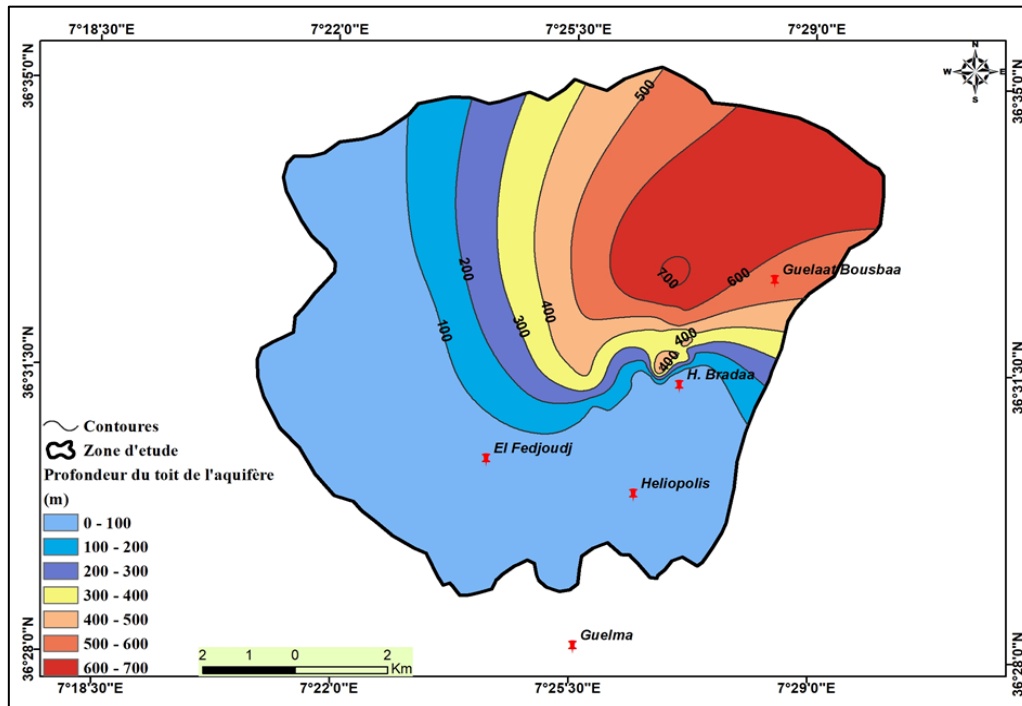


Fig. N°44 : Carte de la profondeur du toit de l'aquifère des calcaires néritiques de Hammam Bradaa - El Fedjoudj.

### IX.5. Carte de la résistance transversale

Afin d'évaluer le potentiel de l'aquifère profond (Z.T,2020), une carte de la résistance transversale a été élaborée, illustrant la variabilité de la résistivité de la couche aquifère en fonction de son épaisseur (J. O, 2020). À partir de cette carte, une résistance transversale significativement élevée (22000  $\Omega.m$ ) est observée dans la partie Est, indiquant des caractéristiques hydrogéologiques favorables. En revanche, des valeurs de résistance transversale plus faibles se manifestent dans la région Sud-Ouest, avec des valeurs moyennes de l'ordre de (<11000  $\Omega.m$ ), traduisant la présence d'une formation aux caractéristiques hydrogéologiques mauvaises.

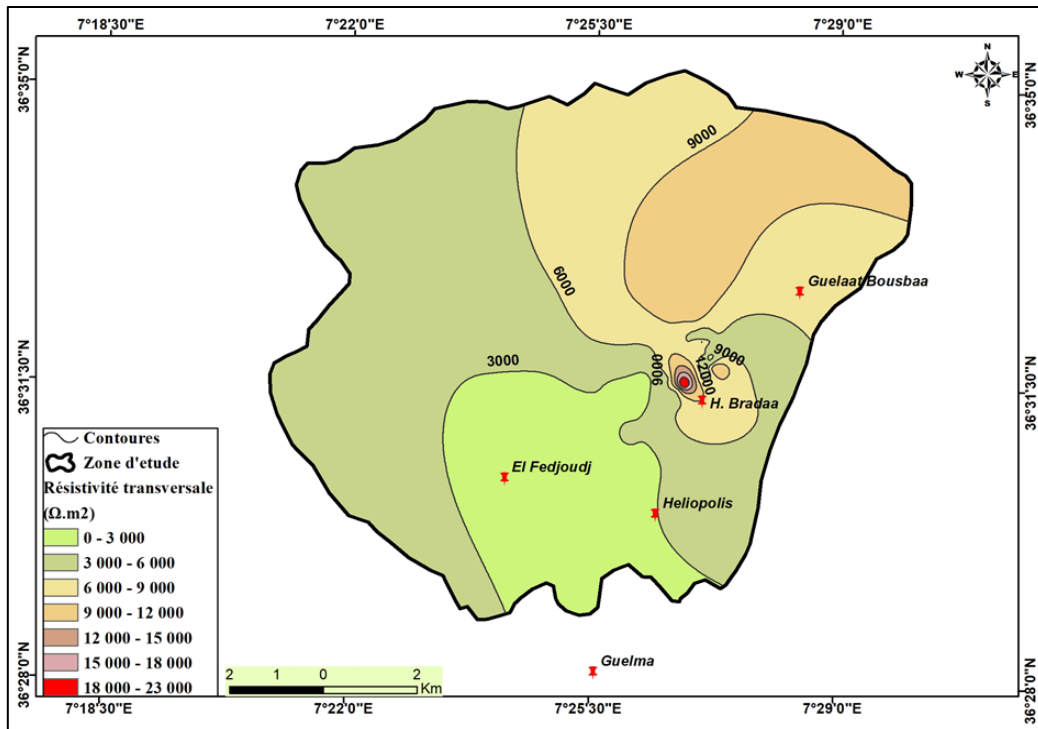


Fig. N°45 : Carte de la résistance transversale.

### IX.6. Type de courbes de sondage électrique vertical (SEV) de la zone d'étude

La figure 46 montre quatre types de courbes observés dans la zone d'étude. Les courbes F2 et G3 reflètent un socle de résistivité élevée par la montée des résistivités apparentes à de grands espacements d'électrodes. La résistivité apparente élevée du socle de ces courbes est en corrélation avec le calcaire du domaine néritique constantinois. La courbe F7 a un espacement court ( $AB = 400$  m). Il indique une chute de résistivité apparente à de grands espacements d'électrodes qui correspond à des marnes. La courbe L1 indique des valeurs de résistivité apparente constantes (30 à 40  $\Omega.m$ ) sur tous les espacements. Probablement, ces résistivités apparentes sont en corrélation avec les formations marno-calcaires.

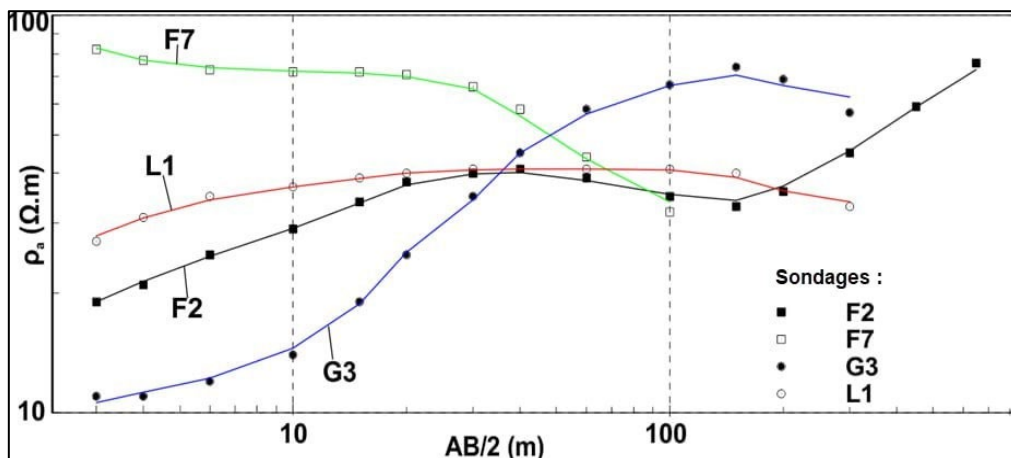


Fig. N°46 : Type de courbes du sondage électrique vertical de la zone d'étude.

### IX.7. Section de résistivité du modèle lisse 1D le long de la ligne G

Une section géoélectriques construite à partir de l'interprétation des courbes de sondage le long de la ligne G est présentée à la figure 47. L'interpolation des sondages est basée sur l'interprétation 1D du modèle lisse. La section géoélectriques est composée de 7 sondages. Les résistivités supérieures à 50  $\Omega.m$  est en corrélation avec les calcaires fissurés en profondeur comme indiqué par le forage HB1. Résistivités inférieures à 50  $\Omega.m$  correspondent aux calcaires marneux et aux marnes. De cette section, nous voyons que les calcaires sont proches de la surface entre les sondages G3 et G4. Un forage d'exploitation situé entre ces deux sondages croisera les calcaires aquifères à faible profondeur.

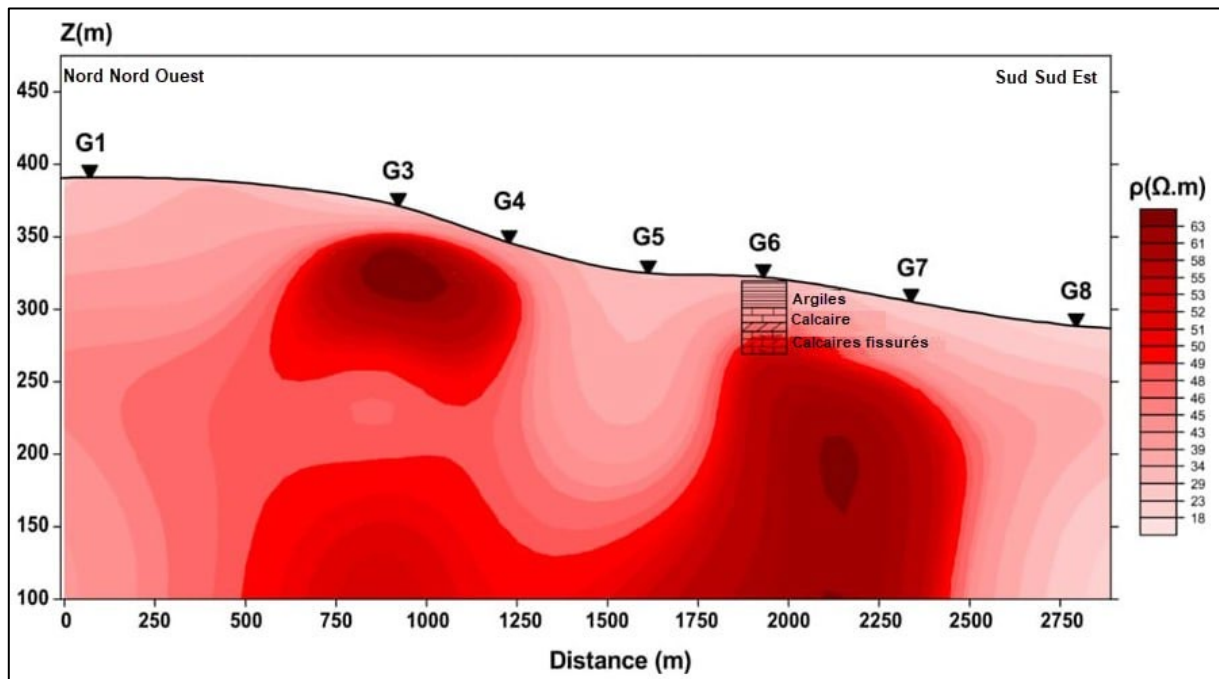


Fig. N°47 : Section de résistivité du modèle lisse 1D le long de la ligne G.

### IX.8. Esquisse tectonique de la zone d'étude

L'esquisse tectonique de la région d'étude a été établie en utilisant les données issues de l'analyse de toutes les coupes géoélectriques, en veillant à respecter l'emplacement des failles identifiées sur ces coupes (Ouafi.Z, 2015). Cette esquisse met en évidence un réseau de failles orientées préférentiellement du Sud-Ouest au Nord-Est. Cette orientation correspond principalement aux failles déjà identifiées par l'étude géophysiques. Il semble probable que ces failles relient les accidents transversaux les plus importants dans les dépôts alluviaux. Cependant, il est à noter la présence de petites failles dans la partie Nord-Ouest de la zone d'étude, qui présentent la même orientation Nord-Est/Sud-Ouest (Brioua.A, 2011, Mahieddine.F, 2016). L'existence de ces failles participe à la complexité du fonctionnement des systèmes aquifères dans la région d'étude (ENAGEO 1993-1994).

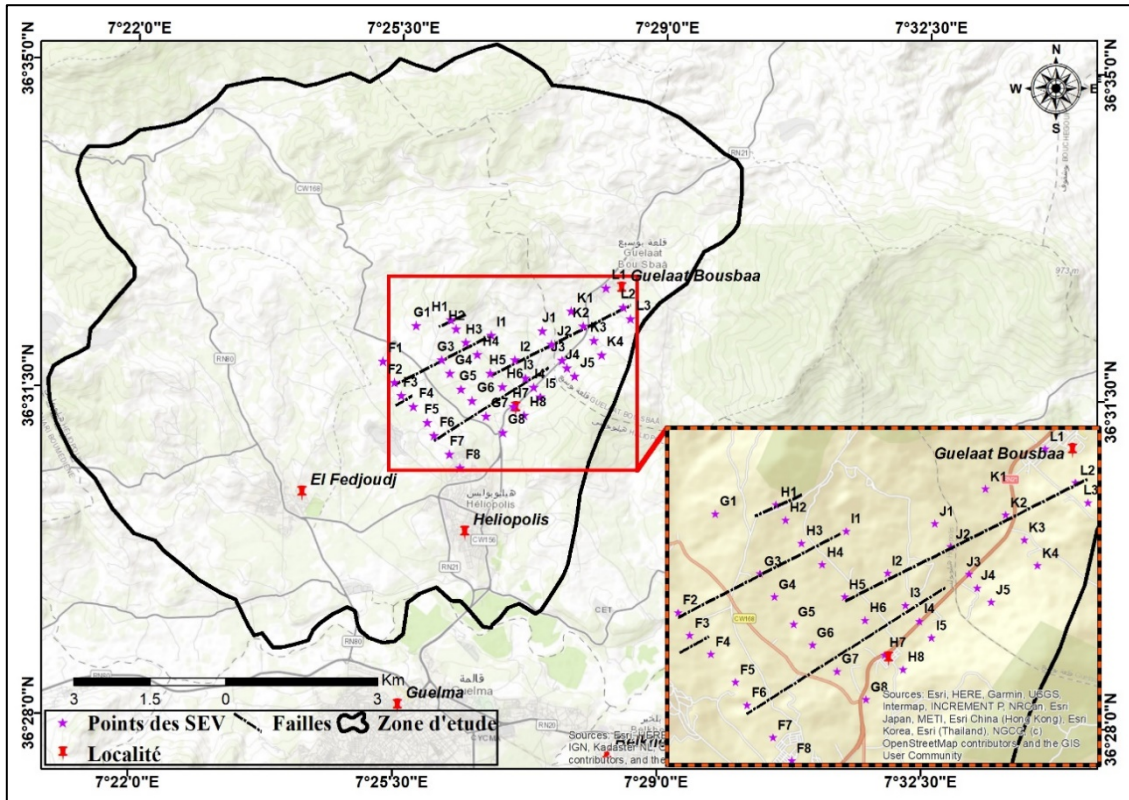


Fig. N°48 : Esquisse tectonique de la zone d'étude d'après les données des SEV (E.N.A.G.E.O, 1993-1994).

### B/Méthode et Modélisation Gravimétrique

L'étude gravimétrique dans la région de Guelma a été réalisée par le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG, 2004). Elle a pour objectif de compléter les informations obtenues par la méthode électrique et d'essayer de comparer leurs résultats, notamment en ce qui concerne la géométrie de la rive nord du bassin d'effondrement de la plaine de Guelma.

#### X. Rappels théoriques

La méthode gravimétrique vise à caractériser la composition géologique du sol en utilisant les variations du champ gravitationnel terrestre (Brahmia.A,2009). Des anomalies géologiques telles que les anticlinaux, les synclinaux, les failles ou les dépôts quaternaires impliquant des roches de densités différentes peuvent être identifiées grâce à l'analyse du champ gravitationnel terrestre ( Brioua.A,2012 et Mahieddine.F,2016).

Dans l'hypothèse d'une Terre isolée dans l'espace, parfaitement sphérique, immobile et composée de couches latéralement homogènes, la valeur de  $g$  serait uniforme partout (CRAAG, 2004).

$$g = \frac{G.M}{R^2} \quad (57)$$

M : Masse de la terre  $5,977.10^{24}$  Kg.

R : Rayon de la terre 6370 Km.

g : Accélération de la pesanteur =  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Cependant, la réalité est tout autre, car la pesanteur présente des variations d'un point à un autre. Ces variations peuvent être attribuées à différentes causes, que l'on peut énumérer.

- ✓ l'altitude de la station de mesures ;
- ✓ la forme du géoïde ;
- ✓ la topographie ou les irrégularités de la surface du sol au voisinage du point de mesure ;
- ✓ la position du point de mesure par rapport à la Lune et au Soleil ;
- ✓ les hétérogénéités du sous-sol.

Les deux premières variations sont d'origine géodésique et dépendent de la position de la station de mesure sur la surface terrestre. La troisième est influencée par le relief, en supposant un sous-sol de densité constante choisie de manière arbitraire. La quatrième fluctuation est liée à la position de la Lune et du Soleil par rapport à la Terre au moment de la mesure. Enfin, la dernière catégorie regroupe les variations de la pesanteur d'origine géologique ou tectonique (Brioua.A, 2011).

Les quatre premières sources sont qualifiées de non géologiques, tandis que la cinquième est dénommée géologique, revêtant ainsi une importance particulière en géophysique appliquée (Brahmia.A, 2009)

Clarifions tout d'abord la signification que nous attribuons au terme "anomalies". Pour mieux comprendre son sens, imaginons tout d'abord que les couches superficielles de la Terre sont composées de terrains homogènes, de densité constante, sur une épaisseur d'au moins quelques centaines de mètres. Dans ces conditions, il est possible de calculer le champ théorique de la pesanteur en tout point de la surface du sol. Cependant, lorsque nous passons à la mesure expérimentale, nous observons que la valeur que nous avons calculée ne correspond pas à celle que nous mesurons. Cette différence est ce que l'on appelle **l'Anomalie de la gravité**.

L'anomalie de Bouguer est définie comme l'écart entre les valeurs effectivement mesurées de la pesanteur (g) et la valeur théorique calculée selon le modèle de Bouguer.

$$\text{Anomalie} = g \text{ mesuré} - g \text{ théorique (calculé)} \quad (58)$$

## X.1. Calcul de l'anomalie gravifique ?

### X.1.1. Calcul de g mesuré

Sur le terrain, les mesures réalisées au moyen d'un gravimètre sont relatives. On commence par effectuer une lecture en un point où la valeur de  $g$  est déjà connue, puis une autre lecture au point où cette valeur doit être déterminée. L'idée est que la différence entre ces deux lectures devrait correspondre à la différence ( $\Delta g$ ) dans l'accélération de la pesanteur entre ces deux points. Cependant, ce n'est pas exactement le cas, car la valeur du champ  $g$  varie non seulement d'un endroit à un autre, mais aussi dans le temps. Deux raisons expliquent cette variation (Brioua.A, 2011).

- ✓ La première variation est d'origine naturelle et résulte de l'influence de la Lune et du Soleil sur le champ gravitationnel.
- ✓ La deuxième variation est d'origine instrumentale et découle du vieillissement du ressort du gravimètre, des légères secousses liées au transport et à la manipulation de l'appareil, ainsi que des fluctuations mineures de température.

Pour obtenir des résultats indépendants des conditions de mesure, des corrections doivent être appliquées, tenant compte :

- ✚ De l'influence luni-solaire ;
- ✚ De l'effet de la hauteur du trépied ;
- ✚ De la dérive instrumentale.

### X.1.2.g modèle

La valeur mesurée de  $g$ , après avoir subi uniquement les corrections liées à la Luni-solaire et aux erreurs instrumentales, ne peut être utilisée pour tirer des conclusions sur la structure du sous-sol. Afin de rendre l'ensemble des mesures homogènes et comparables, il est nécessaire de les ramener à un même niveau.

Cette valeur mesurée et corrigée de  $g$  est ensuite confrontée à une valeur théorique de la pesanteur. Cette dernière est initialement calculée sur l'ellipsoïde, puis elle est ajustée au niveau de la station. A ce stade, elle subit une correction en fonction de l'altitude (correction de l'air libre), de la densité (correction du plateau) et une correction liée au relief.

La disparité habituelle qui en découle est désignée sous le terme d'Anomalie de Bouguer et est formulée de la manière suivante :

$$AB = g_{mes} - g_{th} + \Delta g_{al} - \Delta g_{pl} + \Delta g_{topo} \quad (59)$$

Où :

AB : Anomalie de Bouguer ;

$g_{mes}$  : Valeur de la pesanteur mesurée sur le terrain ;

$g_{th}$  : Valeur théorique de la pesanteur calculée au niveau de l'ellipsoïde de référence ;

$\Delta g_{al}$  : Correction air libre ;

$\Delta g_{pl}$  : Correction plateau ;

$\Delta g_{topo}$  : correction relief.

### X.1.3. Anomalie de Bouguer

La détection des formations géologiques s'effectue en comparant les mesures sur le terrain avec les valeurs du modèle théorique de la pesanteur. L'anomalie de Bouguer est ainsi définie comme l'écart entre les valeurs corrigées de la pesanteur mesurées sur le terrain ( $g_{mes}$ , corrigé) et les valeurs théoriques calculées selon le modèle de Bouguer.

$$AB = g_{mes, corrigé} - g_{mod} \quad (60)$$

## XI. Levé gravimétrique

Les données gravimétriques de cette étude ont été collectées au cours d'une campagne gravimétrique menée par le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG, 2004) au nom de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). La collecte de données a été effectuée à un rythme de 5 points par kilomètre carré, couvrant une superficie totale d'environ 250 kilomètres carrés. Les localités incluses dans cette étude sont Héliopolis, Hammam Bradaa, Guelaat Bousbaa, Nechmaya, Hammam Oulad Ali, Kellermann (El Fedjoudj), et Ain Mrah El Kaftane. L'objectif de cette étude est d'identifier les structures géologiques responsables des anomalies telles que les failles, les contacts, les cavités, etc. De plus, elle vise à reconnaître les formations carbonatées du Néritique et le flysch gréseux Oligocène, susceptibles de présenter un intérêt aquifère.

Les données de l'Anomalie de Bouguer ont été converties numériquement à partir d'une carte, indiquant la position des points de mesure. La correction de la valeur théorique de la gravité a été effectuée en utilisant la formule de 1967, avec une densité de correction de Bouguer fixée à  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Le gravimètre utilisé est un modèle CG3 de la marque SCINTREX.

Pour corriger l'influence du relief, deux techniques ont été mises en œuvre :

- ✚ Une correction de proche station jusqu'à 50 mètres, réalisée à l'aide de la méthode de Hammer (zones B et C) via un programme informatique interne du CRAAG. Les altitudes moyennes des différentes zones B et C de Hammer ont été estimées sur le terrain par les opérateurs à l'aide d'inclinomètres.

- ✚ Pour les zones proches et lointaines, jusqu'à 50 km, la technique des prismes a été employée avec le logiciel Geosoft. Le modèle numérique de terrain (MNT) pour cette correction a été numérisé à partir des cartes topographiques.

### XI.1. Spectre d'énergie radialement moyenné

Le spectre d'énergie s'écrit conventionnellement comme étant le carré du module de la transformé de Fourier du champ gravifique. Les pentes du spectre d'énergie logarithmique sont proportionnelles à la profondeur des sources, en supposant que ces sources sont réparties statistiquement au voisinage d'un niveau horizontal (**Bhattacharyya, 1966 ; Spector and Grant, 1970**). Elle est applicable essentiellement pour l'estimation des profondeurs majeures d'un ensemble de sources. De ce fait, les anomalies dues aux sources superficielles et aux sources profondes peuvent être séparées d'après leurs caractéristiques spectrales, les sources proches de la surface sont caractérisées par un contenu spectral formé des courtes longueurs d'onde et les sources profondes sont caractérisées par les grandes longueurs d'ondes. Ainsi la pseudo profondeur "d" du plan d'approximation est donnée par la relation suivante :

$$d = \frac{\Delta \ln(E)}{4 \cdot \pi \cdot \Delta L} \quad (61)$$

$\Delta \ln(E)$  , est la variation du logarithme de l'énergie dans l'intervalle du nombre d'onde  $\Delta L$

### XI.2. Détection de contours à plusieurs échelles

Les structures géologiques telles que les contacts lithologiques, les failles et les discontinuités crustales génèrent des contrastes marqués (c'est-à-dire, des gradients ou des bords) dans le champ de gravité. Cartographier ces structures à différentes profondeurs est très intéressant pour déduire leur relation avec l'évolution tectonique de la zone d'étude (**Bencharef et al., 2022**).

Pour cela, les contours des anomalies de gravité de la zone d'étude ont été automatiquement détectés et localisés à différentes échelles en utilisant la méthode de détection de contours à plusieurs échelles, également connue sous le nom de Worming.

Une méthode développée par Fractal Graphics (Geoinformatics) et des chercheurs de l'Exploration et de l'Exploitation Minière de la CSIRO (**Hornby et al., 1999; Archibald et al., 1999**).

La technique de détection de contours à plusieurs échelles est une combinaison entre le gradient horizontal et la continuation ascendante en deux étapes. Tout d'abord, les données de gravités ont continuellement ascendantes à des niveaux d'altitude spécifiques, puis à chaque niveau, le gradient horizontal est calculé et les positions de ses maximas sont localisées.

Les "worms" cartographies par la détection de contours aux niveaux peu profonds de continuation ascendante représentent des sources proches de la surface, tandis que les "worms" aux niveaux les plus élevés de continuation ascendants ont corrélés à des sources plus profondes ([Murphy et al., 2006](#); [Austin and Blenkinsop, 2008](#)).

Pour la cartographie des "worms" à plusieurs échelles sur la zone d'étude, nous avons utilisé l'algorithme de détection de contours à plusieurs échelles du logiciel Intrepid Geophysics ([Intrepid, 2020](#)). Le traitement des "worms" comprend plusieurs variables qui doivent être spécifiées avant de lancer les calculs, tels que le nombre de niveaux de continuation ascendante, la distance maximale entre les points de contour, ainsi que le nombre minimum de points pour créer un "worm".

De plus, il existe deux façons de relier les points du gradient maximal, la méthode Canny ou la méthode Blakely. Dans notre cas, nous avons choisi la méthode [Canny \(Canny, 1986\)](#), car la méthode [Blakely \(Blakely and Simpson, 1986\)](#) a tendance à créer des "worms" autour des bords de la grille, tandis que le test [Canny](#) élimine cet effet secondaire, bien qu'à de grandes distances de continuation ascendante, le problème semble inévitable ([Heath et al., 2009](#)). Les données de gravité ont été continuellement ascendants et traitées à six niveaux différents, dans un intervalle compris entre 350 mètres et 1882 mètres.

### **XI.3. Inversion gravimétrique tridimensionnelle**

Nous avons utilisé le programme d'inversion gravimétrique 3D (Facilité d'Inversion Géophysique de l'Université de la Colombie-Britannique). (F.I.G.U.C.B). Ce programme utilise un maillage tridimensionnel rectangulaire pour la distribution de densité en subsurface ([Farquharson et al., 2008](#) ; [Li and Oldenberg, 1998](#)). La densité reste constante à l'intérieur de chaque cellule du maillage, mais varie d'une cellule rectangulaire à l'autre. Les densités des cellules peuvent changer librement pendant le processus d'inversion, mais les limites des cellules restent fixes. Cela constitue un modèle voxel tridimensionnel de la subsurface. IL est donc préférable que les cellules soient petites afin que les géométries et dimensions des caractéristiques géologiques puissent être représentées avec une fidélité acceptable. Avec une telle représentation mathématique de la distribution de densité en subsurface, il est possible de calculer des données d'anomalie gravimétrique synthétique pour les comparer aux données observées.

Le modèle construit est composé de cellules de dimensions 27x33x46, correspondant aux directions X, Y et Z. Chaque cellule a une dimension égale à 500x500x100. Les dimensions totales sont donc de 13500x16500x4100. Avant l'inversion, une erreur gaussienne constante de 3% a été attribuée aux données.

## XII. Analyses des cartes de gravité

### XII.1. Anomalies de Bouguer

La carte des anomalies de Bouguer a été tracé automatiquement en utilisant la technique d'interpolation « minimum de courbure ». Le pas de la grille qu'on a adopté est 250 m. La carte de l'anomalie de Bouguer de la région d'étude avec une densité de réduction égale à 2.4 est montrée sur la (Fig. N°49).

La carte de l'anomalie de Bouguer ainsi obtenue montre une augmentation du champ d'anomalies du Sud vers le Nord. A cette variation régionale de grandes longueurs d'ondes viennent s'ajouter une multitude d'anomalies de courtes longueurs d'ondes d'orientation principale Est-Ouest et Nord, Ouest-Sud, Est. Les valeurs de l'anomalie de Bouguer de cette carte varient entre un minimum de -33 mGal et un maximum de 15 mGal. Notons l'existence d'une forte anomalie négative au Sud de la zone d'étude qui coïncide avec les formations Néogènes du Bassin de Guelma. Au Nord de la zone d'étude, entre Ain Mrah El Keftan et Djebel Mkhafra, on note l'existence d'un haut gravimétrique.

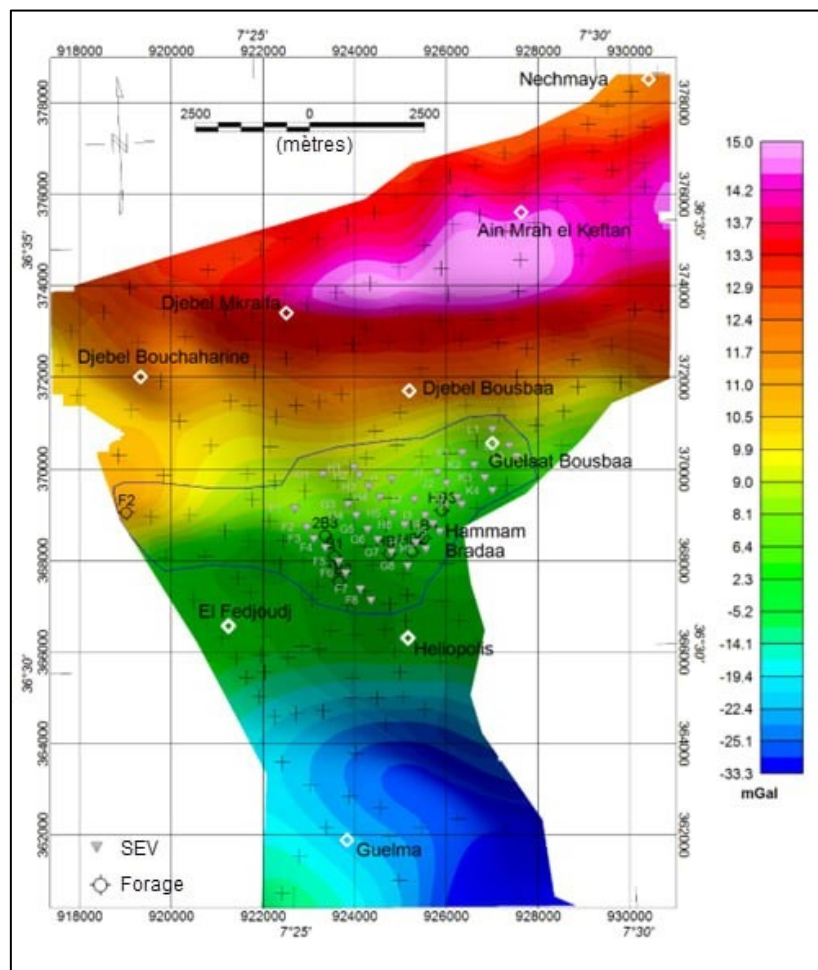


Fig. N°49 : Carte des anomalies de la gravité de Bouguer de la zone d'étude avec une densité de 2,4.

### XII.2. Anomalies Régionales

Il n'existe pas de méthode universelle pour séparer les anomalies, mais nous avons choisi d'utiliser la technique de prolongement vers le haut pour notre cas. Après avoir effectué plusieurs tests, nous avons déterminé qu'un niveau d'élévation vers le haut de 10 km était le plus approprié. La carte résultante de l'élévation vers le haut présente un gradient sud-nord, indiquant un approfondissement du socle du nord au sud (Fig. N°50).

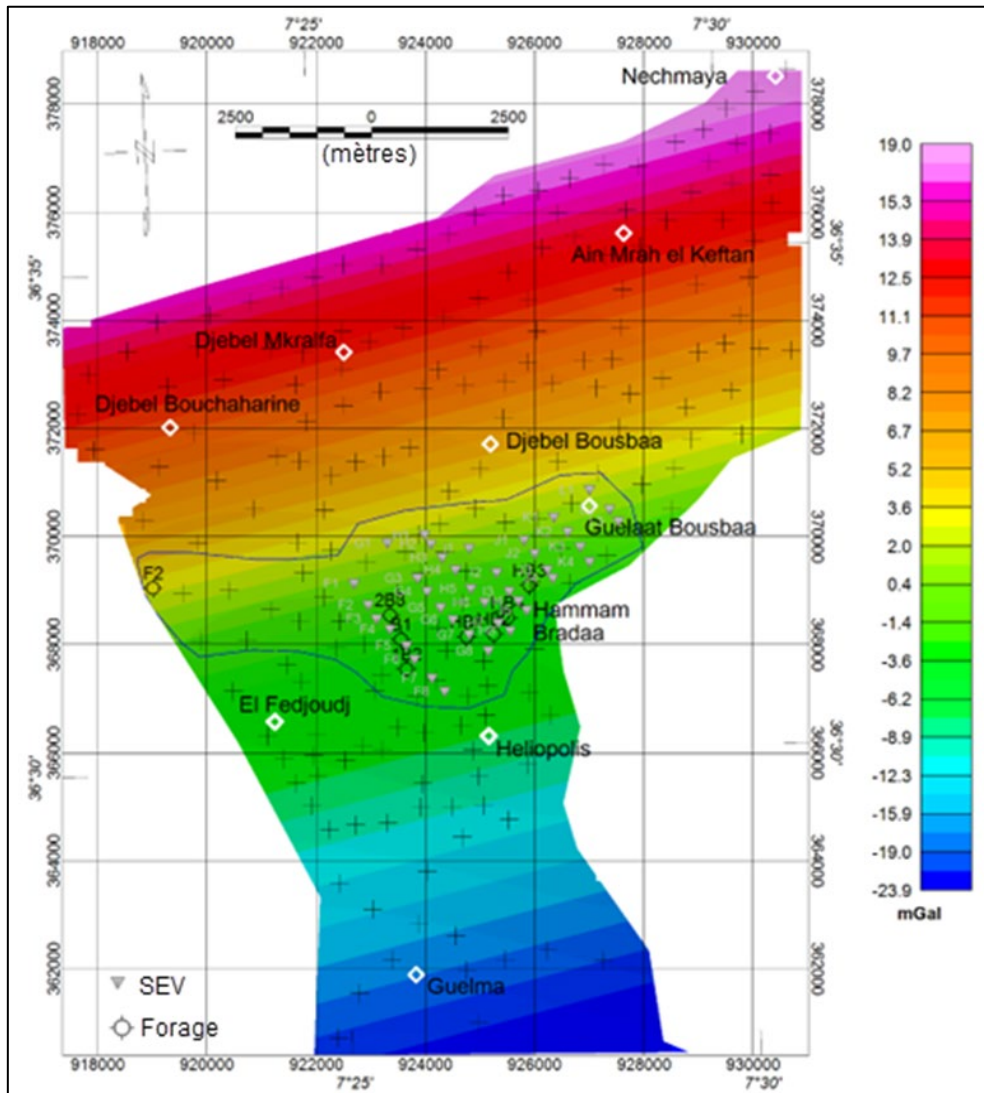


Fig. N°50 : Carte des anomalies gravimétriques régionales de la zone d'étude.

### XII.3. Anomalies Résiduelle

La carte de l'anomalie résiduelle, présentée à la figure 51 est obtenue en soustrayant de l'anomalie de Bouguer, la régionale calculée précédemment par la technique de prolongement vers le haut.

Cette carte est caractérisée par des valeurs qui varient entre un minimum de -11 mGal et un maximum de 8.5 mGal. Elle a permis de mettre en évidence une forte anomalie négative sous

les formations Néogènes du Bassin de Guelma. Cette anomalie négative a été discutée en détail par (Boubaya et al.2011) et elle est causée par un diapir salifère de proche surface profondément enraciné. Un gradient Est-Ouest, située au Nord de la ligne El Fedjoudj-Héliopolis sépare cette anomalie négative de l'anomalie gravimétrique positive. Ce haut gravimétrique coïncide avec les formations carbonatées du domaine néritique constantinois. En effet les forages hydrogéologiques implantés sur cet axe ont tous interceptés en profondeur les calcaires du néritique constantinois.

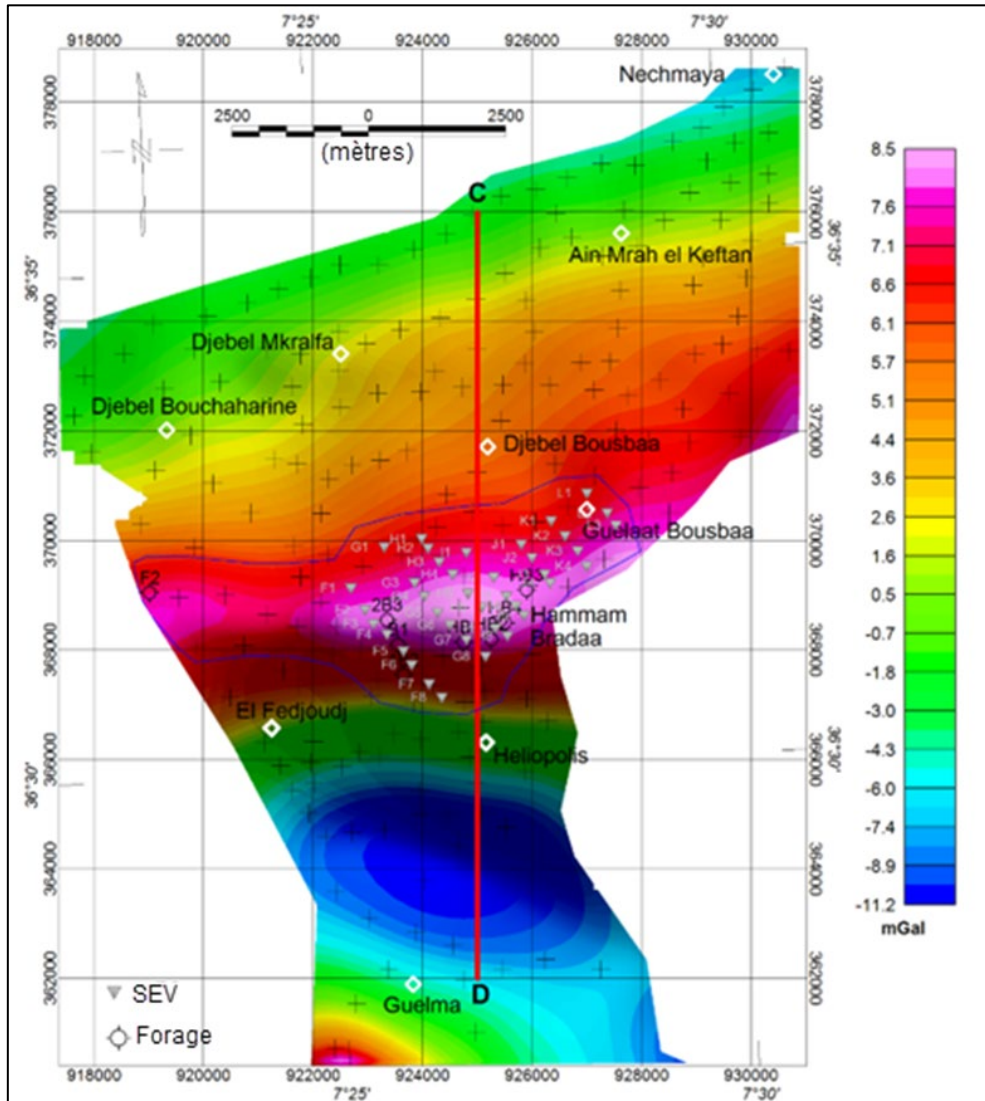


Fig. N°51 : Carte des anomalies gravimétriques résiduelles de la zone d'étude, CD est l'emplacement de la section de densité verticale Nord-Sud de la Fig. 54.

#### XII.4. Résultats du spectre d'énergie radialement moyenné

La carte du spectre radialement moyenné du périmètre d'étude est présentée à la figure 52. Cette dernière a permis de dégager, essentiellement, trois ensembles gravimétriques distincts par leurs profondeurs moyennes, qui s'expriment par des changements identifiables dans la pente du spectre d'énergie.

- ✓ Le premier ensemble est situé à une profondeur moyenne de 2 km et il est lié à la portion du spectre correspondant aux nombres d'ondes 0.05 et 0.2  $\text{km}^{-1}$ . Cet ensemble se manifeste, éventuellement, à la profondeur de la base des formations sédimentaires et peut correspondre au socle.
- ✓ Le second horizon gravimétrique lié aux nombres d'onde 0.25 et 1  $\text{km}^{-1}$ , fournit une profondeur de l'ordre de 0.7 kilomètres. Ce dernier correspondrait, vraisemblablement, aux nappes Telliennes.
- ✓ Le troisième ensemble qui n'est pas montré sur la figure 61, est repéré aux environs de la fréquence de Nyquist et est associé aux bruits.

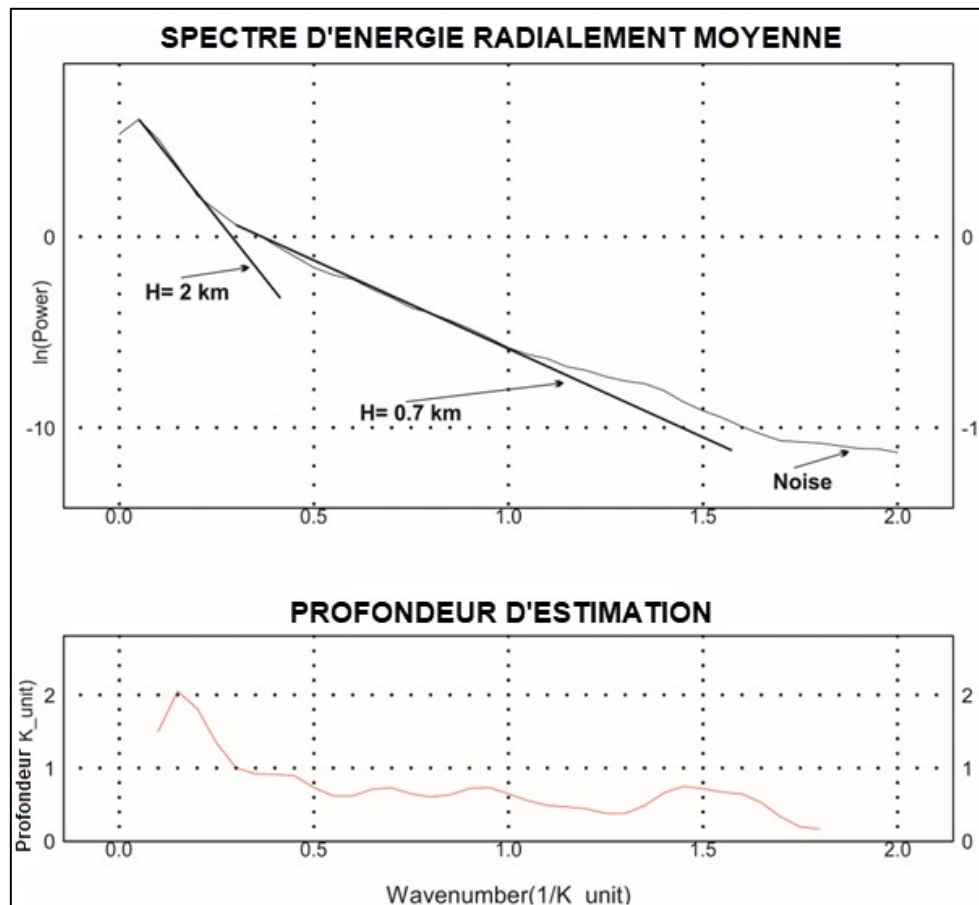


Fig. N°52 : Carte du spectre d'énergie radialement moyenné.

