



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tébessi – Tébessa –



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

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
DOCTORAT en Science  
Option : Hydrogéologie

*Caractérisation et cartographie des risques de pollution, par outil SIG, des eaux souterraines de la plaine de Tébessa (N.E Algérien) et essai de gestion intégrée de la ressource en eau.*

*Par  
DJEBASSI Toufik*

**DIRECTEUR DE THÈSE**    **Mr : FEHDI. Ch**    Professeur Univ de Tébessa

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr : BOUMAZBEUR. A</b>	Examineur	Professeur Univ de Tébessa.
<b>Mr : GUEFAIFIA. O</b>	Examineur	MCA. Univ de Tébessa.
<b>Mr : GHRIEB. L</b>	Examineur	MCA. Univ de Guelma.
<b>Mr : BOUZNAD. I</b>	Examineur	MCA. Univ de Djelfa.
<b>Mr : HADJI. R</b>	Examineur	MCA. Univ de Sétif.

*Juin 2021*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail, fruit de deux longues années d'étude :*

*Au défunt Aboud, mon très cher père*

*A ma mère*

*À ma femme*

*Mes chers enfants Oumaima, Abdelmaoula, Mohammed Djameleddine  
et abboud djaoued eddine*

*À mes chers frères ainsi que mes chères sœurs*

*À tous mes amis sans exception*

*En particulier Dr.Hacene*

*Enfin à tous ceux et celles qui m'estime*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail, fruit de deux longues années d'étude :*

*Au défunt Aboud, mon très cher père*

*A ma mère*

*À ma femme*

*Mes chers enfants Oumâima, Abdelmaoula, Mohammed Djameleddine  
et abboud djaoued eddine*

*À mes chers frères ainsi que mes chères sœurs*

*À tous mes amis sans exception*

*En particulier Dr.Hacene*

*Enfin à tous ceux et celles qui m'estime*

# **REMERCIEMENTS**

---

Voilà enfin, après de longues années de travail, avec l'aide d'*ALLAH*, le tout puissant qui, son aide et sa compassion mènent toujours à bonne fin, j'ai réussi à mettre en forme le manuscrit que vous avez entre les mains.

Il n'aurait jamais vu le jour sans la contribution et le soutien de plusieurs personnes, qu'il m'est bien agréable, en terme de reconnaissance, de leur adresser mes remerciements, sachant pertinemment que quelque soient les termes, si vénérables soient-ils, que je veille à employer, je n'arriverai guère à leur rendre hommage ni leur avouer gratitude.

Je m'adresserai en premier lieu, à Monsieur *Ch. FEHDI* qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail, avec responsabilité et rigueur scientifiques. Je salue en lui compréhension et indulgence.

Malgré son emploi du temps, trop chargé, il a su, et avec dévouement et démesure, me réserver le temps qu'il faut, pour mener à bien cette tâche et me permettre de profiter de son expérience et de ses conseils. Je crois que sans lui, ce manuscrit n'aurait jamais connu d'aboutissement.

Je tiens à remercier également, Monsieur le professeur *A. BOUMAZBEUR*, de l'université de Tébessa, d'avoir accepté d'honorer par sa présence la présidence du jury et de n'avoir aucunement hésité à me permettre de profiter de ses connaissances et de son savoir.

Je dois témoigner ma gratitude à Messieurs, *I. BOUZNAD, O. GUEFAIFIA, L. GURIEB,* et *R. HADJI*, d'avoir accepté l'examen, l'évaluation et la critique de ce travail, de siéger au jury et prendre part au débat, qu'il me soit ainsi permis de leur exprimer si humblement les meilleurs formules de respect et de ma sincère estime.

Mes sincères remerciements s'adressent également à tous ceux qui nous ont autorisé l'accès à leurs propriétés, leurs puits, forages et exploitations agricoles.

Je ne saurais oublier le personnel de l'*ANRH* de Constantine et de Tébessa, en particulier, Messieurs *H. HAZMOUN, L. ELOKI, S. BOUKARIT, A. FERDI, MOUNIRA*, ceux de la *DHW*, la *DSA*, en particulier M<sup>elle</sup> *ABDESLAM. I*, de la *CF*, de la *DPAT* de Tébessa, *SOMIPHOS*, en particulier, Messieurs *L. MOUKHTAR, L. BOUTOUATA* et *BASSEM* et de l'*ABHS* de Tébessa, Hôpital de Bekkaria surtout Monsieur *ZOGLAMI. T*.

Je ne pourrais passer sous silence le concours de tous les amis, notamment durant les compagnes de mesure, d'échantillonnage et lors du traitement de données et d'interprétation des résultats ; Messieurs *Dj. BENGASMIA, H. ZEROUKI, O. HAMED, B. ZARAA, I. BRAHMI, S. MENASEL, S. SEHAILIA* ainsi que toutes les personnes qui ont participé d'un effort, si minime soit-il, de près ou de loin, d'un encouragement ou d'une prière.

# ***REMERCIEMENTS***

---

Un grand merci pour l'ensemble du personnel du département de géologie et de la faculté des sciences de la terre.

En fin, je voudrai saisir l'occasion pour rendre un hommage particulier à mes parents, qui ont tout le temps imploré, et avec persévérance, toute l'aide et tout le succès pour moi, comme je n'omettrais jamais d'émettre un grand merci à mes frères et sœurs, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements, ainsi que tous les miens.

*Merci à toutes et à tous.*

À mon frère & ami, DJEBARI. Hacene, tout simplement merci.

## *SUMMARY*

---

No one can ignore the dire consequences and effects of pollution as a result of urbanization, increased demographic growth and economic development, and the quantitative and qualitative degradation of groundwater by changing its chemical and physical properties, so that it becomes unfit for uses necessary for life and harmful to the environment.

The protection and preservation of these resources are a basic necessity, especially in areas where groundwater is the main source of water.

The question of assessing the degree of danger it poses remains a thorny topic, and is one of the challenges that must be overcome. Since the emergence of the first sources of pollution, specialists have focused their efforts and made available new theories and techniques for us to deal with this phenomenon, such as the *DRASTIC* method, *GOD*, *SI*, *PIG*, etc.

This study is an attempt to discover pollution and identify areas exposed to its risks according to their degree (*weak, moderate, medium, strong ...*)

The use of the geographic information system for the various data necessary in addition to the results of different treatments, which is considered the best way to solve the main problems in studying vulnerability and identifying areas highly exposed to pollution, has allowed to reach a cartographic representation for each of the techniques, which allows reading and analyzing it, identifying areas of weakness and distributing them on a wide *Tebessa* Basin.

The center of the basin, especially the northwestern side of the plain, in addition to the state capital, is one of the most vulnerable areas, even very high (in all maps). The *Bekaria* region as well as the southeastern part of the basin is characterized by low to medium susceptibility.

The location of these vulnerable areas is an indicator that must be taken into account when preparing an integrated water resource management and mobilization program for several different sectors (*AEP, AEI and AEA*).

***The key words:*** pollution, risk, hydrochemistry, salinity, vulnerability, *Tebessa*, integrated management.

## RÉSUMÉ

---

Personne ne peut ignorer les conséquences et les effets désastreux de la pollution résultant de l'urbanisation, de la croissance démographique et du développement économique accrus, et de la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines en modifiant leurs propriétés chimiques et physiques, de sorte qu'elles deviennent impropres aux usages nécessaires à la vie, et nocif pour l'environnement.

La protection et la préservation de ces ressources sont une nécessité fondamentale, en particulier dans les zones où les eaux souterraines sont la principale source d'eau.