## **XII.5. Résultats de détection de contours à plusieurs échelles**

Les contacts de la zone d'étude, obtenus grâce à l'analyse de détection des bords à plusieurs échelles des données gravimétriques (Fig. 53 et Tableau 39), sont interprétés comme indicatifs de deux types de linéaments. Tout d'abord, il y a des linéaments peu profonds (SF1, SF2 et SF3) situés près de Guelaat Bousbaa, qui sont mis en évidence par trois niveaux peu profonds vers le haut. Deuxièmement, il y a des linéaments profonds (DF1 et DF2) dans la région Nord de la zone d'étude et au Nord du Bassin de Guelma (entre El Fedjoudj et Héliopolis), mis en évidence par la présence de tous les niveaux vers le haut. Les contacts peu profonds ou linéaments près de Guelaat Bousbaa se caractérisent par un décalage des niveaux élevés vers le Nord. Il est très probable que ces linéaments soient associés à des nappes de chevauchement, car plusieurs nappes affleurent dans la région de Guelaat Bousbaa. Par conséquent, les linéaments peu profonds déduits des Worms gravimétriques sont associés à une tectonique à peau mince.

Les contacts correspondant aux linéaments profonds dans le Nord de la zone d'étude (DF1) et entre la ligne reliant El Fedjoudj et Héliopolis (DF2) se caractérisent par un décalage vers le Sud des niveaux élevés vers le haut. Ces deux linéaments profonds sont orientés vers le Sud et sont associés à une tectonique à peau épaisse. Les Worms mis en évidence dans le Sud-Ouest de la zone d'étude, près de Guelma, sont dispersés, ce qui les rend très difficiles à interpréter. L'analyse de détection des bords à plusieurs échelles indique que la zone d'étude est affectée par des failles profondes orientées Nord-Est, Sud-Ouest et Est-Ouest, tandis que les failles peu profondes sont orientées Nord-Est, Sud-Ouest, Est-Ouest et Nord-Ouest, Sud-Est.

Les contacts peu profonds ou les failles près de la zone d'étude se trouvent près des zones de recharge près de la montagne de Djebel Bousbaa et peuvent identifier des emplacements pour des aquifères souterrains productifs, en particulier celui situé entre Djebel Bousbaa et Guelaat Bousbaa (SF2).

**Tableau 39** : Principaux linéaments extraits de l'interprétation de la détection de contours multi-échelles des données gravimétriques.

Direction majeure	Contacts	Description	Orientation
Sud-Ouest, Nord-Est	SF1	Situé à l'Ouest de Djebel Bousbaa et traversant Djebel Bouchahrine, il s'agit d'un linéament peu profond d'une longueur de 6,7 km.	Nord-Ouest
Est-Ouest	SF2	Situé au Sud de Djebel Guelaat Bousbaa. Il s'agit du deuxième contact peu profond d'une longueur de 2,5 km.	Nord
Nord-Ouest, Sud-Est	SF3	Situé à l'est de Djebel Bousbaa. Il s'agit du troisième contact peu profond d'une longueur de 4 km.	Nord-Est
Nord-Est, Sud-Ouest	DF1	Il s'agit du premier contact profond, situé au Nord de la zone d'étude. Il a une longueur de 13 km.	Sud
Est- Ouest	FF2	Il s'agit du deuxième contact profond. Avec une longueur de 6,7 km, il correspond à la partie Nord du bassin de Guelma.	Sud

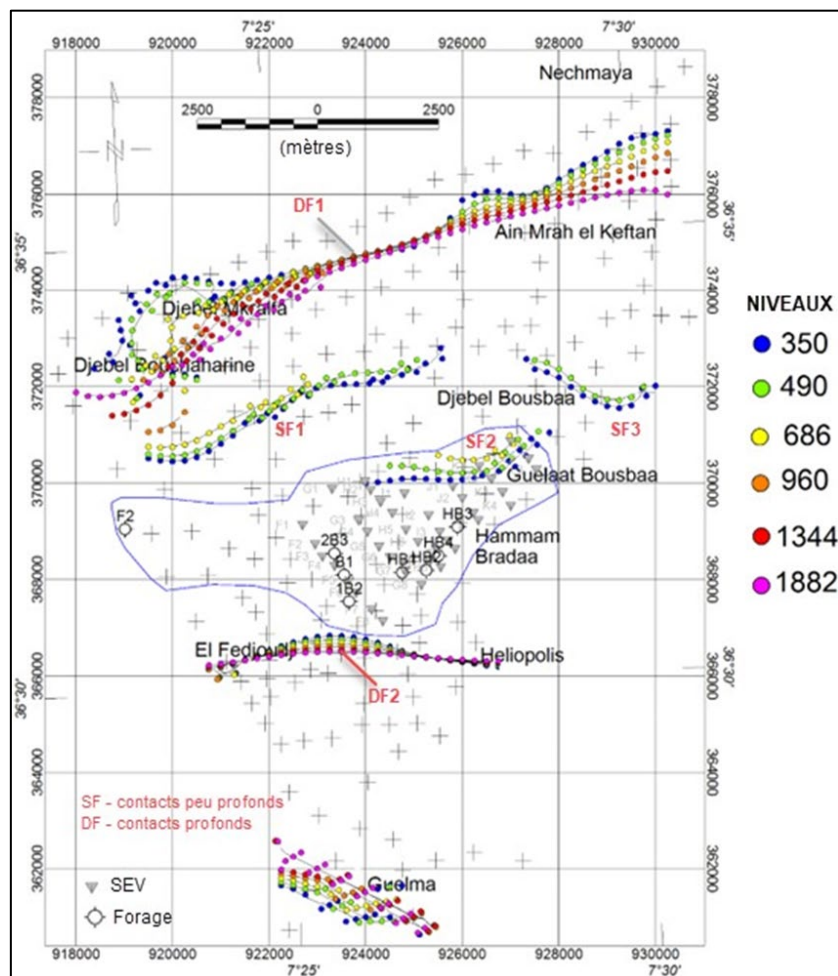


Fig. N°53 : Carte des "Worms" gravimétriques de la zone d'étude.

## XII.6. Inversion gravimétrique tridimensionnelle

Nous avons réalisé des tests impliquant une inversion non-contrainte et une inversion contrainte sur la densité, toutes deux ayant produit des résultats identiques. La densité moyenne du sel responsable du minimum sous le bassin de Guelma est de 2,2, tandis que la densité moyenne des roches carbonatées à l'origine de l'anomalie gravimétrique élevée à proximité de Hammam Bradaa est de 2,6. Nous avons autorisé des variations de densité dans la plage de -0,2 à +0,2 par rapport à la réduction de densité de Bouguer (2,4). Ainsi, un contraste de densité minimum de -0,2 correspond au sel, tandis qu'un contraste de densité maximum de +0,2 est associé aux roches du domaine néritique constantinois.

La figure 54 a présenté les résultats de l'inversion gravimétrique tridimensionnelle. Le modèle de densité tridimensionnel récupéré de la zone d'étude varie entre -0,2 et 0,2. La densité maximale, comme prévu, est corrélée aux roches carbonatées du domaine néritique constantinois, tandis que la densité minimale est attribuée au diapir de sel caché sous le bassin de Guelma. Pour mieux illustrer la structure profonde de la zone d'étude, une coupe Est-Ouest passant par la zone d'étude détaillée de Hammam Bradaa est montrée dans la figure 54.b. Cette coupe Est-Ouest, vue depuis le Sud, révèle une couche dense épaisse correspondant aux roches carbonatées du domaine néritique constantinois, suggérant un fort potentiel pour les ressources en eau souterraine.

La section de la figure 55 représente une tranche vertical extraite du modèle voxel tridimensionnel. La position de cette tranche verticale est indiquée par la ligne rouge épaisse de la figure 59. Elle s'étend sur une longueur de 14 km et est orientée dans la direction Nord-Sud. La tranche révèle clairement la présence de trois anomalies de densité.

- ↳ La première anomalie est située au Sud et correspond à une faible gravité, associée au diapir de sel en surface largement décrit par (Boubaya et al. (2011)).
- ↳ Les deux autres anomalies sont des pics de gravité.
  - Le premier pic de gravité, situé entre les distances de 6 km et 8 km, est sans aucun doute attribué aux calcaires néritiques constantinois. Ce pic de gravité corrobore avec les données des forages HB2, HB4 et HB3, qui montrent un approfondissement progressif des calcaires vers le Nord.
  - Le deuxième pic de gravité, situé à une distance de 2 km au Nord, près de Djebel Mkhafra, présente une intensité plus faible et une plus grande profondeur par rapport au pic de gravité précédemment mentionné.

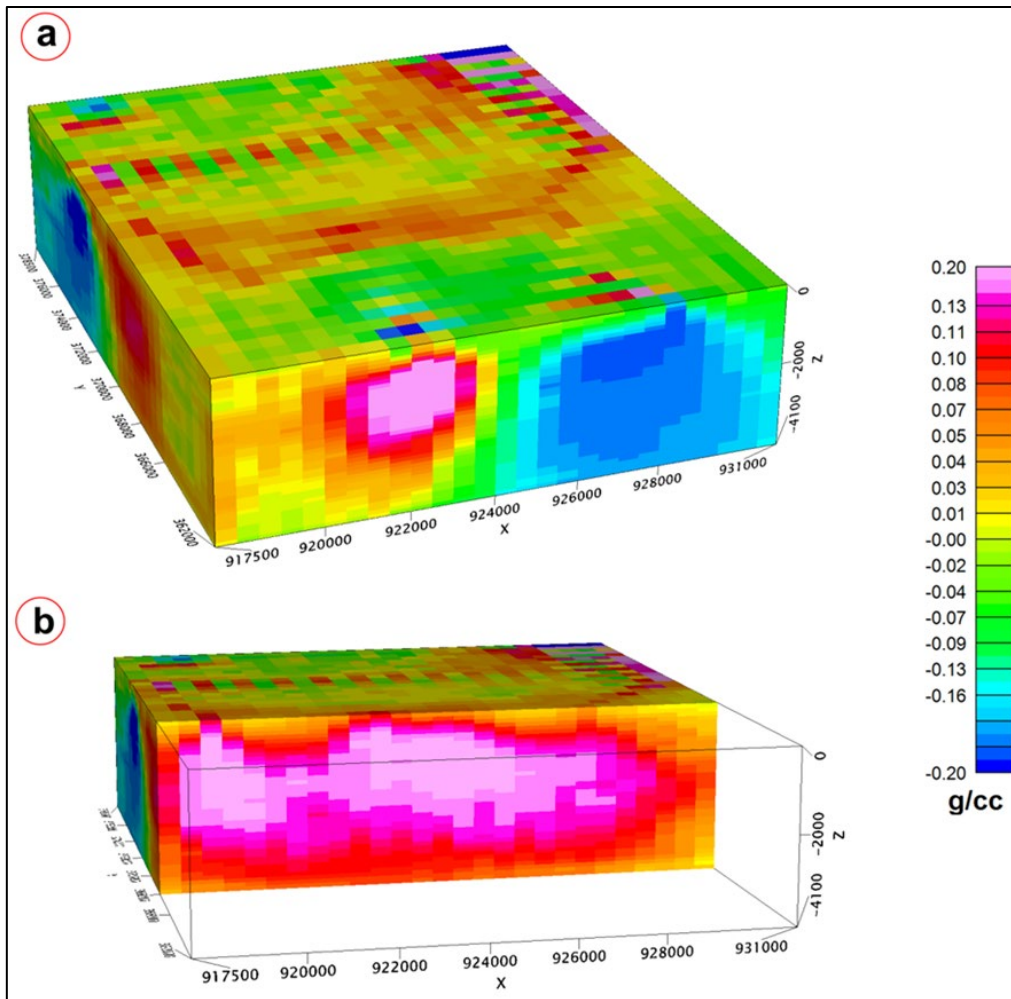


Fig. N°54 : Les résultats de l'inversion gravimétrique 3D.

Ils comprennent :

- a) Le modèle de densité 3D obtenu à partir des données résiduelles d'anomalies gravimétriques, tel qu'illustré dans la Figure 51.
- b) La coupe Est-Ouest passant par Bouzitoune-Hammam Bradaa, vue depuis le Sud.

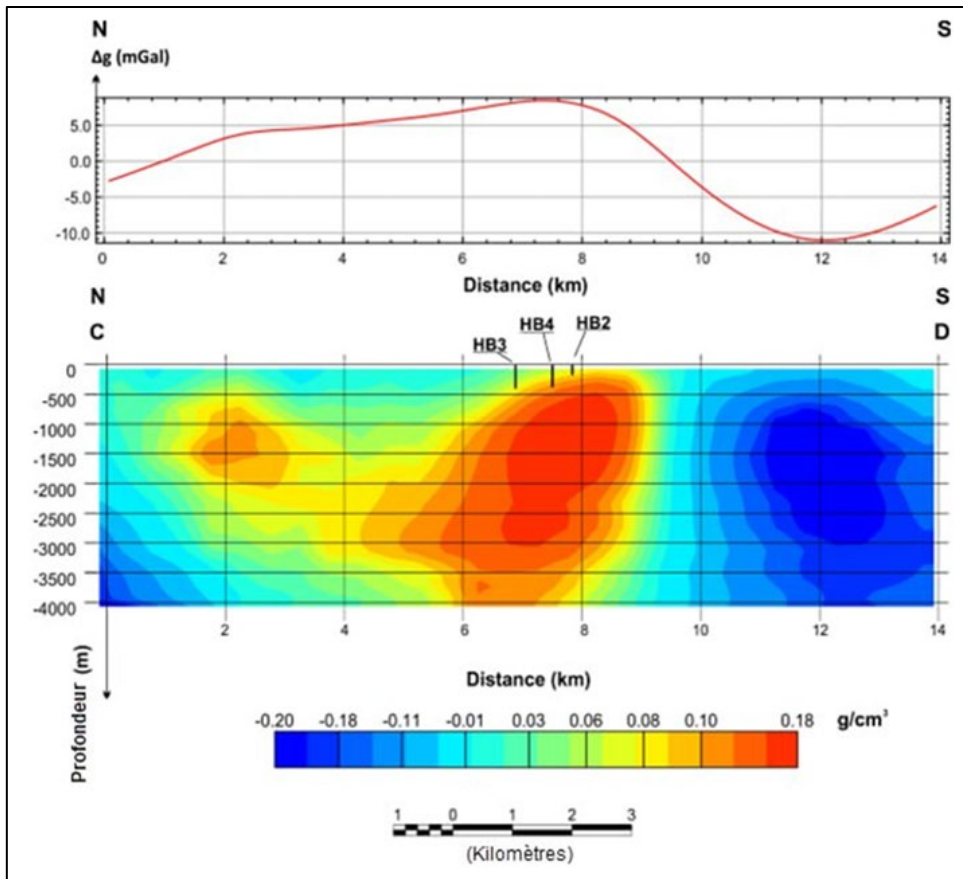


Fig. N°55 : Tranche de densité verticale Nord-Sud extraite de l'inversion de la gravité en 3D.

### XIII. Conclusion

La combinaison des données géophysiques (électrique et gravimétrique) et des données géologiques a fourni des informations sur la géométrie et la constitution de l'aquifère néritique. Cet aquifère est constitué de calcaires fissurés d'une épaisseur moyenne de 300 m de Hammam Bradaa et Bouzitoune à Guelaat Bousbaa. Cette formation carbonatée est une nappe souterraine importante affectée par un réseau de failles orientées Sud-Ouest et Nord-Est formant des horsts et des grabens qui contribuent à la karstification des formations aquifères.

Les calcaires néritiques et sénoniens d'Héliopolis présentent un grand intérêt de point de vue potentialité aquifère, en termes d'extension et d'épaisseur des formations carbonates ainsi que le débit d'exploitation par forage. Le flux général s'étend d'Ouest en Est, du pic oriental du Djebel Débagh, à Hammam Bradaa, où la source romaine a émergé en raison d'affleurements calcaires.

A partir des coupes transversales hydrogéologiques et géoélectriques, nous avons trouvé une corrélation claire entre les coupes transversales hydrogéologiques et les coupes transversales géoélectriques, dont la profondeur moyenne du calcaire est comprise entre 30 et 325 m. La profondeur moyenne du toit calcaire est située approximativement de 10 à 350 m, reflétant la

morphologie irrégulière des formations calcaires néritiques de la région d'étude et les conséquences favorables sur l'identification possible d'aquifères potentiels dans la région.

La zone de Hammam Bradaa se caractérise par une anomalie de gravité résiduelle positive qui correspond au développement en surface des calcaires du domaine néritique de Constantine, connus pour leur potentiel en eau souterraine. Les résultats de la détection des contours à plusieurs échelles ont indiqué que la zone d'étude est affectée par des failles profondes Nord-Est, Sud-Ouest et Est-Ouest, tandis que les failles peu profondes sont orientées Nord-Est, Sud-Ouest, Est-Ouest et Nord-Ouest, Sud-Est.

Selon la distribution des anomalies de gravité, la zone d'étude se caractérise par deux styles tectoniques opposés:

- (1) Une tectonique à peu mince, caractérisée par des linéaments inclinés vers le Nord en relation avec des nappes de charriage, et
- (2) Une tectonique à peu épaisse ou tectonique du socle, caractérisée par des linéaments inclinés vers le Sud en relation avec le socle.

Les linéaments peu profonds ou contacts dans la zone d'étude se trouvent près des zones de recharge proches du Djebel Bousbaa et peuvent indiquer des emplacements potentiels pour des aquifères productifs en eau souterraine.

La présence simultanée de hautes valeurs de gravité et de résistivité au même endroit indique la possibilité d'occurrence de formations calcaires en profondeur, ce qui pourrait contribuer à l'accumulation d'eau souterraine.

*Partie 3 : Qualité des eaux,  
matériels, méthodes utilisées et  
présentations des résultats.*

## **I. Introduction**

La réalisation d'études hydrochimiques implique la collecte d'échantillons d'eau en suivant des techniques de prélèvement spécifiques. Ces échantillons sont ensuite analysés pour obtenir des informations sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau ainsi que sur sa répartition spatiale dans l'environnement. La composition chimique des eaux souterraines est largement influencée par le type de roche qui les entoure, l'évolution des flux hydriques de la nappe, la profondeur de la nappe et la zone climatique. L'analyse de ces eaux fournit des informations précieuses sur les conditions de formation et les mouvements des eaux souterraines.

Au cours des dernières années, la surexploitation excessive des ressources en eau, notamment due à l'urbanisation, à l'irrigation et aux effets du changement climatique touchant les pays du Nord de l'Afrique, a entraîné une diminution du niveau d'eau et des modifications hydrochimiques de la nappe phréatique,

La forte détérioration de la qualité des eaux et des sols est principalement due aux rejets industriels, domestiques et agricoles non réglementés ainsi l'usage intensif d'engrais chimiques dans l'agriculture et à l'exploitation anarchique des ressources.

## **II. Echantillonnage et fiabilité des résultats**

La collecte d'échantillons (puits et forages) a été réalisée durant les périodes de basses et hautes eaux (Septembre 2021 et Mai 2022) dans la nappe superficielle, tandis que dans la nappe profonde, l'échantillonnage a été effectué en Janvier 2020 et Juin 2022. Ces échantillons d'eau ont été prélevés en fonction de la disponibilité des ouvrages, de la profondeur des eaux (type de nappe) et de l'autorisation des propriétaires.

Dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Trente-quatre (34) échantillons répartis sur toute la zone d'étude ont été collectés à partir des puits, dont 16 échantillons (P1-P16) de basses eaux au cours du mois de Septembre 2021 et 18 échantillons (P1-P18) de hautes eaux au mois de Mai 2022. On a remarqué lors de la campagne que certains puits sont secs. Les puits concernés sont réalisés sur 2 m jusqu'à 14 m de profondeur.

Les prélèvements ont été effectués à l'aide des bouteilles en plastiques de 0.5 litre, soigneusement étiquetés, lavés, et rincés trois fois avec l'eau à analyser. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à 4 °C et transférés au laboratoire Horizon : analyses des sols et des eaux Annaba et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4 °C jusqu'à ce qu'ils soient analysés dans un délai d'une semaine au maximum.

D'autre part, nous avons prélevé dix-sept (17) échantillons de la nappe profonde, dont neuf (9) (F1-F9) en janvier 2020 et huit (8) (F1-F8) en juin 2021. Ils ont été sélectionnés de manière à être représentatifs de l'ensemble de la zone d'étude. Les prélèvements d'eau ont été réalisés à des profondeurs allant de 50 mètres à 410 mètres à l'aide de bouteilles en plastique de 1,5 litre, soigneusement étiquetées, lavées et rincées trois fois avec l'eau à analyser. Tous les échantillons ont été stockés dans une glacière à une température inférieure à 4 °C, puis transférés au laboratoire Algérienne des Eaux à Guelma (fig.56).

Les méthodes utilisées sont celles recommandées par (Rodier et al. 2009).

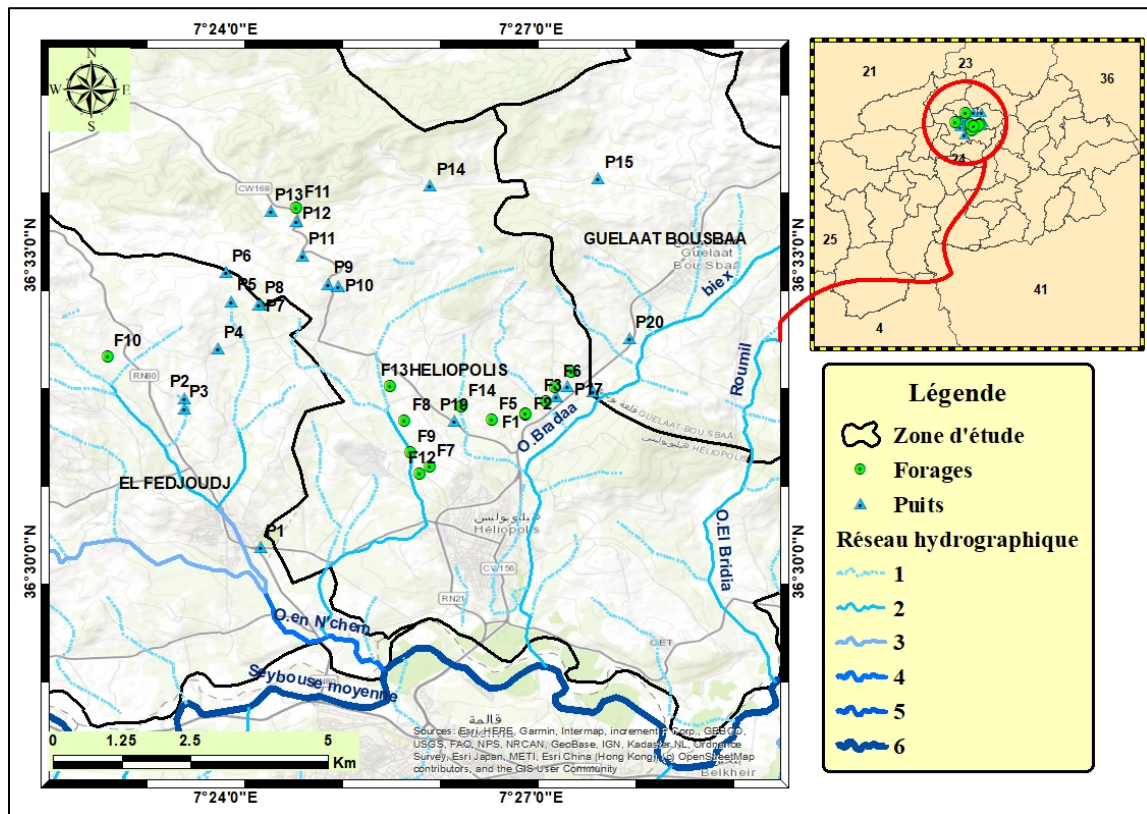


Fig. N°56 : Carte d'inventaire des points d'eau analysés dans la région d'étude (2020, 2021 et 2022).

Les points de prélèvements ont été déterminés à l'aide d'un GPS de marque Garmin D010-02258-01 et localisés par leurs coordonnées UTM comme suit :

Tableau 40 : Localisation des points d'eau échantillonnés

Nappe superficielle		Nappe profonde	
Zone	Puits	Zone	Forages
El Fedjoudj	P1, P2, P3, P4, P5	El Fedjoudj	F03 F07
Héliopolis	P6, P7, P8, P9, P10 P11, P12, P13, P14 P17, P18, P19, P20	Héliopolis	F04, F05, F08, F10
Guelaat Bousbaa	P15 P16	Hammam Bradaa	F01, F02, F06, F09

Les paramètres physiques de l'eau : T(C°), pH et CE, ont été mesurés in-situ à l'aide d'un multi-paramètre WTW (Multi 3420 SET G S940-3, FD0925-3, TC925-3).

Les principaux paramètres chimiques (anions, cations) et les paramètres de pollution, notamment les Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), les Chlorures (Cl<sup>-</sup>), les Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), les Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), l'Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et le Magnésium (Mg<sup>2+</sup>), ont été analysés par Titrimétrie NFT 90-005, les Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) et les phosphates (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>) ont été dosés par spectrophotométrie DIN 38405-D5-2 par contre le Calcium (Ca<sup>2+</sup>), le Sodium (Na<sup>+</sup>) et le Potassium (K<sup>+</sup>) ont été analysés par Photomètre à flamme.

### II.1. Balance ionique

Pour établir la balance ionique de ces eaux, il faut calculer le nombre de milliéquivalents par litre pour chaque élément à partir des masses en mg/l. Les valeurs obtenues représentent les quantités en réactions « r ». Pour que la neutralité électrique de la solution soit respectée, la somme des cations doit être égale à la somme des anions (Brinis.N, 2011). La différence entre les deux nombres se situe dans la limite acceptable de ±10 %. La validation des résultats des analyses chimiques des échantillons d'eau souterraine a été faite en utilisant l'équation suivante ; qui représente la balance ionique. Les résultats sont acceptables pour les analyses effectuées.

$$BI = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100 \quad (62)$$

Les valeurs de La balance ionique des eaux de la nappe superficielle pendant les deux campagnes Septembre 2021 et Mai 2022 sont dans l'intervalle admissible (±10%). De même pour les balances ioniques des analyses effectuées sur les eaux de la nappe profonde en Janvier 2020 et Juin 2021 (fig.57).

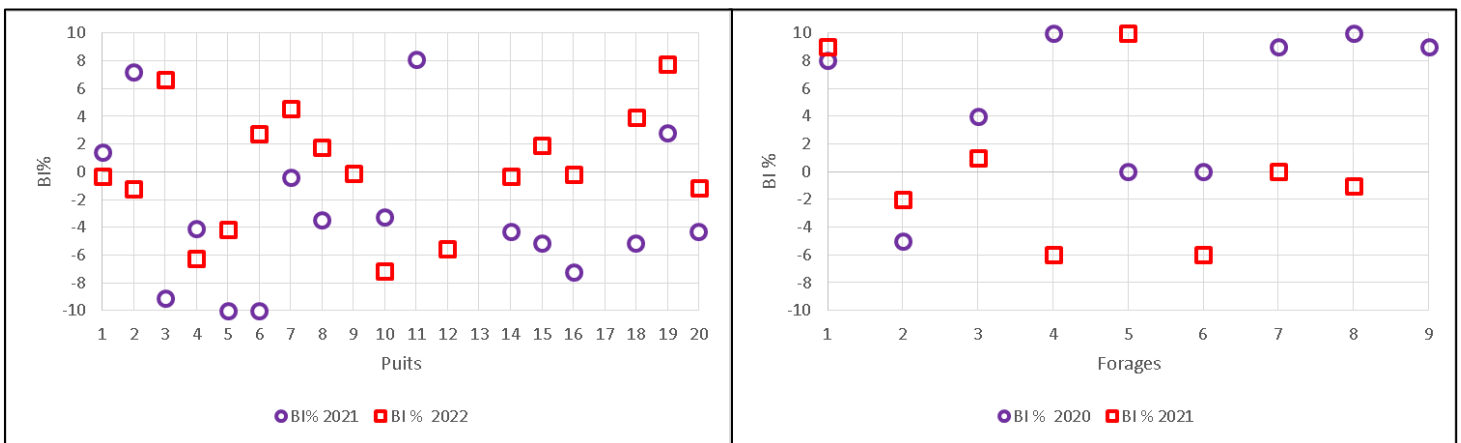


Fig. N°57 : Fiabilité (balance ionique) des résultats des analyses chimiques des eaux Périodes (2020-2021-2022).

### III. Paramètres physiques, chimiques et de pollutions mesurés

#### III.1. Paramètres physiques

##### ➤ Température de l'eau (TC°)

La température de l'eau est un paramètre essentiel pour le confort des utilisateurs. Elle est également importante pour corriger les valeurs des autres paramètres d'analyse qui sont liés à la température, tels que la conductivité.

La température joue un rôle crucial dans l'augmentation de l'activité chimique bactérienne et l'évaporation de l'eau. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs, notamment la situation géographique, la saison, la profondeur et l'origine des sources d'alimentation des lacs, des rivières et des rejets industriels.

##### ➤ Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH, qui représente le potentiel d'hydrogène, est une mesure de la concentration en ions  $H^+$  dans l'eau. L'alcalinité, quant à elle, représente l'ensemble des substances qui peuvent réagir avec les ions hydrogène. Il est essentiel de mesurer le pH sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Le pH de l'eau résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique. Il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates. Il dépend de la diffusion du gaz carbonique à partir de l'atmosphère, du bilan des métabolismes respiratoires et photosynthétiques ainsi que de l'origine des eaux, la nature géologique du milieu traversé, les rejets des eaux usées, etc.

##### ➤ La conductivité électrique (CE $\mu S/cm$ )

La conductivité électrique d'une eau (CE) est la capacité de la colonne d'eau située entre deux électrodes métalliques d'une surface de 1 à 2  $cm^2$ , espacées de 1 cm, à conduire l'électricité.

Elle est directement liée à la présence de minéraux dissous ionisés dans l'eau. La conductivité électrique augmente avec la température et est inversement proportionnelle à la résistivité ( $\sigma$ ).

En mesurant la conductivité électrique, nous tentons d'estimer la quantité de sels dissous ionisables présents dans l'eau.

La conductivité électrique donne un aperçu sur la minéralisation des eaux. Elle accroît avec l'augmentation de la teneur en sels dissous dans l'eau.

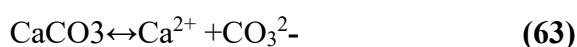
### III.2. Paramètres Chimiques

Les paramètres chimiques mesurés au niveau de laboratoire sont mentionnés comme suit :

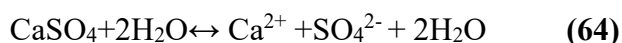
#### ➤ Calcium (Ca<sup>2+</sup>)

Le calcium est principalement présent sous forme de bicarbonates et, dans des quantités plus faibles, sous forme de sulfates, chlorures, et autres composés, contribuant ainsi à la dureté de l'eau. (Rodier et al. 2009). La présence de cette substance dans l'eau est habituellement le résultat de l'une des deux sources naturelles suivantes :

Soit elle se dissout à partir de formations de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), selon l'équation suivante :



Soit elle provient de la dissolution de formations de gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) selon la formule suivante :



#### ➤ Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)

Le magnésium est présent dans de nombreux minéraux et roches, notamment dans la dolomie qui est un carbonate composé de calcium et de magnésium. Lorsque l'eau circule sur des substrats riches en magnésium, elle peut former des eaux magnésiques.

#### ➤ Sodium (Na<sup>+</sup>)

Le sodium est l'un des constituants majeurs de l'écorce terrestre (2.83 %). Il existe dans la totalité des eaux car sa solubilité est très élevée. L'élément en question trouve principalement son origine dans la dissolution de formations salifères, ainsi que dans les eaux usées provenant des activités industrielles et domestiques, ainsi que dans l'utilisation d'engrais. Il est habituellement associé à l'ion chlorure, se dissout facilement dans l'eau, et subit des modifications en raison du processus d'échange de bases avec les éléments alcalino-terreux.

#### ➤ Potassium (K<sup>+</sup>)

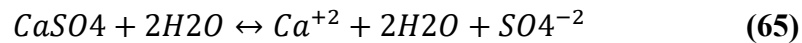
Le potassium est un élément normal des eaux, où sa concentration est largement inférieure à celle du sodium, bien que leurs abondances relatives terrestres soient comparables (sodium 2.83 % - potassium 2.59 %). Il provient principalement de deux sources : l'altération des argiles potassiques et la dissolution des engrais chimiques fréquemment utilisés par les agriculteurs.

➤ **Chlorures (Cl)**

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. Leur présence prédominante se trouve généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indicateur de pollution. Les chlorures dans l'eau peuvent avoir diverses sources, notamment le lessivage des sols riches en sels, l'influence de la salinité des océans, la présence de bassins endoréiques comme les chotts et les sebkhas, les eaux fossiles, les déversements d'eaux usées et industrielles, ainsi que la décomposition des sels naturels.

➤ **Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Les sulfates sont des composés naturellement présents dans l'eau, généralement liés aux cations majeurs tels que le calcium (Ca<sup>2+</sup>), le potassium (K<sup>+</sup>) et le sodium (Na<sup>+</sup>). La présence de cet élément est principalement due à la dissolution des formations évaporitiques, telles que le gypse (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) selon la relation suivante :



➤ **Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :**

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique selon la formule suivante :



### III.3. Paramètres de pollutions (nutritifs)

Le cycle de l'azote est un processus naturel qui permet le recyclage de l'azote dans l'environnement. L'azote est un élément essentiel à la vie, car il est un constituant clé des protéines et d'autres composés organiques. Le cycle de l'azote implique plusieurs étapes importantes :

- **Fixation** : Dans cette étape, l'azote gazeux (N<sub>2</sub>) de l'atmosphère est converti en ammoniac (NH<sub>4</sub>) par des bactéries fixatrices d'azote. Cela peut se produire soit par des bactéries libres dans le sol, soit en symbiose avec des plantes légumineuses qui hébergent des bactéries fixatrices d'azote dans leurs racines.
- **Nitrification** : L'ammoniac (NH<sub>4</sub>) produit lors de la fixation de l'azote est ensuite converti en nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) par des bactéries nitrifiantes, puis en nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) par d'autres bactéries nitrifiantes. Les nitrates sont des formes d'azote qui peuvent être utilisées par les plantes.

- **Assimilation** : Les plantes absorbent les nitrates présents dans le sol par leurs racines et les utilisent pour synthétiser des composés organiques tels que les acides aminés, les protéines et l'ADN. Les animaux herbivores obtiennent ensuite de l'azote en consommant des plantes, et les animaux carnivores obtiennent de l'azote en se nourrissant d'autres animaux.
- **Ammonification** : Dans cette étape, les décomposeurs tels que les bactéries et les champignons dégradent les matières organiques, telles que les déchets d'animaux et de plantes, et les convertissent en ammoniac ( $\text{NH}_4^+$ ) par un processus appelé ammonification. Cela permet de libérer l'azote organique sous forme d'ammoniac dans le sol.
- **Dénitrification** : Les bactéries dénitrifiantes convertissent les nitrates présents dans le sol en azote gazeux ( $\text{N}_2$ ), qui est ensuite libéré dans l'atmosphère. Ce processus de dénitrification réduit la quantité d'azote disponible dans le sol, complétant ainsi le cycle de l'azote.

Le cycle de l'azote est un processus continu et équilibré qui maintient un approvisionnement adéquat en azote dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. Il joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes et dans la disponibilité des nutriments pour les organismes vivants.

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

Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) sont des composés chimiques contenant de l'azote et de l'oxygène. Ils sont formés dans le cadre du cycle de l'azote, principalement par le processus de nitrification, où les bactéries nitrifiantes convertissent l'ammoniac ( $\text{NH}_4^+$ ) en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), puis en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).

Les nitrates sont une source d'azote essentielle pour les plantes, car elles les absorbent par leurs racines et les utilisent pour synthétiser des composés organiques tels que les acides aminés, les protéines et l'ADN. Les nitrates sont donc des nutriments importants pour la croissance et le développement des plantes.

Cependant, les nitrates peuvent également poser des problèmes environnementaux lorsqu'ils sont présents en excès. L'excès de nitrates dans les sols agricoles peut résulter de l'utilisation excessive d'engrais azotés, de la gestion inadéquate des déchets d'élevage ou de la pollution provenant des activités industrielles. Ces nitrates en excès peuvent se retrouver dans les cours d'eau et les eaux souterraines par lixiviation ou ruissellement, ce qui peut entraîner une eutrophisation excessive.

Lorsque les nitrates se retrouvent dans les sources d'eau potable, ils peuvent présenter un risque pour la santé humaine, en particulier chez les nourrissons. Les nitrates peuvent être transformés en nitrites dans le corps, ce qui limite la capacité du sang à transporter l'oxygène, entraînant ainsi des problèmes de santé, tels que la méthémoglobinémie, également connue sous le nom de "syndrome du bébé bleu" (Jun Wu et al, 2019).

La réglementation environnementale vise à limiter les niveaux de nitrates dans les eaux de surface et les eaux souterraines, et des pratiques agricoles durables et une gestion appropriée des engrais peuvent contribuer à réduire la pollution par les nitrates et à prévenir les impacts environnementaux et sanitaires associés.

➤ **Les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )**

Les nitrites sont une forme d'azote peu oxygénée et instable. Elles se situent entre les nitrates et l'ammonium dans le processus de conversion, et sont considérées comme toxiques ayant pour origine l'agriculture ou les rejets urbains et industriels. (Khadri.S, 2009).

➤ **Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )**

La forme d'azote la plus toxique est l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Il joue un rôle essentiel dans le cycle de l'azote. Il est formé par la décomposition des matières organiques, telles que les déchets d'animaux et les plantes mortes. L'ammonium est ensuite utilisé par les bactéries nitrifiantes dans le processus de nitrification, au cours duquel il est converti en nitrites puis en nitrates. Ces nitrates peuvent être absorbés par les plantes comme source d'azote pour leur croissance. Cependant, des niveaux élevés d'ammonium dans les écosystèmes aquatiques peuvent être toxiques pour la vie aquatique, car ils perturbent l'équilibre naturel de l'eau et peuvent entraîner une diminution de l'oxygène dissous.

➤ **Ortho phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ )**

Les phosphates dans les eaux peuvent provenir de plusieurs sources, dont les deux principales sont les rejets urbains et la dissolution des engrais chimiques, notamment les engrais contenant des composés d'azote, de phosphore et de potassium (NPK).

**Rejets urbains :** Les eaux usées provenant des zones urbaines peuvent contenir des phosphates issus de détergents, de produits de nettoyage, de savons et d'autres produits ménagers. Ces produits contiennent souvent des phosphates pour aider à améliorer leur efficacité de nettoyage. Lorsque les eaux usées sont déversées dans les cours d'eau sans un traitement approprié, elles peuvent entraîner une augmentation des niveaux de phosphates dans l'eau.

**Engrais chimiques (NPK) :** Les engrais agricoles contiennent souvent des phosphates, en particulier les engrais à base de phosphore, d'azote et de potassium (NPK). Lorsque ces engrais

sont appliqués aux sols agricoles, une partie des phosphates peut être lessivée par les pluies et les eaux d'irrigation, se retrouvant ainsi dans les rivières, les lacs et les nappes phréatiques environnantes. Les excès de phosphates dans l'eau peuvent favoriser la croissance excessive d'algues et d'autres plantes aquatiques, provoquant des problèmes de qualité de l'eau telle que l'eutrophisation.

#### IV. Présentation des résultats

Pour la vérification de la qualité des eaux étudiées par rapport à la consommation humaine, nous avons confrontés les résultats aux normes OMS, mentionnés dans le tableau 42 ci-dessous

**Tableau 41** : Comparaison des valeurs des éléments physico chimiques et de pollutions analysées avec les normes OMS, 2017

Paramètres	Unité	Normes (OMS ,2017)
<b>Paramètres physiques</b>		
T	C°	25
pH	-	6,5- 8,5
CE	µS/cm	1500
TDS	mg/l	1500
<b>Paramètres chimiques</b>		
Ca <sup>+2</sup>	mg/l	200
Mg <sup>+2</sup>	mg/l	30
Na <sup>+</sup>	mg/l	200
K <sup>+</sup>	mg/l	10
Cl <sup>-</sup>	mg/l	250
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	600
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	250
<b>Paramètres de pollutions</b>		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	50
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	0,5
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	mg/l	0,5

##### IV.1 Nappe superficielle :

###### 1. Paramètres physiques

###### ➤ La température (TC°)

Dans la région étudiée, les valeurs de la température varient de 15,18 à 16,31 °C avec un écart type de 0,64, une moyenne de 16,31°C et un coefficient de variation de 3,96 % pour la première campagne durant le mois de Septembre 2021(période de basses eaux).

Contrairement à la deuxième campagne du mois de Mai 2022 (période de hautes eaux) ou les valeurs de la température de l'eau varient entre 16,10 à 17,90 C°, la moyenne est de 16,92, avec un coefficient de variation de 2,69 % et un écart type de 0,45.

**Tableau 42** : Statistique descriptive de la température (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
TC° Min	15,18	16,10
T C° Max	17,65	17,90
T C° moyenne	16,31	16,92
Ecart- type	0,647	0,455
Coefficient de variation (Cv%)	3,96	2,69
Normes (OMS)	25,00	

La comparaison des valeurs de température d’après le graphe ci-dessous a montré que tous les échantillons sont dans les normes de l’OMS qui est fixée à (25°C).

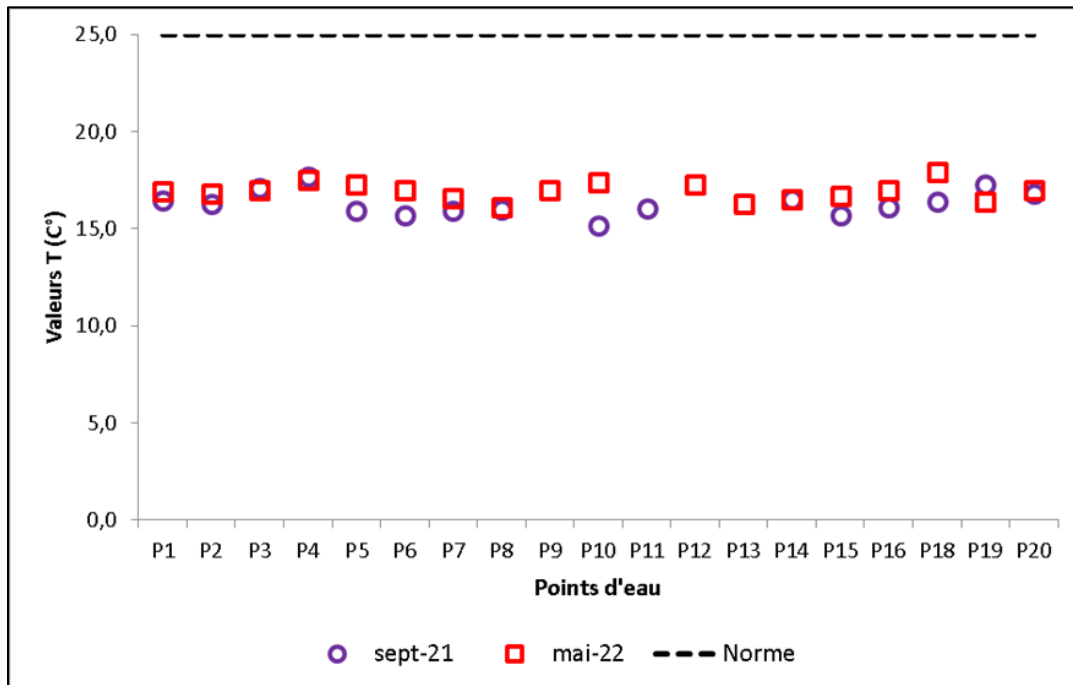


Fig. N° 58 : Variation de la température dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Le potentiel d’hydrogène pH**

Les eaux de puits analysées dans la région de Hammam Bradaa sont pour la plupart neutres à légèrement alcalines avec des valeurs qui varient de 7,01 à 8,40, un écart type de 0,51, une moyenne de 7,52 et un Cv de 6,83 % durant la période de Septembre 2021.