La question de l'évaluation du degré de danger qu'elle pose reste un sujet épineux et l'un des défis à relever. Depuis l'émergence des premières sources de pollution, les spécialistes ont concentré leurs efforts et mis à disposition de nouvelles théories et techniques pour faire face à ce phénomène, telles que la méthode (*DRASTIQUE, GOD, SI, PIG*), etc.

Cette étude est une tentative pour découvrir la pollution et identifier les zones exposées à ses risques en fonction de leur degré (faible, modéré, moyen, fort ...)

L'utilisation du système d'information géographique pour les différentes données nécessaires en plus des résultats des différents traitements, considérée comme le meilleur moyen de résoudre les principaux problèmes dans l'étude de la vulnérabilité et l'identification des zones fortement exposées à la pollution, a permis d'atteindre une représentation cartographique pour chacune des techniques, ce qui permet de l'examiner et de l'analyser, d'identifier les points faibles et leur répartitions à l'échelle du bassin de Tébessa.

Le centre du bassin, en particulier le côté nord-ouest de la plaine, ainsi que le chef-lieu de la wilaya de *Tébessa*, est l'une des zones les plus vulnérables, même très élevées (sur toutes les cartes). La région de *Bekkaria* ainsi que la partie sud-est du bassin se caractérisent par une sensibilité faible à moyenne.

La localisation de ces zones vulnérables est un indicateur à prendre en compte lors de la préparation d'un programme de gestion intégré et de mobilisation des ressources en eau pour les différents secteurs consommateurs (*AEP, AEI, AEA*).

**Les mots clés :** pollution, Risque, hydrochimie, salinité, vulnérabilité, Tébessa, gestion intégrée.



# ملخص

لا يمكن لأحد أن يتجاهل العواقب والآثار الوخيمة للتلوث نتيجة التحضر والنمو الديمغرافي المتزايد والتنمية الاقتصادية وما يسببه من التدهور الكمي والنوعي للمياه الجوفية بتغيير خصائصها الكيميائية والفيزيائية فتصبح غير صالحة للاستخدامات اللازمة للحياة ومضرة على البيئة.

تعتبر حماية هذه الموارد والحفاظ عليها ضرورة أساسية، خاصة في المناطق التي تعتبر المياه الجوفية المصدر الرئيسي للمياه. يبقى التساؤل من أجل تقدير درجة الخطر الذي يمثله موضوعًا شائكًا ، ويشكل أحد التحديات التي يجب التغلب عليها. منذ ظهور المصادر الأولى للتلوث ، ركز المتخصصون جهودهم وأتاحوا لنا نظريات وتقنيات جديدة للتعامل مع هذه الظاهرة ، مثل طريقة *DRASTIC* ، *GOD* ، *SI* ، *PIG* ، إلخ ، تعتبر هذه الدراسة محاولة لاكتشاف التلوث وتحديد المناطق المعرضة لمخاطره حسب درجتها (ضعيفة، معتدلة، متوسطة، قوية...)

أتاح استخدام نظام المعلومات الجغرافية للبيانات المختلفة الضرورية بالإضافة إلى نتائج المعالجات المختلفة والذي يعتبر أفضل طريقة لحل المشاكل الرئيسية في دراسة الضعف وتحديد المناطق المعرضة بشدة للتلوث. للوصول إلى تمثيل خرائطي خاص بكل تقنية من التقنيات ، والتي تتيح قراءتها وتحليلها وتحديد مناطق الضعف وتوزيعها على نطاق حوض تبسة.

يعتبر مركز الحوض وخاصة الجانب الشمالي الغربي من السهل بالإضافة إلى عاصمة الولاية من المناطق ذات الضعف الشديد ، حتى أنها عالية جدًا (في جميع الخرائط). تتميز منطقة بكارية وكذلك الجزء الجنوبي الشرقي من الحوض بقابلية منخفضة إلى متوسطة.

يعد موقع هذه المناطق المعرضة للخطر مؤشرًا يجب أخذه بعين الاعتبار عند إعداد برنامج تسيير مدمج وتعبئة متكامل لموارد المياه الخاصة بجميع القطاعات المختلفة (*AEP* ، *AEI* ، *AEA*).

**الكلمات المفتاحية:** التلوث، خطر، هيدروكيميائية ، الملوحة ، ضعف، تبسة، نظام المعلومات الجغرافية، التسيير المدمج.

# *INTRODUCTION GÉNÉRALE*

---

S'il est un notionnel ou un concept sur lequel les axes de recherche et les pistes qui s'offrent aux scientifiques sont multiples et variés, c'est bien celui de l'eau. Ayant été jusqu'au début du XIXe siècle le mode de transport le plus sûr et le plus économique, elle a aidé les populations à entrer en contact les unes avec les autres le plus aisément possible et construire des villes (la plupart d'entre elles, même celles dépourvues de fleuves).

Elle ne peut constituer une ressource pour l'homme que lorsqu'il y a une adéquation spatiale et temporelle entre sa disponibilité dans le milieu et les besoins de la société. Il est alors judicieux de voir l'eau sous ses aspects à la fois positifs et négatifs. Comme elle est indispensable à la vie humaine, animale, végétale et soutient par conséquent les activités industrielles, productives et touristiques, elle peut en revanche constituer une source de danger et une menace extrêmement coûteuse. Une inondation peut être destructrice alors qu'une perpétuelle sécheresse peut en outre être à l'origine ou aggraver des conflits entre les communautés riveraines notamment du même bassin.

Certains facteurs tels que le changement climatique, la croissance démographique et le développement socio-économique ont à l'évidence un impact irréfutable sur la ressource en eau, qui à son tour peut nuire à la croissance économique, les moyens d'existence, la sécurité nationale et surtout à la santé puisqu'elle est porteuse de maladies.

Devant la situation de la croissance démographique conjuguée à la hausse de la demande en eau et à la multiplication des besoins (usage domestique, agriculture, industrie, tourisme, activités récréatives et loisirs, etc.), nous pouvons dire que la gestion de la ressource en eau doit faire face aux problèmes de mauvaise gestion, de pénurie et de pollution. Dans ce contexte, il nous est aisé de comprendre la nécessité de mettre en place les outils nécessaires, d'abord à la préservation et la protection de cette ressource et les moyens techniques, juridiques et culturels d'aide à la gestion et à la décision qui permettent de mieux cerner le fonctionnement des hydro-systèmes naturels et le devenir de l'eau dans l'environnement.

Il est remarquable qu'au cours des deux dernières décennies, la gestion des ressources en eau s'est affirmée comme une discipline relativement autonome, destinée à chercher des solutions générales optimales aux problèmes résultant du rapport entre les besoins en eau et les disponibilités offertes par la nature.

Dans une tentative de mieux gérer les ressources en eau de notre bassin, nous essaierons d'avoir recours à la gestion intégrée, non pas par une vision classique qui consiste à apporter des solutions au problème de l'offre et de la demande d'eau, mais par la tendance relativement nouvelle qui a fait porter la gestion des ressources en eau du plan purement technique (d'ingénierie) au plan plus large qui est celui de management. Mais avant de ce faire nous devons d'abords caractériser les risques majeurs qui guettent notre ressource et les menaces pertinentes résultants d'une quelconque pollution propagée dans le milieu.