Par contre, la période de Mai 2022, les valeurs du pH varient de 7,44 à 8,54, l’écart type est de 0,28 avec une moyenne de 7,73 et un coefficient de variation égale 3,71 %.

Tableau 43 : Statistique descriptive du pH (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
pH Min	7,01	7,44
pH Max	8,40	8,54
pH moyen	7,52	7,73
Ecart- type	0,51	0,28
Coefficient de variation (Cv%)	6,83	3,71
Normes (OMS)	6,5- 8,5	

Les résultats des analyses des eaux de la zone en question pendant la période des basses eaux 2021 et hautes eaux 2022 indiquent que le pH se rapproche de la neutralité à l'alcalinité dans la plupart des sites étudiés, avec des valeurs oscillantes entre 7,01 (point P7) et 8,4 (point P20 et P16).

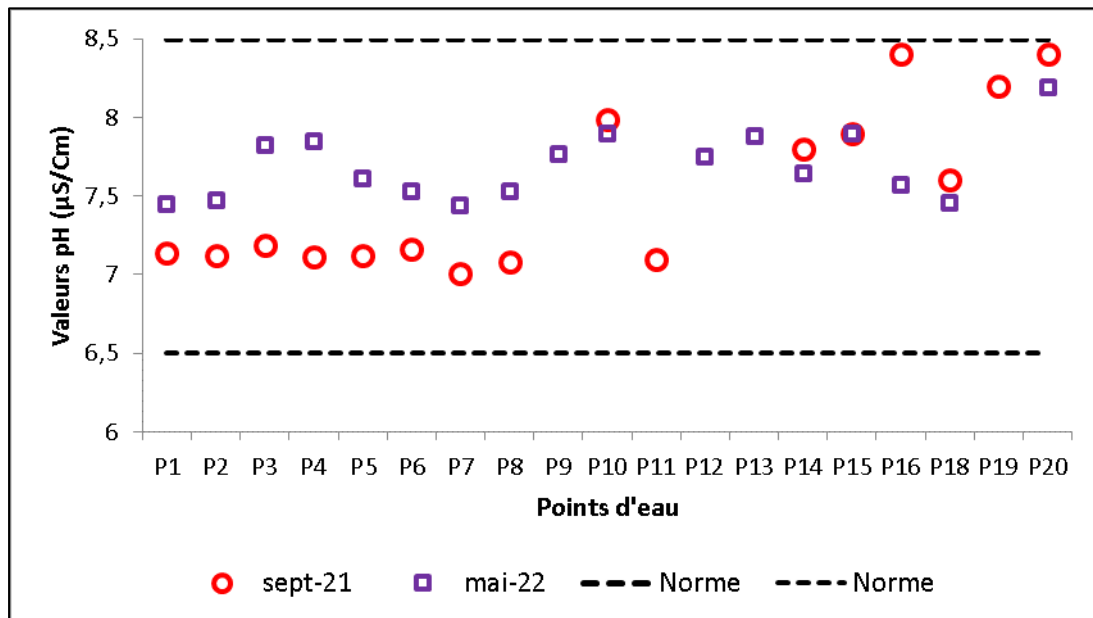


Fig. N°59 : Variation du pH dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **La conductivité électrique CE (µS/cm)**

Les valeurs de la conductivité de la campagne de Septembre 2021 varient entre 509 et 1037µS/cm avec une moyenne de 661,12, un écart types de 152,09 µS/cm et un Cv de 23 % mais les valeurs de la campagne de Mai 2023 varient entre 557 et 1038 µS/cm, un écart type de 131,14 µS/cm, un Cv de 19,17 % et une moyenne de 684,22 µS/cm. Elle est fonction de la température et de la minéralisation de l'eau.

**Tableau 44:** Statistique descriptive de la conductivité électrique (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
<b>CE Min</b>	509	557
<b>CE Max</b>	1037	1038
<b>CE moyenne</b>	661,12	684,22
<b>Ecart- type</b>	152,09	131,14
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	23,00	19,17
<b>Normes (OMS)</b>	1500	

Les valeurs des conductivités enregistrées lors de deux période 2021 et 2022 présentent des variations importantes par rapport à la norme recommandée pour les eaux de boisson par l’Organisation Mondiale de la Santé (1500  $\mu\text{S/cm}$ ).

D’après le graphe ci-dessous, la valeur la plus importante est de 1037  $\mu\text{S/cm}$  enregistrée au niveau du puits (P1) située à la région d’El Fedjoudj durant les deux campagnes de Septembre 2021 et Mai 2022.

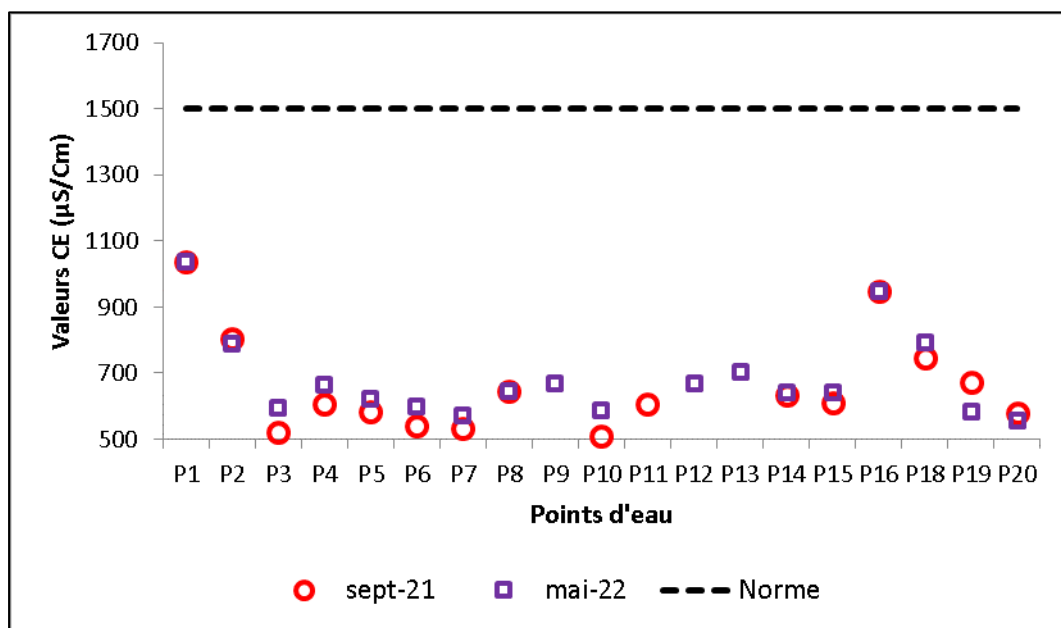


Fig. N°60 : Variation de la conductivité électrique dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

## 2. Paramètres chimiques mesurés au laboratoire

### ➤ Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

Les concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  durant la campagne de Septembre 2021 varient de 71,50 mg/l à 128,60 mg/l avec une moyenne de 94,95, un écart type de 20,73 mg/l et un coefficient de variation égal 21,84 %. La campagne de Mai 2022, indique que les concentrations en  $\text{Ca}^{+2}$

varient de 57,2 à 143 mg/l, une moyenne de 96,37 mg/l, un coefficient de variation de 20,44 % et un écart type de 19,69 mg/l.

**Tableau 45** : Statistique descriptive du calcium (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
<b>Ca<sup>2+</sup> Min</b>	71,5	57,2
<b>Ca<sup>2+</sup> Max</b>	128,6	143
<b>Ca<sup>2+</sup> moyenne</b>	94,95	96,37
<b>Ecart- type</b>	20,73	19,69
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	21,84	20,44
<b>Normes (OMS)</b>	200	

La quasi-totalité des prélèvements des eaux des puits de la nappe superficielle durant la période des basses eaux 2021 et la période des hautes eaux 2022, sont dans les normes de potabilité des eaux d'alimentation établies par l'OMS (200 mg/l).

Les fortes valeurs sont observées au niveau des puits N° (P05), (P16) avec une valeur de 128,60 mg/l, situées dans les régions d'El Fedjoudj et Guelaat Bousbaa et le puits N° (P13), situé dans la région de Héliopolis.

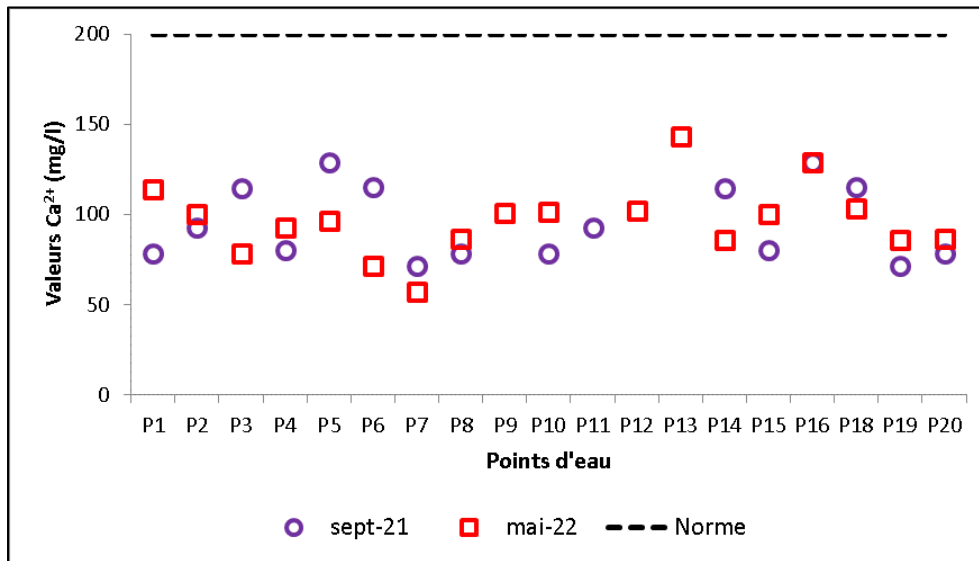


Fig. N° 61 : Variation du calcium (Ca<sup>2+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Magnésium (Mg<sup>+2</sup>)**

Lors de période des basses eaux 2021, les concentrations du magnésium varient de 26 mg/l à 46,8 mg/l avec un écart type de 7,54 mg/l, une moyenne de 34,53 mg/l et un Cv de 21,84 %. Durant la période des hautes eaux 2022, les teneurs en Mg oscillent entre 20,80 et 52 mg/l, la moyenne est de 35,04 mg/l, un écart type égal à 7,16 mg/l et un coefficient de variation de 20,46

% . Le magnésium peut provenir des carbonates comme il peut provenir des formations triasiques (MgSO<sub>4</sub>).

**Tableau 46:** Statistique descriptive du magnésium (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
Mg <sup>2+</sup> Min	26	20,80
Mg <sup>2+</sup> Max	46,80	52
Mg <sup>2+</sup> moyenne	34,53	35,04
Ecart- type	7,54	7,16
Coefficient de variation (Cv%)	21,83	20,46
Normes (OMS)	30	

On remarque que dans cette région d'étude les valeurs de Mg<sup>2+</sup> dépasse la norme de potabilité définie par l'Organisation Mondiale de Santé (OMS) ,(30mg/l) durant la période des basses eaux, 2021 et hautes eaux,2022.

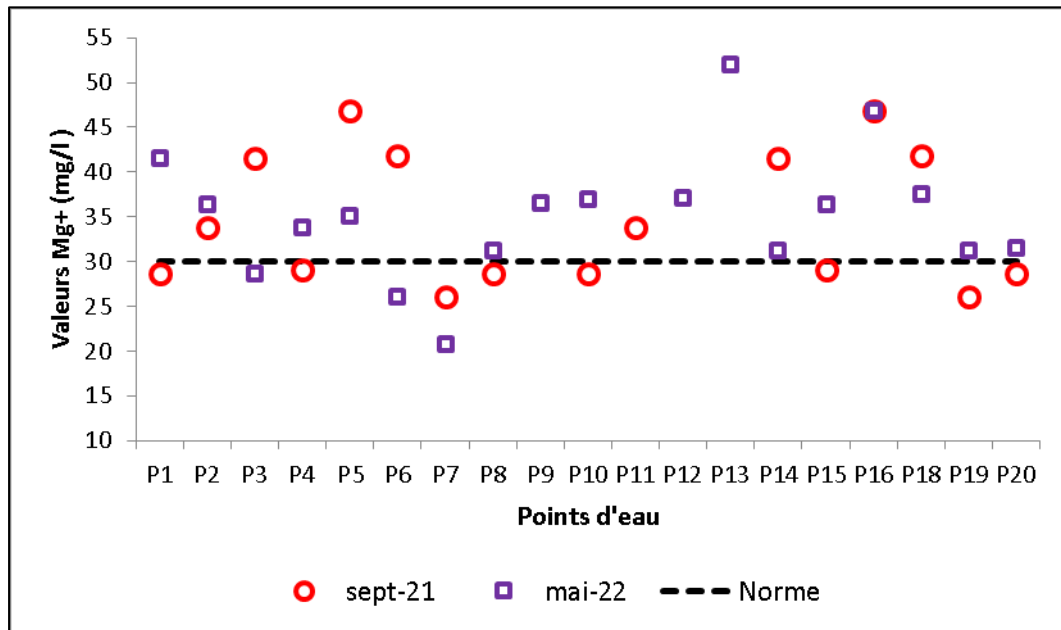


Fig. N° 62 : Variation du magnésium (Mg<sup>2+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Sodium (Na<sup>+</sup>)**

Lors de la période des basses eaux 2021, les concentrations du sodium varient de 18 mg/l à 44 mg/l avec un écart type de 7,28 mg/l, une moyenne de 30,27 mg/l et un Cv de 27,36 %. Durant la période des hautes eaux 2022, les teneurs du Na oscillent entre 22 et 44 mg/l, la moyenne est de 35,04 mg/l, un écart type égal à 6,56 mg/l et un coefficient de variation de 21,67 %.

Tableau 47 : Statistique descriptive du sodium (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
Na <sup>+</sup> Min	18	22
Na <sup>+</sup> Max	44,	44
Na <sup>+</sup> moyen	26,62	30,27
Ecart- type	7,28	6,56
Coefficient de variation (Cv%)	27,36	21,67
Normes (OMS)	200	

Dans la période des basses eaux 2021, la valeur du sodium la plus faible est enregistrée au niveau du puits (P 07) avec une valeur de 18 mg/l, par contre, la valeur la plus forte est observée au niveau du (P16) avec une concentration de 44 mg/l .Ces valeurs sont dans les normes de potabilité recommandées par l’OMS.

Pendant la période des hautes eaux, 2022, on constate des concentrations élevées en sodium dans le puits (P01), tandis que la valeur la plus basse est relevée au puits (P20), avec seulement 22 mg/l. Il est important de noter que tous les points d’eau échantillonnés respectent les normes établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

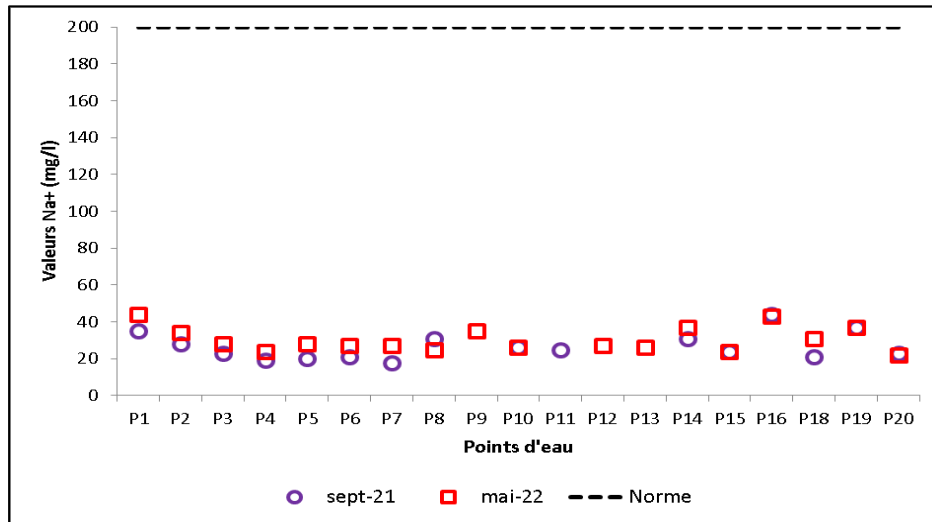


Fig. N°63 : Variation du sodium (Na<sup>+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Potassium (K<sup>+</sup>)**

Pendant la période des basses eaux en 2021, les concentrations en potassium varient de 0,3 mg/l à 8,5 mg/l, avec une moyenne de 1,81 mg/l, un écart type de 1,93 mg/l et un coefficient de variation de 106,47 % ce qui indique une variation importante entre les valeurs enregistrées et celles maximales. En revanche, durant la période des hautes eaux en 2022, les teneurs en K<sup>+</sup>

fluctuent entre 0,40 mg/l et 7,50 mg/l, avec une moyenne de 1,62 mg/l, un écart type de 1,57 mg/l et un coefficient de variation de 96,72 %.

**Tableau 48** : Statistique descriptive du potassium (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
<b>K<sup>+</sup> Min</b>	0,30	0,40
<b>K<sup>+</sup> Max</b>	8,50	7,50
<b>K<sup>+</sup> moyenne</b>	1,81	1,62
<b>Ecart- type</b>	1,93	1,57
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	106,47	96,72
<b>Normes (OMS)</b>	10	

Le graphique ci-dessous des variations du potassium (K<sup>+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée pendant la période des basses eaux en 2021 et hautes eaux 2022 révèle que la plupart des points échantillonnés présente des concentrations en potassium dans la norme établie par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui est de 10 mg/l.

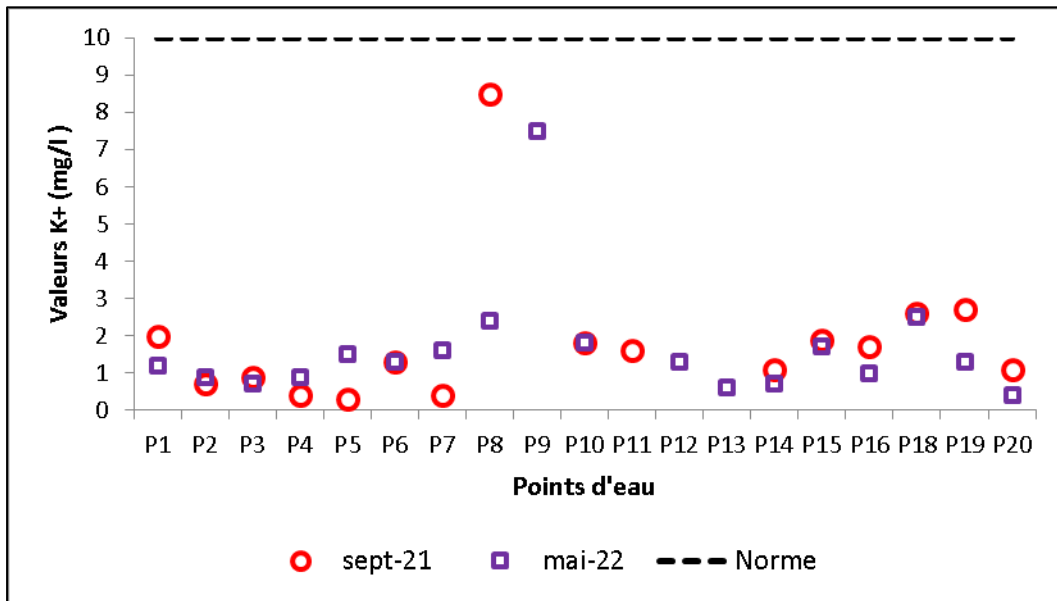


Fig. N° 64 : Variation du potassium (K<sup>+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Chlorures (Cl-)**

Les teneurs des chlorures des eaux de la nappe superficielle analysées dans la zone d'étude varient de 35,50 mg/l à 127,80 mg/l.

La valeur la plus basse est de 35,50 mg/l enregistrée au niveau du puits (P18), la plus élevée est de 127,80 mg/l enregistrée au niveau du puits (P16). La valeur moyenne des Chlorures est de 76,32 mg/l avec un écart type de 24,52 mg/l et un coefficient de variation est égal à 32,13 % lors de la campagne de Septembre 2021.

En revanche, lors de la campagne de Mai 2022, les concentrations en chlorures montrent une gamme allant de 49,70 mg/l à 142 mg/l, avec une moyenne de 86 mg/l et un écart type de 22,81, induisant un coefficient de variation de 26,53 %. Notons une concentration particulièrement élevée de 127,8 mg/l au niveau du puits (P16), tandis que le puits (P18) présente une concentration plus basse, mesurée à 35,5 mg/l au niveau des régions de Guelaat Bousbaa et de Héliopolis.

**Tableau 49:** Statistique descriptive des chlorures (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
Cl <sup>-</sup> Min	35,500	49,700
Cl <sup>-</sup> Max	127,800	142,000
Cl <sup>-</sup> moyenne	76,325	86,000
Ecart- type	24,527	22,816
Coefficient de variation (Cv%)	32,13	26,53
Normes (OMS)	250	

Le graphique ci-dessous, représentant la période des basses eaux en 2021 et hautes eaux en 2022, met en évidence que la majorité des points d'échantillonnage affichent des concentrations en chlorures dans la limite établie par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), fixée à 250 mg/l.

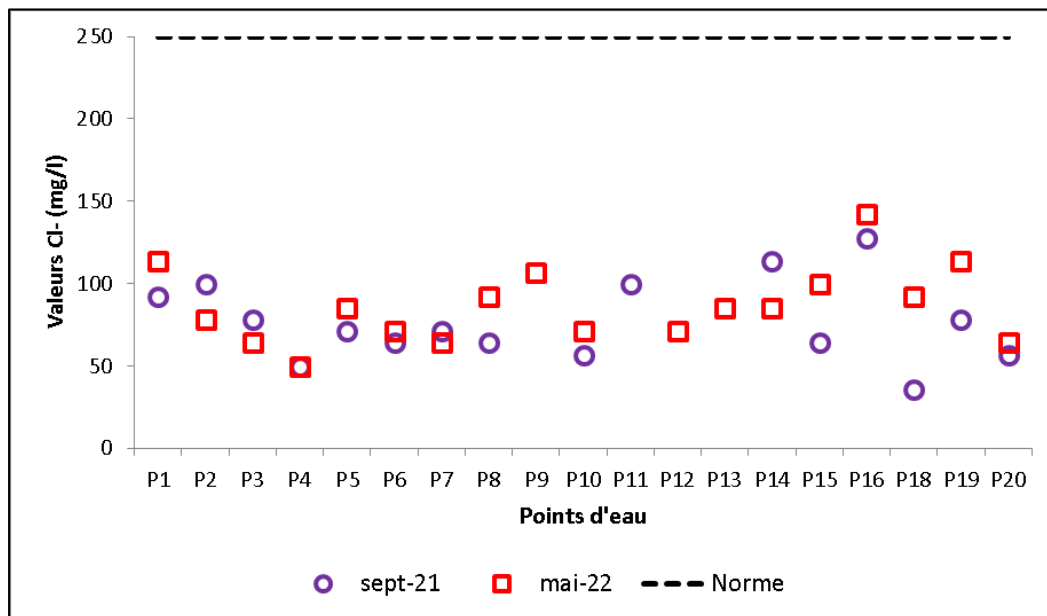


Fig. N° 65 : Variation des chlorures (Cl<sup>-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>)**

Les concentrations en sulfates dans la première campagne en 2021 varient de 55 mg/l à 169 mg/l, En moyenne, la concentration en sulfates est de 95,81 mg/l, avec un écart type de 31,40 mg/l et le coefficient de variation enregistre une valeur de 32,78 %. La deuxième campagne réalisée en 2022 indique des valeurs qui oscillent entre 103 mg/l et 197mg/l avec une moyenne de 140,88, un écart type de 28,56 et un coefficient de variation égal à 20,28 %.

**Tableau 50:** Statistique descriptive des sulfates (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Min	55	103
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Max	169	197
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> moyenne	95,81	140,88
Ecart- type	31,40	28,56
Coefficient de variation (Cv%)	32,78	20,28
Normes (OMS)	250	

Lors de la première campagne menée en Septembre 2021, on relève un pic de 169 mg/l dans le puits (P18), tandis qu'une concentration minimale de 64 mg/l est observée dans le puits (P07). Il est important de noter que les concentrations en sulfates sont dans les normes établies par l'OMS, qui sont fixées à 250 mg/l.

La valeur la plus élevée a été observée au niveau du puits (P18), tandis que la valeur la plus basse, enregistrée dans le puits (P07), s'élève à 103 mg/l. Il est à noter que tous les échantillons d'eau prélevés pendant le mois de Mai 2022, pendant la période des hautes eaux, respectent les normes établies par l'OMS.

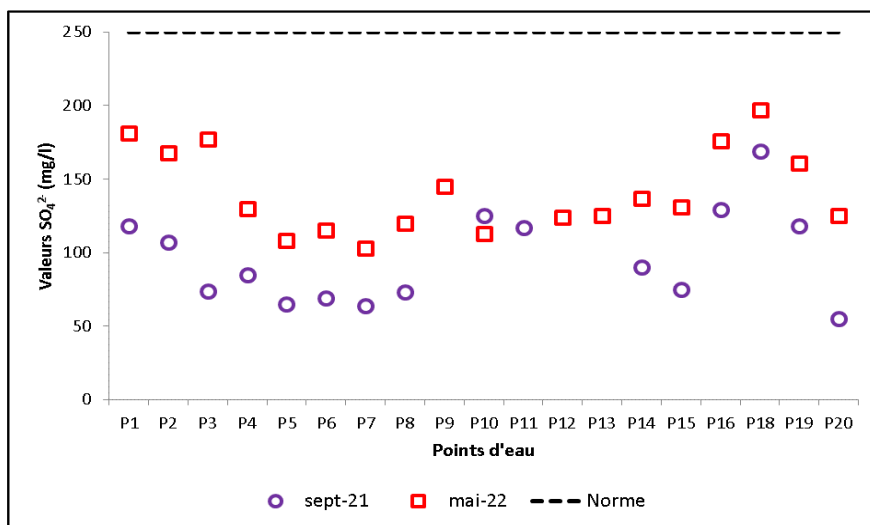


Fig. N°66 : Variation des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :**

Pendant la période des basses eaux en Septembre 2021, les concentrations en bicarbonates varient de 142,80 mg/l à 267,70 mg/l, présentant une grande variabilité avec une moyenne de 212,46 mg/l. L'écart type de 44,98 mg/l avec un coefficient de variation de 21,17 %.

En revanche, pendant la période des hautes eaux 2022, on observe des concentrations en bicarbonates allant de 97,60 mg/l à 244 mg/l. L'écart type est de 33,65 et le coefficient de variation est de 20,39 %, avec une moyenne de 164,99 mg/l.

**Tableau 51 :** Statistique descriptive des bicarbonates (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Min	142,80	97,60
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Max	267,70	244
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> moyenne	212,46	164,99
Ecart- type	44,98	33,65
Coefficient de variation (Cv%)	21,17	20,39
Normes (OMS)	600	

L'interprétation de ce graphe montre que les concentrations des bicarbonates de la nappe superficielle échantillonnées au mois de Septembre 2021 en période des basses eaux et période des hautes eaux 2022 sont dans les normes établies par l'OMS qui de 600 mg/l.

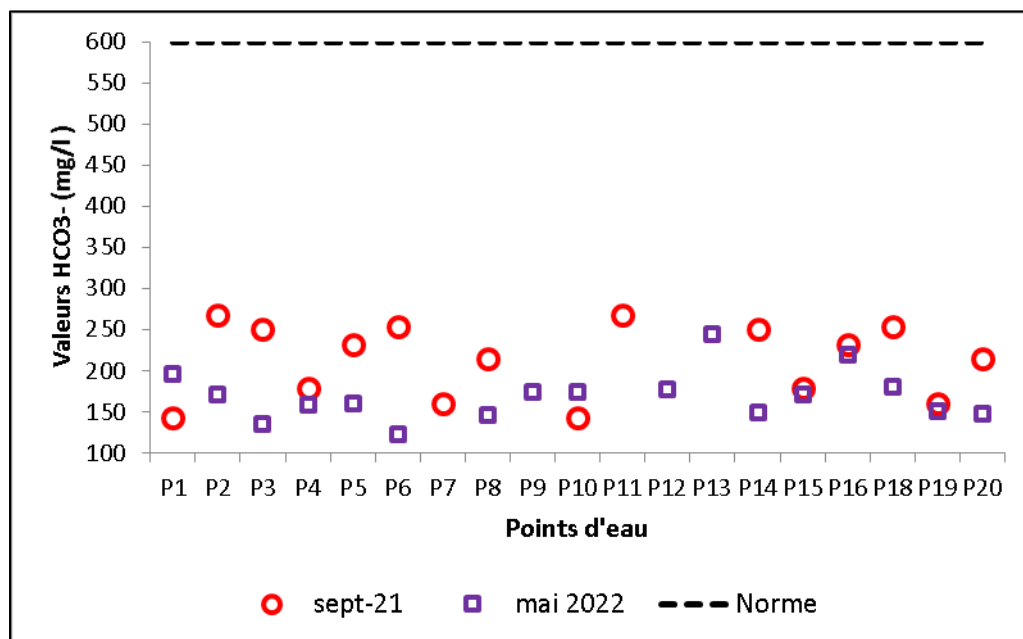


Fig. N° 67 : Variation des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022)

### 3. Paramètres de pollution (nutritifs)

#### ➤ Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Pendant la campagne réalisée au mois de Septembre 2021, les eaux prélevées de la nappe superficielle présentent des concentrations en nitrates inférieures à la norme établie par l’OMS, qui est de 50 mg/L. Ces valeurs varient entre 26,00 mg/l à 42,00 mg/l, avec une moyenne de 32,06 mg/l, un écart type de 4,83 et un coefficient de variation égal à 15,09 %.

Par contre dans la deuxième campagne du mois de Mai 2022, les concentrations en nitrates oscillent de 45 mg/l à 68mg/l, le coefficient de variation est égal à 10 %, la moyenne est de 52,83 avec un écart type de 5,28.

**Tableau 52** : Statistique descriptive des nitrates (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Min	26	45
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Max	42	68
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> moyenne	32,06	52,83
Ecart- type	4,83	5,28
Coefficient de variation (Cv%)	15,09	10
Normes (OMS)	50	

L’interprétation de ce graphe montre que les concentrations des nitrates de la nappe superficielle échantillonnées au mois de Septembre 2021 en période des basses eaux sont dans les normes établies par l’OMS. D’après le graphe, on observe que la plus forte concentration est enregistrée au niveau du puits (P01) avec une valeur de 42 mg/l et la plus faible concentration en nitrate est observée dans le puits (P11) avec une valeur égale à 26 mg/l.

On note aussi que les concentrations des nitrates durant le mois de Mai 2022 en période des hautes eaux sont supérieures aux normes établies par l’OMS. Les plus fortes concentrations sont observées au niveau des puits (P01),(P03), (P05) situés à El Fedjoudj, (P06), (P08), (P09),(P10), (P12),(P13), (P18) ,(P19) , (P20) situés à Héliopolis et (P15), (P16) situés à Guelaat Bousbaa.

Lorsque les engrais chimiques sont utilisés de manière excessive, ils peuvent entraîner la pollution des sols, des eaux souterraines et des cours d'eau. Les substances chimiques présentes dans les engrais peuvent s'infiltrer dans les nappes phréatiques, contaminant ainsi les sources d'eau potable. Cela peut avoir un impact néfaste sur la santé humaine et la biodiversité aquatique. De plus, l'utilisation excessive d'engrais chimiques peut entraîner une diminution de la fertilité des sols à long terme. Les sols peuvent devenir déséquilibrés sur le plan nutritionnel

et perdre leur capacité à retenir l'eau, ce qui peut nuire aux cultures et à la productivité agricole à long terme.

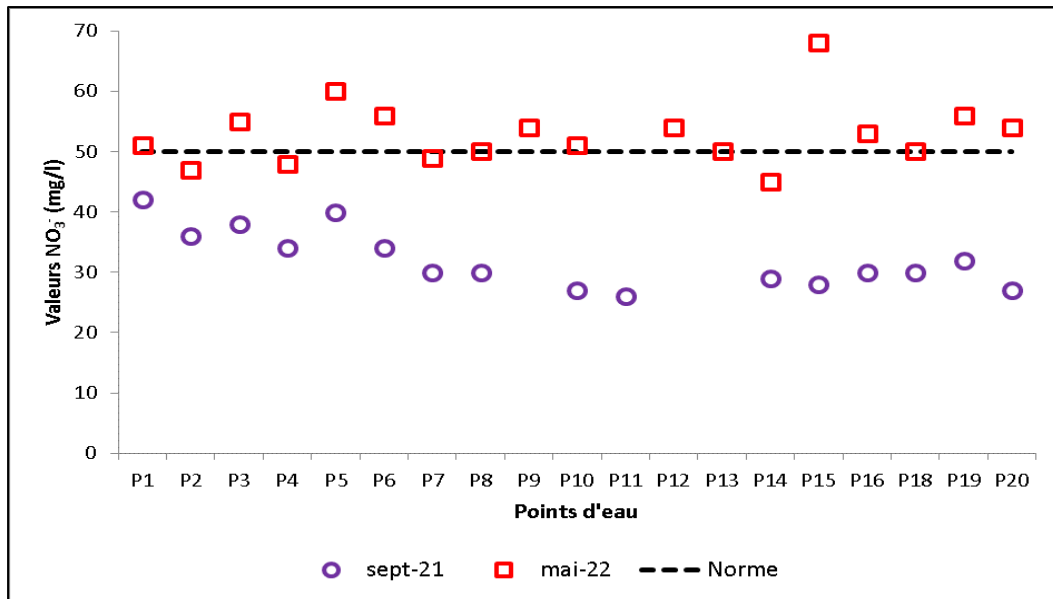


Fig. N° 68 : Variation des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )**

Les niveaux de nitrites dans les eaux souterraines de la nappe superficielle sont forts, variant de 0,07 à 0,22 mg/l, en période des basses eaux 2021 avec une moyenne de 0,11 mg/l. L'écart type de 0,04 mg/l avec un coefficient de variation de 35,47 %, et de de 0,03 mg/l à 0,20 mg/l. L'écart type est de 0,05 et le coefficient de variation est de 43,59 %, avec une moyenne de 0,11 mg/l en période des hautes eaux.

**Tableau 53** : Statistique descriptive des nitrites (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
<b><math>\text{NO}_2^-</math> Min</b>	0,07	0,03
<b><math>\text{NO}_2^-</math> Max</b>	0,22	0,20
<b><math>\text{NO}_2^-</math> moyenne</b>	0,11	0,11
<b>Ecart- type</b>	0,04	0,05
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	35,47	43,59
<b>Normes (OMS)</b>	0,1	

Le graphe des nitrites montre des concentrations élevées au niveau des puits (P02), (P03), (P04), (P05), (P06), (P08), (P09), (P11), (P12), (P16), (P15), (P19) et (P20). 56% des échantillons de la période des basses eaux, 2021 dépassent les normes établies par OMS qui est de 0,1 mg/l. Ces niveaux élevés de nitrites dans les deux campagnes de prélèvements témoignent d'une contamination de la nappe alluvionnaire dans la zone d'étude.

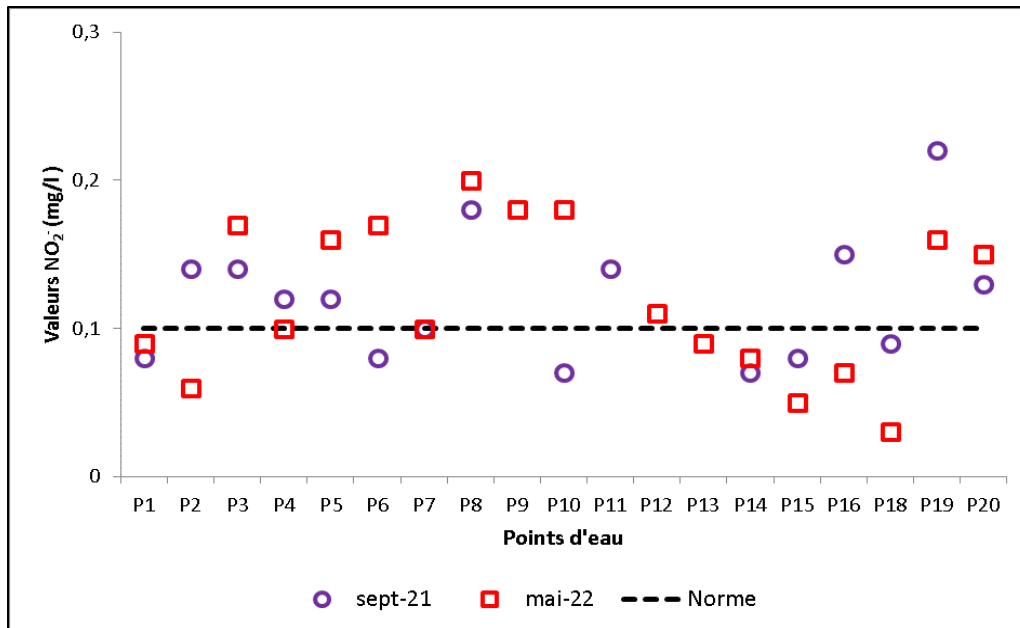


Fig. N° 69 : Variation des nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

➤ **Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

La campagne effectuée durant la période des basses eaux Septembre 2021, montre des teneurs en ammonium supérieures à la norme établie par l’OMS, qui est de 0,5 mg/l. Ces valeurs varient entre 0,10 mg/l à 1,05 mg/l, avec une moyenne de 0,40 mg/l, un écart type de 0,33 et un coefficient de variation égal à 84,18 %. Par contre, dans la deuxième campagne du mois de Mai 2022, les concentrations en ammonium varient de 0,08 mg/l à 0,95 mg/l, le coefficient de variation est égal à 43,90%, la moyenne est de 0,58 avec un écart type de 0,25.

**Tableau 54** : Statistique descriptive de l’ammonium (Septembre, 2021 et Mai, 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Min</b>	0,10	0,08
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Max</b>	1,05	0,95
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>moyenne</b>	0,40	0,58
<b>Ecart- type</b>	0,33	0,25
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	84,18	43,90
<b>Normes (OMS)</b>	0,5	

Ce graphe présente les concentrations en ammonium de la nappe superficielle prélevée au mois de Septembre 2021 en période des basses eaux et en période des hautes eaux, 2022.

D’après le graphe, on observe que les plus fortes concentrations sont enregistrées au niveau des puits (P11), (P14), (P15), (P16), (P18), (P19) et (P20) situés au niveau de Héliopolis et Guelaat Bousbaa, 44% de ces valeurs dépassent la norme établie par OMS. 56% des échantillons sont inférieures aux les normes établies par l’OMS.

Durant le mois de Mai 2022, les concentrations de  $\text{NH}_4^+$  sont supérieures à la norme établie par l'OMS qui est de 50 mg/l. Selon ce graphique, les plus fortes concentrations sont observées au niveau des puits (P01),(P03), (P05) situés à El Fedjoudj, (P06), (P08), (P09),(P10), (P12),(P13), (P18) ,(P19) , (P20) situés à Héliopolis et (P15), (P16) situés à Guelaat Bousbaa.

Effectivement, les puits peuvent être contaminés par l'ammonium en raison ;

- ✓ Des activités humaines telles que l'agriculture intensive, l'élevage intensif, l'utilisation excessive d'engrais azotés ou l'épandage de lisier peuvent entraîner un apport excessif d'ammonium dans les sols et les eaux environnantes.
- ✓ Pollution industrielle : Les rejets industriels, notamment ceux provenant de l'industrie chimique, des usines de traitement des eaux usées ou des installations de production d'énergie, peuvent contenir des niveaux élevés d'ammonium.
- ✓ Déversements accidentels : Des accidents tels que les déversements de produits chimiques contenant de l'ammonium peuvent entraîner une augmentation soudaine des concentrations d'ammonium dans l'environnement.
- ✓ Conditions environnementales : Des conditions environnementales particulières, telles que des précipitations intenses, des inondations ou des sécheresses prolongées, peuvent influencer la concentration d'ammonium dans les eaux souterraines et les cours d'eau.

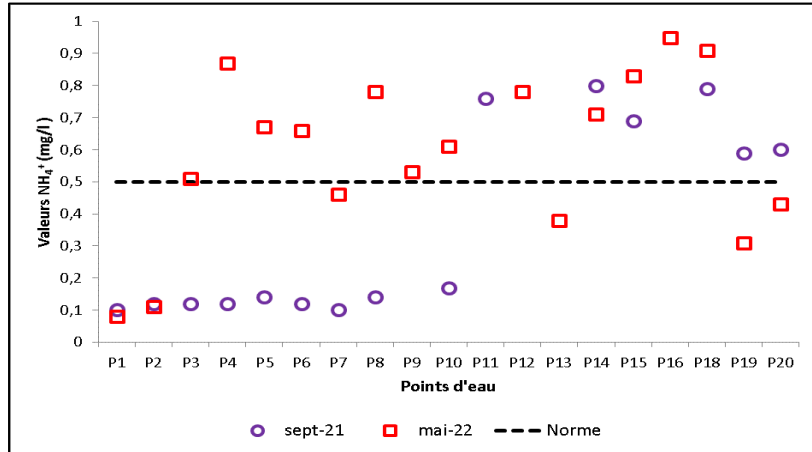


Fig. N° 70 : Variation d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

### ➤ Ortho phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Les valeurs mesurées pendant la campagne varient entre 1,70 mg/l et 16 mg/l, avec une moyenne de 5,05 mg/l. L'écart type, qui mesure la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne, est de 3,93. Le coefficient de variation, qui est le rapport entre l'écart type et la moyenne (exprimé en pourcentage), est égal à 77,85 %. Ce coefficient de variation relativement élevé suggère que les valeurs de teneur en ortho phosphates présentent une certaine variabilité autour de la moyenne.

Effectivement, les valeurs des ortho phosphates observées pendant la période des hautes eaux en 2022 sont assez élevées. Les concentrations varient de 1,10 mg/l à 6 mg/l, avec une moyenne de 4,17 mg/l. L'écart type de 1,29 indique une certaine dispersion des valeurs autour de la moyenne. Le coefficient de variation de 30,96 % est relativement faible par rapport aux mesures précédentes, ce qui suggère une certaine cohérence dans les valeurs de phosphates pendant cette période.

**Tableau 55** : Statistique descriptive de l'ammonium (Septembre 2021 Mai 2022)

Périodes	Basses eaux – Septembre 2021-	Hautes eaux – Mai 2022-
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> Min</b>	1,70	1,10
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> Max</b>	16	6
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> moyenne</b>	5,05	4,17
<b>Ecart- type</b>	3,93	1,29
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	77,85	30,96
<b>Normes (OMS)</b>	0,5	

L'interprétation du graphe indique que les concentrations en ortho phosphates dans la nappe superficielle prélevées au mois de Septembre 2021 et en moi de Mai sont supérieures aux normes établies par l'OMS. Il est observé d'après le graphe que les plus fortes concentrations en ortho phosphates sont enregistrées au niveau des puits (P02) situés à El Fedjoudj, (P06), (P07) et (P09) situés à Héliopolis. Ces valeurs dépassent la norme établie par l'OMS, qui est de 0,5 mg/l.

Ces résultats sont préoccupants car ils indiquent une pollution significative de la nappe phréatique par les ortho phosphates dans ces zones spécifiques. Comme mentionné précédemment, les phosphates peuvent provenir de sources anthropiques telles que l'utilisation d'engrais agricoles et de pesticides contenant du phosphore, ainsi que d'autres activités industrielles et urbaines. Lorsque ces substances atteignent les eaux souterraines, elles peuvent entraîner des concentrations élevées de phosphates, ce qui peut perturber l'équilibre des écosystèmes aquatiques et provoquer une eutrophisation excessive.

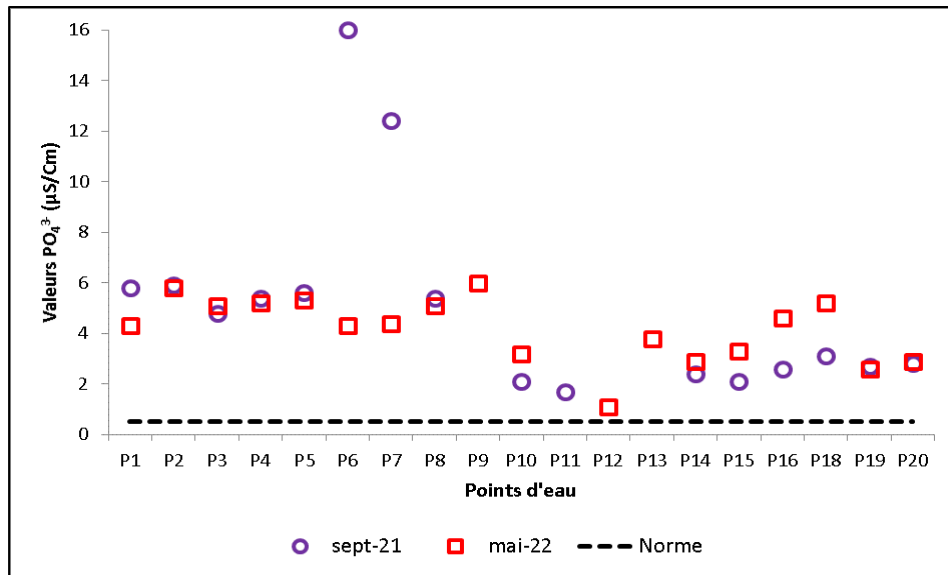


Fig. N° 71 : Variation d’ortho phosphate ( $PO_4^{3-}$ ) dans les eaux de la zone étudiée (basses eaux, 2021 et hautes eaux, 2022).

## IV.2 Nappe profonde

### 1. Paramètres physiques

#### ➤ La température

Pendant la première campagne du mois de Janvier 2020, dans la région étudiée, les températures oscillaient entre 17,3 et 25,2 °C. La moyenne était de 21,98 °C, avec un écart type de 2,02 et un coefficient de variation de 9,21 %. À la différence de la seconde campagne du mois de Juin 2021, où les températures de l'eau ont oscillé entre 18 et 27 degrés Celsius, la moyenne s'établit à 23,93. Le coefficient de variation est de 9,69 % et l'écart type est de 2,32.

**Tableau 56** : Statistique descriptive de la température (Janvier 2020 et Juin 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
TC° Min	17,30	18,80
T C° Max	25,20	27
T C° moyenne	21,98	23,93
Ecart- type	2,02	2,32
Coefficient de variation (Cv %)	9,21	9,69
Normes (OMS)	25,00	

La comparaison des données de température issues du graphique précédent révèle que tous les échantillons présentent des valeurs dans la norme établie par l'OMS, qui est fixée à 25°C. Cependant, il est à noter que les forages (F1=25,2) et (F2=27) enregistrent des températures supérieures aux normes définies par l'OMS.

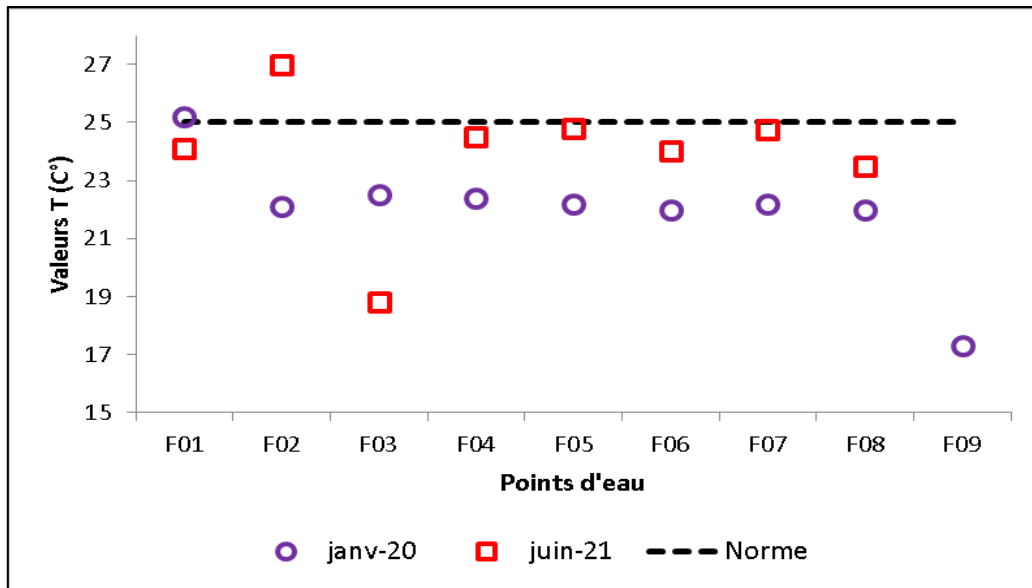


Fig. N° 72 : Variation de la température dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin, 2021).

➤ **Le potentiel d'hydrogène pH**

Dans la région de Hammam Bradaa, les analyses des eaux de forages révèlent que la plupart d'entre elles sont légèrement neutres à alcalines, affichant des valeurs de pH variant entre 7,17 et 8,28 au cours de la période de Janvier 2020. La moyenne s'établit à 7,57 avec un écart type de 0,38 et un coefficient de variation de 5,12%.

En revanche, pour la période de Juin 2021, les valeurs de pH se situent entre 7,37 et 7,64. L'écart type est de 0,09, avec une moyenne de 7,47 et un coefficient de variation notablement plus élevé, soit 31,21 %.

Pendant la période de Juin 2021, les analyses des eaux dans la zone en question montrent que le pH tend vers la neutralité à l'alcalinité dans la majorité des sites étudiés, avec des valeurs variant de 7,37 (forage F1) à 7,64 (forage F2).

**Tableau 57:** Statistique descriptive du pH ((Janvier, 2020 et Juin, 2021).

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
<b>pH Min</b>	7,17	7,37
<b>pH Max</b>	8,28	7,64
<b>pH moyenne</b>	7,57	7,47
<b>Ecart- type</b>	0,38	0,09
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	5,12	1,21
<b>Normes (OMS)</b>	6,5-8,50	

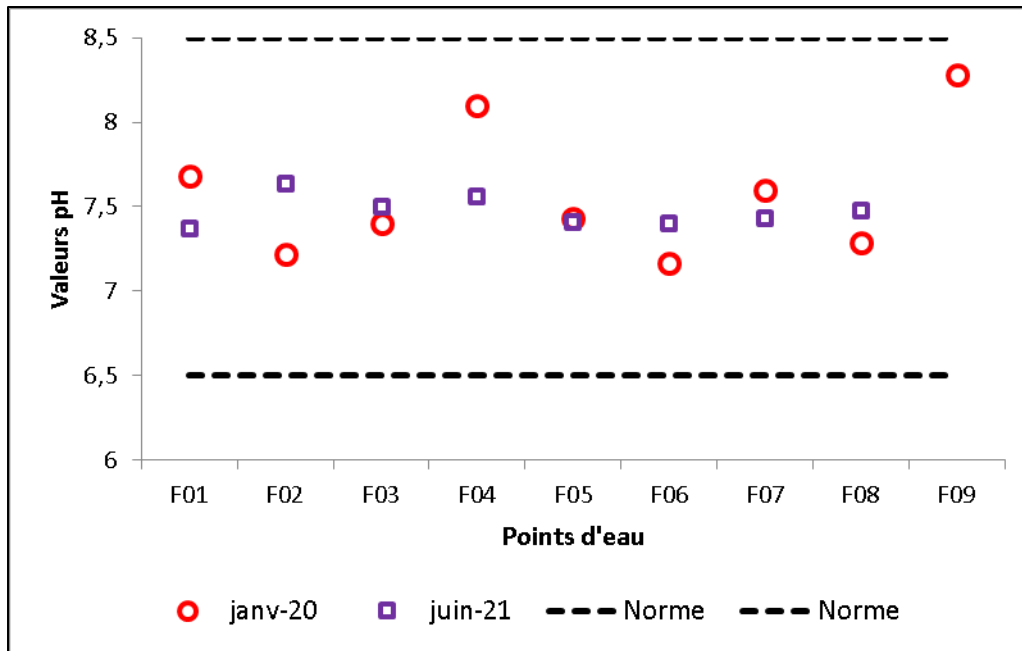


Fig. N° 73 : Variation de la température dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

➤ **La conductivité électrique CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Les valeurs de la conductivité de la campagne de Janvier 2020 sont variées entre de 540 à 1479  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avec une moyenne de 802,55, un écart types de 272, 41  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et un Cv de 33,94 % mais les valeurs de la campagne de Juin 2021 sont varient de 605 à 788  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , un écart type de 56,51  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , un Cv de 8,48 % et une moyenne de 665,87  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Les mesures de conductivité enregistrées en janvier 2020 montrent des écarts significatifs par rapport à la recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé, qui préconise une valeur de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Selon le graphique, la conductivité la plus élevée a été enregistrée à 1479  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au niveau du forage (F7), situé dans la région d'El Fedjoudj et la valeur la plus faible est observée au niveau du forage (F5) dans la région de Héliopolis avec une valeur de 722  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En Juin 2021, on a observé la plus haute valeur de conductivité électrique dans le forage numéro 01 à Hammam Bradaa, atteignant 788  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En revanche, la valeur la plus basse a été enregistrée dans le forage numéro 08 à Héliopolis, avec seulement 605  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Il est important de noter que toutes les valeurs de conductivité électrique analysées pour ces forages étaient dans les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

**Tableau 58** : Statistique descriptive de la conductivité électrique ((Janvier, 2020 et Juin, 2021).

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
CE Min	540	605
CE Max	1479	788
CE moyenne	802,55	665,87
Ecart- type	272,41	56,511
Coefficient de variation (Cv%)	33,94	8,48
Normes (OMS)	1500	

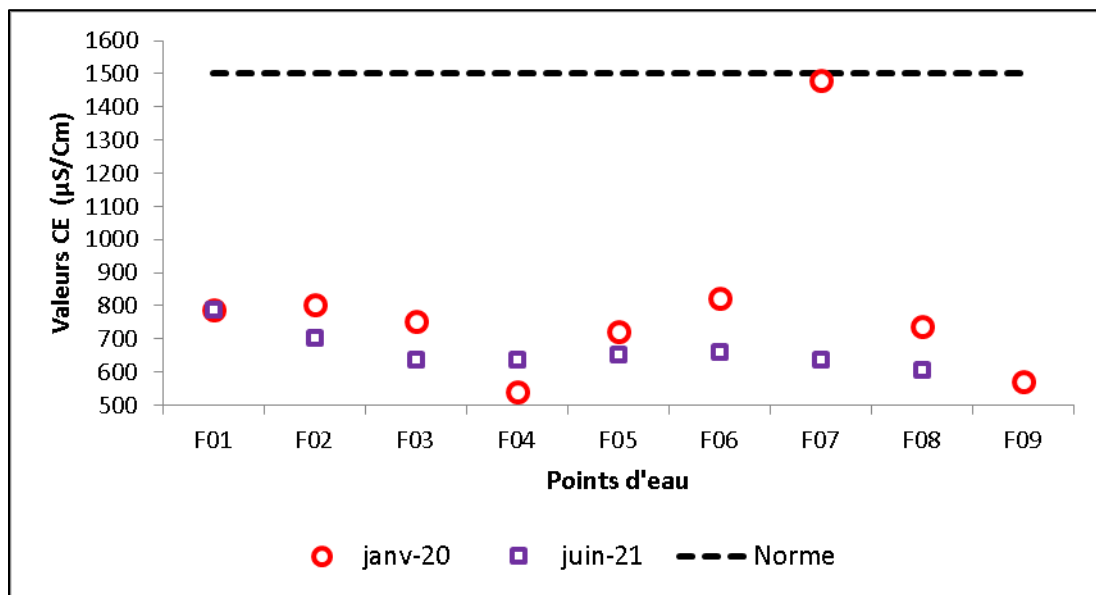


Fig. N° 74 : Variation de la conductivité dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

## 2. Paramètres chimiques mesurés au laboratoire

### ➤ Calcium (Ca<sup>2+</sup>)

En Janvier 2020, les concentrations en Ca<sup>2+</sup> ont oscillé entre 74,49 mg/l et 189,83 mg/l, avec une moyenne de 110,09 mg/l. L'écart type était de 31,94 mg/l, et le coefficient de variation s'élevait à 29,01 %. En Juin 2021, les concentrations en Ca<sup>2+</sup> ont varié de 92,53 mg/l à 106,53 mg/l, avec une moyenne de 99,60 mg/l. Le coefficient de variation était de 4,65 %, et l'écart type était de 4,64 mg/l.

**Tableau 59** : Statistique descriptive du calcium (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
<b>Ca<sup>2+</sup> Min</b>	74,49	92,53
<b>Ca<sup>2+</sup> Max</b>	189,83	106,53
<b>Ca<sup>2+</sup> moyenne</b>	110,09	99,60
<b>Ecart- type</b>	31,94	4,64
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	29,01	4,65
<b>Normes (OMS)</b>	200	

Tous les échantillons d'eau prélevés des forages de la nappe profonde au cours du mois de Janvier 2020 et le mois de Juin 2021 présentent des concentrations en dessous des seuils recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé (200 mg/l) pour l'eau potable.

La très forte valeur est observée au niveau des forages (F01), localisé dans la région d'Héliopolis et (F07) avec une valeur de 189,83 mg/l, située dans la région d'El Fedjoudj.

Les principales sources de calcium dans l'eau potable sont les carbonates de calcium (présents dans des roches telles que le calcaire), les sulfates de calcium et les fluorures de calcium, ainsi que les caractéristiques géologiques de la région, influent sur la concentration de calcium dans l'eau.

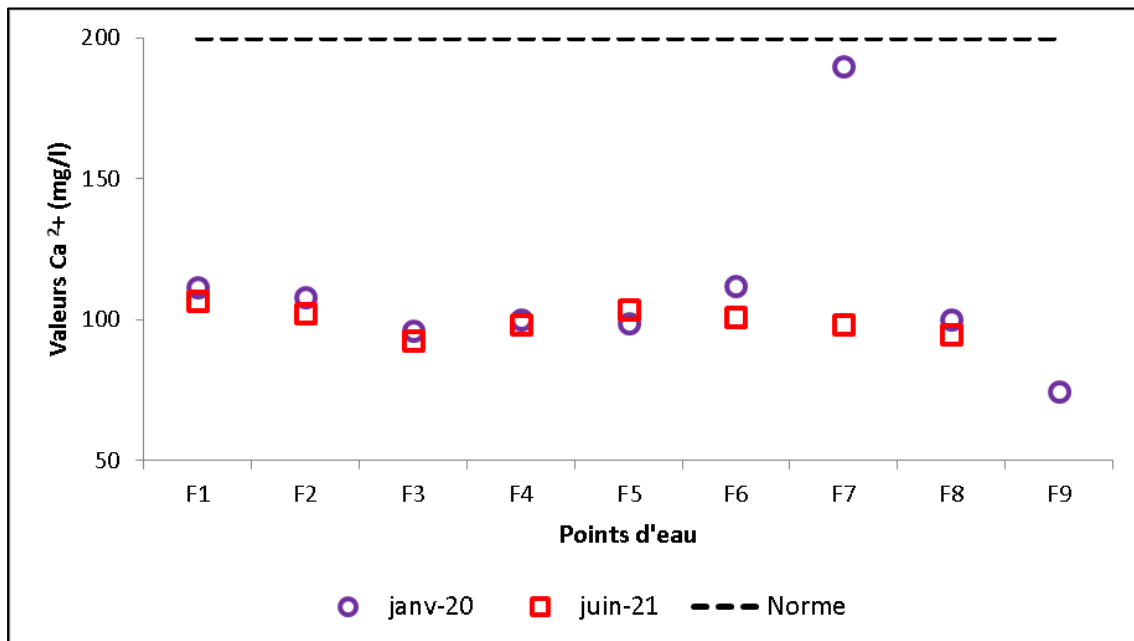


Fig. N° 75 : Variation du calcium (Ca<sup>2+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

➤ **Magnésium (Mg<sup>+2</sup>)**

En 2020, les concentrations de magnésium variaient de 23,81 mg/l à 62,22 mg/l, avec une moyenne de 33,31 mg/l, un écart type de 11,34 mg/l et un coefficient de variation de 34,06 %.

En 2021, les niveaux de magnésium se situaient entre 21,29 mg/l et 34,75 mg/l, avec une moyenne de 28,81 mg/l, un écart type de 4,05 mg/l et un coefficient de variation de 14,08 %.

**Tableau 60** : Statistique descriptive du magnésium (Janvier, 20210 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
Mg <sup>2+</sup> Min	23,81	21,29
Mg <sup>2+</sup> Max	62,22	34,75
Mg <sup>2+</sup> moyenne	33,315	28,81
Ecart- type	11,34	4,05
Coefficient de variation (Cv%)	34,06	14,08
Normes (OMS)	30	

Pendant l'année 2020 et 2021, il est observé que, dans cette zone d'étude, les concentrations en Mg<sup>2+</sup> restent en dessous de la norme de potabilité établie par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) de 30 mg/l, à l'exception de quelques forages, où les concentrations dépassent la recommandation de l'OMS pour les eaux de la nappe profonde. Les niveaux les plus bas de Mg<sup>2+</sup> sont relevés dans le forage (F05), avec une valeur de 23,81 mg/l.

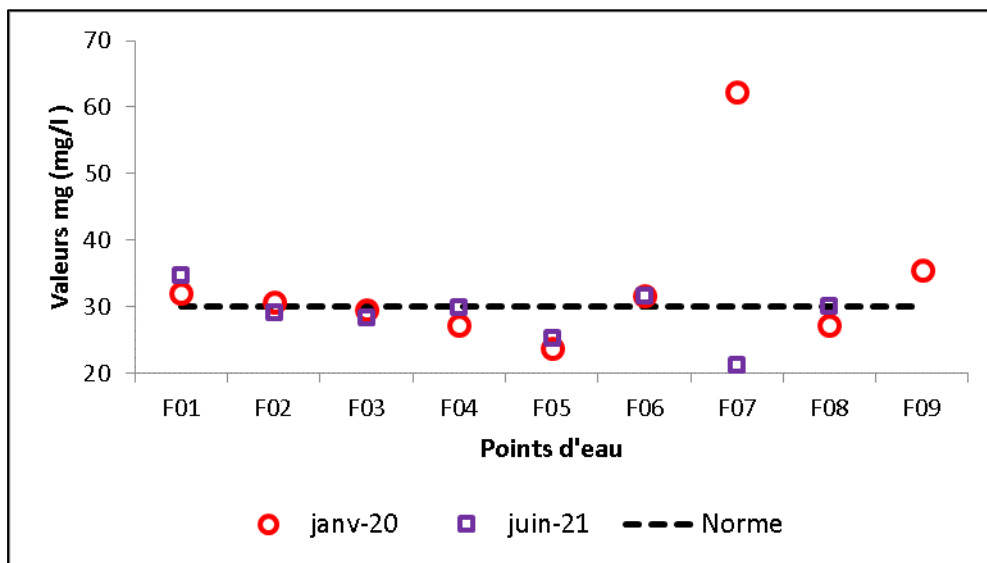


Fig. N° 76 : Variation du magnésium (Mg<sup>2+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

➤ **Sodium (Na<sup>+</sup>)**

En 2020, les concentrations de sodium ont varié de 10 mg/l à 14 mg/l, avec une moyenne de 12,05 mg/l, un écart type de 1,23 mg/l et un coefficient de variation de 10,25 %. En 2021, les niveaux de sodium ont oscillé entre 12 mg/l et 26,50 mg/l, avec une moyenne de 15,87 mg/l, un écart type de 6,27 mg/l et un coefficient de variation de 39,54 %.

**Tableau 61** : Statistique descriptive du sodium (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
Na <sup>+</sup> Min	10	12
Na <sup>+</sup> Max	14	26,50
Na <sup>+</sup> moyenne	12,05	15,87
Ecart- type	1,23	6,27
Coefficient de variation (Cv%)	10,25	39,54
Normes (OMS)	200	

Pendant la campagne de Janvier 2020, on relève la plus basse concentration de sodium au forage (F03), situé dans la région d'El Fedjoudj, avec une valeur de 10 mg/l. À l'inverse, la concentration la plus élevée est enregistrée au forage (F02) à Hammam Bradaa, avec 14 mg/l. Au cours de la période de Juin 2021, les concentrations les plus faibles de sodium sont enregistrées aux forages (F05), (F07) et (F08), toutes trois affichant une valeur de 12 mg/l. En revanche, la concentration la plus élevée est observée au forage (F02), avec une concentration de 26,5 mg/l.

Il est important de souligner que ces valeurs restent dans les normes de potabilité recommandées par l'OMS, fixées à 200 mg/l.

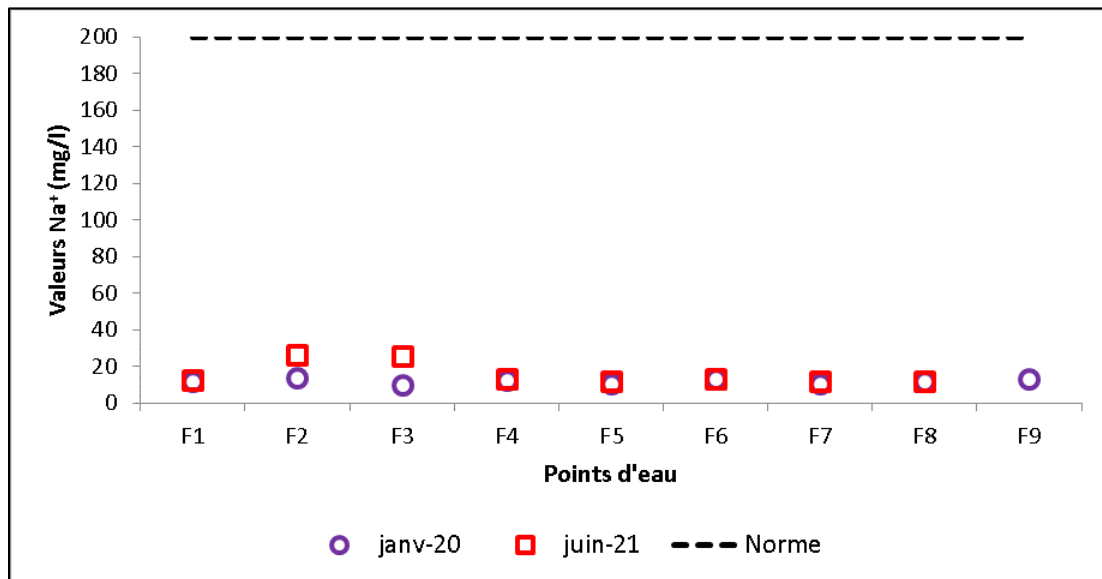


Fig. N°77 : Variation du sodium (Na<sup>+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

➤ **Potassium (K<sup>+</sup>)**

Au cours de la campagne de Janvier 2020, les concentrations en potassium ont varié de 1,20 mg/l à 1,90 mg/l, avec une moyenne de 1,53 mg/l. L'écart type s'est établi à 0,28 mg/l, et le coefficient de variation était de 18,44 %. En revanche, lors de la campagne de 2021, les teneurs en K<sup>+</sup> ont oscillé entre 1,10 mg/l et 1,65 mg/l, avec une moyenne de 1,41 mg/l. L'écart type s'est chiffré à 0,20 mg/l, et le coefficient de variation était de 14,62 %.

**Tableau 62** : Statistique descriptive du potassium (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
<b>K<sup>+</sup> Min</b>	1,2	1,10
<b>K<sup>+</sup> Max</b>	1,90	1,65
<b>K<sup>+</sup> moyenne</b>	1,53	1,41
<b>Ecart- type</b>	0,28	0,20
<b>Coefficient de variation (Cv%)</b>	18,44	14,62
<b>Normes (OMS)</b>	10	

Le graphique illustrant les fluctuations des niveaux de potassium (K<sup>+</sup>) dans les eaux de la zone examinée en Janvier 2020 et Juin 2021, met en lumière que la majorité des échantillons prélevés affiche des concentrations en potassium dans la norme fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui est de 10 mg/l.

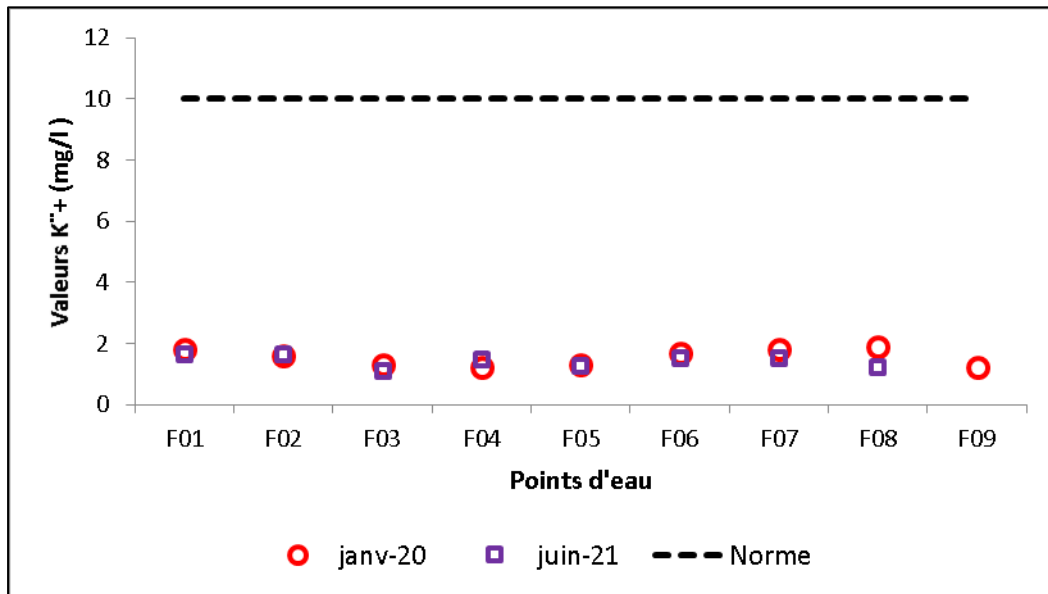


Fig. N°78 : Variation du potassium (K<sup>+</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin, 2021).

➤ **Chlorures (Cl)**

Lors de la campagne de Janvier 2020, les niveaux de chlorures dans les eaux de la nappe profonde varient de 42,60 mg/l à 170,40 mg/l. Le forage (F06) enregistre la concentration la plus basse à 42,60 mg/l, tandis que le forage (F07) présente la concentration la plus élevée à 170,40 mg/l. La moyenne des teneurs en chlorures est de 62,48 mg/l, avec un écart type de 40,75 mg/l. Le coefficient de variation est de 65,22%.

En revanche, lors de la campagne de Juin 2021, les concentrations en chlorures montrent une variation plus resserrée, s'étendant de 35,50 mg/l à 42,40 mg/l. La moyenne s'établit à 36,36 mg/l, avec un écart type de 2,43, ce qui induit un coefficient de variation de 6,70 %. On

remarque une concentration particulièrement élevée de 42,4 mg/l au niveau du forage (F04), tandis que le forage (F05) présente une concentration plus basse, mesurée à 35,5 mg/l dans la région d'Héliopolis.

**Tableau 63** : Statistique descriptive des chlorures (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
Cl <sup>-</sup> Min	42,60	35,50
Cl <sup>-</sup> Max	170,40	42,40
Cl <sup>-</sup> moyenne	62,48	36,36
Ecart- type	40,75	2,43
Coefficient de variation (Cv%)	65,22	6,70
Normes (OMS)	250	

Le graphique ci-dessous, qui représente les deux périodes de Janvier 2020 et Juin 2021, montrent que la plupart des points d'échantillonnage présentent des concentrations en chlorures dans la limite recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), qui est de 250 mg/l.

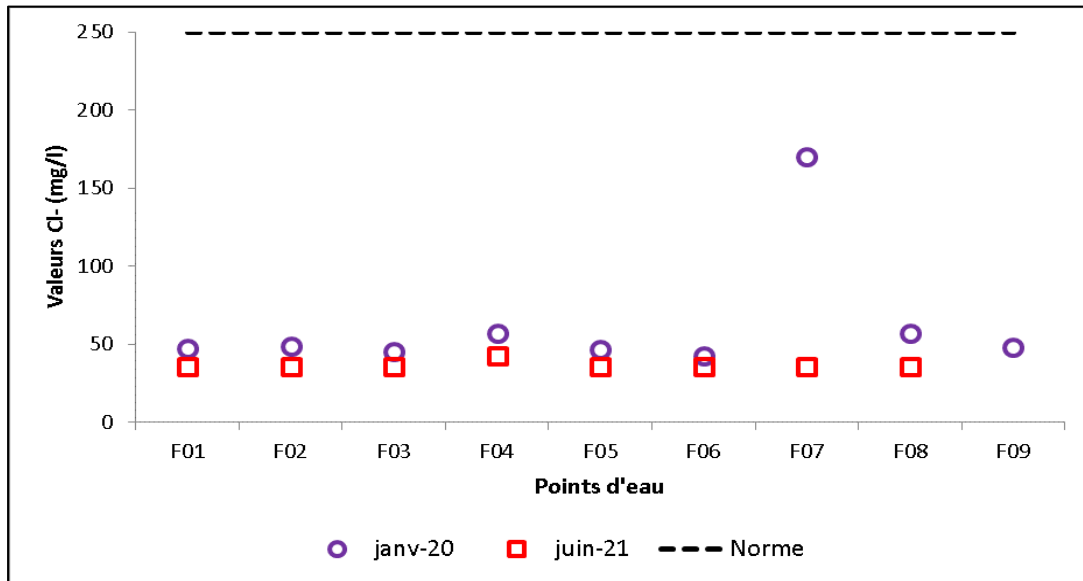


Fig. N° 79 : Variation des chlorures (Cl<sup>-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

➤ **Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Lors de la première campagne en 2020, les concentrations en sulfates varient de 0,30 mg/l à 318 mg/l. En moyenne, la concentration en sulfates s'établit à 105,42 mg/l, avec un écart type de 97,80 mg/l. Le coefficient de variation atteint 92,77 %.

Pour la seconde campagne menée en 2021, les valeurs de sulfates oscillent entre 16,50 mg/l et 196 mg/l. La moyenne des concentrations est de 82,06 mg/l, avec un écart type de 64,40 mg/l. Le coefficient de variation est de 78,48 %.

**Tableau 64** : Statistique descriptive des sulfates (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Min	0,30	16,50
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Max	318	196
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> moyenne	105,42	82,06
Ecart- type	97,80	64,40
Coefficient de variation (Cv%)	92,77	78,48
Normes (OMS)	250	

Durant la première campagne en Janvier 2020, le forage (F05) affiche une concentration minimale de 0,30 mg/l, tandis que le forage (F07) présente une concentration élevée de 318 mg/l, excédant les normes établies par l'OMS. Il est à souligner que les concentrations en sulfates demeurent en deçà des normes fixées par l'OMS, qui s'élèvent à 250 mg/l.

La concentration la plus élevée a été relevée au niveau du forage (F01), tandis que la plus basse, enregistrée dans le forage (F04), était de 16,50 mg/l. Il est important de noter que tous les échantillons d'eau prélevés en Juin 2021 respectent les normes établies par l'OMS.

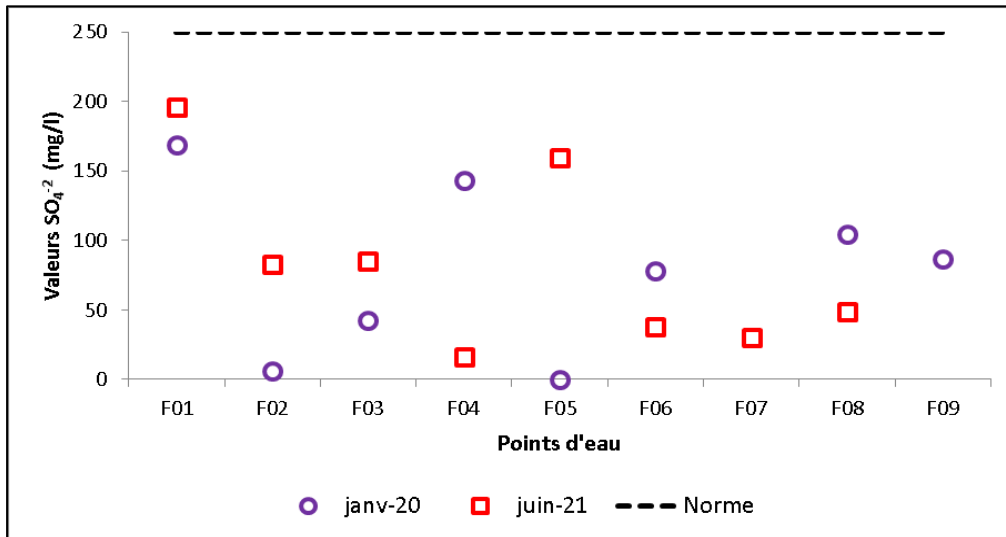


Fig. N°80 : Variation des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

➤ **Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :**

En Janvier 2020, les concentrations en bicarbonates ont fluctué entre 341,60 mg/l et 420,90 mg/l, démontrant une grande variabilité avec une moyenne de 369,21 mg/l. L'écart type de 25,19 mg/l indique une dispersion significative, avec un coefficient de variation de 6,824 %.

En revanche, en Juin 2021, les concentrations en bicarbonates ont été observées dans une plage allant de 329,50 mg/l à 339,16 mg/l. L'écart type était de 3,12 et le coefficient de variation de 0,93 %, avec une moyenne de 334,21 mg/l.

Tableau 65 : Statistique descriptive des bicarbonates (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin 2021
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Min	341,60	329,50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Max	420,90	339,16
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> moyenne	369,21	334,21
Ecart- type	25,19	3,12
Coefficient de variation (Cv%)	6,82	0,93
Normes (OMS)	600	

L'analyse de ce graphique indique que les concentrations en bicarbonates de la nappe profonde échantillonnées en Janvier 2020 et Juin 2021 ne dépassent pas les normes établies par l'OMS. En se basant sur le graphique, on constate que les concentrations les plus élevées ont été enregistrées dans les forages (F07) avec une valeur de 420,90 mg/l et (F02), atteignant 339,16 mg/l, tandis que les plus faibles concentrations en bicarbonates ont été observées dans le forage (F09) avec une valeur de 341,60 mg/l et (F06), avec une valeur de 329,50 mg/l.

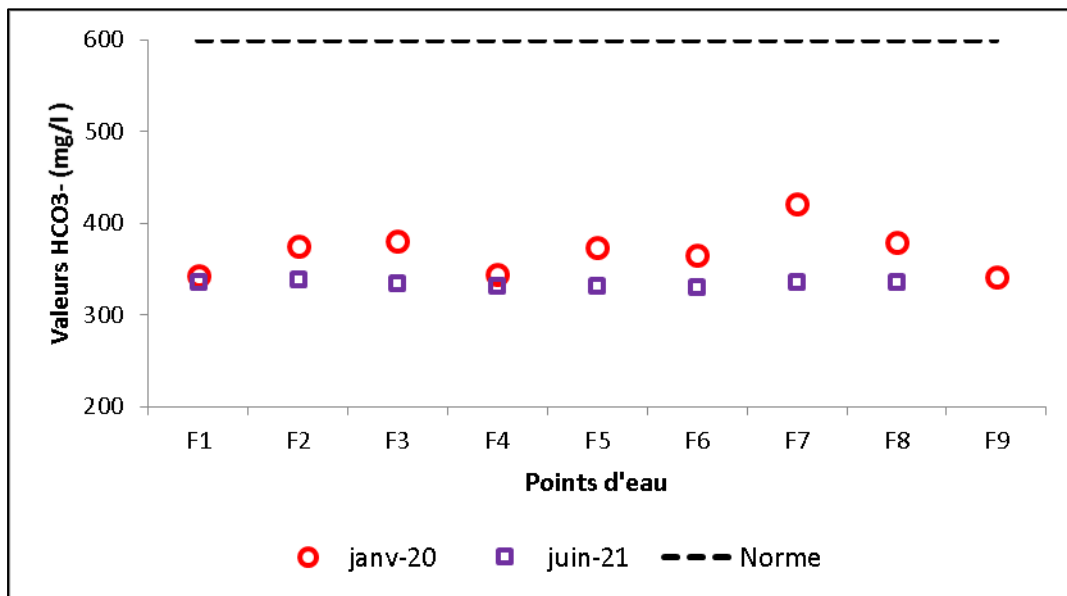


Fig. N° 81 : Variation des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

### 3. Paramètres de pollutions (nutritifs)

#### ➤ Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Au cours de la campagne menée en Janvier 2020, les échantillons d'eau de la nappe profonde montrent des concentrations en nitrates dans la norme établie par l'OMS, fixée à 50 mg/l. Ces valeurs fluctuent entre 0,925 mg/l et 4,74 mg/l, avec une moyenne de 2,02 mg/l. L'écart type est de 1,17 et le coefficient de variation s'élève à 58,08 %. En revanche, la campagne du mois de Juin 2021 montre que les concentrations varient de 1,25 à 3,10 mg/l, un écart type de 0,63, une moyenne de 2,22 et un coefficient de variation égal à 28,47 %.

**Tableau 66** : Statistique descriptive des nitrates (Janvier, 2020 et Juin, 2021)

Périodes	Janvier 2020	Juin2021
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Min	0,92	1,25
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Max	4,74	3,10
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> moyenne	2,02	2,22
Ecart- type	1,17	0,63
Coefficient de variation (Cv%)	58,08	28,47
Normes (OMS)	50	

L'analyse de ce graphique indique que les concentrations en nitrates, prélevées en Janvier 2020 et Juin 2021, sont inférieures aux normes établies par l’OMS, qui est de 50 mg/l. En examinant le graphique, on remarque que la concentration la plus basse est observée au niveau du forage (F01) situé à Hammam Bradaa.

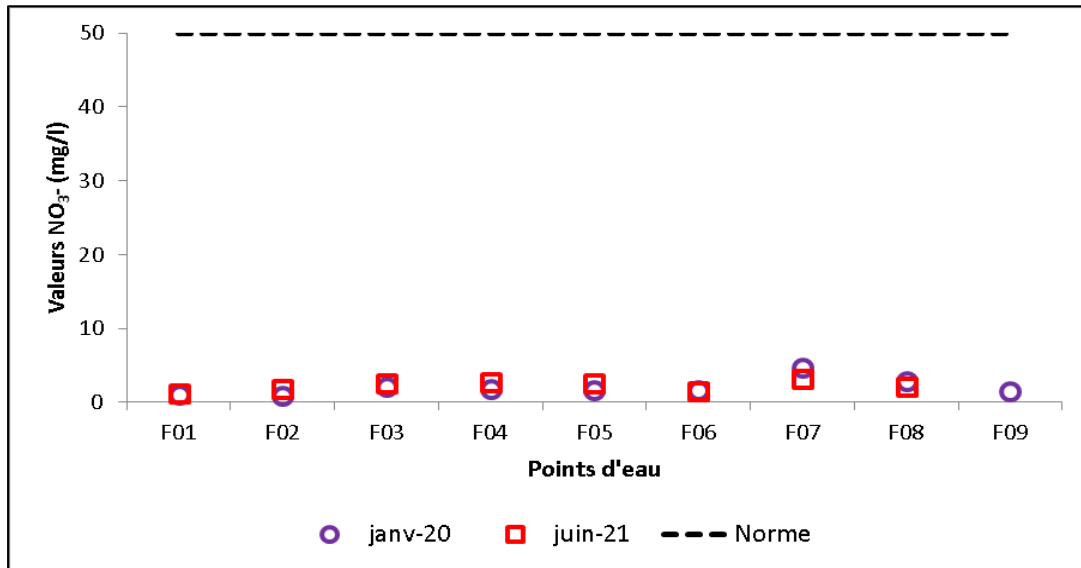


Fig. N° 82 : Variation des nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans les eaux de la zone étudiée (Janvier, 2020 et Juin 2021).

## V. Interprétation des résultats

### 1. Identification des faciès chimiques

Pour déterminer les faciès chimiques des eaux, on peut utiliser des diagrammes tracés à partir des résultats d'analyses chimiques de l'eau. Ces diagrammes sont également connus sous le nom de diagrammes hydrochimiques ou trilineaires. Ils permettent de visualiser la répartition des principaux ions et éléments chimiques dans l'eau.

Les principales méthodes pour identifier les faciès chimiques des eaux incluent :

- ✓ Formule ionique
- ✓ Diagramme Piper

Ces méthodes graphiques aident à identifier les faciès chimiques des eaux, ce qui est essentiel pour évaluer la qualité de l'eau, comprendre les sources potentielles de pollution et prendre des mesures appropriées pour la protection des ressources en eau et de l'environnement.

### A.Nappe superficielle

#### 1.1.Formule ionique

La formule ionique est obtenue en classant de gauche à droite par ordre décroissant les quantités en réaction des anions puis celles des cations. Le faciès correspond à la combinaison entre l'anion dominant avec le cation dominant.

Les résultats obtenus permettent de distinguer les faciès qui figurent dans le **tableau 67** suivant :

**Tableau 67** : Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique - Basses eaux 2021-

Faciés chimiques	Formules ioniques		Puits	Pourcentage
	r anions	r cations		
Chloruré calcique	$Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P1	6,25 %
Bicarbonaté calcique	$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P2 P3	87,5%
	$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P4	
	$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P5 P8 P11 P14 P15 P16	
	$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P18 P19	
	$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P20	
Sulfaté calcique	$SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^- > NO_3^-$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	P10	6,25 %

D'après le tableau ci-dessus, les résultats de la première campagne réalisée au mois de Septembre 2021, indiquent les proportions suivantes pour les différents faciès géologiques :

- Faciès bicarbonaté calcique : 87,5%
- Faciès sulfaté calcique : 6,25%
- Faciès chloruré calcique : 6,25%

Cela indique que la majorité des échantillons collectés pendant cette campagne présentent un faciès bicarbonaté calcique, tandis que 13,5% est partagé à égalité entre le faciès chloruré calcique et le faciès sulfaté calcique.

**Tableau 68** : Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique - Hautes eaux 2022-

Faciès chimiques	Formules caractéristiques		puits	Pourcentage (%)
	r anions	r cations		
Sulfaté calcique	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P1	61,11 %
	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P2 P3 P4	
	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P6 P7 P9	
	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P14 P16	
	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P18	
	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P19	
Chloruré calcique	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P8 P16	16,66 %
Bicarbonaté calcique	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P5	22,22 %
	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P10 P12 P13	
	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	P15	

Le tableau 70 ci-dessus, montre que les résultats de la deuxième campagne de collecte d'échantillons réalisée en mai 2022 indiquent les proportions suivantes pour les différents faciès géologiques :

- Faciès sulfaté calcique : 61,11%
- Faciès bicarbonaté calcique : 22,22%
- Faciès chloruré calcique : 16,66%

Cela indique que la majorité des échantillons collectés pendant cette campagne présentent un faciès sulfaté calcique, suivi par le faciès bicarbonaté, et enfin, le faciès chloruré calcique.