Dans notre tâche, nous nous sommes intéressés à la région de Tébessa qui disposait jadis d'une ressource hydrique satisfaisante, malgré sa situation géographique (au *Nord-est* du pays) et la semi aridité de son climat. Ce territoire, connu par sa vocation agricole et pastorale, est devenu un point d'exode pour les populations rurales et d'attrait des riverains, à cause de la découverte de ressources minières et énergétiques, et par conséquent plusieurs activités se sont déployées et la population a augmenté (*301 524 habitant*) dans le bassin, ce qui a engendré une demande accrue en eau, pour les divers usages.

La réponse à toutes ces sollicitations, et à défaut de ressources superficielles mobilisables et la rareté des précipitations (ne dépassant guère les *400mm/an*), passe inévitablement par l'exploitation des eaux souterraines. L'objectif doit être atteint, quitte à épuiser davantage dans la réserve, et satisfaire une dotation de *150 L/j/hab*, une irrigation dont le volume reste loin d'être déterminé (proliférations des ouvrages illicites) et un secteur industriel de plus en plus exigeant.

La complexité de la situation est devenue inquiétante voire ingérable. Le premier des constats est l'apparition, depuis plusieurs années, de situations manifestement graves sur le plan quantitatif marquées par une baisse régulière de la piézométrie (engendrant un rabattement flagrant de la nappe d'environ *20 m*), le tarissement de plusieurs sources (*Aïn Zerrouk*), la chute des débits des ouvrages de captage (de *40 l/s* à *20 l/s*) ainsi que les problèmes de qualité qui ne cessent de surgir (dégradation, pollution domestique, pollution agricole ...etc.).

Dans le présent travail, et comme avancé plus haut, nous nous sommes fixés pour objectif de suggérer un modèle de gestion des ressources en eau, à l'échelle de notre bassin.

Pour ce faire, nous devons d'abord localiser les foyers de pollution probables ainsi que leur degré de nuisance et finir par délimiter les zones à haut risque de vulnérabilité et ce par diverses méthodes cartographiques de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines pour identifier les zones à haut risque de contamination et aboutir à ce fameux mode de

gestion adéquat et de préconiser les divers moyens possibles pour la préservation et la reconstitution de cette ressource, notamment là où on enregistre les rabattements excessifs.

Pour atteindre l'objectif de cette thèse, qui vient s'ajouter aux travaux précédents, nous allons essayer d'approfondir certaines connaissances, notamment la prolifération de la pollution, tout en essayant d'interpréter et de caractériser ce phénomène tant ennuyeux et ce, par l'outil SIG, en mettant en relief ses formes et son ampleur et aboutir au mode de gestion type. L'ensemble de cette étude s'articulera, selon le texte qui le traduit, sur plusieurs chapitres :

- Dans un premier temps on a essayé de faire un portrait du bassin, objet de cette étude, et donc on a abordé le cadre général et le milieu physique ensuite les caractéristiques géologiques, complété par une étude géophysique à travers lesquelles nous avons pu constituer une idée sur le milieu et les diverses formations géologiques qui peuvent se comporter comme aquifères.
- En second lieu, nous avons estimé qu'un aperçu sur les caractéristiques hydroclimatiques et hydrologiques ainsi qu'une étude hydrochimiques des eaux de la plaine sont nécessaires pour compléter les premiers thèmes.
- Ensuite, nous avons consacré tout un chapitre pour le suivi, la localisation des foyers de pollution et la caractérisation des risques qui en résultent, suivi d'un dernier chapitre qui est un essai de gestion intégrée des ressources en eau du bassin.

Comme à l'accoutumée, cette thèse se termine par une conclusion générale tout en soulevant quelques recommandations pour les travaux futurs.

# ***SUMMARY***

---

## ***Chapitre I : Cadre général et milieu physique***

### Introduction

I – Situation de la zone d'étude .....	2
I – 1 – Situation géographique .....	2
II – Étude physique du bassin versant .....	4
II – 1 – Caractéristiques de forme .....	4
II – 1 – 1 – La surface.....	4
II – 1 – 2 – La forme du bassin .....	4
II – 1 – 3 – Les dimensions du rectangle équivalent .....	5
II – 2 – Le relief.....	5
II – 2 – 1 – La courbe hypsométrique .....	5
II – 2 – 2 – Les altitudes caractéristiques .....	7
II – 2 – 2 – 1 – Les altitudes maximale et minimale .....	7
II – 2 – 2 – 2 – L'altitude moyenne .....	7
II – 2 – 2 – 3 – L'altitude médiane .....	7
II – 2 – 3 – Les pentes .....	9
II – 2 – 3 – 1 – La pente moyenne.....	9
II – 2 – 3 – 1 – Les Indices de pente.....	9
II – 2 – 3 – 1 – a – L'indice global de pente ( $I_g$ ).....	9
II – 2 – 3 – 1 – b – La dénivelée spécifique ( $D_s$ ).....	9
II – 2 – 3 – 1 – c – L'indice de pente de Roche ( $I_p$ ) .....	9
II – 3 – Hydrographie .....	13
II – 3 – 1 – Réseau hydrographique .....	13
II – 3 – 2 – Le degré de développement du réseau.....	14
II – 3 – 3 – Le temps de concentration .....	15
Conclusion.....	15

## ***Chapitre II : Caractéristiques géologiques***

### Introduction

I – Géomorphologie .....	19
I – 1 – Les monts septentrionaux .....	20
I – 2 – Les monts méridionaux.....	20

II – Caractéristiques géologiques .....	20
II – 1 – Le Trias .....	20
II – 2 – Le Jurassique .....	20
II – 3 – Le Barrémien .....	20
II – 4 – L'Aptien .....	21
II – 4 – 1 – L'Aptien marneux .....	22
II – 4 – 2 – L'Aptien calcaire .....	23
II – 4 – 3 – Le Clansayésien .....	24
II – 5 – L'Albien .....	25
II – 6 – Le Vraconien .....	25
II – 7 – Le Cénomaniens .....	25
II – 8 – Le Turonien .....	26
II – 9 – Le Campanien-Santonien .....	26
II – 10 – Le Maestrichtien .....	27
II – 11 – Le Paléocène .....	27
II – 12 – L'Éocène .....	27
II – 13 – Le Miocène .....	27
II – 14 – Le Quaternaire .....	27
II – 14 – 1 – Formations actuelles et récentes .....	28
II – 14 – 2 – Formations anciennes .....	28
II – 14 – 3 – Plio-Quaternaire (villafranchien) .....	29
III – Tectonique de la région .....	29
III – 1 – Les phases de l'orogénèse .....	29
III – 2 – La formation du fossé d'effondrement de Tébessa .....	31
Conclusion .....	29

### ***Chapitre III : Géométrie de l'Aquifère***

#### Introduction

I – Implantation des profils .....	35
II – Échelle de résistivité .....	36
III – Interprétation des résultats .....	37
III – 1 – Les coupes géoélectriques .....	37
III – 1 – 1 – Zone de Bekkaria .....	37
III – 1 – 2 – Zone de Tébessa .....	37
III – 2 – Carte des résistivités $AB = 600\text{ m}$ .....	41
III – 3 – Épaisseur du recouvrement résistant .....	41

Conclusion.....	42
-----------------	----

## ***Chapitre IV : Caractéristiques Hydroclimatologiques***

### Introduction

I – Réseau d’observation .....	44
II – Facteurs météorologiques déterminants .....	45
II – 1 – Le régime des vents .....	45
II – 2 – L’humidité relative de l’air .....	46
II – 3 – La neige .....	46
II – 4 – La pluviométrie.....	47
II – 4 – 1 – Les précipitations annuelles et leur variabilité .....	47
II – 4 – 2 – Les précipitations mensuelles .....	50
II – 5 – Les températures.....	53
II – 5 – 1 – Variation des températures .....	54
III – Les indices climatiques .....	55
III – 1 – L’indice d’aridité de <i>E. DE MARTONE</i> .....	55
III – 2 – L’indice d’aridité mensuel.....	56
IV – Diagramme pluviothermique .....	57
V – Le bilan hydrique.....	58
V – 1 – Étude de l’évapotranspiration.....	58
V – 1 – 1 – Estimation de l’évapotranspiration réelle ( <i>ETR</i> ).....	58
V – 1 – 2 – Estimation de l’évapotranspiration potentielle ( <i>ETP</i> ).....	60
V – 2 – Estimation de la réserve facilement utilisable .....	62
V – 3 – Bilan d’eau par la méthode de <i>C. W. Thornthwaite</i> .....	63
V – 4 – Interprétation du bilan hydrologique .....	64
V – 5 – Répartition des précipitations .....	65
V – 5 – 1 – Le ruissellement .....	65
V – 5 – 2 – L’infiltration .....	66
Conclusion.....	66

## ***Chapitre V : Caractéristiques hydrogéologiques***

### Introduction

I – Structure du système .....	69
I – 1 – La nappe alluviale et le milieu poreux .....	69

I – 2 – La nappe des calcaires et le milieu fissuré .....	70
II – Potentialité de l’aquifère.....	71
II – 1 – Les forages étatiques.....	71
II – 2 – Les puits et les forages non étatiques .....	71
III – L’étude de la piézométrie .....	71
III – 1 – Inventaire des points d’eau.....	72
III – 2 – Le suivi de la piézométrie .....	73
III – 3 – Les apports du système et conditions aux limites .....	75
IV – Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde .....	76
IV – 1 – Cartographie des paramètres hydrodynamiques .....	93
a – La carte de transmissivité .....	93
a – La Perméabilité.....	94
Conclusion.....	94

## ***Chapitre VI : Caractéristiques Hydrochimiques***

Introduction	
I – Paramètres physico-chimiques et identification des faciès.....	96
I – 1 – Caractérisation des eaux de la nappe .....	96
I – 1 – 1 – Prélèvements .....	96
I – 1 – 2 – Mesures in situ .....	97
I – 1 – 3 – Analyses aux laboratoires .....	97
II – Les eaux de la plaine de Tébessa et leur habilitation pour l’irrigation.....	110
II – 1- Introduction .....	110
II – 2 – Risque de salinité.....	111
II – 2 – 1 – Salinisation .....	111
II – 3 – Aptitude des eaux à l’irrigation .....	117
III – Analyse en Composantes Principales.....	120
III – 1 – But de la méthode.....	121
III – 2 – Principe de la méthode .....	121
III – 3 – L’espace des variables.....	122
III – 4 – L’espace des unités statistiques.....	122
III – 5 – Traitement de données et interprétation des résultats .....	122
III – 6 – Matrice de corrélation .....	124
III – 7 – Analyse des cercles ACP.....	125
Conclusion.....	126



## *Chapitre VII : Caractérisation des risques de pollution*

### Introduction

I.	I – Description de la méthode DRASTIC .....	128
	I – 1 – Base de données et acquisition.....	131
	I – 2 – Élaboration des couches thématiques des sept paramètres DRASTIC :.....	132
	I – 2 – 1 – Épaisseur de la zone non saturée (D) .....	132
	I – 2 – 2 – La Recharge efficace (R).....	133
	I – 2 – 3 – Matériaux de l'aquifère (A) :.....	134
	I – 2 – 4 – Type de sol (S): .....	135
	I – 2 – 5 – La pente (T).....	136
	I – 2 – 6 – Impact de la zone vadose (I): .....	137
	I – 2 – 7 – Conductivité hydraulique (C).....	138
	I – 2 – 8 – La carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC :.....	139
II.	II – Description de la méthode GOD .....	140
	A. II – 1 – Type d'aquifère.....	142
	B. II – 2 – La lithologie de la zone vadose .....	142
	C. II – 3 – La profondeur de la nappe .....	143
	D. II – 4 – La carte de vulnérabilité selon la méthode GOD .....	144
III.	III – Description de la méthode SI : .....	146
	A. III – 1 – Occupation du sol.....	147
	1. III – 1 – 1 – Définitions .....	147
	2. III – 1 – 2 – Carte d'occupation du sol .....	147
	3. III – 1 – 3 – La carte de vulnérabilité selon la méthode SI.....	149
	IV – Description de la méthode PIG .....	150
	IV – 1 – Échantillonnage et analyse.....	150
	IV – 1 – 1 – Le poids relatif.....	150
	IV – 1 – 2 – Le paramètre de poids ( $W_p$ ) .....	151
	IV – 1 – 3 – État de concentration ( $Sc$ ) :.....	151
	IV – 1 – 4 – Qualité globale de l'eau ( $O_w$ ) :.....	151
	IV – 2 – Classification des PIG.....	152
	IV – 3 – Carte de vulnérabilité selon la méthode PIG.....	153
	Conclusion.....	153

## ***Chapitre VIII : gestion intégrée de la ressource en eau***

Introduction	
I – Description de la méthodologie .....	156
II – Analyse et traitement des données nécessaires.....	156
II – 1 – Liens de transmission .....	160
II – 2 – Liens de retour .....	161
II – 3 – Réglage des paramètres .....	161
II – 3 – 1 – Développement des scénarios.....	161
III – Demande en eau potable.....	163
III – 1 – Scénario de référence .....	163
III – 2 – Scénario 01 .....	164
III – 3 – Scénario 02.....	164
III – 4 – Demande non satisfaite .....	165
IV – Demande en eau agricole .....	166
Conclusion.....	168