#### V.A.2.Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est une méthode couramment utilisée pour classer l'eau et analyser les tendances de la qualité de l'eau en fonction de différents groupes d'échantillons. Les principales espèces ioniques présentes dans la plupart des eaux naturelles comprennent des cations tels que Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ) ainsi que des anions comme chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (Selmane.T, 2023).

Il permet de distinguer les différentes compositions chimiques des eaux et d'identifier les faciès hydrochimiques dominants.

#### 🚦 Classification de Piper (campagnes des basses eaux 2021, et hautes eaux 2022)

Le report des résultats des analyses des eaux de la nappe superficielle de Hammam Bradaa sur le diagramme triangulaire de Piper (deux périodes), met en évidence l'incidence de la période de prélèvement sur le type de faciès. On remarque que durant la période des hautes eaux, les eaux sont de type chloruré sulfaté calcique et magnésiennes, alors, que les points caractéristiques des basses eaux migrent légèrement vers le faciès bicarbonaté. Nous pensons que pendant les hautes eaux la nappe est plus alimentée par les précipitations qui une fois infiltrées dans la nappe elles sont influencées par la lithologie de l'aquifère et donc elles sont de type évaporitique ; La formule ionique confirme cette tendance (78% des échantillons sont de type évaporitique). Par contre en basses eaux, la nappe sera alimentée par les eaux de la nappe profonde et les eaux tendent légèrement vers le faciès bicarbonaté qui est caractéristique de la nappe profonde ; la formule ionique indique que durant cette période 87% des points contrôlés acquièrent les caractéristiques du faciès bicarbonaté : ceci suggère, probablement, un contact entre les deux nappes qui se fait du bas vers le haut, notamment en période des basses eaux.

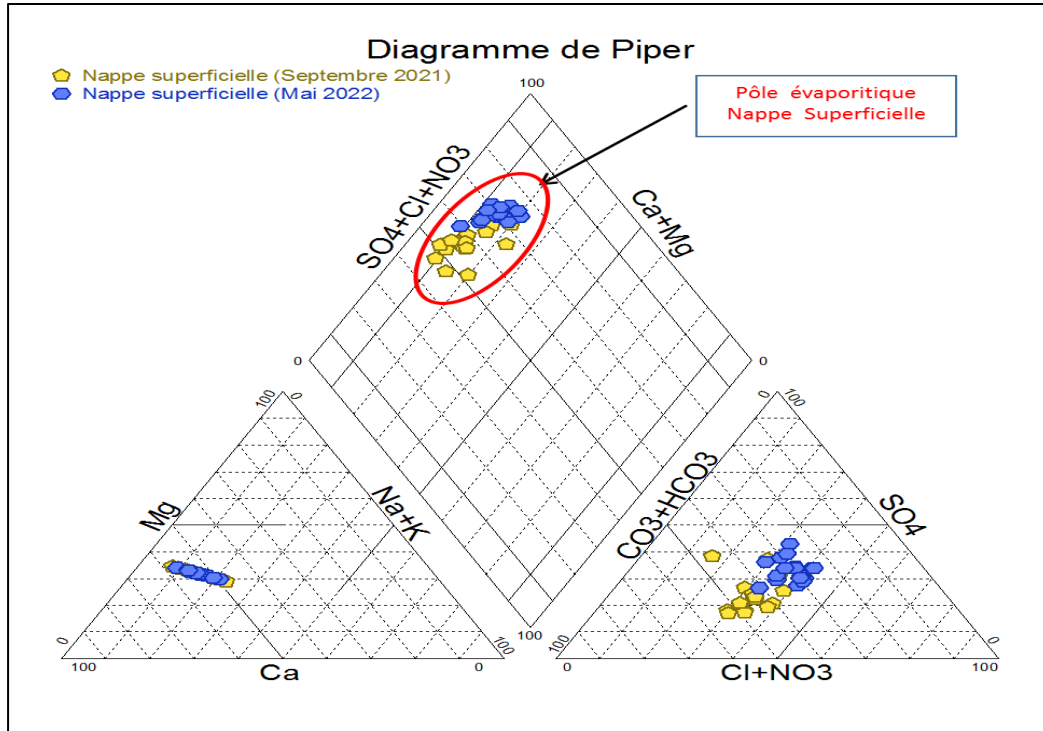


Fig. N°83 : Représentation des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper des basses et hautes eaux 2021.

## B.Nappe profonde

### 1. Formule ionique

Tableau 69 : Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique – Janvier 2020-

Faciès chimiques	Formules caractéristiques		Forages	Pourcentage
	r anions	r cations		
Bicarbonaté calcique	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F01	100,00 %
	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F02 F03	
	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F04	
	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F05	
	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F06 F07 F08 F09	

**Tableau 70** : Faciès chimiques des eaux selon la formule ionique – Juin 2021-

Faciès chimiques	Formules caractéristiques		Faciès chimiques	Pourcentage
	r anions	r cations		
Bicarbonaté calcique	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F01 F02 F03	100 %
	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F04	
	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F05	
	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F06 F07	
	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	F08	

Les tableaux présentés ci-dessus présentent les résultats de deux campagnes menées en janvier 2020 et juin 2021 dans les nappes de Hammam Bradaa, El Fedjoudj et Héliopolis. Ces données révèlent que la majorité des échantillons présentent un faciès bicarbonaté calcique, à hauteur de 100 %.

### V.B.2. Diagramme de Piper

#### Classification de Piper (campagnes de Janvier 2020, et Juin 2021)

L'analyse des représentations graphiques du diagramme durant la période du mois de Janvier 2020 et le mois de juin 2021 nous conduit à tirer les conclusions suivantes :

En examinant le triangle des cations, on observe que le calcium prédomine par rapport au magnésium et au sodium.

Dans le triangle des anions, les hydrogénocarbonates sont les composants les plus abondants, tandis que les sulfates et les chlorures sont moins fréquents dans les eaux des forages analysés.

En ce qui concerne le diagramme losangique, il révèle un schéma d'évolution chimique spécifique. Les échantillons de forages des deux campagnes en 2020 (F01, F02, F03, F04, F05, F06, F08 et F09) et en 2021 (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 et F8) se situent au centre du petit losange, ce qui indique un faciès chimique bicarbonaté calcique et magnésien, riche en calcium et magnésium. Cela suggère une dissolution des formations carbonatées.

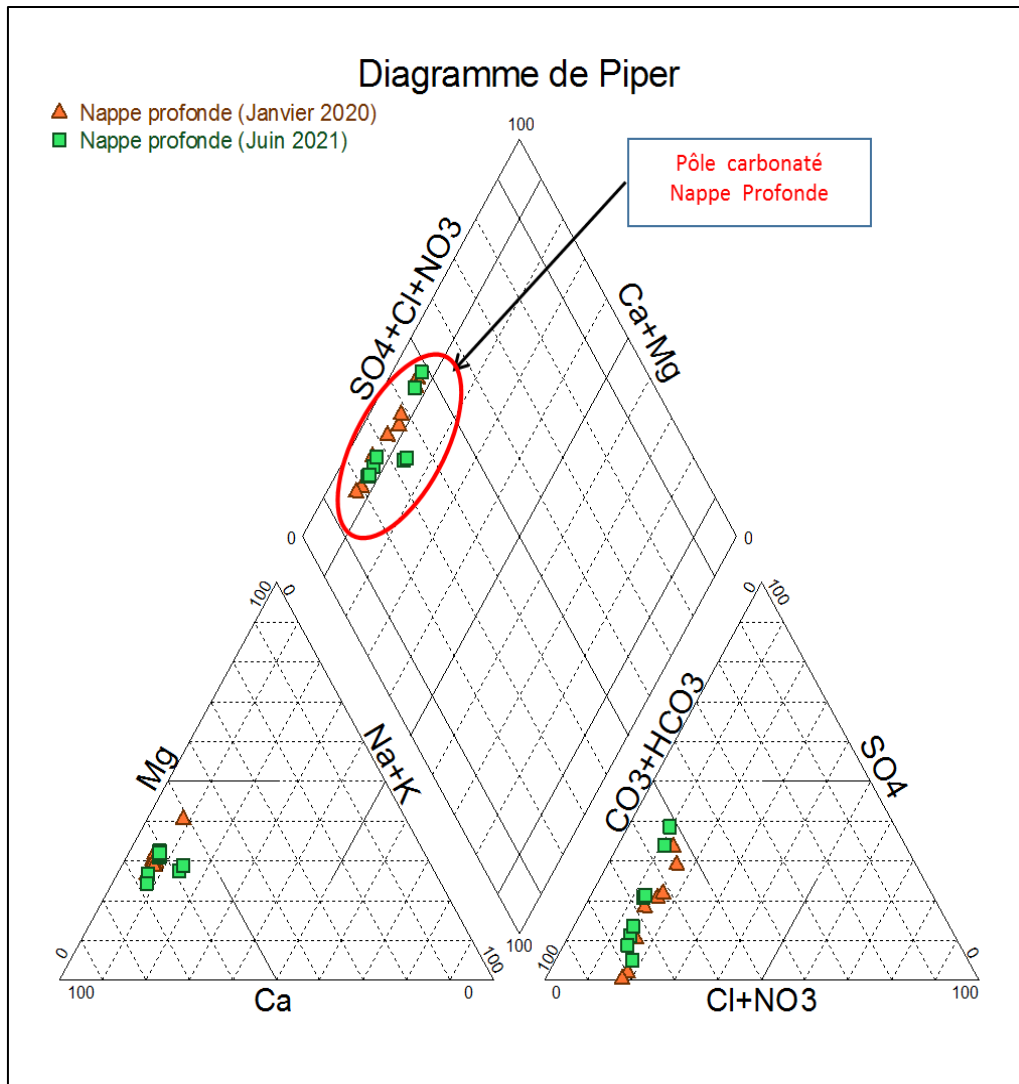


Fig. N°84 : Représentation des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper de la nappe profonde durant les deux périodes Janvier 2020 et Juin 2021.

## V.2.Processus Hydrogéochemiques et origine de minéralisation

En général, les interactions eau-roche sont les facteurs les plus importants qui affectent la composition géochimique observée des eaux souterraines (Appelo et Willemssen, 1987) les changements géochimiques des concentrations d'ions dans les eaux souterraines peuvent être mieux compris s'ils peuvent être visualisés le long d'une coordonnée X-Y (Güler et al. 2002). Les données hydrochimiques ont été traitées et portées sur des diagrammes de dispersion tels que les diagrammes de composition ionique bivariés pour faciliter l'analyse des tendances et pour identifier et classer les processus et mécanismes géochimiques du système aquifère dans la zone d'étude.

### V.2.1. Diagramme de Gibbs

Le diagramme de **Gibbs (1970)** permet de comprendre les mécanismes naturels de la chimie des eaux souterraines. Les mécanismes hydrochimiques peuvent être divisés en trois classes : évaporation, précipitation et interaction eau-roche (**Gibbs 1970**). En général, la présence d'une concentration élevée de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  indique une interaction eau-roche, tandis qu'une concentration élevée de  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  révèle des processus d'évaporation.

Le diagramme de Gibbs c'est un graphique de  $(\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}))$  et  $(\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-))$  vs. TDS, largement utilisé pour déterminer la relation entre les caractéristiques lithologiques d'un aquifère et sa composition en eau (**Reghais.A, 2023**).

Dans la présente étude, Le diagramme de Gibbs (figure ci-dessous basses eaux 2021 et hautes eaux 2022) de la nappe superficielle met en évidence une interaction entre les échantillons étudiés et les formations rocheuses, ce qui suggère une dissolution des minéraux évaporitiques tels que le gypse  $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$  et l'halite  $[\text{NaCl}]$ . Cette dissolution joue un rôle crucial dans la détermination de la composition chimique des eaux souterraines dans la région de Hammam Bradaa. L'interaction eau-roche reflète spécifiquement l'influence de la composition chimique de la roche sur celle de l'eau pendant son percolation sous la surface.

L'analyse des échantillons à l'aide du diagramme de Gibbs a révélé que les échantillons prédominants se situent dans les champs interaction eau roche, ce qui veut dire que les minéraux dissous dans les eaux étudiées n'ont pas atteint la saturation et donc ces eaux vont s'enrichir davantage en sels minéraux provoquant ainsi l'augmentation de la minéralisation durant leur parcours souterrain.

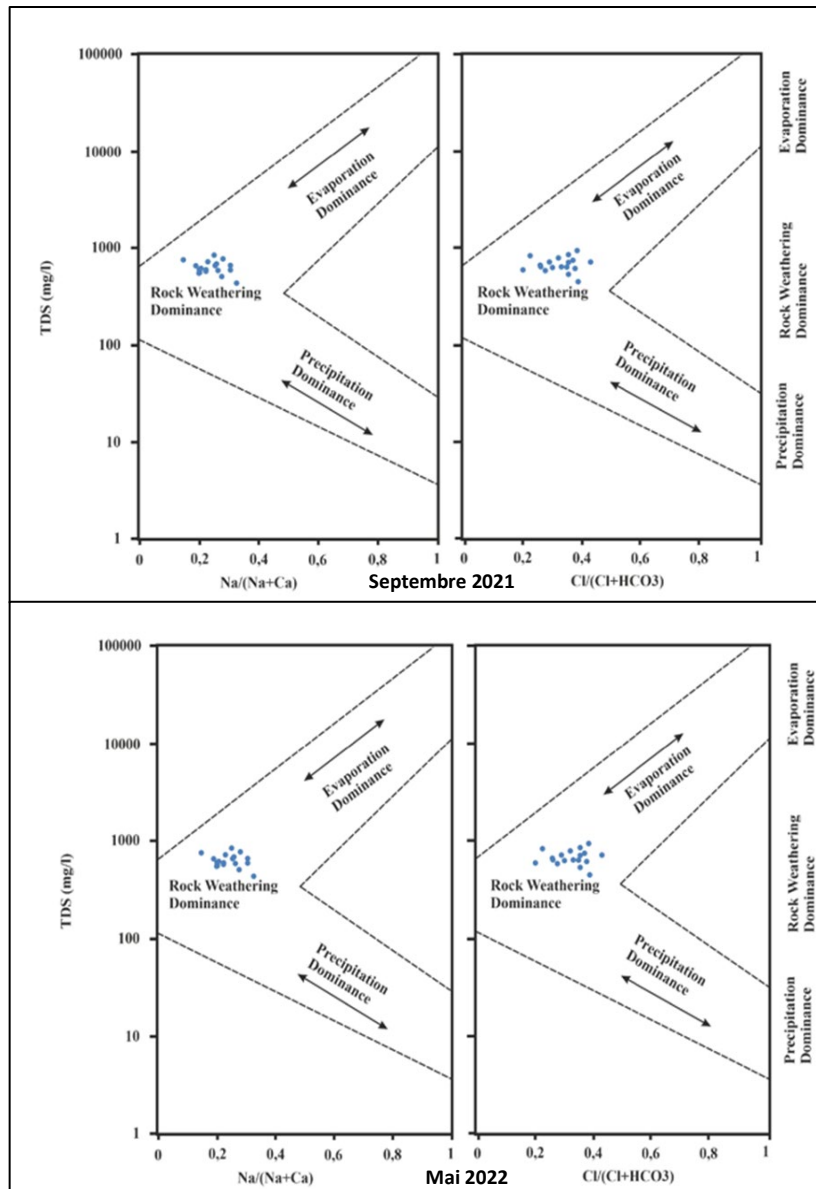


Fig. N°85 : Diagramme de Gibbs lors de deux campagnes de prélèvements dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa.

Les graphiques de rapports de Gibbs des échantillons d'eau souterraine de la nappe profonde lors des deux campagnes de prélèvement en janvier 2020 et juin 2021 sur les diagrammes de Gibbs peuvent fournir des informations sur l'importance relative de trois mécanismes naturels majeurs qui contrôlent la chimie de l'eau : la précipitation atmosphérique, l'altération des minéraux et l'évaporation avec cristallisation fractionnée.

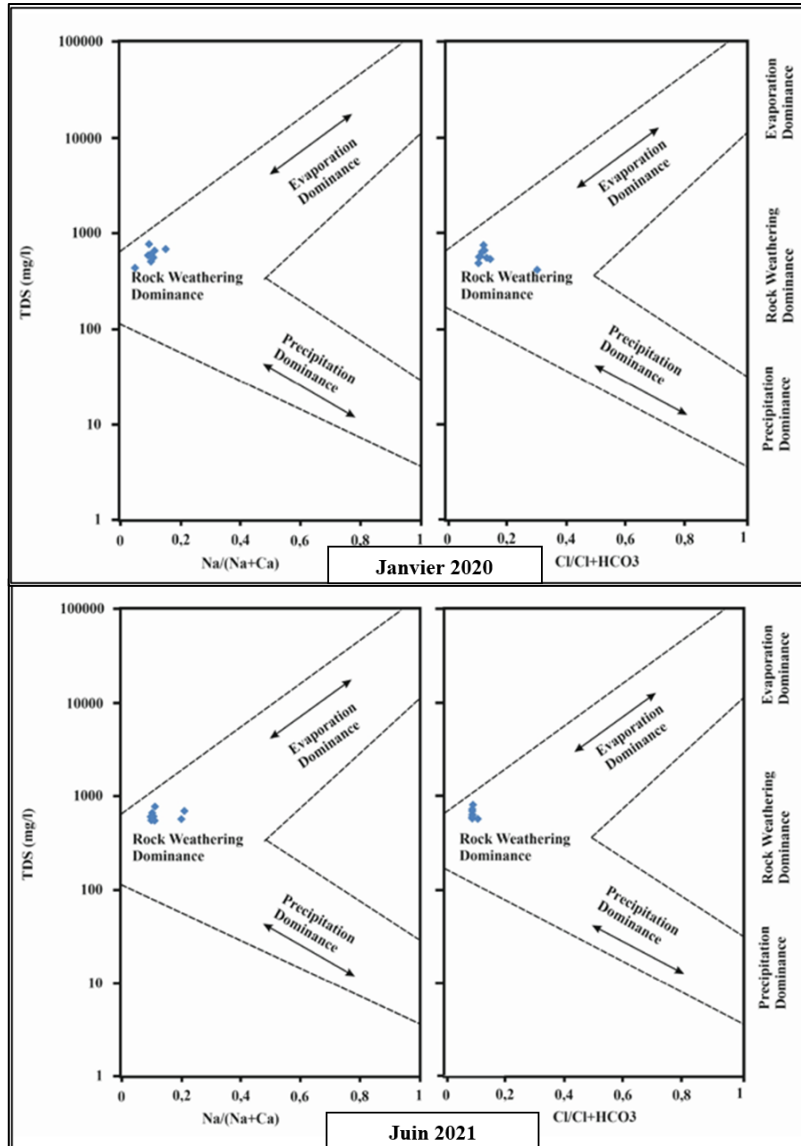


Fig. N°86 : Diagramme de Gibbs des deux campagnes : 2020 et 2021 de la nappe profonde.

Le diagramme de Gibbs montre que les échantillons d'eau souterraine analysés se situent dans la zone interaction eau-roche avec des valeurs de TDS inférieure à 1000 mg/l.

### V.3. Phénomènes modificateurs

#### V.3.1. Indice d'échange de base (I.E.B)

L'application de l'indice d'échange de base (IEB) se révèle utile pour mettre en lumière les altérations de la composition chimique de l'eau au fil de son parcours. L'IEB est défini comme le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature présents initialement dans l'eau. Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I.E.B = \frac{rCl - r(Na+K)}{rCl} \quad (67)$$

Lorsque l'indice d'échange de base (IEB) est négatif, cela indique que les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau subissent un échange avec les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  provenant des formations encaissantes.

Si l'IEB est positif, cela signifie que les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  présents dans l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  provenant des formations géologiques encaissantes.

Enfin, un IEB de 0 indique un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle de la formation géologique encaissantes.

**Tableau 71** : Statistique des indices d'échange de base dans les eaux de la nappe superficielle et profonde de Hammam Bradaa.

Statistique	Nappe superficielle		Nappe profonde	
	I.E.B (2021)	I.E.B (2022)	I.E.B (2020)	I.E.B (2021)
Minimum	0,02	0,63	0,80	-0,19
Maximum	3,05	3,52	2,35	0,69
Moyenne	1,55	1,84	1,45	0,30
Ecart-type (n-1)	0,80	0,70	0,53	0,30

D'après le tableau ci-dessus, les valeurs de l'indice d'échange de base (I.E.B) de la nappe superficielle et profonde sont positives, veut dire que  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  des formations encaissantes. A l'exception de quelques forages de la nappe profonde dans la campagne de Juin 2021 ou les résultats sont négatifs, ce qui suggère que les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau sont en réalité remplacés par les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  provenant des roches environnantes. L'échange de base est, en effet, plus fréquent dans la nappe superficielle dont la proportion de l'argile est très importante bien que variable dans l'aquifère correspondant, alors que dans l'aquifère profond les substances favorisant cet échange sont moins fréquentes.

#### V.4.Modélisation géochimique inverse

##### V.A.1.Indice de saturation (IS)

###### A. Nappe superficielle

Ce concept permet d'évaluer initialement la quantité de minéraux dissous dans les eaux souterraines en ce qui concerne certains minéraux spécifiques comme la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$ . En d'autres termes, il révèle la propension de ces minéraux à se dissoudre ou à se précipiter dans l'eau (Mouassa .S, 2017). Cette propriété est représentée par un indice qui se définit de la manière suivante :

$$IS = \text{Log} \frac{PAI}{K_s} \quad (68)$$

Où :

PAI : rapport d'activité ionique

Ks : produit de solubilité ;

**Si :**

IS<0 : la solution est sous-saturée par rapport au minéral considéré,

IS>0 : la solution est sursaturée au minéral avec une tendance à la précipitation,

IS=0 : la solution est en équilibre avec le minéral.

Donc 
$$PAI = Ks \quad (69)$$

Cependant, en tenant compte des possibles incertitudes dans les analyses chimiques et les mesures de pH qui influent sur le calcul de l'indice de saturation (IS), il est possible d'adopter la convention suivante, comme proposée dans des travaux antérieurs (Ousmane, 1988 ; Yao, 2009, Samaila Djoumaye DJAHADI 2021 ).

**Si**

IS < -0,5, cela indique que la solution est sous-saturée par rapport aux minéraux considérés.

-0,5 < IS < +0,5, cela signifie que la solution est à l'équilibre de saturation.

IS > +0,5, cela suggère que la solution est en état de sursaturation par rapport aux minéraux.

Dans le contexte de cette étude actuelle, les indices de saturation ont été calculés de manière automatisée à l'aide du logiciel Diagrammes, en utilisant la fonctionnalité Phreeqc (version 2.6.7).

**Tableau 72 :** Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines de la nappe superficielle (Basses eaux, 2021).

Minéral Stat	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	Dolomite	Aragonite	Calcite	Anhydrite	Gypse	Halite
	CaCO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Na Cl
<b>Min</b>	-0,97	-0,58	-0,44	-2,09	-1,87	-7,73
<b>Max</b>	2,42	1,11	1,25	-1,52	-1,3	-1,82
<b>Moy</b>	0,46	0,12	0,26	-1,83	-1,61	-6,80
<b>Ecart type</b>	1,01	0,50	0,51	0,15	0,15	1,54
<b>CV%</b>	232,94	425,19	192,44	-8,00	-9,06	-22,67

La détermination des indices de saturation des minéraux spécifiques (comme la calcite, l'aragonite, la dolomite, le gypse, l'anhydrite et l'halite) est une approche courante en géochimie et l'hydrogéologie.

« PHREEQC » est un programme de modélisation chimique qui permet de calculer les équilibres chimiques et les indices de saturation en fonction de la composition chimique de l'eau et des conditions géochimiques spécifiques.

D'après les valeurs des basses eaux, 2021 obtenues du tableau n° ci-dessus, les eaux de la nappe aquifère des régions de Héliopolis, El Fedjoudj et Guelaat Bousbaa, sont sous-saturés par rapport à l'halite, à l'anhydrite et au gypse.

Les minéraux **évaporitiques** présentent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés dans l'ensemble des échantillons analysés (**khedidja.A, 2016**). Les indices de saturation négatifs pour les minéraux évaporitiques (comme le gypse, l'anhydrite et l'halite) indiquent qu'ils sont sous-saturés par rapport à la composition chimique de l'eau. Cela signifie que les conditions chimiques de l'eau ne favorisent pas la précipitation de ces minéraux, et ils ont donc tendance à se dissoudre s'ils sont présents dans la roche environnante.

Les indices de saturation négatifs (-1,87 à -1,3 pour le gypse, -2,09 à -1,52 pour l'anhydrite, et -7,73 à -1,82 pour l'halite) indiquent que ces minéraux évaporitiques ont une forte tendance à se dissoudre dans l'eau souterraine. Plus l'indice de saturation est négatif, plus la probabilité de dissolution est élevée. Cela pourrait expliquer pourquoi ces minéraux évaporitiques ne précipitent pas en grande quantité dans l'eau souterraine, ce qui entraîne une dissolution qui contribue à l'augmentation de la concentration en ions correspondants dans l'eau.

La présence de l'halite (chlorure de sodium) avec des indices de saturation allant jusqu'à -7,73 suggère que cet élément peut être dissous de manière significative dans l'eau, ce qui peut contribuer à l'augmentation de la salinité des eaux analysées. La dissolution de l'halite peut jouer un rôle majeur dans la composition chimique et la salinité de l'eau souterraine.

Cette simulation confirme donc l'importance des roches évaporitiques dans l'enrichissement en éléments tels que le gypse, l'anhydrite et l'halite, ainsi que leur influence sur la salinité des eaux analysées. Cela fournit des informations précieuses sur les processus géochimiques en jeu dans l'aquifère et les interactions entre l'eau souterraine et la roche environnante.

Par ailleurs, les indices de saturation pour les minéraux **carbonatés** (calcite, dolomite et aragonite) se situent dans l'intervalle de -0,97 à +2,42, ce qui suggère qu'ils sont en effet sursaturés dans ces conditions. Cela signifie que les concentrations des ions nécessaires à la précipitation de ces minéraux sont présentes dans l'eau souterraine, et ils ont donc tendance à précipiter.

Les plages suivantes pour les indices de saturation :

- ✓ Calcite : de -0.4 à 1.25
- ✓ Dolomite : de -0.97 à 2.42
- ✓ Aragonite : de -0.58 à 1.11

Si l'état d'équilibre est considéré dans l'intervalle de -0.5 à +0.5, alors cela confirme que les trois minéraux carbonatés sont en état de sursaturation. Cette sursaturation indique que les conditions chimiques de l'eau souterraine sont favorables à la précipitation de ces minéraux. En particulier, la calcite et la dolomite ont des indices de saturation qui dépassent 0.5, ce qui indique une forte tendance à la précipitation. Cela signifie que ces minéraux carbonatés ont une probabilité élevée de précipiter sous forme de calcite et de dolomite.

Les puits (P1), (P4), (P7), (P8) et (P11) sont sous-saturés par rapport aux minéraux (calcite et dolomite) situés dans les régions d'El Fedjoudj et Héliopolis. Par contre, (P1), (P2), (P3), (P4), (P5), (P6), (P7), (P8) et (P11) sont sous saturés par rapport au minéral aragonite.

Ces résultats confirment l'importance des minéraux carbonatés dans l'aquifère étudié et leur influence potentielle sur la composition chimique de l'eau souterraine. Cela pourrait également avoir des implications pour la formation de dépôts carbonatés et la compréhension des processus géochimiques dans cette région.

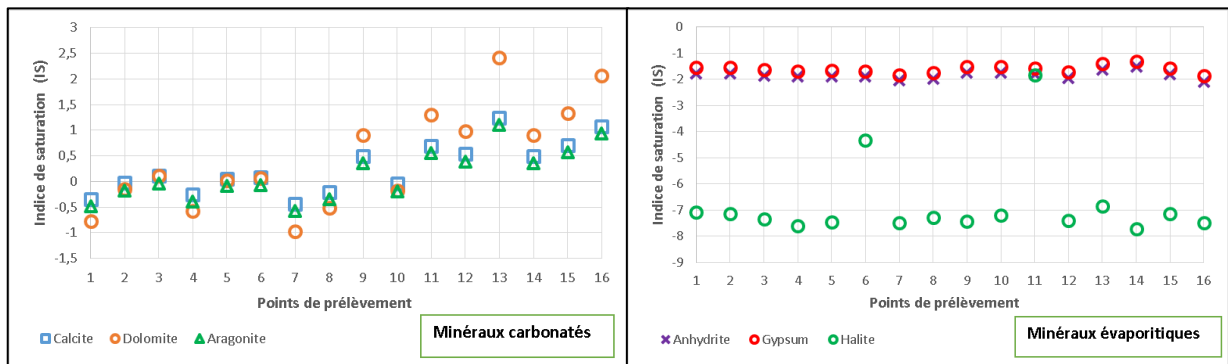


Fig. N°87 : Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe superficielle durant la période des basses eaux 2021.

**Tableau 73** : Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines de la nappe superficielle (hautes eaux, 2022).

Minéral Stat	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	Dolomite	Aragonite	Calcite	Anhydrite	Gypse	Halite
	CaCO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Na Cl
<b>Min</b>	-0,73	-0,46	-0,32	-1,91	-1,69	-7,51
<b>Max</b>	1,99	0,9	1,04	-1,49	-1,27	-6,82
<b>Moy</b>	0,64	0,22	0,36	-1,66	-1,44	-7,20
<b>Ecart type</b>	0,66	0,33	0,33	0,11	0,11	0,18
<b>CV%</b>	103,21	147,76	90,20	-6,49	-7,48	-2,54

Les données présentées dans le tableau dévoilent les indices de saturation des eaux dans la nappe phréatique, recueillies auprès de 18 points d'eau au cours de la période des hautes eaux en Mai 2022.

En général, les eaux de cette nappe souterraine des régions d'Héliopolis, El Fedjoudj et Guelaat Bousbaa présentent une sous-saturation (indice de saturation, IS < 0) en ce qui concerne le gypse, l'halite et l'anhydrite. Cela suggère une éventuelle possibilité de dissolution. Cependant, dans l'ensemble, ces eaux affichent une sursaturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et de l'aragonite, avec des indices de saturation supérieurs à 0 (IS > 0).

Ces observations indiquent une propension à la précipitation, sauf dans les cas des puits (P6), (P7) et (P8), où les eaux montrent une sous-saturation par rapport à la calcite, à la dolomite et à l'aragonite.

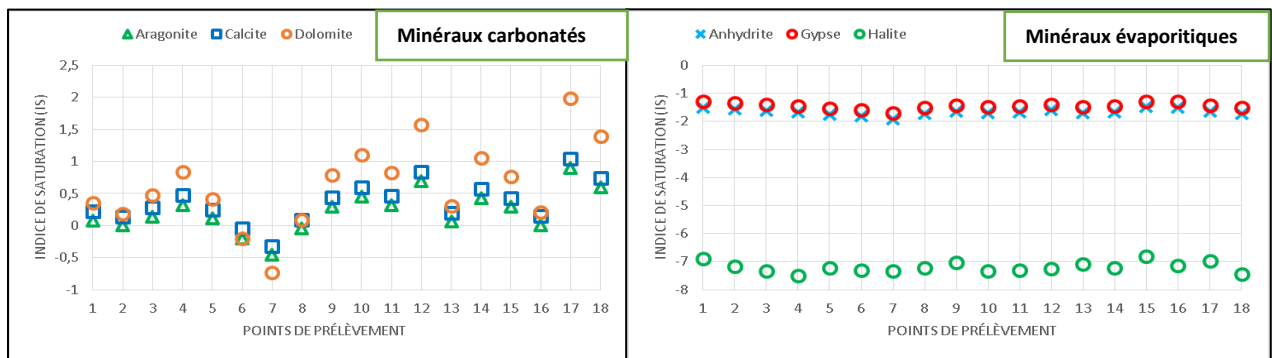


Fig. N°88 : Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe superficielle durant la période des hautes eaux 2022.

### Nappe profonde

**Tableau 74** : Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines de la nappe profonde de Hammam Bradaa (Janvier, 2020).

Minéral Stat	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	Dolomite	Aragonite	Calcite	Anhydrite	Gypse	Halite
	CaCO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Na Cl
<b>Min</b>	0,3	0,11	0,25	-4,25	-4,03	-7,93
<b>Max</b>	2,28	0,98	1,12	-1,17	-0,95	-7,35
<b>Moy</b>	1,07	0,48	0,62	-2,12	-1,90	-7,77
<b>Ecart type</b>	0,60	0,28	0,28	0,65	0,65	0,17
<b>CV%</b>	56,06	58,74	44,66	-30,49	-33,95	-2,16

Le tableau ci-dessus montre les indices de saturation calculés dans la nappe profonde de Hammam Bradaa à partir de 09 forages d'eau analysés en Janvier 2020, indiquant une réaction significative entre l'eau et les formations carbonatées.

Les formations néritiques constantinoises dans cette région sont principalement composées de carbonates. En outre, les formations détritiques de cette zone incluent des évaporites telles que le gypse, l'halite et l'anhydrite.

L'analyse de ce tableau pour l'ensemble des forages échantillonnés indique une sursaturation carbonatée vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et de l'aragonite, avec des indices de saturation supérieurs à 0 (IS > 0). Ces observations montrent une propension à la précipitation et sous saturées par les évaporites y compris le gypse, l'halite et l'anhydrite.

La dissolution du gypse augmente la concentration et ainsi le rapport  $Ca^{2+} / Mg^{2+}$  (>1). Une fois ce rapport est supérieur à 0.5, il provoque le phénomène de dédolomitisation thermodynamiquement (Bouaicha.F, 2018). Ce processus serait provoqué par la dissolution irréversible de sulfate accompagnée par une dissolution de la dolomite et une précipitation de la calcite.

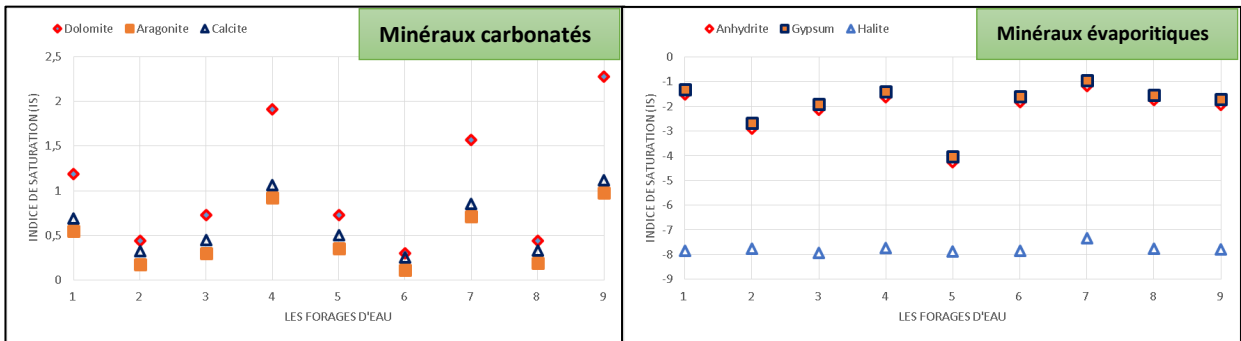


Fig. N°89 : Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe profonde durant la période de 2020.

**Tableau 75** : Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines de la nappe profonde de Hammam Bradaa (juin, 2021).

Minéral Stat	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	Dolomite	Aragonite	Calcite	Anhydrite	Gypse	Halite
	CaCO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Na Cl
<b>Min</b>	<b>0,52</b>	<b>0,21</b>	<b>0,35</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,3</b>	<b>-7,96</b>
<b>Max</b>	<b>1,09</b>	<b>0,5</b>	<b>0,64</b>	<b>-1,48</b>	<b>-1,26</b>	<b>-7,62</b>
<b>Moy</b>	0,74	0,32	0,47	-1,97	-1,75	-7,86
<b>Ecart type</b>	0,20	0,09	0,10	0,35	0,35	0,15
<b>CV%</b>	27,30	29,11	20,41	-17,93	-20,15	-1,87

Les données de la campagne de Juin 2021 extraites du tableau ci-dessus révèlent que les eaux des forages de la nappe aquifère profonde de Hammam Bradaa sont en sous-saturation par

rapport à l'halite, à l'anhydrite et au gypse, tandis qu'elles sont en sursaturation par rapport à la calcite, à l'aragonite et à la dolomite.

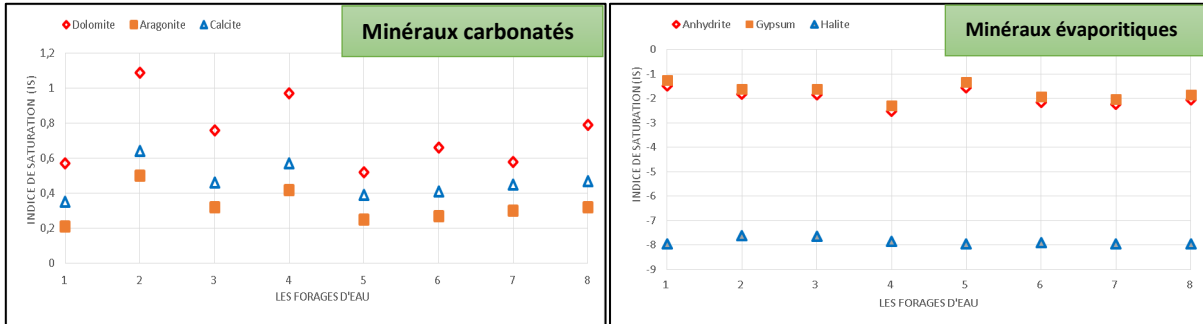


Fig. N°90 : Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe profonde durant la période de 2021.

### V.5. Analyses statistiques des paramètres mesurés

L'analyse statistique univariée et multivariée offre des outils essentiels pour comprendre et interpréter les données dans de nombreux domaines et notamment celui en relation avec l'étude hydrochimique des eaux (Hussein, 2004 ; Ahoussi et al., 2008 ; Sojka et al., 2008 ; Soro, 2010 ; Monjerezi et al., 2012 ; Yuan et al., 2017 ; Gbombélé SORO, 2019).

Les techniques statistiques univariées sont utilisées pour analyser une seule variable. Elles permettent de décrire la distribution de cette variable, de détecter des anomalies ou des tendances, pour cela on utilise La matrice de corrélation qui est un outil de représentation graphique de la relation entre deux variables. Elle est construite en calculant le coefficient de corrélation entre chacune des variables.

Les différentes relations entre les paramètres physicochimiques par l'estimation du coefficient de corrélation peuvent être déterminées sur la base du coefficient critique théorique tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre de couples mis en jeu. Le coefficient de corrélation entre x et y s'exprime par la relation suivante :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (70)$$

Ce coefficient est une mesure de l'intensité de la relation entre deux variables. Il varie entre -1 et 1. Une valeur de 0 indique qu'il n'y a pas de relation entre les deux variables, une valeur positive indique une corrélation positive (les valeurs des deux variables augmentent ou diminuent dans le même sens), et une valeur négative indique une corrélation négative (les valeurs des deux variables augmentent ou diminuent dans des sens opposés) (Reghais.A, 2023).

Alors que, les techniques statistiques multivariées sont utilisées pour analyser plusieurs variables simultanément. Elles permettent de décrire la structure des données, de détecter des relations entre les variables, et de faire des prédictions.

La principale technique statistique multivariée utilisée dans cette étude est la classification ascendante hiérarchique (CAH).

L'analyse de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) comprend un ensemble de techniques statistiques qui sont utilisées pour déterminer les groupes ou les structures statistiques naturelles dans les données. Cette méthode permet de regrouper des observations ou des variables en fonction des ressemblances qui existent ou non entre elles. Cette méthode est couramment utilisée pour analyser les données hydrochimiques des eaux et vient en complément de l'ACP. C'est un outil puissant pour l'analyse des données de la chimie de l'eau en raison de la complexité des systèmes hydrochimiques et des difficultés rencontrées dans leur interprétation. Le fondement mathématique de la méthode est basé sur le calcul de la distance euclidienne entre les individus ou observations dans un espace à n-dimensions. Au début, les données doivent être normalisées par le calcul de leurs moyennes au moyen de la formule suivante :

$$K_{ij} = \frac{X_{ij} - X}{S_{ic}} \quad (71)$$

Où  $K_{ij}$  est la valeur normale de  $X_{ij}$  pour la  $i$ ème variable du  $j$ ème individu,  $X$  est la moyenne de la  $i$ ème variable et  $S_{ic}$  l'écart type.

La procédure adoptée donne un poids égal à chaque variable. Ainsi, la mesure de similarité est tout simplement la distance définie dans un espace euclidien.

La distance entre deux individus ( $j, k$ ) est donnée comme suit :

$$D_{ij} = \sum_{i=1}^N (K_{ij} - K_{ik})^2]^{1/2} \quad (72)$$

Où

$K_{ik}$  représente la  $K$ ème variable mesurée sur l'objet  $i$ , et  $K_j k$  la  $K$ ème variable mesurée sur l'objet  $j$ .

Les résultats d'analyses sont donnés sous forme d'un dendrogramme horizontal ou vertical qui classe les observations ou les variables par groupes ou sous-groupes possédant le même poids ou les mêmes caractéristiques. Cette méthode permet donc de faire un regroupement des observations ou variables en fonction des similarités qui existent entre celles-ci ou non.

### V.A.1.1. Matrice de corrélation

#### A. Nappe superficielle

Pour la période d'échantillonnage de septembre 2021 (Tableau ci-dessous), nos résultats montrent que pendant la période des basses eaux, les paramètres clés sont  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Nous avons constaté que  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  et la conductivité électrique (CE) étaient fortement corrélés ( $0,7 < r < 0,5$ ).

Les liens significatifs entre les différents éléments trouvés peuvent probablement être attribués à leurs origines communes. La minéralisation des eaux semble être principalement régie par trois mécanismes :

- ✓ de la nature des roches traversées et des minéraux dissous au cours de l'infiltration ;
- ✓ du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol ;
- ✓ du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration,
- ✓ de l'évaporation élevée due au climat subhumide à semi-aride et à l'échange d'ions.

Une corrélation positive significative a été remarquée entre  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 1$ ). Cette observation suggère que le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) partagent des sources d'origine similaires, probablement issues de formations carbonatées et évaporitiques. De plus, des corrélations robustes ont été constatées entre le sodium et le chlorure ( $r = 0,68$ ), ainsi qu'entre le sodium et le sulfate ( $r = 0,41$ ). Cela laisse penser que la décomposition des plagioclases sodiques joue un rôle clé dans la concentration de  $\text{Na}^+$  dans la région étudiée, en complément de la dissolution de l'halite.

- ✓ En ce qui concerne les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), une forte corrélation positive a été observée avec  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0,70$ ). Ceci suggère que la source de ces ions pourrait être la dissolution de minéraux carbonatés, ou bien résulter de processus d'échange d'ions dans la nappe aquifère. En revanche, la corrélation très faible constatée entre les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) durant cette période suggère que les nitrates ont une origine plus superficielle et probablement anthropique.

**Tableau 76 :** Matrice de corrélation de la nappe superficielle de Hammam Bradaa des paramètres collectée en Septembre 2021.