### ***Conclusion générale et recommandations***

### ***Références bibliographiques***

# ***LISTE DES TABLEAUX***

---

Tableau 1: Répartition des surfaces en fonction des tranches d'altitudes.bassin de Tébessa. ....	6
Tableau 2: Indice de pente de Roche/Bassin de Tébessa. ....	12
Tableau 3: Récapitulation des paramètres morphométriques. Bassin de Tébessa. ....	16
Tableau 4: Echelle de résistivité – plaine de Tébessa – ....	36
Tableau 5: Références des stations pluviométriques ....	44
Tableau 6: Mois humide et mois sec à la station pluviométrique de Tébessa. ....	50
Tableau 7: Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières. Bassin de Tébessa ....	53
Tableau 8: Valeurs de la température moyenne mensuelle (min & max). Bassin de Tébessa. ....	54
Tableau 9: Indice d'aridité de E. DE Martone et type de climat. 1981/82 – 2018/19. ....	56
Tableau 10: Indice d'aridité mensuel. Bassin de Tébessa. 1981/82 – 2018/19. ....	57
Tableau 11: Applicabilité de la formule de Coutagne. Bassin de Tébessa. ....	59
Tableau 12: Estimation de l'ETR selon la méthode de L. Turc annuelle. ....	59
Tableau 13: Estimation de l'ETR selon la méthode de L. Turc annuelle. ....	60
Tableau 14: Résultats de calcul de l'ETP selon la formule de C. W. Thornthwaite. ....	61
Tableau 15: Résultats de calcul de l'ETP par la méthode de L. Turc. ....	62
Tableau 16: Valeurs de l'ETP et de l'ETR et méthodes d'estimation. Bassin de Tébessa. ....	63
Tableau 17: Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite, 1981/82 – 2018/19. ....	64
Tableau 18: Estimation du ruissellement selon la méthode de Tixeront-Berkaloff. ....	66
Tableau 19: Estimation de l'infiltration dans le bassin de Tébessa. ....	67
Tableau 20: Données des forages profonds réalisés par l'ANRH. ....	77
Tableau 21: Données lithologiques du forage P3. ....	78
Tableau 22: Données lithologiques du forage P2. ....	83
Tableau 23: Données lithologiques du forage O2 – 3. ....	88
Tableau 24: Normes et classification des eaux selon leurs conductivités (OMS 1 994). ....	99
Tableau 25: Facies chimiques dominants des eaux souterraines de la plaine de Tébessa. ....	109
Tableau 26: Classe de qualité de salure de l'eau d'irrigation (Richards, 1969 in J. Perigaud, 1 977). ....	111
Tableau 27: Classification des eaux par la méthode du SAR et leur état d'utilisation. ....	117
Tableau 28: Classification des eaux par la méthode du SAR et leur état d'utilisation. ....	119
Tableau 29: Différentes variables et axes (Déc 2018). ....	122
Tableau 30: Tableau N°29: Corrélations entre les variables et les facteurs (Déc 2018) ....	123
Tableau 31: Matrice de corrélation entre les variables (Déc 2018). ....	124
Tableau 32: Poids des paramètres DRASTIC (Aller et al. 1987). ....	129
Tableau 33: Notations accordées aux paramètres DRASTIC (Lallemand-Barrès 1994) ....	130
Tableau 34: Critères d'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode DRASTIC ....	131
Tableau 35: Données utilisées pour le calcul et la cartographie des paramètres DRASTIC. ....	131
Tableau 36: Cotation du paramètre profondeur de l'eau. ....	133
Tableau 37: Cotation de la recharge de la nappe. ....	135
Tableau 38: Cotation de la pente du terrain. ....	136
Tableau 39: Cotation du type de sol. ....	137
Tableau 40: Cotation de la pente du terrain. ....	138
Tableau 41: Cotation de la zone vadose. ....	139
Tableau 42: Cotation de la pente du terrain. ....	140
Tableau 43: Classes de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin de Tébessa. ....	141
Tableau 44: Cotation des différents paramètres de la méthode GOD (Foster et al., 2002) ....	142

Tableau 45: Cotation de la zone vadose selon la méthode GOD. ....	144
Tableau 46: Cotation du paramètre profondeur de l'eau selon la méthode GOD. ....	145
Tableau 47: Classes de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin de Tébessa (GOD).....	147
Tableau 48: Indices SI et degré de vulnérabilité (Jourda et .al, 2007). ....	148
Tableau 49: Répartition de l'occupation du sol à travers la plaine de Tébessa 2019. ....	149
Tableau 50: Composition chimique des eaux souterraines de la nappe de Tébessa. ....	151
Tableau 51: Système de pondération pour la norme de qualité de l'eau potable par rapport aux mesures de la qualité de l'eau .....	152
Tableau 52: Classification des indices de pollution par la méthode de FIG.....	153
Tableau 53: La production des forages à travers les communes de Tébessa. ....	159

## ***LISTE DES FIGURES***

---

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.....	2
Figure 2: Limites administratives de la zone d'étude. ....	3
Figure 3: Limites naturelles de la zone d'étude. ....	3
Figure 4: Répartition des surfaces en fonction des altitudes .....	6
Figure 5: Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques à travers le bassin de Tébessa.....	7
Figure 6: Carte de répartition des altitudes dans le bassin de Tébessa. ....	8
Figure 7: Carte de répartition des pentes dans le bassin de Tébessa. ....	10
Figure 8: Carte du réseau hydrographique du bassin de Tébessa.....	13
Figure 9: Profil en long du Talweg principal du bassin de Tébessa.....	15
Figure 10: Croquis géomorphologique de la région de Tébessa. ....	19
Figure 11: Colonne stratigraphique de la région de Tébessa. ....	22
Figure 12: Carte Géologique de la région de Tébessa au 1/200 000 <sup>ème</sup> .....	23
Figure 13: Coupes Géologiques interprétatives dans la région de Hammamet. ....	24
Figure 14: Coupe Géologique schématique dans la zone d'étude (d'après J. Ricard 1975).....	25
Figure 15: Esquisse tectonique des environs de Tébessa d'après W. M. Kowaleski et al.....	30
Figure 16: Carte de position des coupes géoélectriques (CGG 1970).....	36
Figure 17: Coupe géo électrique (U, V, X) de la zone de Bekkaria (CGG 1975). ....	38
Figure 18: Coupe géo électrique (Q, O, L) de la zone de Tébessa (CGG 1975). ....	39
Figure 19: Coupe géo électrique (J, G, F) de la zone de Aïn Chabro (CGG 1975).....	40
Figure 20: Carte des résistivités AB = 600. ....	41
Figure 21: Carte du recouvrement de la plaine de Tébessa.....	42
Figure 22: Stations pluviométriques et leurs codes – Bassin de Tébessa.....	45
Figure 23: Stations pluviométriques et leurs codes – Bassin de Tébessa.....	46
Figure 24: Photographies prises le 31/12/2014 montrant la neige aux versants.....	46
Figure 25: Répartition des jours de neige, période d'observation 1981/2019. Station de Tébessa.....	47
Figure 26: Répartition inter – annuelle des précipitations aux stations d'observation (1906 – 2019)....	48
Figure 27: Répartition des précipitations moyennes annuelles. Bassin de Tébessa .....	50
Figure 28: Répartition des précipitations moyennes mensuelle à la station de Tébessa.....	51
Figure 29: Cartes des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa.....	51
Figure 30: Cartes des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa.....	52
Figure 31: Cartes des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa.....	52
Figure 32: Répartition saisonnière des précipitations. Bassin de Tébessa. ....	53
Figure 33: Variation des Températures moyennes mensuelles. Bassin de Tébessa. ....	54
Figure 34: Répartition des Températures moyennes annuelles. Bassin de Tébessa. ....	55
Figure 35: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone, 1923. ....	56
Figure 36: Abaque de l'Indice d'aridité.....	57
Figure 37: Abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE.....	60
Figure 38a: Représentation graphique du bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwait .....	64
Figure 38a: Représentation graphique du bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwait .....	65
Figure 39: Coupe hydrogéologique a à travers la plaine de Ain Chabro, in Rouabhia 2009.....	70
Figure 40: Carte d'inventaires des puits. Plaine de Tébessa. ....	72
Figure 41: Carte d'inventaires des forages. Plaine de Tébessa. ....	73
Figure 42: Carte piézométrique. Juin 1994. Plaine de Tébessa.....	74