Variables	Ca	mg	Na	k	Cl	SO4	HCo3	No3	No2	Nh4	Po4	CE	Ph	T C°
Ca	1													
mg	1,000	1												
Na	0,054	0,056	1											
k	-0,244	-0,244	0,336	1										
Cl	0,313	0,315	0,688	-0,145	1									
SO4	0,134	0,133	0,411	0,088	0,115	1								
HCo3	0,704	0,703	-0,106	-0,065	0,267	0,027	1							
No3	0,248	0,249	0,003	-0,209	0,085	-0,113	-0,021	1						
No2	-0,153	-0,152	0,401	0,396	0,163	-0,003	0,084	0,010	1					
Nh4	0,282	0,282	0,431	0,006	0,350	0,435	0,278	-0,586	0,085	1				
Po4	0,045	0,043	-0,386	-0,131	-0,172	-0,426	0,023	0,335	-0,210	-0,588	1			
CE	0,108	0,108	0,697	0,112	0,490	0,539	-0,047	0,350	0,080	0,249	-0,192	1		
Ph	-0,006	-0,006	0,482	-0,022	0,120	0,233	-0,180	-0,502	0,118	0,683	-0,544	0,114	1	
T C°	-0,111	-0,111	0,064	-0,147	-0,029	-0,024	-0,002	0,268	0,438	0,034	-0,192	0,116	0,048	1

Pendant la période des hautes eaux 2022, la matrice de corrélation montre que la conductivité électrique (CE) a une corrélation positive (0,60-0,70) avec  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $HCO_3^-$ . Ceci reflète leur implication dans la minéralisation des eaux souterraines dans la région étudiée.  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  et  $Na^+$  montrent une forte corrélation positive (0,5-0,73), indiquant une possible origine commune.  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$  et  $Cl^-$  (0,50- 0,65) montrent également une très forte relation positive. Une forte corrélation entre ces paramètres indique que des variations dans l'une de ces substances peuvent être associées à des variations similaires dans les autres, ce qui peut avoir des implications pour la compréhension de la composition chimique et de la qualité de la minéralisation dans ces régions (Hammam Bradaa, Héliopolis, El Fedjoudj et Guelaat Bousbaa). Les bicarbonates  $HCO_3^-$  ont une corrélation positive avec  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ . Cela peut être expliqué par la dissolution des formations carbonatées ainsi que la possibilité d'alimentation de la nappe superficielle par la nappe profonde et, donc, un apport des bicarbonates.

Ces fortes relations peuvent indiquer que les sels de chlorure (halite) et de sulfate (gypse et anhydrite) sont responsables de la minéralisation des eaux de cette nappe superficielle.

**Tableau 77** : Matrice de corrélation de la nappe superficielle de Hammam Bradaa des paramètres collectée en Mai 2022.

Variabes	Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	Hco3	No3	No2	Nh4	Po4	CE	Ph	T C
Ca	1													
Mg	1,000	1												
Na	0,316	0,319	1											
K	-0,002	-0,005	0,125	1										
Cl	0,509	0,508	0,756	0,270	1									
So4	0,319	0,322	0,654	0,025	0,494	1								
Hco3	0,998	0,998	0,332	0,004	0,516	0,342	1							
No3	-0,014	-0,014	-0,229	0,105	0,214	-0,140	-0,030	1						
No2	-0,374	-0,377	-0,268	0,285	-0,193	-0,425	-0,386	0,128	1					
Nh4	0,003	0,000	-0,274	0,088	0,012	-0,151	0,003	0,192	-0,103	1				
Po4	-0,010	-0,011	0,126	0,389	0,065	0,272	-0,036	-0,163	0,031	-0,045	1			
CE	0,629	0,631	0,731	-0,022	0,624	0,659	0,631	-0,209	-0,533	-0,136	0,246	1		
Ph	-0,001	0,000	-0,198	-0,090	-0,018	-0,089	0,016	0,321	0,312	-0,135	-0,494	-0,467	1	
T C	0,056	0,058	-0,088	0,100	-0,230	0,215	0,058	0,041	-0,173	0,364	0,131	0,130	-0,160	1

**B. Nappe profonde :**

La matrice de corrélation (Tableau.ci dessous de la période du mois de Janvier 2020) montre que la conductivité (CE) a une corrélation significative avec  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NO_3^-$  et  $SO_4^{2-}$  Ceci reflète leur implication dans la minéralisation des eaux souterraines dans la région d'étude.  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  ont une relation avec les sulfates ( $SO_4^{2-}$ ), les chlorures ( $Cl^-$ ), les bicarbonates ( $HCO_3^-$ ), le potassium ( $K^+$ ) et le sodium ( $Na^+$ ) cela est liée à la dissolution des minéraux carbonatés (Calcite et dolomite) et évaporitiques (l'halite et le gypse.

On ne remarque pas des relations significatives avec les paramètres de pollution, la nappe profonde est protégée des influences de surface.

**Tableau 78** : Matrice de corrélation de la nappe profonde de Hammam Bradaa des paramètres collectée en Janvier 2020.

Variabes	T	PH	Cond	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	Cl-	SO4	HCO3-	NO3-
T	1										
PH	-0,4630	1									
Cond	0,2353	-0,3027	1								
Ca2+	0,3357	-0,2155	0,9634	1							
Mg2+	-0,0805	0,1231	0,8880	0,8660	1						
Na+	-0,2843	0,0840	-0,3116	-0,2621	-0,1779	1					
K+	0,4763	-0,5647	0,5705	0,5436	0,3532	0,0834	1				
Cl-	0,0386	0,0609	0,9016	0,9243	0,9361	-0,3042	0,3560	1			
SO4	0,1799	0,3009	0,6952	0,7822	0,8276	-0,2135	0,4291	0,8370	1		
HCO3-	0,1298	-0,5096	0,8491	0,7741	0,6401	-0,4575	0,4187	0,7559	0,3670	1	
NO3-	-0,0102	-0,0755	0,7876	0,7824	0,7641	-0,4997	0,3681	0,8880	0,7204	0,8205	1

L'analyse du tableau ci-dessus de la deuxième campagne du mois de Juin 2021 est faite comme suit :

- ✓ La conductivité électrique (CE) montre des corrélations significatives avec  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , indiquant leur implication dans la minéralisation des eaux souterraines.
- ✓ Une bonne corrélation entre la température de l'eau ( $T^{\circ}\text{C}$ ) et le potassium ( $\text{K}^+$ ) suggère des processus géochimiques en jeu, ceci se remarque surtout dans les eaux thermales riches en potassium.
- ✓ Le calcium est corrélé avec les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et le potassium ( $\text{K}^+$ ), indiquant une dissolution du gypse.
- ✓ La corrélation entre le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) est liée au type de faciès de type bicarbonaté sodique très répandu des eaux thermales qui caractérisent la région d'étude et peuvent entrer en contact avec les eaux étudiées.

**Tableau 79** : Matrice de corrélation de la nappe profonde de Hammam Bradaa des paramètres analysés durant le mois de Juin 2021.

Variables	T	PH	Cond	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
T	1										
PH	0,2083	1									
Cond	0,2721	-0,2096	1								
Ca <sup>2+</sup>	0,6482	-0,3175	0,7865	1							
Mg <sup>2+</sup>	-0,0769	-0,0451	0,5438	0,2794	1						
Na <sup>+</sup>	-0,2355	0,6722	0,0815	-0,2699	0,0462	1					
K <sup>+</sup>	0,7215	0,0655	0,7031	0,7064	0,2602	-0,0537	1				
Cl <sup>-</sup>	0,0990	0,3829	-0,1922	-0,1292	0,1069	-0,1850	0,0733	1			
SO <sub>4</sub>	0,0037	-0,4131	0,7163	0,6525	0,3055	-0,0100	0,1054	-0,4113	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,1629	0,4932	0,2512	-0,0817	-0,0641	0,5260	0,2340	-0,3067	0,1052	1	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,1836	0,1999	-0,6865	-0,5420	-0,8589	-0,0318	-0,4696	0,3010	-0,4376	-0,0350	1

### V.5.2. Analyse multivariée (multidimensionnelle)

#### Classification Ascendante Hiérarchique des eaux souterraines :

##### A. Nappe superficielle

Les résultats d'analyses des eaux souterraines selon la classification ascendante hiérarchique durant la période des basses eaux 2021 sont représentés par le dendrogramme ci-dessous ;

L'analyse de ce dendrogramme, montre quatre classes statistiques distinctes.

- La première classe est déterminée par le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). Dans cette classe, on remarque l'influence des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et les dolomies (Ca, Mg) sur les eaux souterraines.
- La deuxième classe statistique caractérisée par le sodium ( $\text{Na}^+$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), la conductivité (CE), le potentiel hydrogène (PH). Cette dernière montre l'effet de la dissolution des roches évaporitiques.

- La troisième classe statistique est déterminée par les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ) et la température ( $T^\circ$ ). Ce qui explique la pollution des eaux par les engrais chimiques. La température liée au processus de précipitation de la calcite et de l'altération des silicates par hydrolyse.
- La quatrième classe statistique est déterminée par les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et sont liés à une pollution d'origine anthropique.

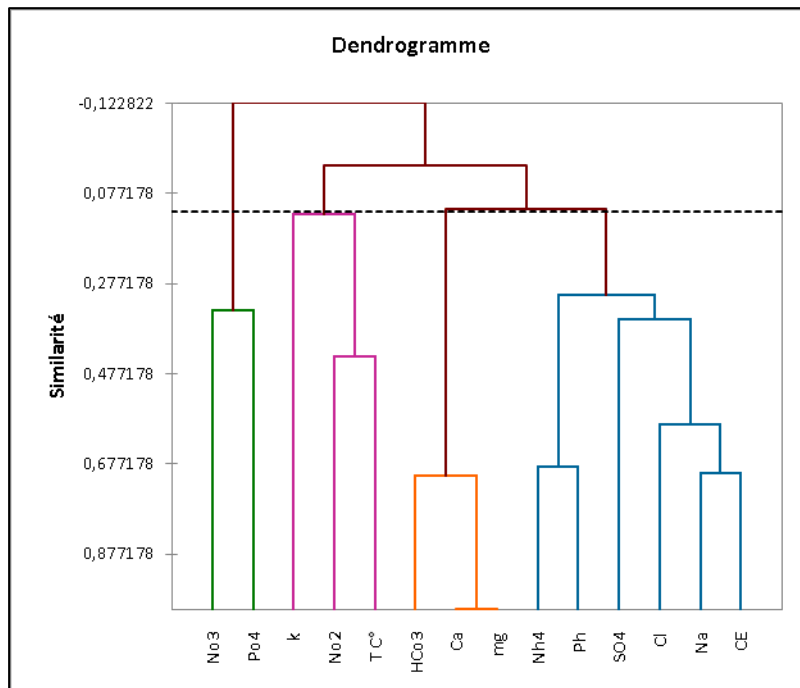


Fig. N°91 : Dendrogramme des variables de CAH de la nappe superficielle-Septembre 2021-

L'analyse dendrogramme ci-dessous durant la période des hautes eaux 2022 révèle la présence de trois groupes statistiquement distincts.

- Le premier groupe est caractérisé par la présence de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et la conductivité électrique (CE). Dans cette catégorie, on peut observer l'influence des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), des dolomies (Ca, Mg), ainsi que des évaporites sur les caractéristiques des eaux souterraines. La présence des ions évaporitiques et carbonatés dans la même classe peut indiquer probablement, l'apport des bicarbonates dans les eaux de la nappe profonde vers la nappe superficielle.
- Le deuxième groupe statistique est marqué par le potentiel hydrogène (pH), les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ). Ce groupe met en évidence l'impact de la pollution d'origine anthropique et de la contamination due aux engrais chimiques.

- Enfin, le troisième groupe statistique est influencé par l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et la température ( $T^\circ$ ). La température est associée au processus de précipitation de la calcite et à l'altération des silicates par hydrolyse et peut jouer un rôle dans le cycle de l'azote.

Cette analyse suggère la présence de différentes influences sur les caractéristiques des eaux souterraines, allant des processus géochimiques naturels à l'impact de la pollution d'origine anthropique, offrant ainsi une vue approfondie des facteurs qui façonnent la composition des eaux souterraines.

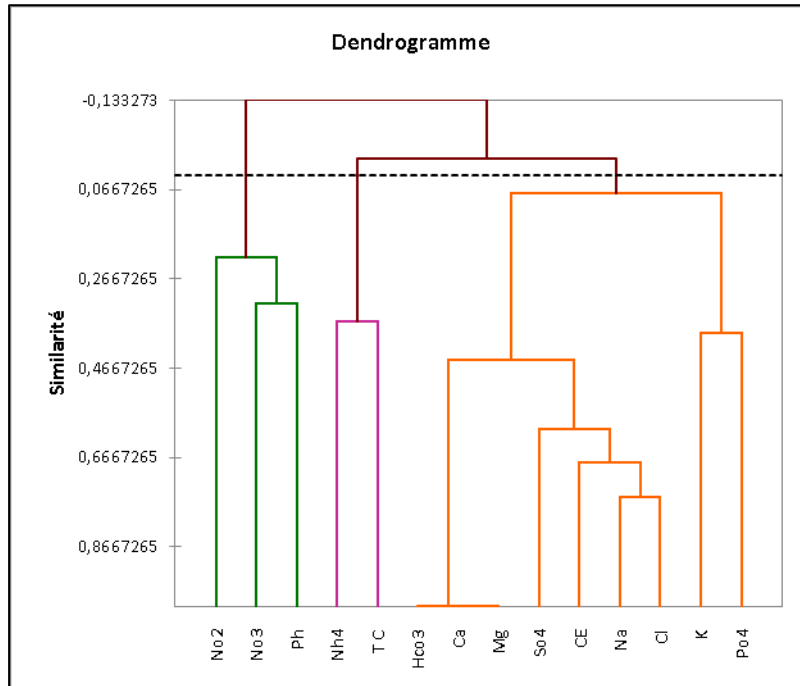


Fig. N°92 : Dendrogramme des variables de CAH de la nappe superficielle –Mai 2022-

### B. Nappe profonde

Les résultats d'analyses des eaux souterraines selon la classification ascendante hiérarchique, durant la période du mois de Janvier 2020, sont représentés par le dendrogramme ci-dessous ; L'analyse de ce dendrogramme, montre une implication de tous les paramètres chimiques dans la minéralisation (la conductivité électrique), cette implication est plus marquée par les bicarbonates.

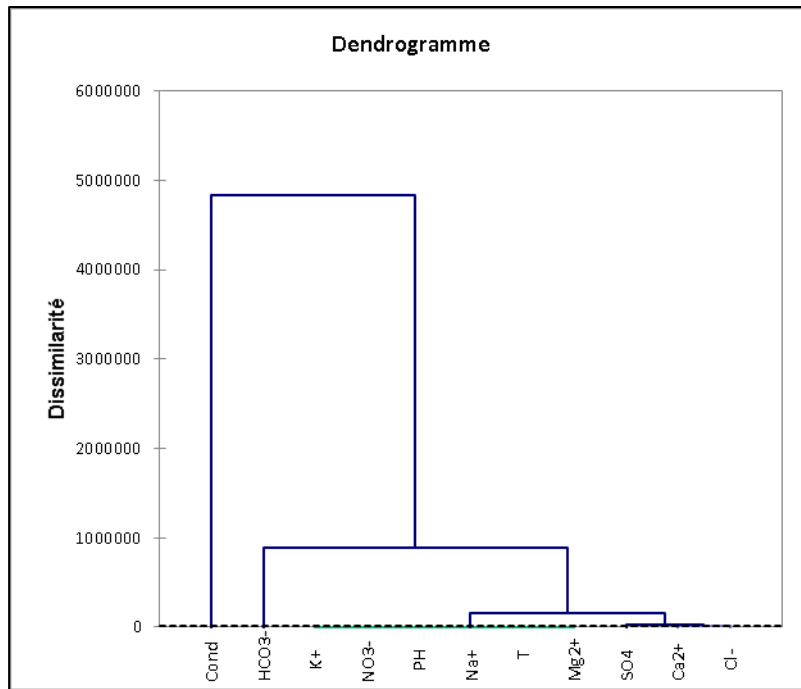


Fig. N°93 : Dendrogramme des variables de CAH de la nappe profonde –Janvier 2020-

L'analyse de dendrogramme de la deuxième campagne réalisée en mois de juin 2021 confirme l'information tirée de la campagne de Janvier 2020 qui indique une implication de tous les paramètres dans la minéralisation des eaux, cette implication est plus marquée par l'importance des bicarbonates. Ces eaux sont de type bicarbonaté.

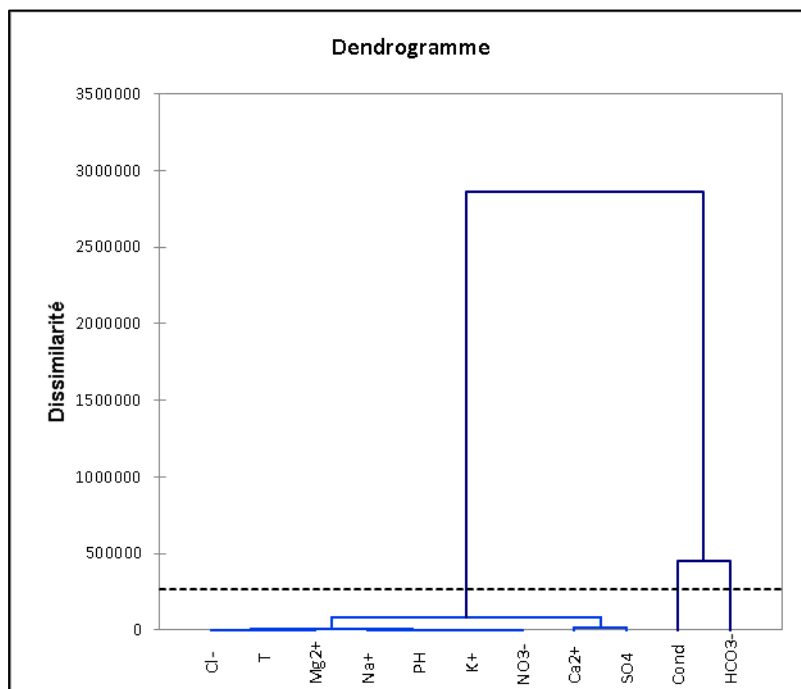


Fig. N°94 : Dendrogramme des variables de CAH de la nappe profonde – juin 2021-

## V.6.Indices d'évaluation de qualité d'eau

### A. Nappe superficielle

#### V.A.1.Indice de qualité de l'eau arithmétique (WQI)

Au fil des dernières décennies, le WQI (Indice de Qualité de l'Eau) a été largement reconnu comme un outil efficace fournissant des informations essentielles sur la qualité de l'eau à l'intention des citoyens. Cet indice a été utilisé pour évaluer la qualité des eaux de surface et souterraines (Abbasi et Abbasi, 2012). Le WQI se présente sous forme d'une note qui représente la qualité globale de l'eau par rapport à des normes spécifiques établies pour des usages particuliers. En d'autres termes, il reflète l'effet global de différents paramètres de qualité de l'eau. (Selmane.T, 2023).

L'objectif principal de l'Indice de Qualité de l'Eau (WQI) est de condenser une masse de données complexes sur la qualité de l'eau en une seule valeur compréhensible. Cela permet d'exprimer les données sous une forme simplifiée et logique, (Boudjebieur.A, 2022).

Effectivement, le WQI est largement reconnu comme un outil rapide et systématique pour évaluer et classer les caractéristiques de l'eau (Nazir, 2016). De nombreuses études à travers le monde ont appliqué cet indice avec des résultats satisfaisants, notamment dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines (Khalid, 2019 ; Ramachandran et al, 2021 ; Radouane et al., 2021; Oseke et al., 2021).

Le calcul du WQI repose sur une pondération des paramètres sélectionnés, ce qui permet de synthétiser plusieurs mesures de qualité de l'eau en une seule valeur globale. En fonction du résultat obtenu, la qualité de la masse d'eau est ensuite classée dans une échelle allant de mauvaise à optimale, avec une plage de variation du WQI allant de 0 à 100.

Il est important de noter que différentes techniques peuvent être utilisées pour surveiller les facteurs environnementaux et collecter les données nécessaires pour calculer l'indice de qualité de l'eau (WQI). Ces techniques comprennent des échantillonnages réguliers, des analyses de laboratoire.

L'indice arithmétique pondéré utilisé pour évaluer la qualité de l'eau dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa. Cet indice utilise onze variables mesurées pour chaque échantillon d'eau de puits. Voici les étapes pour calculer cet indice :

- ✓ Attribuer un poids ( $W_i$ ) de 1 à 5 pour chacun des paramètres suivants : pH, CE,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  et TDS. Ces poids représentent l'importance relative de chaque paramètre dans la qualité de l'eau.
- ✓ Le poids relatif (RW) d'un paramètre peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$RWi = \frac{Wi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad (73)$$

Où :

RWi est le poids relatif du paramètre i.

Wi est le poids attribué au paramètre i (compris entre 1 et 5).

$\Sigma(Wi)$  est la somme des poids de tous les paramètres.

n : le nombre de paramètres.

**Tableau 80** : Poids et poids relatif des paramètres physico-chimiques de la nappe superficielle et profonde utilisé pour le calcul de l'indice de qualité(WQI).

Paramètre	Nombre d'OMS (2017)	Facteur de poids(Wi)	Poids relatif (RWi)
pH	6,5 - 8,5	4	0,114
CE	1500	4	0,114
Ca <sup>2+</sup>	200	2	0,057
Mg <sup>2+</sup>	30	1	0,028
Na <sup>+</sup>	200	2	0,057
K <sup>+</sup>	10	2	0,057
Cl <sup>-</sup>	250	3	0,085
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	600	3	0,085
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250	4	0,114
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	5	0,142
TDS	600-1000	5	0,142

- ✓ L'échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre a été calculée en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par sa norme respective établie par l'OMS (2017) et en multipliant les résultats par 100.

$$qi = \frac{Ci}{Si} * 100 \quad (74)$$

qi : l'échelle d'évaluation de la qualité.

Ci : concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon mg/l.

Si : norme de l'Organisation mondiale de la santé pour chaque paramètre chimique en mg/l selon les directives de l'OMS (2017).

- ✓ Ensuite, pour obtenir la valeur de l'indice de qualité de l'eau (WQI), le sous-indice de qualité de l'eau (*Sli*) est calculé pour chaque paramètre en utilisant l'équation suivante :

$$Sli = RWi * qi \quad (75)$$

- ✓ En dernier lieu, le calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI) est réalisé en utilisant des sous-indices de qualité de l'eau (*Sli*).

$$WQI = \sum_{i=1}^n Sli \quad (76)$$

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) sont classées en cinq catégories pour différents types d'eau :

**Tableau 81** : Classes de l'indice de qualité (WQI) - Basses eaux 2021-

Valeur de l'indice de qualité (WQI)	Classes	Nombres d'échantillons	% d'échantillon
< 50	Eau de qualité excellente	0	0%
50–100	Eau de bonne qualité	16	100,00%
100–200	Eau de qualité médiocre	0	0,00%
200–300	Eau de qualité pauvre	0	0,00%
> 300	Eau impropre à la consommation	0	0,00%

**Tableau 82**: Classes de l'indice de qualité (WQI) - Hautes eaux 2022-

Valeur de l'indice de qualité (WQI)	Classes	Nombres d'échantillons	% d'échantillon
< 50	Eau de qualité excellente	0	0%
50–100	Eau de bonne qualité	18	100%
100–200	Eau de qualité médiocre	0	0%
200–300	Eau de qualité pauvre	0	0%
> 300	Eau impropre à la consommation	0	0%

Selon les données obtenues du tableau ci-dessus, lors de la campagne des basses eaux en Septembre 2021, les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) se situent dans une fourchette allant de 45,97 à 62,54, avec une moyenne de 53,09 et un écart type de 4,52. Cela indique une gamme de variation de la qualité des eaux, allant de "bonne". La distribution des résultats est la suivante : aucune source d'eau n'a été classée comme étant de "qualité excellente", 100,00 % des échantillons ont été évalués comme étant de "bonne qualité", aucun échantillon n'a été

catégorisé comme "médiocre qualité", aucun n'a été considéré de "pauvre qualité", et enfin, aucun échantillon n'a été jugé impropre à la consommation.

Dans l'ensemble, la plupart des puits échantillonnés présentent une qualité d'eau satisfaisante pour la consommation, avec un indice de qualité de l'eau (WQI) inférieur à 100.

Pendant la campagne des hautes eaux en Mai 2022, les mesures de l'Indice de Qualité de l'Eau (WQI) ont varié entre 51,50 et 73,51, avec une moyenne de 61,11 et un écart-type de 6,08. Ces données reflètent une diversité de niveaux de qualité de l'eau, s'étendant du "bonne". L'analyse des résultats révèle que les évaluations se répartissent comme suit : aucune source d'eau n'a atteint le niveau d'excellence, 100,00% des échantillons ont montré une "bonne qualité", tandis que 0,00% ont été classés comme étant de "qualité médiocre". Aucun échantillon n'a été considéré de "pauvre qualité", et il n'y a eu aucun cas d'eau n'a été jugé impropre à la consommation. Dans l'ensemble, la plupart des puits échantillonnés présentent une qualité d'eau bonne pour la consommation, avec un indice de qualité de l'eau (WQI) situé dans la plage de 50 à 100.

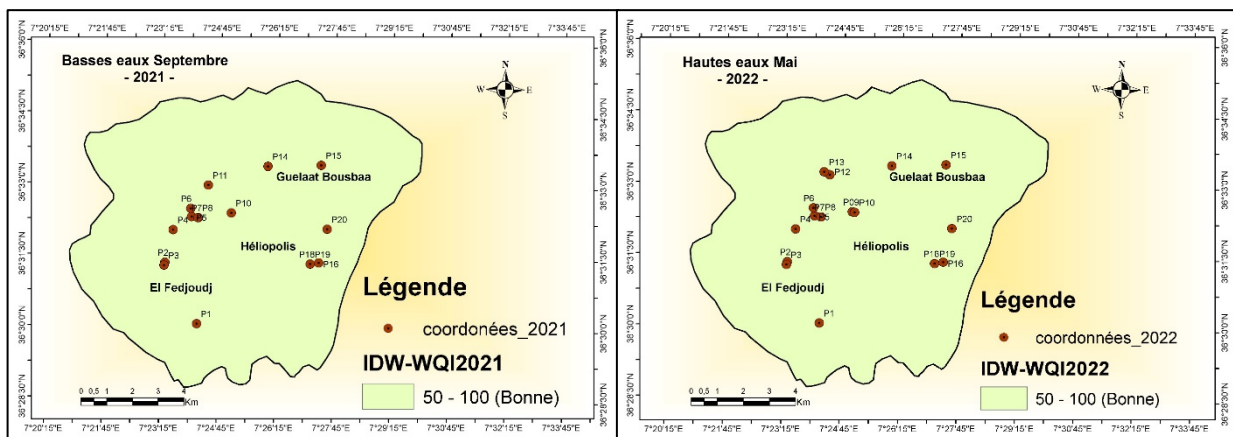


Fig. N°95 : Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau (WQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.

## B. Nappe profonde

Tableau 83 : Classes de l'indice de qualité (WQI)

Valeur de l'indice de qualité (WQI)	Classes	Nombres d'échantillons	% d'échantillon
< 50	Eau de qualité excellente	0	0,00 %
50-100	Eau de bonne qualité	17	100,00 %
100-200	Eau de qualité médiocre	0	0%
200-300	Eau de qualité pauvre	0	0%
> 300	Eau impropre à la consommation	0	0%

D'après les données du tableau, l'indice de qualité de l'eau (IQE) varie entre 50,63 et 83,53, avec une moyenne de 57,94 et un écart type de 7,38. Cela suggère une gamme de qualité allant de "Bonne". En détaillant les résultats, on observe que 0,00% des forages ont été classés comme présentant une "qualité excellente", tandis que 100,00% ont été évalués comme "bonne qualité". Aucun échantillon n'a été catégorisé comme "médiocre" ou "pauvre qualité", et aucun n'a été jugé impropre à la consommation.

Dans l'ensemble, la majorité des forages analysés dans la nappe profonde de Hammam Bradaa affichent une qualité d'eau adaptée à la consommation humaine, avec un IQE inférieur à 100.

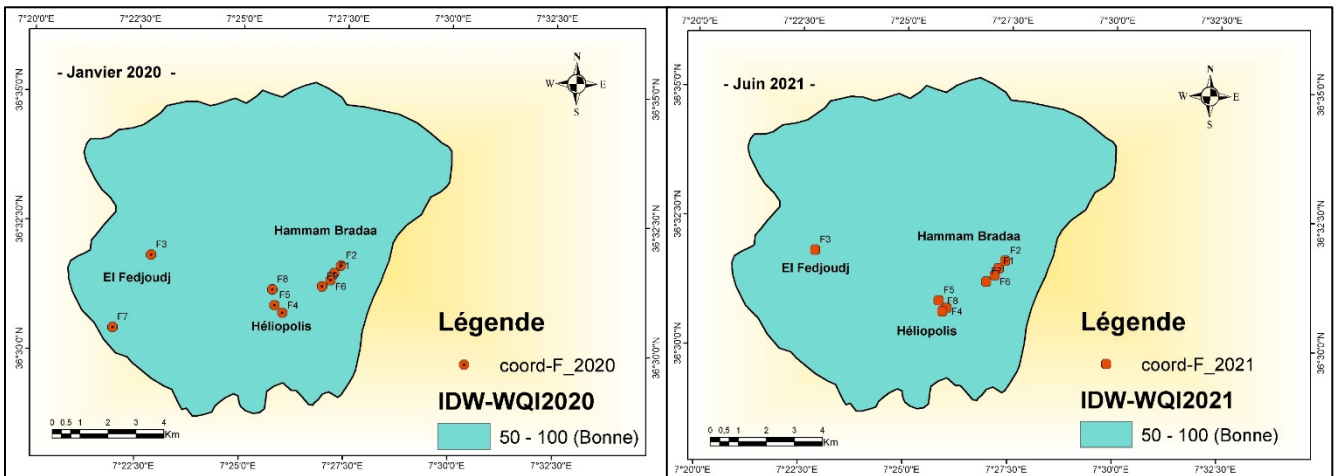


Fig. N° 96 : Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau (WQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.

### V.A.2.Indice de Qualité de l'eau pondéré par entropique (EWQI)

Divers chercheurs ont utilisé le modèle d'Indice de Qualité de l'Eau Pondéré Entropique (EWQI) [Ozkul et al.200](#), [Kumar and Augustine 2022](#), [Amiri et al. 2014](#) , [He and Wu 2019](#), [Adimalla 2021](#)). La qualité des eaux souterraines peut être déterminée à l'échelle mondiale à l'aide de l'indice de qualité de l'eau (EWQI) destinées à la consommation. Cette méthode a été largement utilisée en se basant sur la théorie de l'entropie. L'EWQI est évalué en suivant les étapes suivantes : la première étape consiste à calculer une matrice de valeurs X, associée à « m » échantillons d'eau souterraine et chaque échantillon à « n » paramètres hydrochimiques par l'application de l'équation suivante.

$$X = |x_{11} \ x_{12} \ x_{21} \ x_{22} \ x_{m1} \ x_{m2} \ \dots \ x_{1n} \ \dots \ x_{2n} \ \dots \ x_{mn} | \quad (77)$$

Où "m" (i=1, 2, 3, 4, ..., m) représente les échantillons d'eau souterraine ;

n (j=1, 2, 3, 4, ..., n) représente le nombre de paramètres hydrochimiques de chaque échantillon.

Deuxièmement, la matrice 'X' est normalisée à 'Y' en utilisant la fonction de normalisation.

Troisièmement, le poids hyperbolique "wj" est calculé.

Quatrièmement, l'échelle de notation est sélectionnée.

Enfin, la valeur EWQI est calculée.

Où  $x_{ij}$  indique la valeur,  $j^{\text{ème}}$  paramètre chimique,  $i^{\text{ème}}$  nombre d'échantillon ;  $(x_{ij})_{\min}$  et  $(x_{ij})_{\max}$  sont respectivement les valeurs minimaux et maximaux des paramètres; L'entropie «  $e_j$  » et le poids de l'entropie «  $w_j$  »;  $S_j$  est les limites admissibles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2017).

Le **tableau 84** représente les cinq classes de qualité des eaux souterraines déterminées à partir des valeurs de l'indice de qualité de l'eau pondéré entropique (EWQI).

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} \dots & X_{2n} \\ X_{m1} & X_{m2} \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (78)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (79)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{21} \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} \dots & Y_{2n} \\ Y_{m1} & Y_{m2} \dots & Y_{mn} \end{bmatrix} \quad (80)$$

$$P_{ij} = \frac{y_{ij} + 0,0001}{\sum_{i=0}^n (y_{ij} + 0,0001)} \quad (81)$$

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln p_{ij} \quad (82)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (83)$$

$$q_j = \frac{x_j}{S_j} \times 100 \quad (84)$$

$$EWQI = \sum_{j=0}^n w_j q_i \quad (85)$$

**Tableau 84** : Classification des normes de qualité des eaux souterraines selon l'Indice de Qualité de l'Eau Pondéré par l'Entropie (EWQI) de la nappe superficielle.

EWQI	% Basses eaux 2021	% Hautes eaux 2022	Nombres de prélèvements	Qualité des eaux	Usage possible
< 50	0	0	0	Excellente	Eau potable, irrigation et industrie
50 - 100	100	100	16 / 18	Bonne	Eau potable, Irrigation et industrie
100 - 150	0	0	0 / 0	Médiocre	Irrigation et industrie
150 - 200	0	0	0	Pauvre	Irrigation
> 200	0	0	0	Très pauvre	Traitement approprié requis avant utilisation

Les résultats de l'indice EWQI issus des deux campagnes d'échantillonnage effectuées en Septembre 2021 et en Mai 2022 montrent que tous les échantillons étudiés soient 100% ont été classés dans la catégorie de qualité bonne, avec des valeurs se situant entre 50 et 100 au cours de la période des basses eaux en 2021 et hautes eaux 2022 et l'eau est destinée à l'irrigation, l'industrie et potabilité.

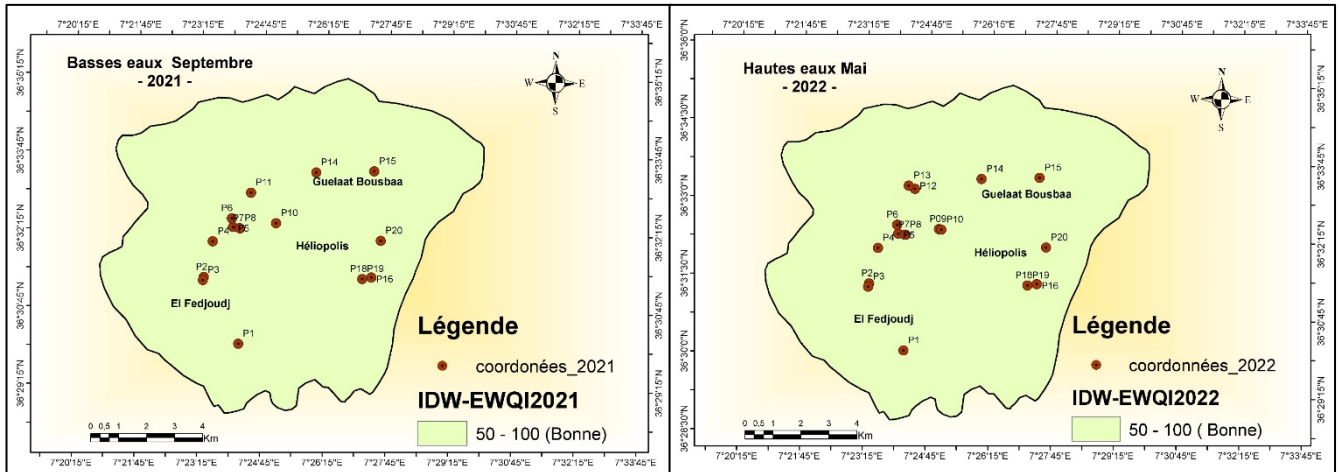


Fig. N°97 : Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau pondéré par l'entropie (EWQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.

### B.Nappe profonde

**Tableau 85** : Classification des normes de qualité des eaux souterraines selon l'Indice de Qualité de l'Eau Pondéré par l'Entropie (EWQI).

EWQI	% des forages d'eau	Nombres de prélèvements	Qualité des eaux	Usage possible
< 50	0	0	Excellente	Eau potable, irrigation et industrie
50 -100	0	17	Bonne	Eau potable, Irrigation et industrie
100 - 150	100	0	Médiocre	Irrigation et industrie
150– 200	0	0	Pauvre	Irrigation
> 200	0	0	Très pauvre	Traitement approprié requis avant utilisation

Les résultats de l'indice EWQI révèlent que la totalité des échantillons analysés, soit 100%, ont été classés dans la catégorie de qualité bonne, avec des valeurs comprises entre 50 et 100. Il convient de noter que cette eau est destinée à des usages tels que l'irrigation, l'industrie et la consommation humaine.

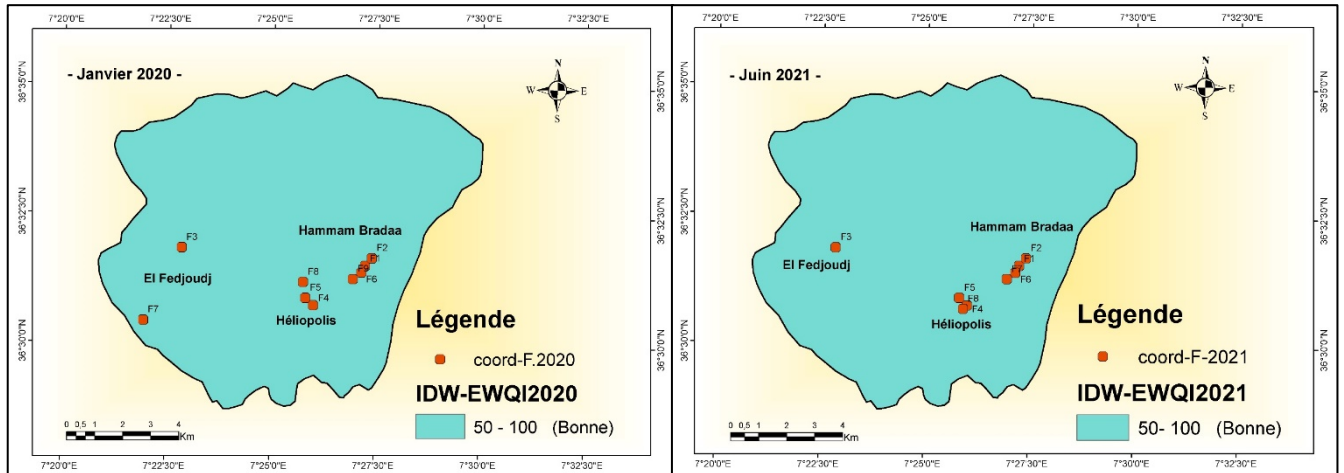


Fig. N°98 : Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau pondéré par l'entropie (EWQI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.

### V.A.3.Indice de pollution par les Nitrates (NPI)

La contamination des eaux souterraines par les nitrates et ses conséquences sur la santé humaine constituent l'un des problèmes cruciaux suivis à l'échelle mondiale (Panneer selvam et al. 2020). L'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) est un indicateur utilisé pour évaluer le degré de pollution des eaux souterraines causée par les nitrates résultant de l'activité humaine (Bahrami et al. 2020). Lorsque la concentration de  $\text{NO}_3^-$  dans les eaux souterraines dépasse les 20 mg/l, elle est considérée comme une pollution d'origine anthropique (Reddy et al. 2022). La limite maximale autorisée de  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau potable est de 50 mg/l (OMS 2017).

La surveillance de la contamination des eaux souterraines par les nitrates à l'aide du NPI a été réalisée dans de nombreuses régions du globe, car cet indicateur offre une vision claire du pourcentage de pollution de l'eau (Obeidat et al. 2012 ; El Mountassir et al. 2022, Selmane.T, 2023).

La formule suivante a été utilisée pour calculer l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI).

$$NPI = \frac{Cs - HAV}{HAV} \quad (86)$$

En utilisant la valeur Cs pour la plage d'analyse des nitrates dans l'échantillon d'eau et la valeur HAV comme seuil de la source artificielle (20 mg/l), l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) permet de classer la qualité de l'eau en cinq catégories distinctes donné dans le **tableau 86** :

NPI	% Basses eaux 2021	% Hautes eaux 2022	Nombres de prélèvements	Classes de pollution
< 0	0	0	0	Eau propre, sans pollution
0 - 1	100	0	16 / 0	Légère pollution
1 - 2	0	100	0 / 17	Pollution modérée
2 – 3	5,55	0	1	pollution importante
> 3	0	0	0	Pollution très élevée

Les résultats obtenus à partir de l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) fournissent une perspective intéressante sur la qualité de l'eau durant les périodes de basses eaux en 2021 et de hautes eaux en 2022. L'interprétation des données révèle des tendances significatives quant à la présence et à l'intensité de la pollution par les nitrates dans les échantillons d'eau.

Il est satisfaisant de noter qu'au cours de la période de basses eaux en 2021, les échantillons analysés montrent une variation de 0,3 à 1 avec une moyenne de 0,60. Il a été noté que 100 % des échantillons étaient classés comme légèrement pollués.

Cependant, les résultats de l'année 2022, marquée par une période de hautes eaux, présentent une variation notable. Les échantillons examinés affichent un écart allant de 1,25 à 2,4, avec une moyenne de 1,64. Il a été observé que 94,45 % des échantillons se situaient dans la catégorie de pollution modérée et un seul puits présente une pollution importante, soit 5,55 %.

En somme, ces résultats soulignent l'importance de surveiller de près la qualité de l'eau et d'appliquer des mesures de prévention pour éviter une augmentation significative de la pollution par les nitrates. L'approche de classification en catégories du NPI permet de mettre en évidence les niveaux de pollution et offre des indications précieuses pour la gestion et la préservation des ressources en eau.

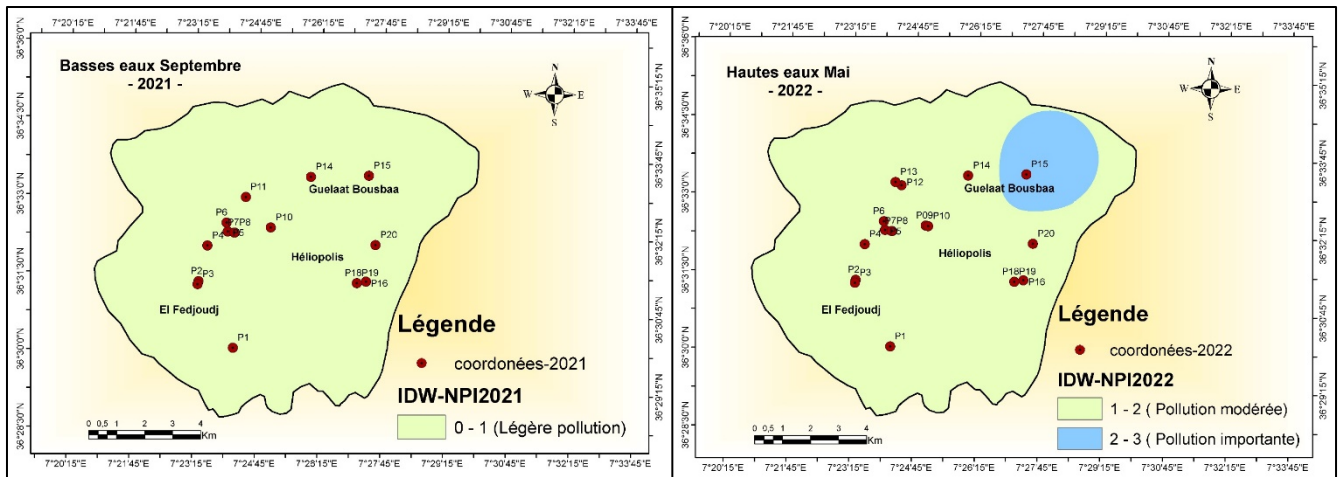


Fig. N°99 : Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau par les nitrates (NPI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.

### B.Nappe profonde

**Tableau 87** : La classification de la qualité de l'eau selon l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) de la nappe profonde.

NPI	% des forages d'eau	Nombres de prélèvements	Classes de pollution
< 0	100	17	Eau propre, sans pollution
0 - 1	0	0	Légère pollution
1 - 2	0	0	Pollution modérée
2- 3	0	0	Pollution importante
> 3	0	0	Pollution très élevée

Les résultats issus de l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) offrent un aperçu significatif de la qualité de l'eau durant la période d'échantillonnage. L'analyse de ces données met en lumière des tendances marquées concernant la présence et l'ampleur de la pollution par les nitrates dans les échantillons d'eau.

Il est essentiel de souligner que l'indice de pollution par les nitrates dans la nappe profonde de Hammam Bradaa est inférieur à 0, ce qui indique que les forages d'eau analysés sont classés dans la catégorie des eaux propres et non polluées par les nitrates.

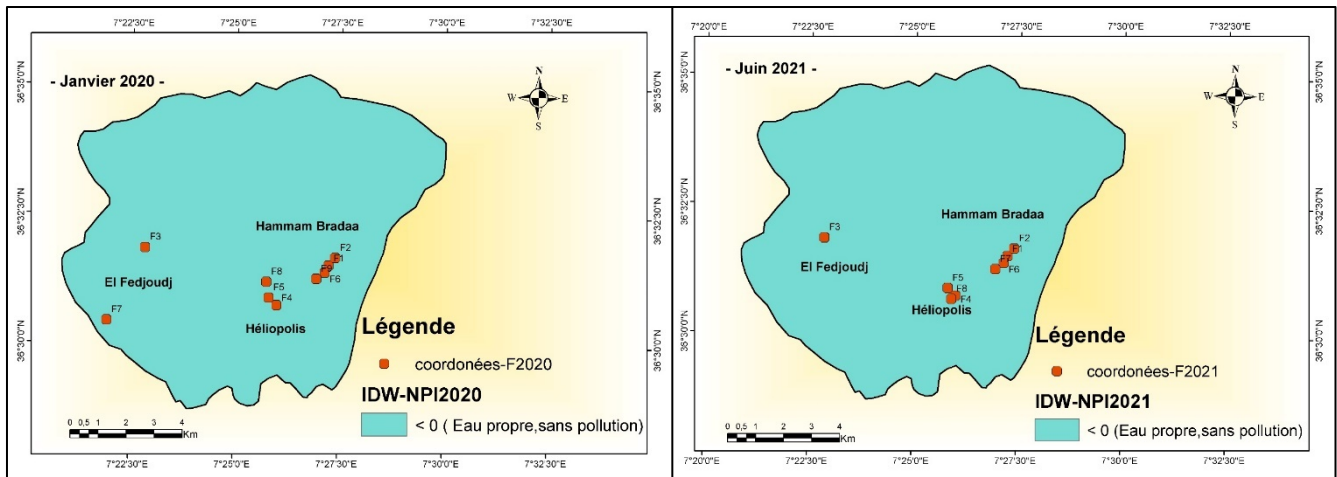


Fig. N°100 : Carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau par les nitrates (NPI) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma.

## V.7.Indice d'irrigation

### V.A.1.Indice de perméabilité (IP)

L'indice de perméabilité du sol, proposé par **Doneen en 1964**. Cet indice est utilisé pour évaluer comment l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation peut affecter la perméabilité du sol. L'indice de perméabilité est défini par la relation suivante :

$$IP\% = \frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-})}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+} * 100 \quad (87)$$

Où :

$Na^+$  est la concentration en sodium (exprimée en milliéquivalents par litre - meq/l) dans l'eau d'irrigation.

$Ca^{2+}$  est la concentration en calcium (exprimée en milliéquivalents par litre - meq/l) dans l'eau d'irrigation.

$Mg^{2+}$  est la concentration en magnésium (exprimée en milliéquivalents par litre - meq/l) dans l'eau d'irrigation.

$HCO_3^-$  est la concentration en bicarbonate (exprimée en milliéquivalents par litre - meq/l) dans l'eau d'irrigation.

**Tableau 88** : L'Indice de perméabilité permet de classer la qualité de l'eau pour l'irrigation en trois catégories distinctes :

IP	% Basses eaux 2021	% Hautes eaux 2022	Nombres de prélèvements	Classes d'irrigation
> 75	0	0	0	Excellente
25- 75	100	100	16 / 18	Bonne
< 25	0	0	0 / 0	Mauvaise

Les résultats du calcul de l'indice de perméabilité (IP %) pour les deux périodes, basses eaux en 2021 et hautes eaux en 2022, révèlent que la plupart des puits de la nappe superficielle affichent une qualité considérée comme bonne pour l'irrigation, et peuvent être utilisés sans problème.

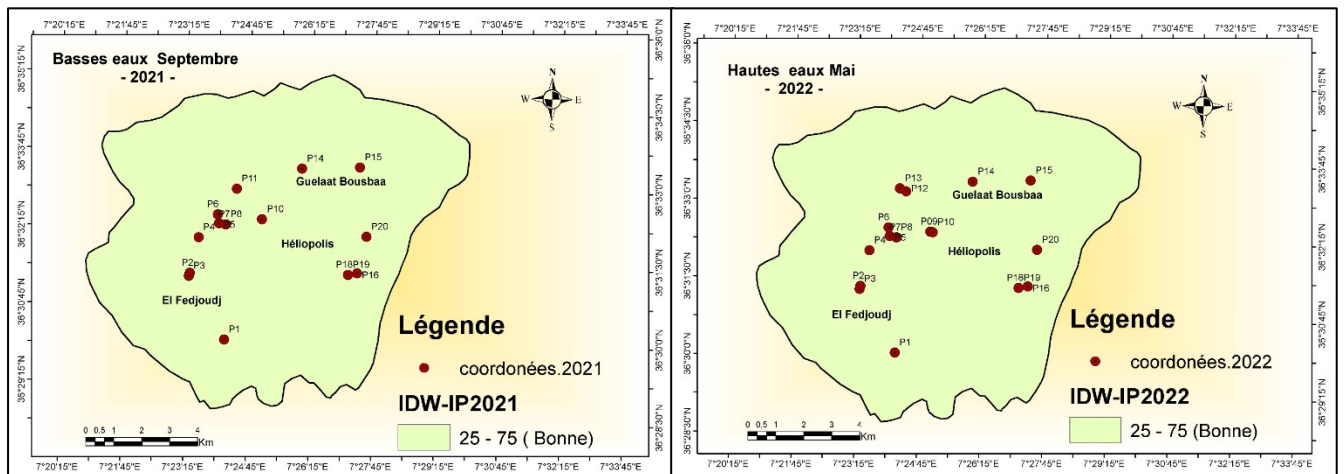


Fig. N°101 : Carte de distribution spatiale d'indice de perméabilité pour (IP) à l'aide de la méthode IDW dans la nappe superficielle de Hammam Bradaa, Guelma.

### B.Nappe profonde

**Tableau 89** : L'Indice de perméabilité permet de classer la qualité de l'eau pour l'irrigation en trois catégories distinctes :

IP	% Janvier 2020	% Juin 2021	Nombres de prélèvements	Classes d'irrigation
> 75	0	0	0	Excellente
25- 75	88,88 / 0	0 / 100	0 / 8	Bonne
< 25	11,11 / 0	0	1 / 0	Mauvaise

D'après les résultats du calcul de l'indice de perméabilité (IP%), il apparaît que la plupart des forages d'eau présentent une qualité bonne en ce qui concerne leur aptitude à l'irrigation. À l'exception d'un seul forage, qui est classé de qualité mauvaise.

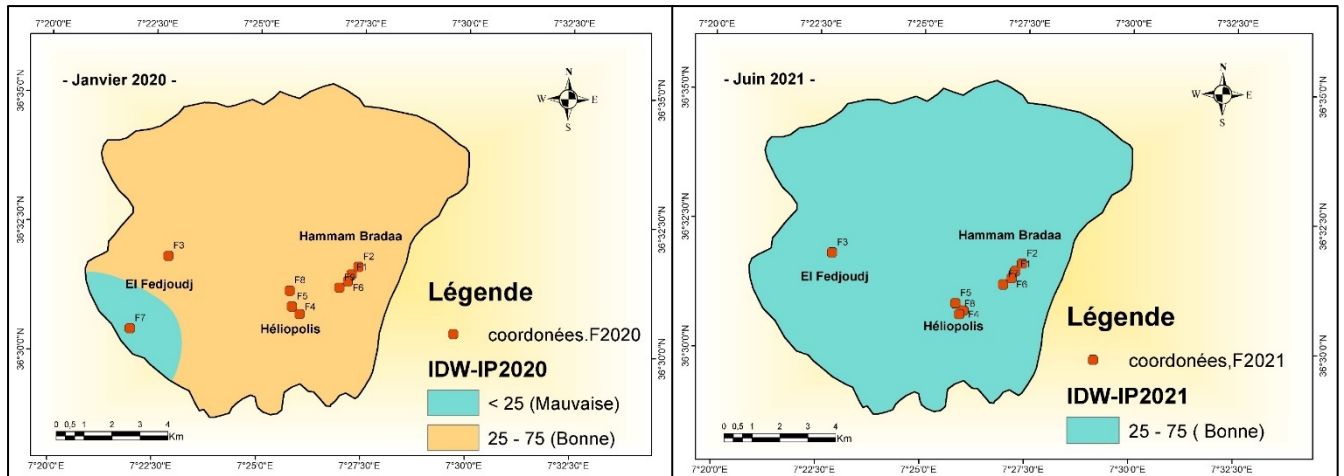


Fig. N°102 : Carte de distribution spatiale d'indice de perméabilité (IP) pour l'irrigation à l'aide de la méthode IDW dans la nappe profonde de Hammam Bradaa, Guelma

## VI. Relation entre nappe superficielle et profonde

Le champ captant de Hammam Bradaa représente un élément stratégique dans le cadre de la sécurité hydrique des agglomérations dont il assure l'approvisionnement, toute contamination pouvant affecter la qualité de ses eaux par les eaux superficielles qui sont soumises à l'activité anthropique risquera de remettre en cause la disponibilité d'un potentiel non négligeable en eau potable pour les régions de Guelma, Bouchegouf et Annaba.

Toute tentative d'identification d'une éventuelle relation entre la nappe des carbonates (profonde) correspondant à des séries néritiques constantinoises dont les grands traits stratigraphiques sont actuellement bien connus. Il s'agit essentiellement, en fait, de formations calcaires Jurassico-crétacé et une couverture marno-calcaire d'âge Sénonien supérieur à Eocène avec la présence de lacunes de sédimentation. La relation de cette nappe avec la nappe superficielle (alluviale) doit tenir en compte de la complexité de l'extension des calcaires néritiques dans le domaine des nappes de charriages. D'après plusieurs auteurs, si ces calcaires affleurent, par endroit, ils se trouvent parfois sous d'épaisses couches de marnes.

En l'absence des données hydrodynamiques fiables pouvant nous permettre d'établir avec précision d'éventuelle relation entre nappe superficielle (alluviale) et profonde, Nous avons exploité les outils : **structural/géologique, piézométrique, hydrochimique et isotopique.**

### ↳ Outil structural et géologique

La configuration tectonique du champ étudié laisse supposer qu'un contact entre les nappes est fort probable et même inévitable vu la structure du bassin néritique qui se présente sous forme de horsts et grabens. Mais l'existence, dans certains endroits, d'un écran marneux d'épaisseur non négligeable minimise l'importance de ce contact. Donc, le contact favorisé par la configuration structurale, s'il existe, serait contrôlé par l'importance de l'écran marneux, et le sens de l'alimentation (du haut vers le bas ou l'inverse) qui elle dépendrait de la charge hydraulique dans chaque nappe.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur ces calcaires et dont les conclusions, pour notre zone d'étude, se résume dans : « *Les formations de la série néritique apparaissent au sommet oriental du Djebel Débagh, celui-ci s'ennoie à l'Est sous les nappes pour réapparaître à la faveur des fenêtres à Hammam Oulad Ali, au Douar Bouzitoune, à la piscine romaine d'Héliopolis (Hammam Bradaa) et enfin à l'Ouest de la station ferroviaire du Nador.* »

### ↳ Piézométrie

La charge hydraulique, ou la différence de pression entre deux nappes d'eau superposées, peut influencer le passage de l'eau d'une nappe à l'autre. Lorsque la nappe supérieure a une charge hydraulique plus élevée que la nappe inférieure, l'eau peut s'écouler de la nappe supérieure vers la nappe inférieure. Ce processus est souvent appelé « drainage interne » ou « interconnexion des nappes ». Ce phénomène peut se produire lorsque les couches géologiques entre les deux nappes sont perméables, ou à travers des fractures.

Cependant, si la nappe inférieure a une charge hydraulique plus élevée que la nappe supérieure, il y aura un mouvement inverse, où l'eau peut s'écouler de la nappe inférieure vers la nappe supérieure si des conditions favorables telles que des fractures ou des failles connectent les deux nappes.

Cette interconnexion des nappes peut avoir des implications importantes pour la qualité et la quantité de l'eau disponible dans différentes zones, ainsi que pour la protection des réserves d'eau souterraine.

Le graphique n°103 montre que la charge hydraulique est supérieure dans la première nappe (superficielle) sauf, au niveau de trois points où il semblerait que les charges sont les mêmes, ceci peut être expliqué par un éventuel contact au niveau de ces points. Il y a certainement d'autres points de contact qui ne sont pas couverts par le graphique, donc, nous pensons que le contact n'est pas systématique mais dépend, surtout, des zones aux alentours des affleurements des calcaires et où les niveaux piézométriques coïncident. La question qui se pose : serait-il un

contact du bas vers le haut, dans ces points, ou l'inverse ? Pour répondre à cette question, nous allons suivre les paramètres hydrochimiques ainsi qu'une analyse isotopique.

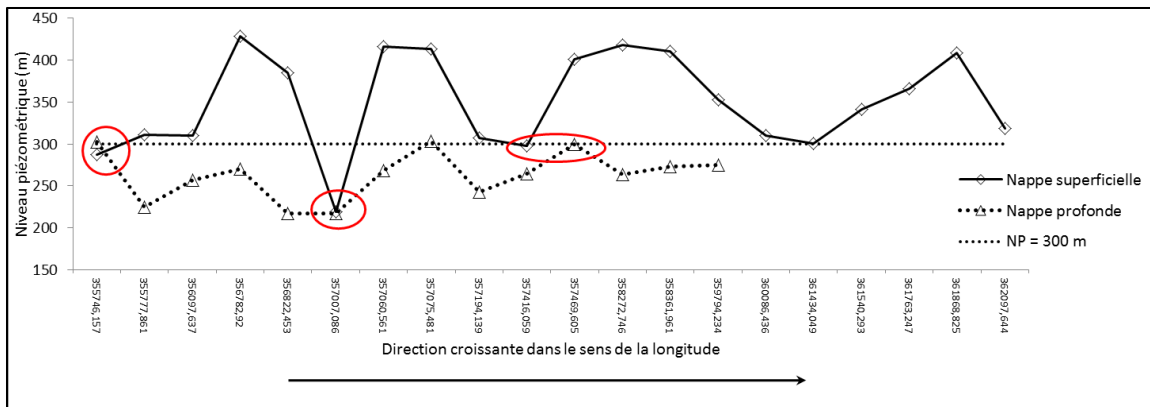


Fig. N°103 : Différence de charge hydraulique entre nappe profonde et superficielle.

### ↳ Outil hydrochimique

Les outils : structural/géologique et piézométriques mettent en évidence un contact entre les deux nappes qui reste limité dans des endroits probablement liés aux zones d'affleurements des calcaires néritiques et/ou les endroits où la couverture marneuse est faible. L'utilisation de l'outil hydrochimique permet d'affiner la direction de ce contact. L'étude de cet outil se base sur l'évolution des bicarbonates dans les deux nappes ainsi que les paramètres de pollution tels que  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , et  $\text{PO}_4$ .

#### • Evolution des bicarbonates

Les faciès des eaux des aquifères carbonatés comme celui du néritique appartiennent au type bicarbonaté, si aucune modification (pollution) ne vient perturber la composition ionique des eaux, effectivement les résultats des analyses effectuées indiquent la dominance de ce faciès dans les eaux de la nappe profonde. Par ailleurs, les études montrent que les aquifères alluvionnaires peuvent avoir des faciès évaporitiques liés aux interactions avec les matériaux géologiques environnants, mais rarement carbonatés.

Par contre, on note que le faciès dominant des eaux de la nappe superficielle est surtout bicarbonaté dans **53%** des cas mais en comparant les anions des faciès évaporitique ( $\text{Cl}+\text{SO}_4$ ) avec les bicarbonates ( $\text{HCO}_3$ ), on trouve qu'à seulement dans **14%** des cas les bicarbonates dominent les chlorures et sulfates ensemble, mais dans **86%** des cas ces derniers ( $\text{Cl}+\text{SO}_4$ ) dominent le premier ( $\text{HCO}_3$ ) figure n°104. L'étude de l'évolution des faciès de la nappe superficielle montre qu'en périodes des basses eaux, le faciès dominant est bicarbonaté, alors qu'en hautes eaux, il devient évaporitique dans la majorité des points analysés. Nous pensons qu'en saison de pluies, la recharge se fait par les précipitations et la nappe superficielle conserve

son faciès d'origine (évaporitique) alors qu'en période de basses eaux, l'alimentation se fait par la nappe profonde ce qui se traduit par un transfert des eaux bicarbonatées du bas vers le haut et le faciès de la nappe superficielle devient dans sa majorité bicarbonatée. Ceci nous conduit à dire que, sans doute, le faciès original des eaux de la nappe superficielle est évaporitique qui a été contaminé par les eaux bicarbonatées de la nappe profonde, notamment en période des basses eaux provoquant, ainsi, un déséquilibre important dans la composition ionique des eaux de la nappe superficielle. L'observation du graphique n°105 montre que l'évolution des bicarbonates (meq/l) dans les deux nappes se fait selon la même pente, sauf que les teneurs sont plus importantes dans les eaux de la nappe profonde. Ceci peut être expliqué par un apport en cet ions à partir de la nappe profonde, soit par drainage interne (du bas vers le haut) dans les zones favorables, soit par une éventuelle alimentation latérale à partir des massifs calcaires sur les bordures (les courbes isopièzes de la carte relative à la nappe superficielle sont parallèle à la limite Sud –Est.

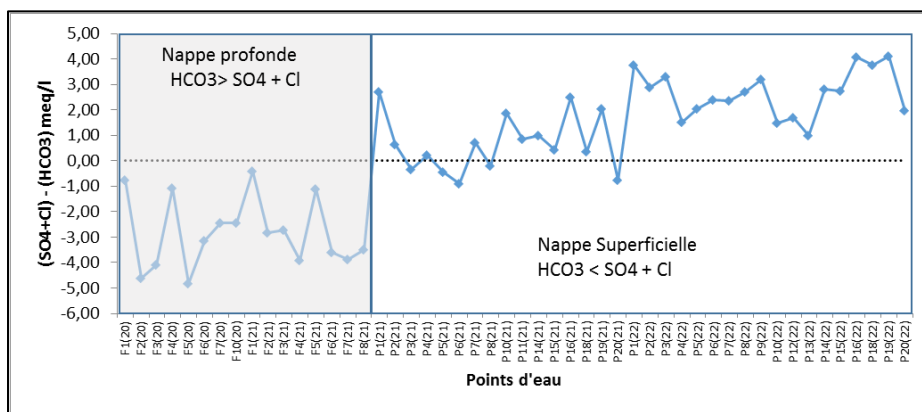


Fig. N°104 : Types des faciès en fonction des anions dominants (SO4+Cl)-(HCO3).

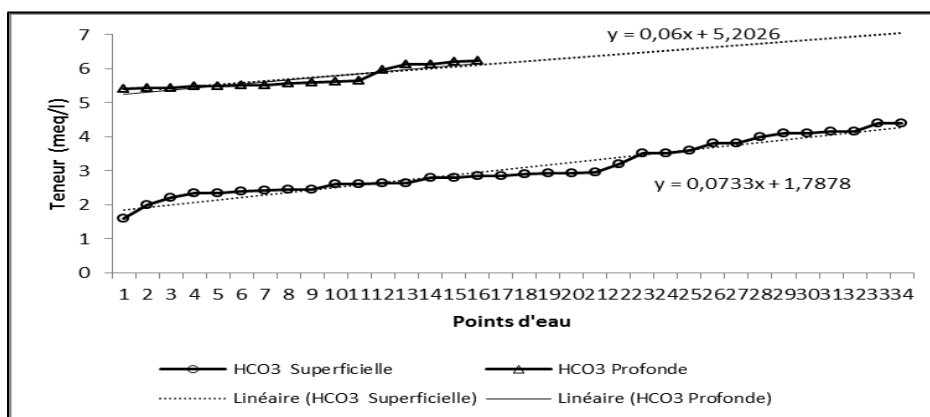


Fig. N°105 : Evolution de (HCO3) dans les nappes : superficielle et profonde

- **Paramètres de pollution**

L'étude des paramètres de pollution dans les deux nappes permet de voir si le passage de ceux-ci se fait et surtout dans quelle direction. Nous avons sélectionné les nitrates, l'ortho phosphate,

et l'ammonium. Le suivi des teneurs de chaque paramètre dans le même graphique des eaux de la nappe superficielle et profonde (Fig. 106) permet de relever les remarques suivantes :

- Dans tous les cas, les teneurs en paramètres de pollution sont plus faibles dans la nappe profonde que la nappe superficielle,
- Les teneurs sont stables et ne changent presque pas dans la nappe profonde (pas d'influence de surface) mais très variables dans la nappe superficielle à cause de l'influence d'activité anthropique (pollution).

Il se trouve que les deux nappes ne sont pas affectées par les mêmes teneurs et donc le passage des eaux du haut vers le bas est à exclure, alors que dans le sens inverse est possible mais ne peut pas être confirmé par les graphiques. Le passage des eaux du bas vers le haut peut affecter, par le phénomène de dilution, les teneurs des paramètres contrôlés dans la nappe superficielle.

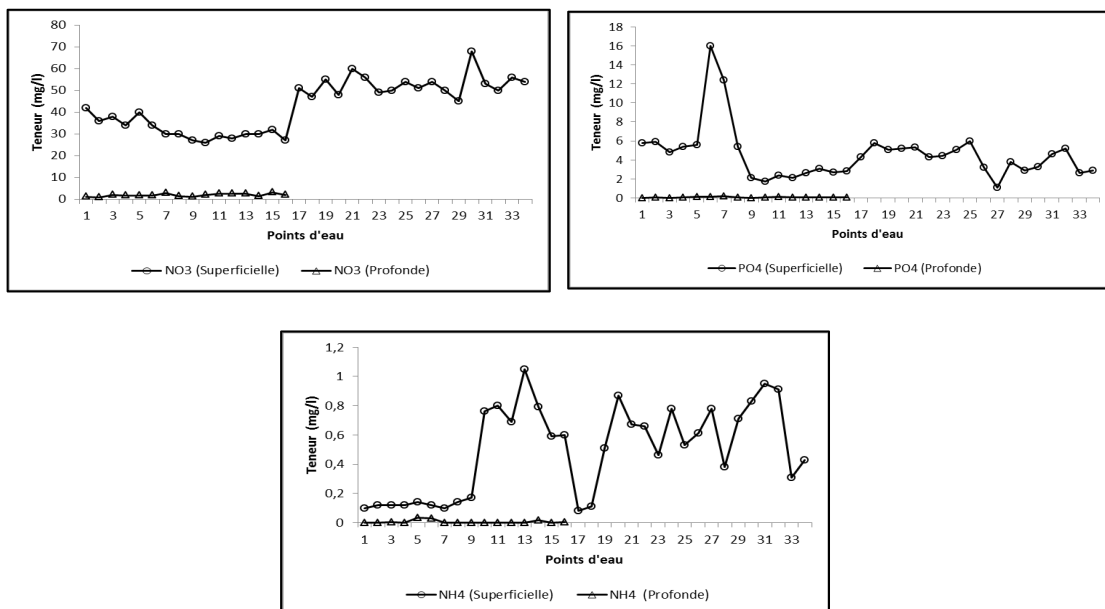


Fig. N° 106 : Evolution des paramètres de pollution dans les nappes : superficielle et profonde.

### ↳ Outil des isotopes

- **Rappel d'hydrologie isotopique :**

La composition isotopique d'une eau est telle une empreinte qui permet d'identifier des eaux d'origines différentes ou l'inverse. Les isotopes stables sont souvent utilisés dans l'étude des connexions des nappes notamment ceux dont les ions composent la molécule d'eau à savoir : l'oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ), le Deutérium ou Hydrogène lourd ( $^2\text{H}$  ou D), Cependant, du fait de leur faible différence de masse, ils présentent des abondances différentes dans des phases différentes

comme la vapeur d'eau (condensation) et l'eau liquide (équation 88), l'abondance dans telle ou telle phase est contrôlée par le fractionnement isotopique.



Les variations du rapport atomique « R » ( $R = N'/N$ ) où « N' » est l'isotope rare et « N » est l'isotope abondant d'un échantillon, il est généralement déterminé à l'aide d'un spectromètre de masse et exprimé en valeur delta ( $\delta$ ) par rapport à un matériel de référence (standard, std) ou SMOW (Standard Mean Ocean Water), l'océan étant le début et le point final du cycle hydrologique et représente 97% de la masse de l'eau.

La proportion relative de ces différentes molécules s'appelle la composition isotopique et est quantifiée par la relation :

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) * 1000 \quad (89)$$

Les études (IAEA, 2008 , Moulla. A.S, Guendouz. A, Cherchali. M.E.H, 2002) ont montré que l'oxygène-18 et le deutérium sont conservatifs dès qu'ils atteignent le niveau de la nappe, l'usage de ces isotopes représente souvent l'outil le plus efficace pour étudier la possibilité d'une connexion. A condition bien sûr que la signature isotopique des deux aquifères soit suffisamment différente.

#### Résultats de l'analyse isotopique

Pendant l'évaporation de l'eau, les molécules d'eau s'évaporent de manière sélective en fonction de la masse de leurs isotopes, ce qui entraîne un fractionnement isotopique. Ce processus est principalement dû aux différences dans les énergies de liaison des isotopes de l'oxygène (**16-O** et **18-O**) et de l'hydrogène (**1-H** et **2-H** ou **deutérium**).

Par ailleurs, les isotopes les plus lourds (**18-O**) ont des liaisons moléculaires légèrement plus fortes que les isotopes plus légers (**2-H**). Ainsi, l'énergie nécessaire pour briser les liaisons entre les isotopes plus lourds (**18-O**) est légèrement plus élevée que celle exigée pour les isotopes plus légers (**2-H**). Lorsque l'eau s'évapore, les molécules contenant des isotopes plus lourds ont une légère tendance à rester dans l'eau liquide, tandis que celles contenant des isotopes plus légers ont une probabilité légèrement plus élevée de s'évaporer et de former la vapeur.

Le dépouillement du graphique N° 107, indique qu'un alignement parfait des points relatifs aux nappes, superficielle et profonde avec un  $r^2$  de l'ordre de **0,93** témoignant ainsi d'une origine commune des eaux des deux nappes qui serait le résultat d'un mélange lié aux masses d'air provenant de la mer méditerranée orientale et occidentale (malheureusement nous ne nous

disposons pas de l'analyse isotopique des pluies dans la région pour la comparer avec celle des eaux étudiées).

Les points de la nappe profonde se regroupent et se superposent sans qu'ils ne soient dispersés indiquant ainsi la conservation de sa signature isotopique originale de la pluie ancienne du fait que cette nappe est protégée de toute interaction avec l'extérieur, ceci permet d'exclure le contact du haut vers le bas et confirme les résultats du suivi des paramètres de pollution. Alors, qu'on remarque que la dispersion des points de la nappe superficielle selon une droite de pente 4,5 indiquant que ses eaux ont subi un fractionnement isotopique qui les a enrichis en isotopes lourds (**0-18 et H-2** par rapport à **16-O et 1-H**), cette nappe étant proche de la surface, ces eaux subissent les influences des aléas thermiques et donc sont soumises au phénomène d'évaporation. Ceci n'exclue pas la possibilité d'un contact du bas vers le haut.

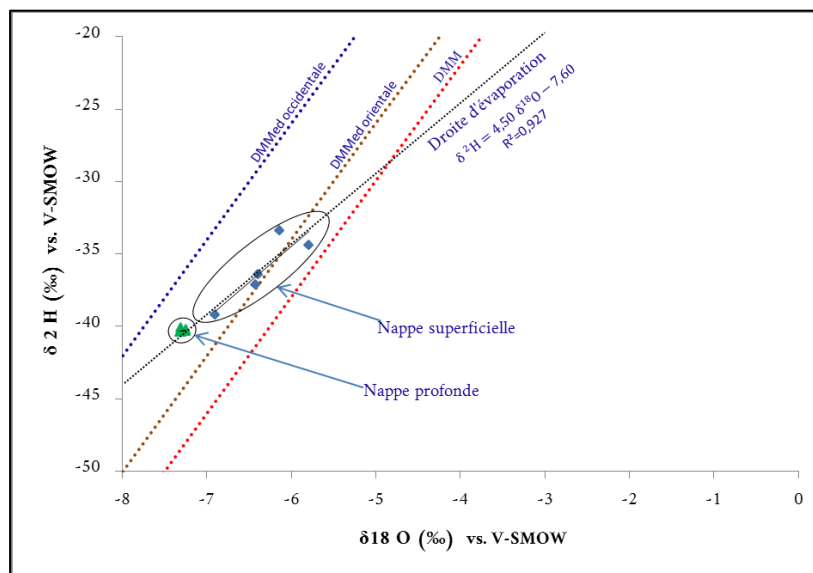


Fig. N°107 : Evolution en isotopes stables des eaux dans les nappes : superficielle et profonde.

#### ✚ Synthèse des arguments du contact entre nappes : superficielle et profonde :

En plus d'une alimentation latérale, dans certains endroits, de la nappe superficielle par les formations calcaires se trouvant sur les bordures, nous pensons, en se basant sur les arguments qui précèdent qu'un contact du bas vers le haut (de la nappe profonde vers la nappe superficielle) est fort probable dans les zones aux alentours des affleurements des calcaires. Les eaux des deux nappes ont la même origine qui serait liée aux pluies issues des masses d'air provenant de la mer méditerranée orientale et occidentale. On remarque aussi que la signature originale de ces pluies est conservée dans les eaux de la nappe profonde, cette même nappe est protégée des influences de l'activité polluante de surface, par contre, la nappe superficielle a

subi une évaporation provoquant un enrichissement en isotopes lourds, d'une part, et une contamination par l'activité anthropique, d'autre part.

## **VII. Conclusion**

L'observation des échantillons d'eaux souterraines examinées (puits forages) des nappes : superficielle et profonde de Hammam Bradaa sur le diagramme de Piper, montre la présence de deux familles chimiques dominantes.

- Une famille de facies chimique bicarbonaté calcique et magnésienne associé à des formations géologiques riches en calcaire ou en roches carbonatées. Ce type de facies caractérise surtout la nappe profonde.
- Une famille de facies chimique chloruré et sulfaté calcique et magnésienne indiqué par la présence de formations géologiques riches en minéraux tels que le gypse, le sel ou d'autres sels de calcium et de magnésium caractérise surtout la nappe superficielle.

Le pH des eaux de Hammam Bradaa varie pour la plupart des échantillons entre 7 et 8, ce qui indique que les eaux analysées sont pour la plupart neutres à alcalines et dépassent pas les normes établies par l'OMS.

Les résultats des valeurs de la conductivité électrique lors des deux campagnes de prélèvements indiquent des variations au-dessous des normes recommandées par l'OMS.

L'analyse descriptive des éléments nutritifs (nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphate) montre des concentrations supérieures aux normes établis par l'OMS, ce qui indique une pollution agricole.

D'après le diagramme de Gibbs, les échantillons prélevés pendant les deux périodes basses et hautes eaux (2020,2021 et 2022) indique une interaction entre les échantillons étudiés et les formations rocheuses, ce qui suggère une dissolution des minéraux évaporitiques tels que le gypse  $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$  et l'halite  $[\text{NaCl}]$ . L'indice d'échange de base est positif, cela signifie que les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  présents dans l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  provenant des formations géologiques encaissantes.

Les indices de saturation montrent que la plupart des échantillons sont en sursaturation par rapport aux minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) et en sous-saturation par rapport au gypse, anhydrite et halite (minéraux évaporitiques).

L'analyse statistique multi variée (CAH) montre différents groupes selon les campagnes de prélèvements (2020,2021 et 2022) dans les deux nappes superficielle et profonde de Hammam Bradaa.

Les indices de qualité ont été appliqués pour évaluer la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine dans les régions d'El Fedjoudj, Héliopolis, Hammam Bradaa et Guelaat Bousbaa. Où les résultats se présentent comme suit :

- ✚ Les valeurs calculées de WQI de 34 puits et 17 forages ont indiquées que la majorité de ces puits et forages étaient de bonne qualité d'eau.
- ✚ L'indice EWQI indique que la plupart des échantillons étudiés appartiennent à la catégorie bonne.
- ✚ Les résultats obtenus à partir de l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) indiquent que les échantillons analysés appartiennent à trois classes de pollution (légère, modérée et importante).

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation par l'indice de perméabilité (IP) montre que tous les points d'eau échantillonnés se trouvent dans la classe bonne, sauf dans un seul forage où la classe est mauvaise.

Tous les échantillons d'eau prélevés de la nappe superficielle et profonde sont bons pour la consommation humaine et l'irrigation.

L'étude de la relation entre la nappe superficielle et profonde d'après les outils géologiques, structurales, piézométriques et isotopique confirme que le contact se fait du bas vers le haut (de la nappe profonde vers la nappe superficielle) dans les zones aux alentours des affleurements des calcaires. Les eaux des deux nappes ont la même origine qui serait liée aux pluies issues des masses d'air provenant de la mer méditerranée orientale et occidentale.

## | *Conclusion générale*

## CONCLUSION GENERALE

La région de Guelma dont fait partie la zone étudiée est située au Nord-Est Algérien et constitue la partie Nord du bassin d'effondrement de la plaine de Guelma située entre la longitude 7 °18'00"E, 7 °33'00"E et latitude 36 ° 30'00" N, 36°36'00 N et constitue, du point de vue géographique, un point de rencontre, voire un carrefour entre les pôles industriels du Nord (Annaba et Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum El Bouaghi et Tébessa). Elle occupe une position médiane entre le Nord du pays, les Hauts plateaux et le Sud.

La zone d'étude fait partie du domaine externe de la chaîne des Maghrébides de l'Algérie orientale. Les terrains qui constituent le sol et le sous-sol sont variés et leurs âges oscillent entre le Trias et le Quaternaire, présentant ainsi une lithologie très variée. La majeure partie de ces roches sédimentaires est recouverte par une couverture Quaternaire (d'alluvions, de graviers et de sables), par des formations Miocène et du Pliocène.

Du point de vue géomorphologique, la région de Guelma correspond à une dépression à valeur de bassin allongé Est-Ouest, dans laquelle ce sont accumulées les dépôts récents du Néogène. Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud, à des reliefs constitués de terrains, allochtones, appartenant, pour l'essentiel, au domaine Tellien, connu pour être géologiquement constitué de marnes et de carbonates d'âge méso cénozoïque et dont la sédimentation, de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique. L'édifice structural de ce pays, qui est tectoniquement fortement accidenté est bien exposé entre Guelma et Guelaat Bousbaa. Il comporte un empilement de nappes où on reconnaît aisément plusieurs unités continues, d'Est en Ouest, entre lesquelles s'intercalent des écaillés discontinues.

Les formations néritiques constantinoises qui représentent la terminaison orientale du domaine, apparaissent à la faveur de fenêtres, à Djebel Débagh, à l'Est de Hammam Oulad Ali, à Héliopolis et à Nador. D'Ouest en Est ces formations carbonatées constituent le substratum des nappes telliennes de Guelma.

L'étude climatologique de la région d'étude sur une période d'observation de 40 ans (1981-2021) pour la station de Belkheir, nous a permis de définir un climat tempéré caractérisé par des précipitations annuelles de 683,52 mm, avec une température moyenne de l'ordre 16,41°C. L'évolution annuelle des précipitations et des températures, permet de distinguer deux saisons l'une hivernale pluvieuse et froide et l'autre d'été chaude et sèche.

L'établissement du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite a permis l'estimation de la valeur de l'ETR qui montre qu'une grande partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration réelle de l'ordre de 492,6 mm.

Le calcul du bilan hydrologique nous a permis d'évaluer une lame d'eau ruisselée et infiltrée respectivement 15,57% et 12,36% des précipitations, ce qui laisse supposer que l'alimentation de la nappe ne se fait pas uniquement par infiltration efficace, mais qu'une bonne partie de l'eau d'alimentation provienne par les formations carbonatées bordent la nappe.

Les données hydrogéologiques de certains forages réalisés sur la région d'El Fedjoudj, Héliopolis et Hammam Bradaa indiquent la présence de deux aquifères distincts :

- ✓ **Un aquifère alluvionnaire** d'âge Mio-Plio-Quaternaire, d'une épaisseur de 15 m se trouve à une profondeur de 5 m.
- ✓ **Un aquifère carbonaté néritique** est principalement constitué de calcaire dolomitique du Sénonien supérieur et de calcaire bio-détritiques.

La piézométrie effectuée dans la zone d'étude révèle une direction générale d'écoulement des eaux souterraines du Nord au Sud. L'interprétation des cartes piézométriques met en évidence la relation entre la nappe et l'Oued (Oued Seybouse). L'aquifère alluvionnaire est principalement alimenté par les précipitations, les calcaires fissurés et les failles. Les écoulements naturels de ces aquifères se produisent par le biais de sources, de forages et par évapotranspiration.

Selon les coupes litho stratigraphiques et hydrogéologiques effectuées, les formations calcaires affleurent le long de l'axe Hammam Bradaa, Héliopolis et El Fedjoudj, puis s'enfoncent sous une couche de marne avec une inclinaison prononcée dans les directions Nord et Sud. En revanche, l'enfoncement est plus progressif dans les directions Est et Ouest. Il est important de signaler que la karstification des calcaires, parfois est superficielle et parfois elle est profonde.

Dans la région d'Héliopolis, des formations calcaires affleurent par endroit, de manière isolée et avec des dimensions variables. Elles sont recouvertes par des formations plus récentes telles que les formations quaternaires, les flysch, les nappes telliennes et ultra-telliennes. Les forages mécaniques effectués dans la région traversent ces formations à différentes profondeurs, permettant ainsi d'observer leur géométrie et leur orientation le long de l'axe El Fedjoudj, Hammam Bradaa et Mechtat Bouzitoune. Cette zone représente une importance significative du point de vue aquifère en raison de l'extension et de l'épaisseur des formations néritiques, ainsi que du débit d'eau souterraine prélevé.

La zone d'étude présente une karstification notable dans le néritique, observable à des profondeurs variantes entre 50 et 350 mètres. Cette karstification offre des opportunités d'étude et d'exploitation significatives du système aquifère. Actuellement, une dizaine de forages exploitent cet aquifère, générant un débit total de 357 litres par seconde.

L'interprétation de l'essai de pompage du forage maachou, qui capte la nappe profonde prouve que cette nappe présente les caractéristiques d'un karst (T et K).

La combinaison des données du levé géophysique et des données géologiques a fourni des informations sur la géométrie et la constitution de l'aquifère néritique. Il est constitué de calcaire fissuré d'une épaisseur moyenne de 300 m de Hammam Bradaa et Bouzitoune à Guelaat Bousbaa. Cette formation carbonatée est une nappe phréatique souterraine importante affectée par un réseau de failles orientées Sud-Ouest et Nord-Est formant des horsts et des grabens qui contribuent à la karstification des formations aquifères.

Les calcaires néritiques et sénoniens d'Héliopolis présentent un grand intérêt en tant qu'aquifère, compte tenu de l'extension et de l'épaisseur des formations carbonatées et, surtout, du débit retiré. Le flux général s'étend d'Ouest en Est, du pic oriental du Djebel Débagh à Hammam Bradaa, où la source romaine a émergé en raison d'affleurements calcaires.

A partir des coupes transversales hydrogéologiques et géoélectriques, nous avons trouvé une corrélation claire entre les coupes transversales hydrogéologiques et les coupes transversales géoélectriques, dont la profondeur moyenne du calcaire est comprise entre 30 et 325 m. La profondeur moyenne du toit calcaire est située approximativement de 10 à 350 m, reflétant la morphologie irrégulière des formations calcaires néritiques de la région d'étude et les conséquences favorables sur l'identification possible d'aquifères potentiels dans la région.

L'étude géophysique combinée de la gravité et du sondage électrique (SEV), calibrée avec des données de forage, a considérablement amélioré la compréhension géologique de la structure profonde de la région de Hammam Bradaa. La zone de Hammam Bradaa se caractérise par une anomalie de gravité résiduelle positive qui correspond au développement en surface des calcaires du domaine néritique de Constantine, connus pour leur potentiel en eau souterraine. Les résultats de la détection des contours à plusieurs échelles ont indiqué que la zone d'étude est affectée par des failles profondes Nord-Est, Sud-Ouest et Est-Ouest, tandis que les failles peu profondes sont orientées Nord-Est, Sud-Ouest, Est-Ouest et Nord-Ouest, Sud-Est.

Selon la distribution des anomalies de gravité, la zone d'étude se caractérise par deux styles tectoniques opposés:

- (1) Une tectonique à peu mince, caractérisée par des linéaments inclinés vers le Nord en relation avec des nappes de charriage,
- (2) Une tectonique à peu épaisse ou tectonique du socle, caractérisée par des linéaments inclinés vers le Sud en relation avec le socle.

Les linéaments peu profonds ou contacts dans la zone d'étude se trouvent près des zones de recharge proches du Djebel Bousbaa et peuvent indiquer des emplacements potentiels pour des aquifères productifs en eau souterraine.

La présence simultanée de hautes valeurs de gravité et de résistivité au même endroit indique la possibilité d'occurrence de formations calcaires en profondeur, ce qui pourrait contribuer à l'accumulation d'eau souterraine.

L'observation des échantillons d'eaux souterraines examinées (puits forages) de la nappe superficielle et profonde de Hammam Bradaa sur le diagramme de Piper, montre la présence de deux familles chimiques dominantes.

- Une famille de facies chimique bicarbonaté calcique et magnésienne associé à des formations géologiques riches en calcaire ou en roches carbonatées. Ce type de facies caractérise surtout la nappe néritique profonde.
- Une famille de facies chimique chloruré et sulfaté calcique et magnésienne indiqué par la présence de formations géologiques riches en minéraux tels que le gypse, le sel ou d'autres sels de calcium et de magnésium. Ce type de caractérise surtout la nappe superficielle.

Les résultats des valeurs de la conductivité électrique lors des deux campagnes de prélèvements indiquent des variations au-dessous des normes recommandées par l'OMS, sauf dans un seul échantillon où la valeur dépasse la norme.

L'analyse descriptive des éléments nutritifs (nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphate) montre des concentrations supérieures aux normes établis par l'OMS, ce qui indique une pollution agricole.

D'après le diagramme de Gibbs, les échantillons prélevés pendant les deux périodes basses et hautes eaux (2020,2021 et 2022) indiquent une interaction entre les échantillons étudiés et les formations rocheuses. L'indice d'échange de base est dans la majorité des cas positif, cela signifie que les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  présents dans l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  provenant des formations géologiques encaissantes.

Les indices de saturation montrent que la plupart des échantillons sont en sursaturation par rapport aux minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) et en sous-saturation par rapport au gypse, anhydrite et halite (minéraux évaporitiques).

L'analyse statistique multi variée (CAH) montre différents groupes selon les deux campagnes de prélèvements basses et hautes eaux (2020,2021 et 2022) des deux nappes superficielle et profonde de Hammam Bradaa.

Les indices de qualité ont été appliqués pour évaluer la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine dans les régions d'El Fedjoudj, Héliopolis, Hammam Bradaa et Guelaat Bousbaa. Où les résultats sont présentés comme suit :

- ✚ Les valeurs calculées de WQI de 34 puits et 17 forages ont indiquées que la majorité de ces puits et forages étaient de bonne qualité d'eau.
- ✚ l'indice EWQI indique que la plupart des échantillons étudiés appartiennent à la catégorie bonne.
- ✚ Les résultats obtenus à partir de l'Indice de Pollution par les Nitrates (NPI) indiquent que les échantillons analysés appartiennent à trois classes de pollution (légère, modérée et importante).