Figure 43: Carte piézométrique. Mai 2020. Plaine de Tébessa.....	74
Figure 44: Carte des conditions aux limites du système aquifère du bassin de Tébessa. ....	75
Figure 45a: forage Merdja NHA (Tébessa) .....	77
Figure 45b: . forage Z1bis .....	77
Figure 45c: forage F2-3.....	77
Figure 46: Transport et montage de l'appareil de forage/ installation du chantier P3.....	78
Figure 46: Transport et montage de l'appareil de forage/ installation du chantier P3.....	78
Figure 47a: Coupe lithologique et programme d'équipement du forage P3.....	79
Figure 47a: Coupe lithologique et programme d'équipement du forage P3.....	79
Figure 47b: Fig. 47b : La descente de tubage API 9 <sup>5/8</sup> . Le 02/06/2018.....	80
Figure 47c: Mise en place du gravier. Le 03/06/2018.....	80
Figure 48: Représentation et résultats des essais de pompage par palier. Forage P3. ....	80
Figure 49: Courbe de descente (essais de pompage de longue durée). Forage P3. ....	81
Figure 50: Courbe de descente et de remonté (forage P3). ....	82
Figure 50a: Développement du forage P3 à la pmppe à la pompe .....	82
Figure 50b: essai de pompage par palier. Le 08/06/2021 .....	82
Figure 50c: Equipement du forage P3 par les servicfes de l'ADE. Le 18/07/2018.....	82
Figure 51: Coupe lithologique et programme d'équipement du forage P2 .....	84
Figure 52: Représentation et résultat des essais de pompage. Forage P2.....	85
Figure 53: Courbe de descente (essai de pompage de longue durée). Forage P2.....	86
Figure 54a: Courbe de descente et de remontée. Forage P2 .....	87
Figure 54b: Développement du Forage P2 à la pompe .....	87
Figure 54c: Essai de pompage par palier .....	87
Figure 54b: Equipement du Forage P2 par les services de l'ADE .....	87
Figure 55: Coupe lithologique et programme d'équipement du forage O2.3.....	89
Figure 56: Représentation et résultat des essais de pompage. Forage O2 – 3 .....	90
Figure 57: Courbe de descente (essai de pompage de longue durée. Forage O2.3.....	91
Figure 58: Courbe de descente et de remontée. Forage O2.3.....	92
Figure 59: Carte de Transmissivité – Plaine de Tébessa –.....	93
Figure 60: Carte de perméabilité – Plaine de Tébessa – .....	94
Figure 61: Carte d'inventaire des points d'eau prélevés – Plaine de Tébessa – .....	97
Figure 62: Carte de répartition du pH. Plaine de Tébessa (Déc 2018) .....	98
Figure 63: Carte de répartition de la conductivité. Plaine de Tébessa. (Décembre 2018).....	99
Figure 64: Carte de répartition des concentrations en Ca <sup>++</sup> . Plaine de Tébessa (Déc 2018). ....	100
Figure 65: Carte de répartition des concentrations en Mg <sup>++</sup> . Plaine de Tébessa (Déc 2018). ....	101
Figure 66: Carte de répartition des concentrations en Na <sup>++</sup> . Plaine de Tébessa (Déc 2018). ....	102
Figure 67: Photographies montrant l'épaisseur des marnes. ....	103
Figure 68: Carte de répartition des concentrations en Cl <sup>-</sup> . Plaine de Tébessa (Déc 2018).....	103
Figure 69: Carte de répartition des concentrations en SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> - Plaine de Tébessa. (Déc 2018.....	104
Figure 70: Carte de répartition des concentrations en HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> . Plaine de Tébessa. (Déc 2015) .....	105
Figure 71: Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de Piper. Plaine de Tébessa (Déc 2014.) .....	107
Figure 72: Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme .....	108
Figure 73: Représentation cartographique des faciès chimiques des eaux de puits. Plaine de Tébessa. .....	109
Figure 74: Cl <sup>-</sup> contre Ca et Mg <sup>++</sup> en mmo/L pour les échantillons d'eaux souterraines .....	112
Figure 75: Relation entre Ca, Mg, Na, K, Sr, SO <sub>4</sub> et le Cl des eaux souterraines .....	113
Figure 76: Représentation des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox. ....	118

Figure 77: Représentation des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox. ....	119
Figure 78: Histogramme des valeurs propres et variabilité cumulées .....	123
Figure 79: Analyse en composante principale des eaux de la nappe alluviale. ....	125
Figure 80: Représentation graphique des individus. (Déc 2018) de la nappe alluviale. ....	125
Figure 81: Épaisseur de la zone non saturée (ZNS). ....	132
Figure 82: Carte représentative de la recharge nette dans la zone d'étude. ....	133
Figure 83: Carte de la nature de la zone saturée de la zone d'étude. ....	134
Figure 84: Carte représentative des valeurs de l'indice du type de sol. ....	135
Figure 85: Carte de répartition des indices de pente du terrain. ....	136
Figure 86: Carte de répartition des valeurs de l'indice de la nature de la zone vadose. ....	137
Figure 87: Carte de la conductivité hydraulique de la nappe de Tébessa. ....	138
Figure 88: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Tébessa, ....	139
Figure 89: Carte de type d'aquifère de la région de Tébessa selon la méthode GOD. ....	142
Figure 90: Carte de type de lithologie de la zone vadose selon la méthode GOD. ....	143
Figure 91: Épaisseur de la zone non saturée. ....	144
Figure 92: Carte de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin de Tébessa (méthode GOD) ....	145
Figure 93: Carte d'occupation du sol de la région de Tébessa 2019 .....	148
Figure 94: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine de la région .....	149
Figure 95: Valeurs des PIG des échantillons d'eau dans la plaine de Tébessa. ....	152
Figure 96: Répartition spatiale des zones de pollution des eaux souterraines de la plaine de .....	153
Figure 97: Représentation cartographique des quatre méthodes de vulnérabilités .....	154
Figure 98: Carte de la zone d'étude dans le logiciel WEAP. ....	157
Figure 99: Répartition des sites de demande .....	158
Figure 100: surface agricole de chaque site de demande (niveau d'activité annuelle par Ha) .....	158
Figure 101: Population de chaque site de demande (niveau d'activité annuelle par personne).....	159
Figure 102: Champs de captage d'approvisionnement. ....	160
Figure 103: Organigramme de la création des scénarios .....	163
Figure 104: Evolution de la demande en eau potable – Scénario de référence - .....	163
Figure 105: Evolution de la demande en eau - Scénario 01 .....	164
Figure 106: Evolution de la demande en eau - Scénario 02.....	165
Figure 107: Demande non satisfaite mensuel en eau potable pour tous les scénarios .....	165
Figure 108: Evolution de la demande en eau agricole – Scénario de référence – .....	166
Figure 109: Evolution de la demande en eau agricole – Scénario 3 –.....	166
Figure 110: Evolution de la demande en eau agricole – Sénario 03 et scénario de référence .....	167
Figure 111: Comparaison entre la demande en eau pour le Scénario 3 par rapport au scénario de référence.....	167

*CADRE GÉNÉRAL ET  
MILIEU PHYSIQUE*



## I – Situation de la zone d'étude

### I – 1 – Situation géographique

La wilaya de Tébessa est située à l'extrême Nord-est Algérien, à la portuaire du désert.