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation par l'indice de perméabilité (IP) montre que tous les points d'eau échantillonnés se trouvent dans la classe bonne, sauf dans un seul forage ou la classe est mauvaise.

Tous les échantillons d'eau prélevés de la nappe superficielle et profonde sont bons pour la consommation humaine et l'irrigation. Il serait important d'élargir le spectre des paramètres contrôlés pour affiner cette qualité.

L'étude de la relation entre la nappe superficielle et profonde d'après les outils géologiques, structurales, piézométriques et isotopique confirme que le contact se fait du bas vers le haut (de la nappe profonde vers la nappe superficielle) dans les zones aux alentours des affleurements des calcaires. L'analyse isotopique indique que les eaux des deux nappes ont la même origine qui serait liée aux pluies issues des masses d'air provenant de la mer méditerranée orientale et occidentale.

### *Recommandation*

- Effectuer des analyses isotopiques sur les pluies de la région d'étude pour préciser la source de la recharge des nappes,
- Effectuer des analyses des métaux lourds sur les eaux des deux nappes pour chercher d'éventuelles influences de l'activité industrielles,

- Il serait préférable d'effectuer des piézomètres dans le champ captant pour le suivi périodique de la piézométrie, l'utilisation des points d'eau pour la mesure du niveau d'eau est souvent difficile voire impossible dans certains cas,
- L'étude des eaux de la nappe superficielle indique qu'elles sont de bonne qualité, il serait intéressant d'élargir le spectre des paramètres contrôlés pour affiner cette qualité et proposer un traitement de ces eaux qui représentent un potentiel non négligeable,
- Proposer un programme de contrôle et de protection, en interdisant toutes activités polluantes sur les zones des affleurements des calcaires qui représentent des aires de recharges et des endroits vulnérables à la pollution de la nappe.
- Renforcer l'identification des aquifères potentiels dans la région d'étude par d'autres méthodes géophysiques telles que la méthode de sismique réfraction et la technique diagraphie et géo radar.

## | *Références bibliographiques*

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abbasi, S. A, Khan, F. I, Sentilvelan, K., & Shabudeen, A, 2002** : Modelling of Buckingham Canal water quality. *Indian Journal of Environmental Health*, 44(4), 290– 297.
2. **Abd El-Gawad, A.M.S., Kotb, A.D., & Hussien, G.H, 2017** : Geoelectrical contribution for delineation the groundwater potential and subsurface structures on Tushka Area, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(2), 379-394.  
<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.10.003>
3. **Abdulrazzaq, Z.T., Agbasi, O.E., Aziz, N.A., & Etuk, S.E, 2020** : Identification of potential groundwater locations using geophysical data and fuzzy gamma operator model in Imo, Southeastern Nigeria. *Applied Water Science*, (10), 188.  
<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01264-6>
4. **Abtout, A., Hamai, L., Bouyahiaoui, B, 2005** : Etude gravimétrique de la région de Guelaat Bousbaa-Nador et du Bassin d'Oued Zenati (Guelma): Reconnaissance des aquifères. Rapport ANRH (Agence National des Ressources Hydriques).
5. **ADE, 2018** : Fiche techniques des forages. Algérienne des eaux. Guelma. agricole., Quatrième édition, Editions F.A.O., I.F.A. (Paris, France) et IMPHOS (Casablanca, agriculture organisation, Rome, Italy. 90p.
6. **Aissaoui.M, 2018** : Caractéristiques hydro chimiques des eaux de l'Oued Seybouse et ses affluents dans la région de Guelma - quantification du degré de la pollution. Thèse de Doctorat LMD en hydrogéologie. Université Badji Mokhtar Annaba.
7. Algérie). (France.).
8. **Ameur, Z.O., Brioua, A., Zerdazi, A., Belksier, M.S., & Kechiched, R, 2015** : Apports de la prospection géophysique a l'identification des aquifères : cas du secteur de Hammam Bradaa – Guelma, Algerie Orientale.
9. **ANRH ,2012** ; Agence Nationale des Ressources Hydriques., Grille de qualité des eaux de surface.
10. **Appelo, C. A. J & Willemssen A, 1987** : Geochemical Calculations and Observations on Salt Water Intrusions, I. A Combined Geochemical mixing Cell Model.” *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90058-8).
11. **Archibald, N., Gow, P., Boschetti, F, 1999** : Multiscale edge analysis of potential field data. *Explor. Geophys.* 30 (2), 38–44.

12. **Aris, Y., Coiffait, P.E., Michel Guiraud, M , 1998** : Characterisation of mesozoic–cenozoic de formations and palaeo stress fields in the central constantinois, northeast Algeria.
13. **Astier. J.L, 1971** : Géophysique appliquée à l’hydrogéologie. Edition Masson&Cie. Paris.
14. **Austin, J.R., Blenkinsop, T.G, 2008** : The Clon curry lineament: geophysical and geological evidence for a deep crustal structure in the Eastern Succession of the Mount Isa inlier. *Precambrian Res.* 163 (1–2), 50–68.
15. **Bahrami M, Zarei A R, Rostami F, 2020** : Temporal and spatial assessment of groundwater contamination with nitrate by nitrate pollution index (NPI) and GIS (case study: Fasarud Plain, southern Iran). *Environmental Geochemistry and Health* 42(10): 3119-3130.
16. **Bechiri N, 2011** : Evolution du chimisme des eaux de surface et souterraines dans le bassin versant de la Seybouse (Nord-est Algérien). Mémoire de Magister en qualité des eaux et impact sur l’homme et l’environnement. Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
17. **Bencharef, M.H., Boubaya, D., Aboud, E., Ayfer, S, 2022** : Role of an advanced gravity data analysis in improving the geologic understanding of the northern Tebessa region, Northeastern Algeria. *J.Afric. Earth Sci.* 196 (December), 104693.
18. **Benmarce K, 2015** : Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la région de Guelma, Nord-est Algérien. Thèse Doctorat Université Badji Mokhtar Annaba, (Algérie).
19. **Benmarce, K., Khanchoul, K., 2019** : Physicochemical and is otopical characterization of groundwater in the basin of Guelma, North-East of Algeria. *J.Water Land Dev.*Nº. 42 (VII–IX), 33–41.
20. **Bhattacharyya, B.K, 1966** : Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics* 3 1, 97–12 1.
21. **Blakely, R.J., Simpson, R.W, 1986** : Approximating edges of source bodies from magnetic
22. **Blayac. J, 1912** : Esquisse géologique du bassin de la Seybouse et de quelques régions voisines. Thèse sc. Paris B.S.C.G. Algérie n°6 490 p 53 fig. 6 plv. Alger.
23. **Bouaicha, F., Dib, H., Belkhiri, L., Manchar, N., Chabour, N, 2017** : Hydrogeo chemistry and geothermometry of thermal springs from the Guelma region, Algeria. *J. Geol. Soc. India* 226–232.

24. **Bouaicha.F, 2018** : Le géothermalisme de la région de Guelma. Thèse de Doctorat en sciences. Universités Frères Mentouri Constantine 1.
25. **Boubaya, 2017** : Combining resistivity and aeromagnetic geophysical surveys for groundwater exploration in the maghnia plain of Algeria. *J. Geol. Res.* 2017, 1–14.
26. **Boubaya, D., Allek, K., Hamoudi, M, 2011** : Is there a hidden salt diapir in the Guelma Basin, NE Algeria. *J. Appl. Geophys.* 73, 348–356.
27. **Bouchama, M., Assassi, F, 2020** : Etude sédimentologique de la série néritique carbonatée Cenomano-Albienne du groupe oriental Constantinois-Cas Djebel Grar NE Algerien. *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 26 (num´ero1), 39–51.
28. **Boudjebieur.A, 2022** : Modélisation de la gestion des eaux dans la région de Guelma (moyenne Seybouse).Thèse de Doctorat LMD. Université Badji Mokhtar Annaba.
29. **Boudoukha, A. & Messaidb, 2014** : Caractérisation électrique des formations aquifères de l’Est Algerien. *Courrier du Savoir – N°18*, Mars 2014, pp.77-82.
30. **Boudoukha, A.2008** : Identification des aquifères profonds par la prospection électrique application à l’Est Algérien. *Sciences et Technologies*, (28), 47-52.
31. **Bouillin J.P, 1986** : Le « bassin maghrébin » : une ancienne limite entre l’Europe et l’Afrique à l’ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. France*, 8(2) 547-558.
32. **Brahmia.A, 2009** : Etude de la structure profonde du système aquifère du fosse d'effondrement de Terraguelt, haute Seybouse. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.
33. **Brahmia N, 2016** : Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans le Bassin versant de la moyenne Seybouse. Thèse de Doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar d’Annaba, Algérie.
34. **Brinis.N, 2011** : Caractérisation de la salinité d’un complexe aquifère en zone aride cas de l’aquifère d’el-Outaya région nord-ouest de Biskra. Algérie. Thèse de Doctorat en sciences. Université Mohamed Kheider – Biskra.
35. **Brioua.A, 2011** : Prospection géophysique appliquée à la recherche de terrains aquifères dans le secteur de Hammam Bradaa (wilaya de Guelma).Mémoire d’ingénieur d’état. Université Badji Mokhtar Annaba.
36. **Burollet, 1951** : Étude géologique des bassins mio-pliocènes du nord-est de la Tunisie. 1961.
37. **Canny, J, 1986** : A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal.*

38. **Castany G, 1982** : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. Dunod, Paris, France. 238p.
39. **Chadi, M, 1991** : Géologie structurale des monts d'Ain M'lila (Algérie orientale), Nancy 1
40. **Chokri, J, 2017** : Etude géophysique de l'aquifère calcaire de Sidi Ahmed (Nefza-Beja. Mémoire de master de recherche en science de la terre.
41. **Chouabi. A.M, 1987** : Étude géologique de la région de Hammam N'Baïls (SE de Guelma, Constantinois, Algérie) : un secteur des zones externes de la chaîne des Maghrébides. (France.123p.).
42. **D.P.A.T, 2011** : Direction de planification et de l'aménagement du territoire .Guelma.
43. **Darest de la Chavane. J.C, 1910** : Recherches géologiques et paléontologiques dans la région de Guelma. (France.).
44. **David, 1956** : Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte géol. Algérie. 304p.
45. **Derradji, F., Kherici, N., Romeo, M., Caruba, R, 2004** : Aptitude des eaux de la vallée de
46. **DHW, Guelma 2020** : Données forages en exploitation. Direction de l'hydraulique de Guelma, Algérie.
47. **Djeraba. M, 1973** : Etude agro-pédologique de la plaine alluviale de Guelma. Programme
48. **Domzig, A, 2006** : Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de
49. **Drissi.B et Benmachiche.K, 1988** : Approche hydrogéologique de la région de Guelaat Bousbaa (w-Guelma).Mémoire d'ingénieur d'état en hydrogeologie. Université Badji Mokhtar Annaba.
50. **Durand Delga.M, 1955** : Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. (France.533 p).
51. **Edwards, L.S, 1977** : A Modified Pseudosection for resistivity and. IP. Geophys. 42, 1020–1036.
52. **El Mountassir O, Bahir M, Ouazar D, Chehbouni A, Carreira P M ,2022** : Temporal and spatial assessment of groundwater contamination with nitrate using nitrate pollution index (NPI), groundwater pollution index (GPI), and GIS (case study: Essaouira basin, Morocco). Environmental Science and Pollution Research 29(12): 17132-17149. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16922-8>

53. **Elkanti, S.M., El Mokhtar, M., Chibout, M., Mridekh, A., & El Mansouri, B, 2013.** Détermination des formations aquifères par la géophysique électrique dans la péninsule de Dakhla (Maroc). Sixième Colloque Maghrébin de Géophysique Appliquée, Meknès les 3, 4 et 5 mai 2013
54. **Eugene -Okorie, J.O., Obiora, D.N., Ibuot, J.C., & Ugbor, D.O, 2020** : Geoelectrical investigation of groundwater potential and vulnerability of Oraifite, Anambra State, Nigeria. *Applied Water Science*, (10), 223.  
<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01304-1>
55. **FAO** : Organisation Des Nations Unies Pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome).(2005):
56. **FAO, 1985** : Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage paper 29. Food and
57. **FAO, 2003** : Les engrais et leurs applications, Précis à l'usage des agents de vulgarisation
58. **Farquharson, C.G., Ash, M.R., Miller H, G, 2008** : Geologically constrained gravity inversion for the Voisey's Bay ovoid deposit. *Lead. Edge* 27 (1), 64.
59. France.
60. **Gaud B, 1976** : Etude hydrogéologique de la nappe alluvionnaire de Guelma. Rapport interne. 318-333.
61. **Gbombélé SORO 1\*, Tanina Drissa SORO 2, N'guessan Marie-Rosine FOSSOU 3, Oi Adjiri ADJIRI 2 et Nagnin SORO 1,2019** : Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(3): 1870-1889, June 2019.
62. **Gibbs R.J., 1970** : Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science* 170 (3962): 1088–90.
63. **Gilli, E, Christian, M.C., & Mudry, J, 2004** : Hydrogeology : Objects, methods, applications. London, United Kingdom: CRC Press, 394 p.
64. **Güler C., Geoffrey D.T., Mc Cray J & Keith Turner A, 2002** : Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data." *Hydrogeology Journal*.  
<https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
65. **Hachani, F., Balti, H., Montassar, M., Kadri, A., Chkirbene, A., Mlayah, A., Gasmi, M, 2020** : Contribution of geophysical methods in characterizing the structure of El Fahs plain: hydrogeological implications. *J. Afr. Earth Sci.* 172,

66. **Hamad, A., Hadji, R., Boubaya, D., Brahmi, S., Baali, F., Legrioui, R., Abdeslam, I.,**
67. **Heath, P., Dhu, T., Reed, G., Fairclough, M, 2009** : Geophysical modelling of the Gawler Province, SA—interpreting geophysics with geology. *Explor. Geophys.* 40 (4), 342–351.
68. **Hidouri, B., Hamed, Y, 2021** : Integrating gravity data for structural investigation of the Youkous-Tebessa and Foussana-Talah transboundary basins (North Africa). *Euro-Mediterranean J. Environ. Integrat.* 6. Article number: 62.
69. **Hornby, P., Boschetti, F., Horowitz, F.G, 1999** : Analysis of potential field data in the wavelet domain. *Geophys. J. Int.* 137 (1), 175–196.
70. **International Atomic Energy Agency (IAEA), 2008** : Isotopes de l’environnement dans le cycle hydrologique Volume IV, les eaux souterraines, collection cours de formation, pages : 335-338.
71. **Intrepid, 2020** : Multi-scale edge detection wizard (software). In: Intrepid Geophysics, Suite110, 3 Male Street, Brighton, VIC 3186, Australia.
72. **Joleaud. L, 1912** : Travaux étendus sur l’ensemble du Constantinois,
73. **Jun Wu et al, 2019** : Severe Nitrate Pollution and Health Risks of Coastal Aquifer Simultaneously Influenced by Saltwater Intrusion and Intensiv Anthropogenic Activities. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* (2019) 77:79–87 <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00636-7>
74. **Kachi.N, 2015** : Impact du périmètre irrigué sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la Seybouse. Thèse de Doctorat en sciences. Université Badji Mokhtar Annaba.
75. **Khadri S, 2009** : Qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie aval : Impacts des néofacteurs de pollution. Mémoire de Magister en Hydrogéologie. Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
76. **Khalid.S, 2019** : An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration* 197 : 14-26.
77. **Khedidja.A, 2016** : Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l’aquifère de Tadjnant –Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines .Thèse de doctorat en sciences. Université Batna2.
78. **Kiken. M, 1961** : Les traits essentiels de la géologie de l’Algérie.

79. **kouassi Ernest Ahoussi <sup>1\*</sup>, Yao Blaise Koffi <sup>1</sup>, Amani Michel Kouassi <sup>2</sup> Gbombélé Soro <sup>1</sup>, Nagnin Soro <sup>1</sup> et Jean Biemi <sup>1</sup>, 2012** : Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(4) : 1854-1873, August 2012.
80. la marge sous-marine algérienne. Thèse de l'Université Bretagne Occidentale.
81. la Seybouse `a l'irrigation (Nord-Est algéria) [Suitability of the waters of the Seybouse Valley for irrigation (North-East of Algeria)]. *Secheresse* (Montrouge) 15p, 353–360.
82. **Lahondère. J. C, 1987** : Les séries ultra telliennes d'Algérie Nord-orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural.
83. **Lepretre, R., Frizon de Lamotte, D., Combier, V., Gimeno-Vives, O., Mohn, G. Eschard, R, 2018** : The Tell-Rif orogenic system (Morocco, Algeria, Tunisia) and the structural heritage of the southern Tethys margin. *BSGF - Earth Sci.Bullet.* 189, 10.
84. **Li, Y., Oldenburg, D.W., 1998** : 3-D inversion of gravity data. *Geophysics* 63, 109–119.
85. MAB 7, UNESCO, Paris, 55  
p. 86. *Mach. Intell.* (6), 679–698.
86. **Mahieddine. F et Mihoub, 2016**: caractérisation hydrogéologique et géophysique de la région de Héliopolis El Fedjoudj -Hammam Oulad Ali. *Memoire de Master. Université* 8 mai 45 Guelma
87. **Maouche, S., Abtout, A., Merabet, N., Aïfa, T., Lamali, A., Bouyahiaoui, B., Bougchiche, S., Ayache, M., 2013** : Tectonic and hydrothermal activities in Debagh, Guelma Basin (Algeria). *J. Geol. Res.* 13. Article ID 409475.
88. **Maouche, S., Djaroun, N., Harouz, C., Sahi, N., Amri, K., Harbi, A, 2019** : Active tectonics in the Guelma Basin (eastern Algeria). In: Sundararajan, N., et al. (Eds.), *On Significant Applications of Geophysical Methods, Advances in Science, Technology & Innovation.* Springer Nature Switzerland.
89. Maroc). 84 P.
90. **Mickus, K., Frifita, N., Ben Zaied, M., Ouessar, M., 2022** : Gravity and electrical resistivity analysis of deep and shallow structures related to aquifers within the Jeffara Plain, southeast Tunisia. *J. Afr. Earth Sci.* 196, 104685.
91. **Mouassa.S, 2017** : Évaluation des ressources en eau dans le sous bassin versant de la moyenne Seybouse, région de Guelma Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat en sciences. Université Badji Mokhtar Annaba.

93. Mountains, Saudi Arabia. *Arabian J. Geosci.* 14, 334.
94. **Murphy, F.C., Rawling, T.J., Wilson, C.J.L., Dugdale, L.J., Miller, J.M., 2006** : 3D structural modelling and implications for targeting gold mineralisation in western Victoria. *Aust. J. Earth Sci.* 53 (5), 875–889.
95. **Nazir H M, Hussain I, Zafar M I, Ali Z, Abd El-Salam N M ,2016** : Classification of drinking water quality index and identification of significant factors. *Water resources management* 30(12): 4233-4246.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-016-1417-4>
96. **Nouar, T, & Brahmia, A, 2016** : Hydrochemistry and assessment on groundwater quality of the aquifer of Heliopolis in North of Guelma- Algeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(11), 1-7. Volume 7, Issue 11, November-2016 318ISSN 2229-5518.
97. **O.M.S., 2017** : Directives de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson. Recommandations. Organisation mondiale de la Santé.
98. **Obeidat M Edu vie, Awawdeh M, Al-Rub F A, Al-Ajlouni A ,2012** : An Innovative Nitrate Pollution Index and Multivariate Statistical Investigations of Groundwater Chemical Quality of Umm Rijam Aquifer (B4), North Yarmouk River Basin, Jordan. *Water Quality Monitoring and Assessment* 169. or gravity anomalies. *Geophysics* 51 (7), 1494–1498.
99. **Oseke F I, Anornu G K, Adjei K A, Eduvie M O ,2021** : Assessment of water quality using GIS techniques and water quality index in reservoirs affected by water diversion. *Water-Energy Nexus* 4: 25-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.12.002>
100. **Panneerselvam B, Karuppannan S, Muniraj K, 2020** : Evaluation of drinking and irrigation suitability of groundwater with special emphasizing the health risk posed by nitrate contamination using nitrate pollution index (NPI) and human health risk assessment (HHRA). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 27(5): 1324-1348.
101. **Parkhurst D.L & Appelo C. A. J, 1999** : User's Guide to PHREEQC (version 2) : A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. quadriennal 1970-1973. Opération 11.01.0.60.20.78. 86 p.

102. **Radouane E M, Chahlaoui A, Maliki A, Boudellah A, 2021** : Assessment and modeling of groundwater quality by using water quality index (WQI) and GIS technique in meknes aquifer (Morocco). *Geology, Ecology, and Landscapes* 1-13.
103. **Raji, W.O, 2014** : Review of electrical and gravity methods of Near-surface exploration for groundwater. *Niger. J. Technol. Dev.* 11, 2.
104. **Ramachandran A, Sivakumar K, Shanmugasundharam A, Sangunathan U, Krishnamurthy R R, 2021** : Evaluation of potable groundwater zones identification based on WQI and GIS techniques in Adyar River basin, Chennai, Tamilnadu, India. *Acta Ecologica Sinica* 41(4) : 285-295.
105. **Raoul. J. F, 1974** : Géologie du centre de la chaîne Nummidique (nord du constantinois,
106. **Rapport inédit, ENAGEO, 1993-1994** : Entreprise nationale de la géophysique pour le compte de la direction de l'hydraulique de Guelma (DHW-Guelma) « prospection électrique par SEV dans la région de Hammam Bradaa (w. de Guelma).
107. **Rapport inédit.CRAAG, 2014** : Le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique(CRAAG) « Etude de gravimétrie dans la région de Guelma.
108. **Rapport. Hydrosol, 2014** : Étude géophysique pour la réalisation d'un forage dans la région de Guelaat Bousbaa pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) d'Ain El Berda.
109. **Reddy S, Sunitha V, Suvarna B ,2022** : Groundwater quality and its potential health impacts nearby inactive mines using PIG and geospatial technology, Southwestern part of Cuddapah basin, Andhra Pradesh, South India. *Groundwater for Sustainable Development* 17 : 100742.
110. **Reghais.A, 2023** : Etude de fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe du Complexe Terminal de la région de Biskra (Sud-est Algérien).Thèse de Doctorat LMD. Université Mohammed Seddik Benyahia - de Jijel.
111. **RGPH ,2008-2015** : Projection de la population de la willaya de Guelma.
112. **Rihab Guellala, Malek Abidi, Néji Balti & Mohamed Hédi Inoubli ,2014** : Prospection géophysique pour la recherche d'eau souterraine dans le Nord-Ouest de la Tunisie. *Journal des sciences hydrogéologiques.*  
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.914213>
113. **Rodier J. et al, 2009** : L'analyse de l'eau, 9e édition. DUNOD (éditeur), Paris, France. 1579.

114. **Roubault M, 1934** : La kabylie de Collo. Etude géologique. Thèse Sc. Paris.  
*P.S.C.G.Algérie* (2), Bull. n° 10, 272 p., Alger.
115. **Ruault-Djerrab**. Personal Web site. <http://djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com/>.  
(Accessed 10 November 2022).
116. **Saidia.B & Chaab.S, 2002** : Reconnaissance hydrogéologique à partir de données géologiques et géophysiques de la région de "Hamam Bradaa-El Fedjoud.
117. **Samaila djoumaye djahadi\***, **issoufou sandao1,2**, **yacouba ahmed1**, **Moussa harouna et boureima ousmane1,2021** : Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du socle du bassin versant de Goroubi dans la commune de Torodi /Liptako nigérien. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 15(6): 2715-2729, December 2021.
118. **Selmane.T, 2023** : Qualité des eaux souterraines et origine des nitrates dans la région El Maadher de Bousaada. These de Doctorat LMD. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
119. **Spector K& Grant, F.S, 1970** : Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics* 35, 293–302.
120. **Taha, A.I., Al Deep, M., Mohamed, A, 2021** : Investigation of groundwater occurrence using gravity and electrical resistivity methods: a case study from Wadi Sar, Hijaz *Tectonophysics* 290, 59–85.
121. **Toubal, A, 1984** : Contribution à l'étude des Minéralisations Antimonifères du N.E. Algérien, Thèse 3ème Cycle, Université Paris VI.
122. **UNESCO, 1977** : Carte de la répartition mondiale des régions arides. Note technique d'utilisation des engrais par culture en Algérie. 43p.
123. **Vila, J.M., 1980** : La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
124. **Vôte C, 1967** : Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Ain Fakroun, Ain Babouche et les régions limitrophes. Publication du service de cartes géologiques, N.S.,Bull. no 36(3), Alger, Algérie.
125. **Yao, K.M, 2009** : Contribution à l'étude des paramètres physico chimiques des eaux de la lagune Ebrié dans la zone d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat à la Faculté des Sciences à l'Université Cocody, 155 p.
126. **Youssef, M.A., Abd El-Gawad, A.M., & Farag, K.S, 2018** : Iron ore prospecting based on very low frequency-electromagnetic and geoelectrical resistivity at Wadi Abu Subeira, Northeastern Aswan, South Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.08.002>

127. **Zohdy, A.A.R, 1969** : The use of Schlumberger and equatorial soundings in groundwater investigations near El Paso, Texas. *Geophysics* 34, 713–728.
128. **Zouak, Z, Benabbes, C., & Benzid, Y, 2014** : Néotectonique, anomalies morpho-structurales et mouvements de terrain dans la région de Guelma. *Sciences & Technologie D – N°40*, Décembre (2014), pp. 73-81.

## | *Annexes*

## Annexe N°01 :

**Tableau 01 :** Courbe caractéristique débit - rabattement

<i>Palier</i>	<i>Temps (s)</i>	<i>Débit (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>Débit (l/s)</i>	<i>Rabattement (m)</i>
1	8	0,045	45	24,95
2	8	0,050	50	30,87
3	8	0,060	60	33,98

**Tableau 02 :** Droite débits - rabattements spécifique

<i>Palier</i>	<i>Débits pompés Q /m<sup>3</sup>/s</i>	<i>Rabattement (m) S</i>	<i>Rabattement spécifique S/Q (m /m<sup>3</sup>/s)</i>
1	45*10 <sup>-3</sup>	24,95	554,44
2	50*10 <sup>-3</sup>	30,87	617,4
3	60*10 <sup>-3</sup>	33,98	566,33

**Tableau 03 :** Droite débits- rabattements spécifique

<i>Rabattement mesuré(m)</i>	<i>Débit pompe Q (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>A</i>	<i>AQ</i>	<i>B</i>	<i>BQ<sup>2</sup></i>	<i>Rabattement calculé (m) S= AQ+ BQ<sup>2</sup></i>
24,95	45*10 <sup>-3</sup>	50	2,25	12592	25,49	27,74
30,87	50*10 <sup>-3</sup>	50	2,50	12592	31,48	33,98
33,98	60*10 <sup>-3</sup>	50	3,00	12592	45,33	48,33

**Tableau 04 :** Valeurs du rabattement résiduel et du temps-essais de remonté

temps (s)	rabattement résiduel	T'/T+1
14400	0,01	7,5
16200	0,01	6,7
18000	0,01	6,2
19800	0,08	5,7
21600	0,08	5,33
23400	0,08	5
25200	0,08	4,71
27000	0,07	4,46

28800	0,07	4,26
32400	0,08	3,88
36000	0,08	3,6
39600	0,08	3,36
43200	0,07	3,16
46800	0,08	3
50400	0,05	2,9
54000	0,04	2,73
57600	0,06	2,6
61200	0,06	2,52
64800	0,05	2,44
68400	0,05	2,36
72000	0,04	2,3
79200	0,04	2,16
82800	0,02	2,1
86400	0	2,08
93600	0	1

## Annexe N°02

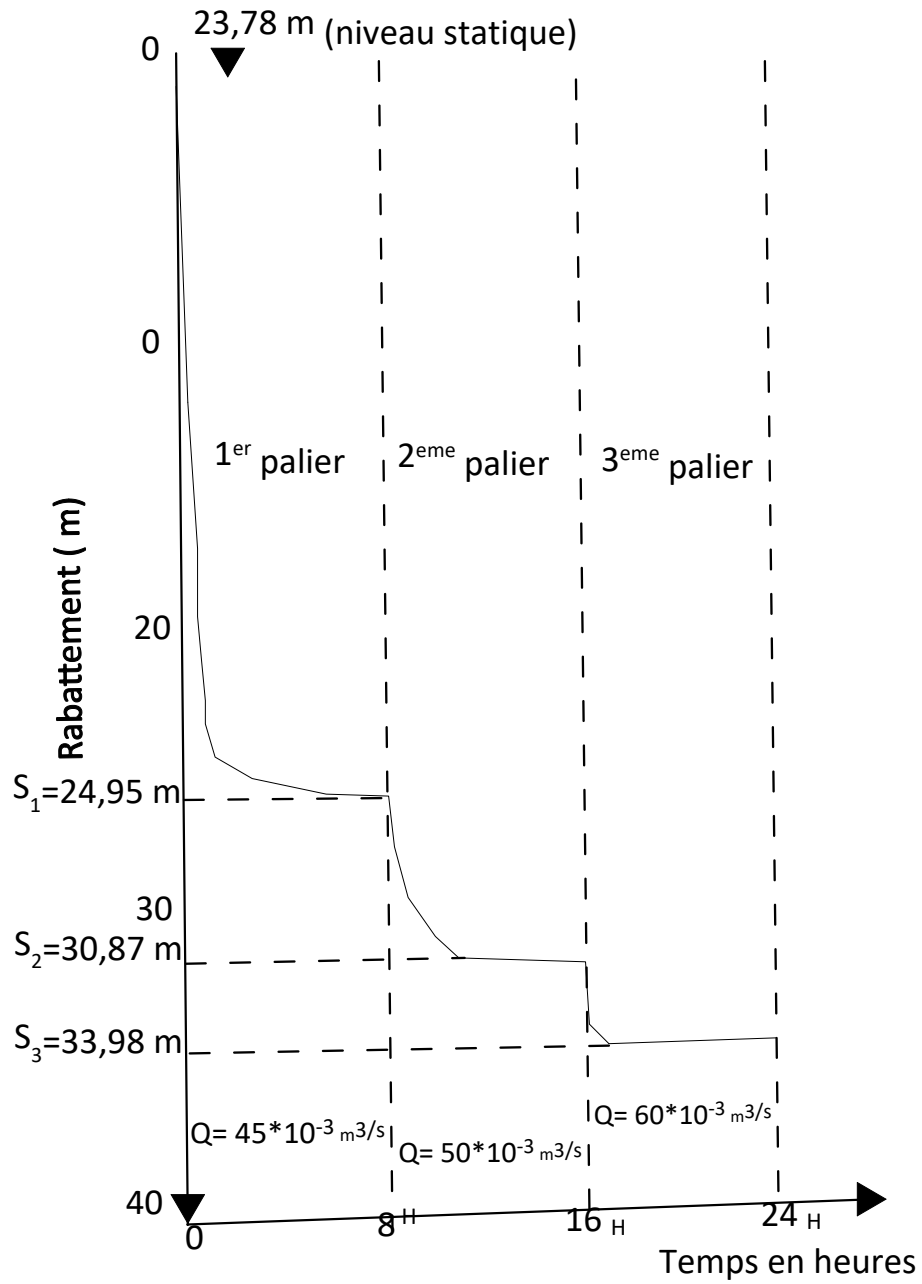


Fig. N°01 : Courbe rabattement – Temps

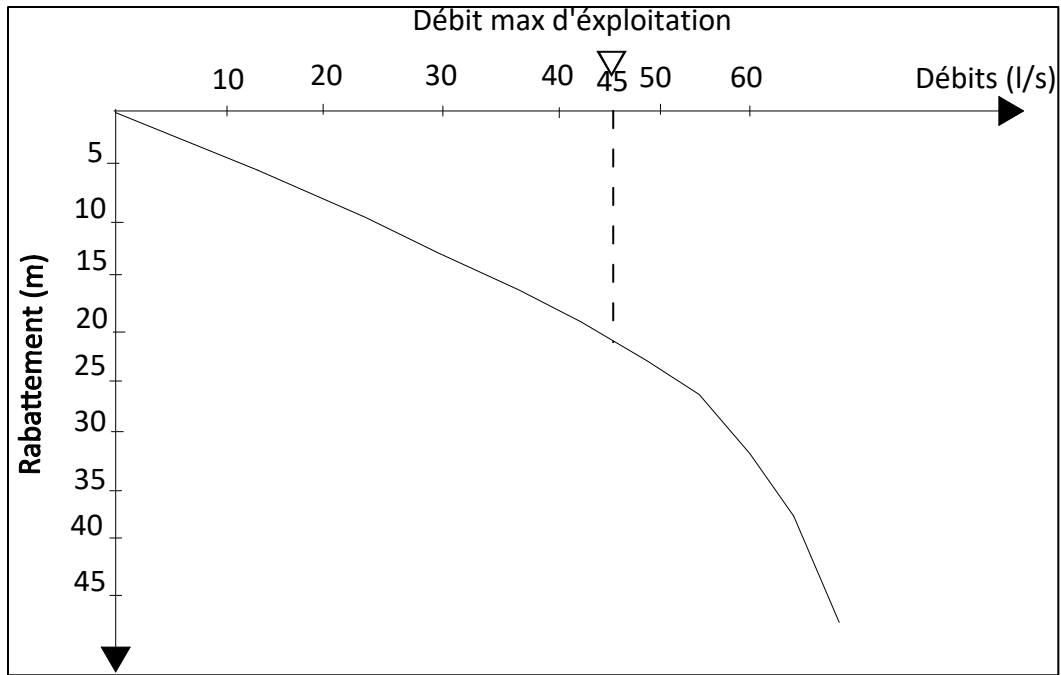


Fig. N°02 : Courbe débits – rabattement

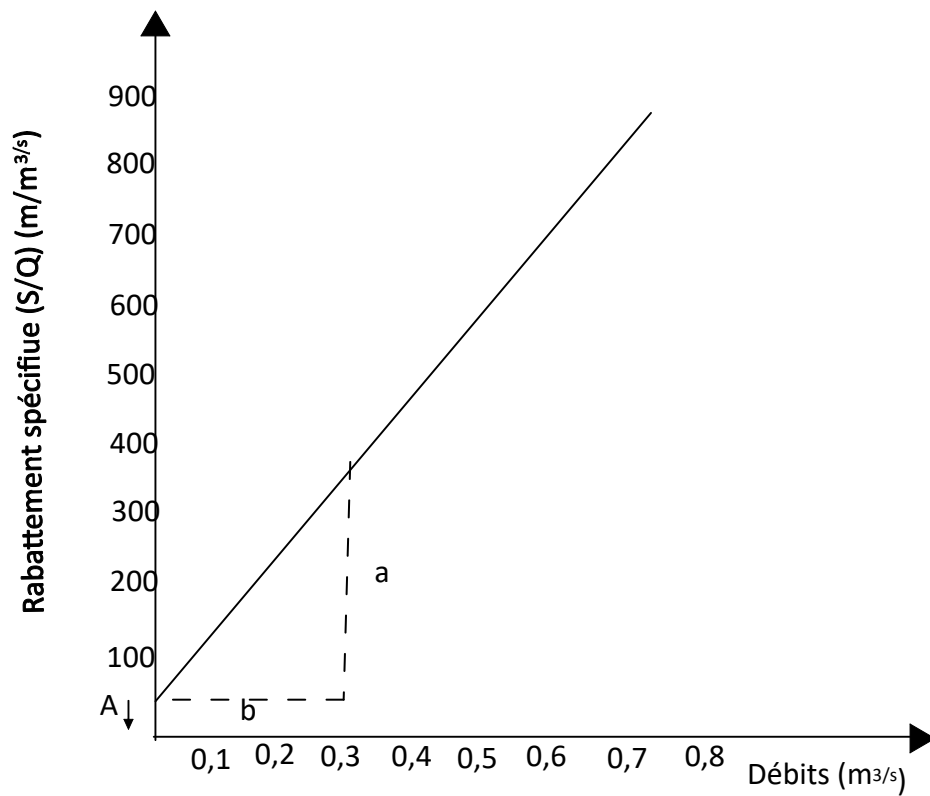


Fig. N°03 : Courbe rabattement spécifique - débits

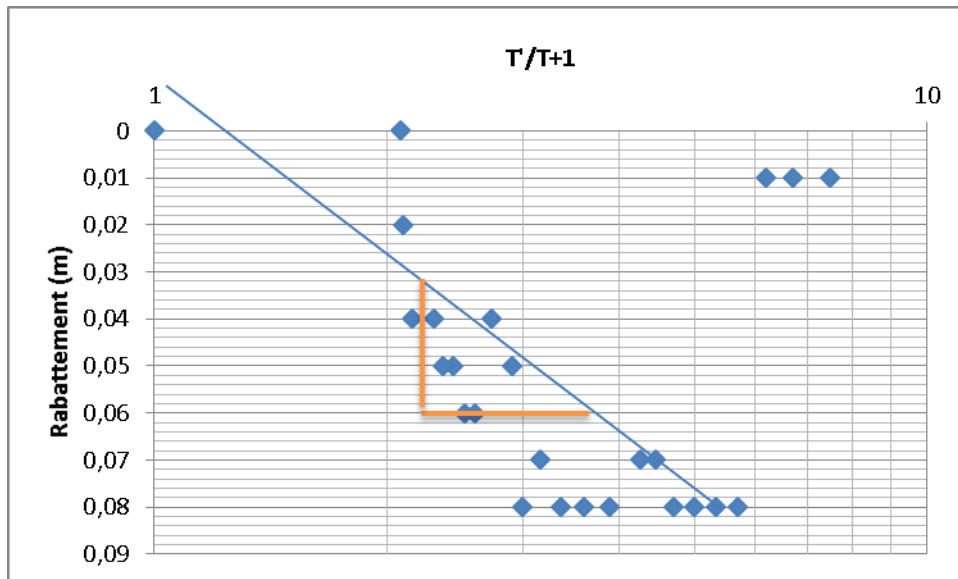


Fig.n°04 : Courbe de remonté.

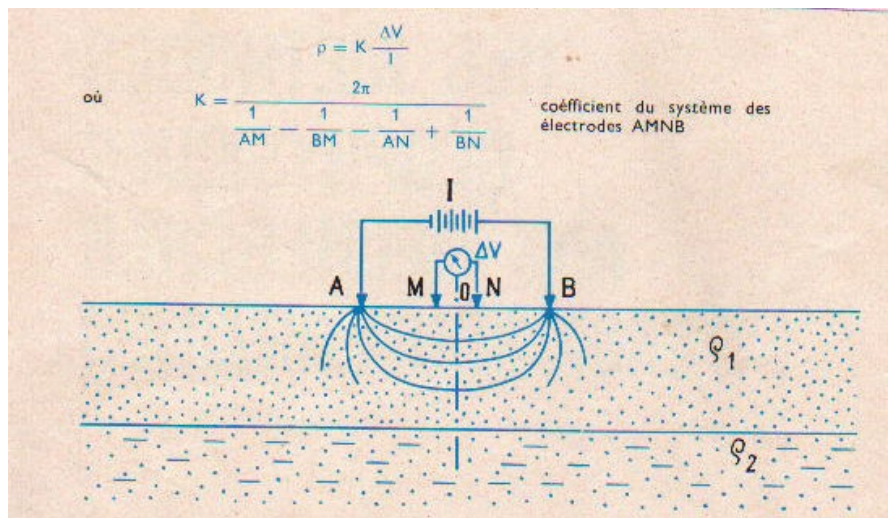


Fig. N°05 : Quadripôle de Schlumberger.

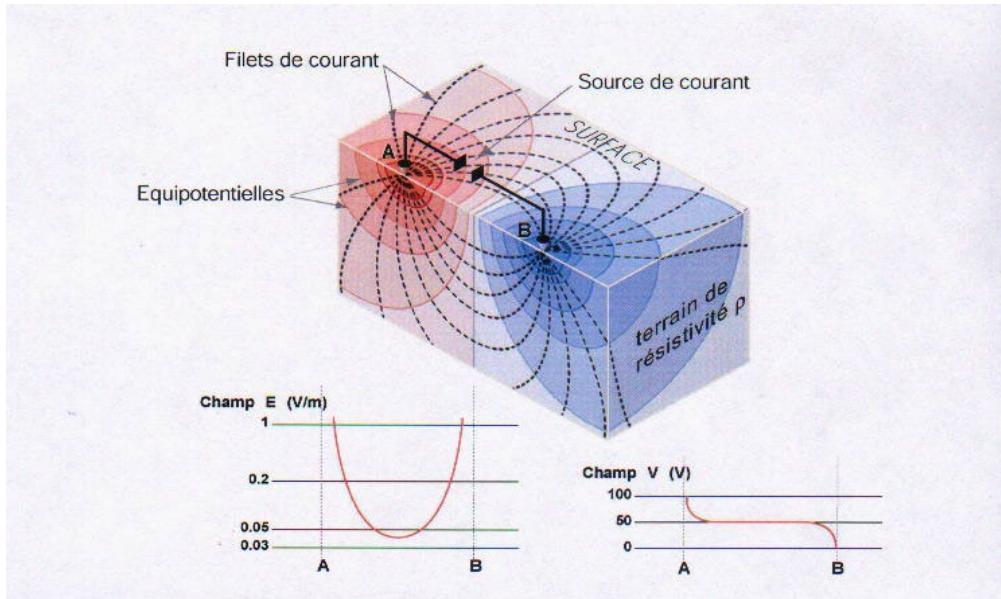


Fig. N°06 : Equipotentielles de courant dans un sol homogène

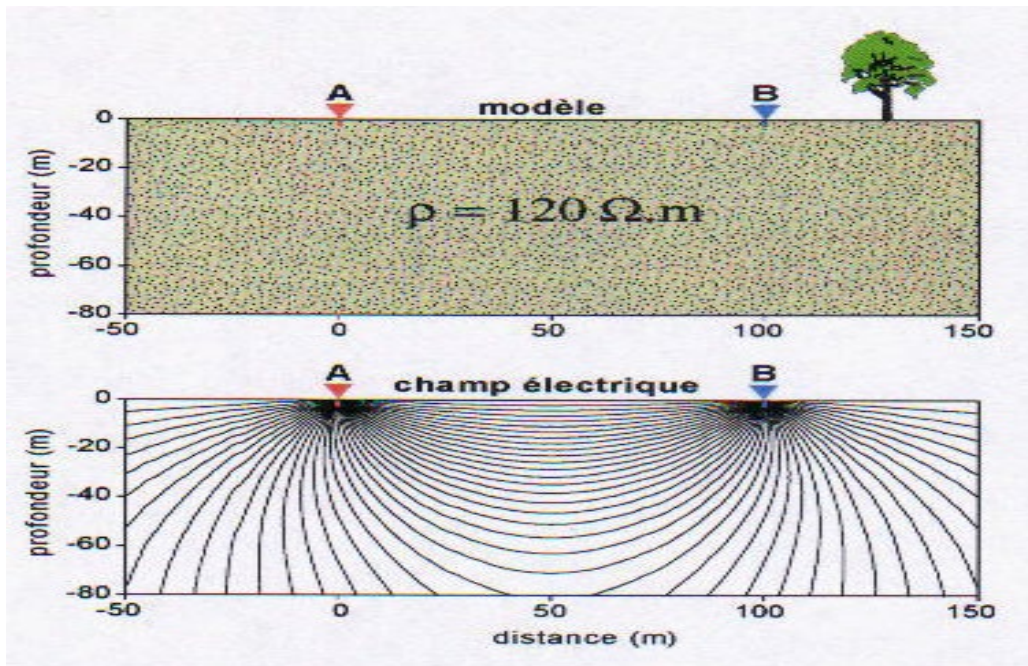


Fig. N°07 : Le courant dans le premier terrain de faible résistivité.