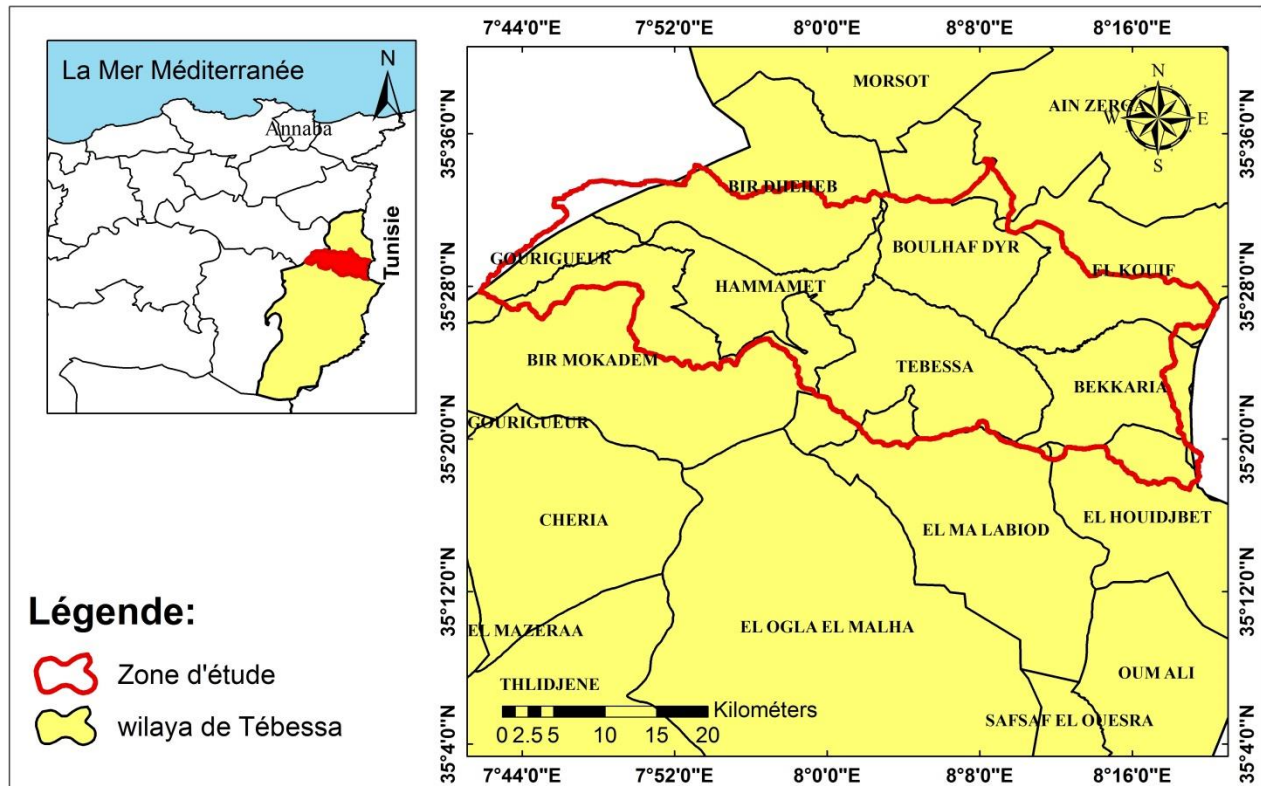


Fig. 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

Elle est distante d'environ 240km au Sud de la Mer méditerranée, (Fig. 1).

La région objet de cette étude, appartient au domaine de l'Atlas saharien oriental, aux confins Algéro-Tunisiens, précisément aux monts de Tébessa, qui constituent la partie orientale de ceux de Nemamcha. Elle est limitée (Fig. 2):

- ✓ Au Nord, par la Daïra de Morsott ;
- ✓ Au Nord-Est, par les Daïras de Rass El Ayoun et El Kouif ;
- ✓ À l'Ouest, par la commune de Gourigour ;
- ✓ Au Sud-Ouest, la Daïra de Bir Mokadem ;
- ✓ Au Sud-Est, par la Daïra d'El Ma El Abiod et El Houdjbet ;
- ✓ À l'Est, par les frontières tunisiennes.

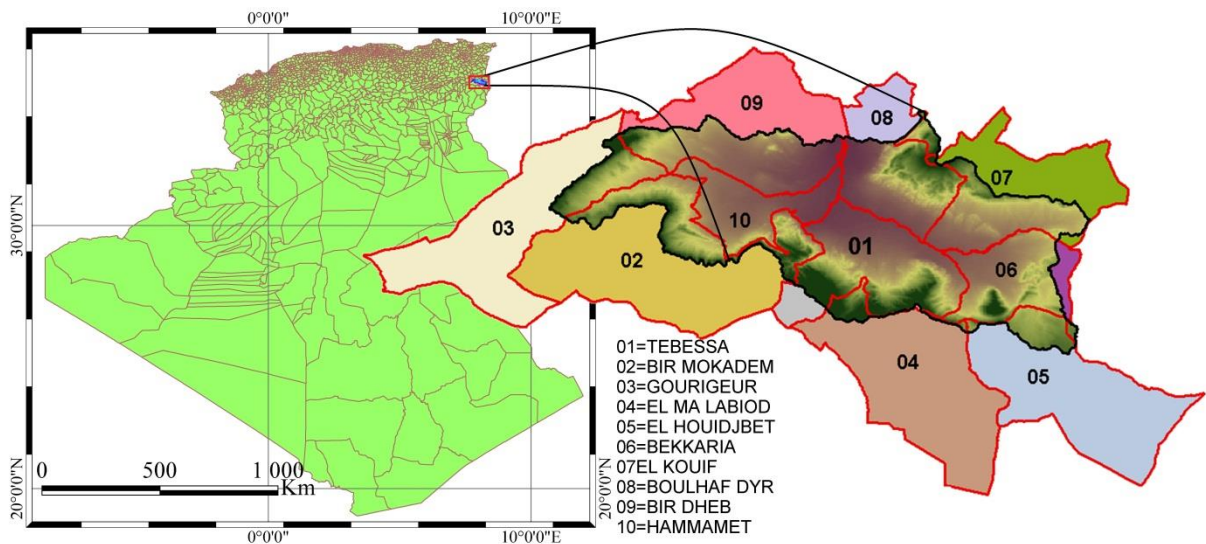


Fig. 2 : Limites administratives de la zone d'étude.

Concernant les limites géomorphologiques, les monts de Dyr, Belkefif, El Kouif constituent la limite Nord.

Les monts de Djebissa et El Mouhad forment la limite Est, tandis qu'au Sud se sont les monts de Bouromane, Doukkane, et Es'Sen, alors qu'à l'Ouest se sont les monts de Serdies et Kecherid. Voir (Fig. 3).

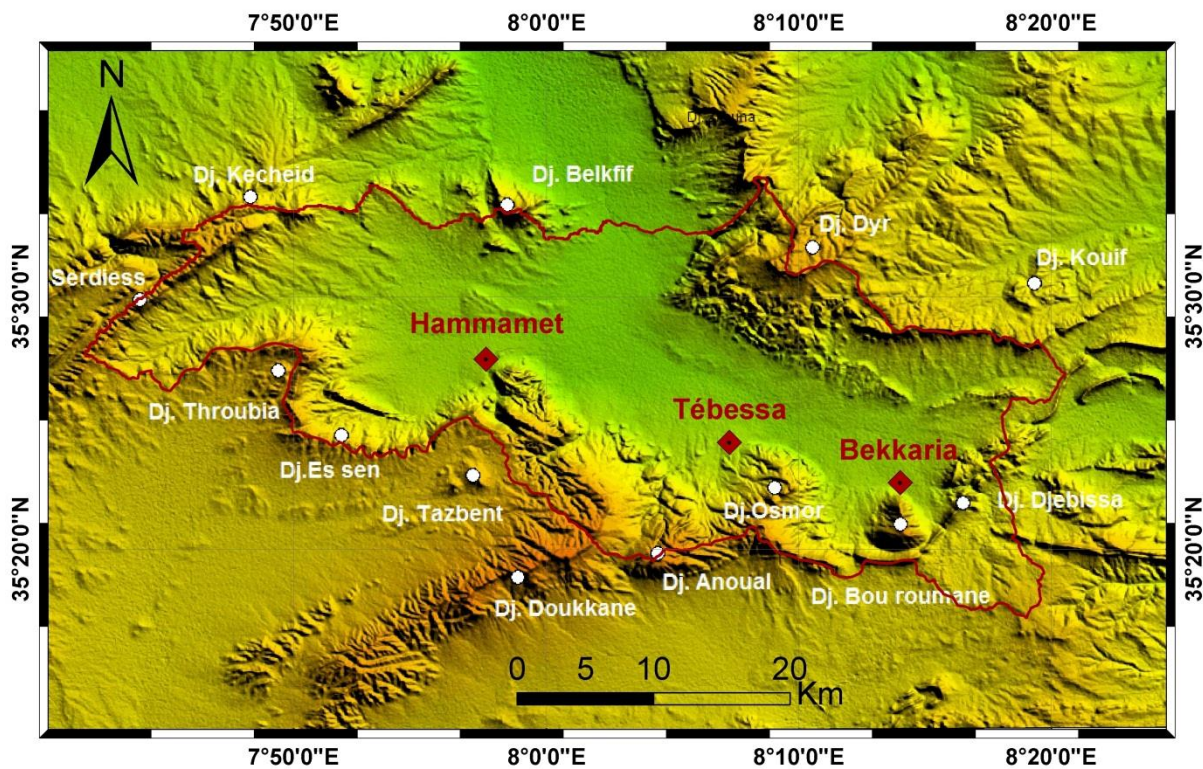


Fig. 3. Limites naturelles de la zone d'étude.

## II – Étude physique du bassin versant

### II – 1 – Caractéristiques de forme

#### II – 1 – 1 – La surface.

Dans une fin de déterminer ses caractéristiques, il a été d'abord question de délimiter le bassin versant et de lui choisir un exutoire (Oued Chabro).

Sur une carte topographique, 1/ 200 000, il a été procédé à la détermination de la surface ; qui peut être mesurée, soit par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, soit par l'utilisation d'un planimètre ou, mieux, par des techniques de digitalisation. La valeur du périmètre, quant à elle, a été déterminée à l'aide d'une application du Système d'Informations Géographiques (ArcGis).

Alors, sur un périmètre de l'ordre de 212,7km, ce bassin couvre une superficie de 974.4 km<sup>2</sup>.

#### II – 1 – 2 – La forme du bassin

Cette caractéristique peut être exprimée par la détermination d'un paramètre communément appelé indice de compacité de *Gravlius* ( $K_c$ ).

Sachant pertinemment que la forme du bassin a une influence certaine sur l'écoulement superficiel global, et surtout l'allure de l'hydrogramme d'une pluie quelconque.

Plus cet indice est proche de l'unité, plus le bassin versant est de forme quasiment circulaire (ramassée), et par conséquent, le temps de concentration ( $t_c$ ) des eaux de ruissellement sera court. Dans le cas contraire, un bassin de forme allongée ne réagira pas de la même manière.

Ce paramètre se définit comme le périmètre du bassin rapporté à celui d'un cercle ayant même surface, il peut être aisément calculé selon l'expression suivante :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad \text{Donc} \quad K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Avec :}$$

$A$  : aire du bassin (Km<sup>2</sup>).

$P$  : son périmètre (Km).

$$A N : P = 212,7km \text{ et } A = 974.4km^2 \quad \text{d'où} \quad K_c = 1,90.$$

La valeur ainsi obtenue ( $K_c = 1,90$ ) traduit une forme allongée, du bassin étudié.

### II – 1 – 3 – Les dimensions du rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou de *Gravelius*, notion introduite par L. Roche (1963), permet une facile comparaison entre bassins versants, pour ce qui est influence, surtout, de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Par une transformation géométrique, le bassin réel devient rectangulaire. Dans cette dernière, on maintient périmètre, surface inchangés (et donc le même indice de compacité) et par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des parallèles aux petits côtés du rectangle.

Posons,  $L$  et  $l$  respectivement, la longueur et la largeur du rectangle équivalent ; son périmètre et son aire s'expriment respectivement par les relations ;

$$P = 2.(L + l), \quad A = Ll \text{ et l'indice de compacité étant : } K_C = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}.$$

$$L = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left[ \frac{1,12}{K_C} \right]^2} \right] ; \text{ si } K_C \geq 1,12$$

La combinaison de ces trois lois donne :

$$AN : L = 95,73Km \text{ et } l = 10,17Km.$$

Ces deux valeurs confirment bien la forme allongée du bassin en question.

### II – 2 – Le relief

Il est aisé de concevoir l'impact du relief sur l'écoulement, puisque, nombreux sont les paramètres hydrométéorologiques (précipitations, températures...etc.), qui varient avec l'altitude et la morphologie du bassin. La vitesse d'écoulement est, en outre, influencée par la pente. Le relief est souvent décrit, sur les cartes topographiques, par une représentation sous forme de courbes de niveau et se détermine lui aussi au moyen des caractéristiques suivantes :

#### II – 2 – 1 – La courbe hypsométrique

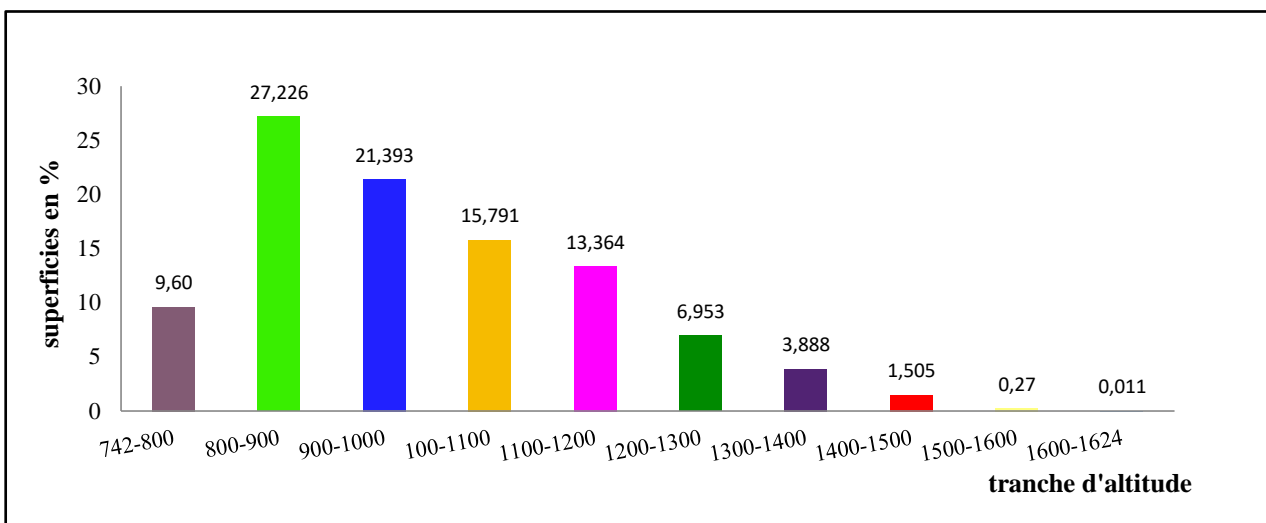
Elle fournit une vue de synthèse de la pente du bassin, donc du relief. C'est une représentation graphique de la répartition de la surface (ou le pourcentage de surface, en abscisse) du dit bassin, en fonction de son altitude (en ordonnée). Une telle analyse met donc en évidence le profil type du bassin et des pentes ; facteur déterminant de l'écoulement.

## II – 2 – 1 – 1 – Répartition des tranches d'altitudes et élaboration de la courbe

L'évaluation des surfaces par tranche d'altitude (planimètrage de l'aire comprise entre deux courbes maîtresses voisines) nous a permis de retenir les valeurs récapitulées dans le tableau ci-après (Tab. 1).

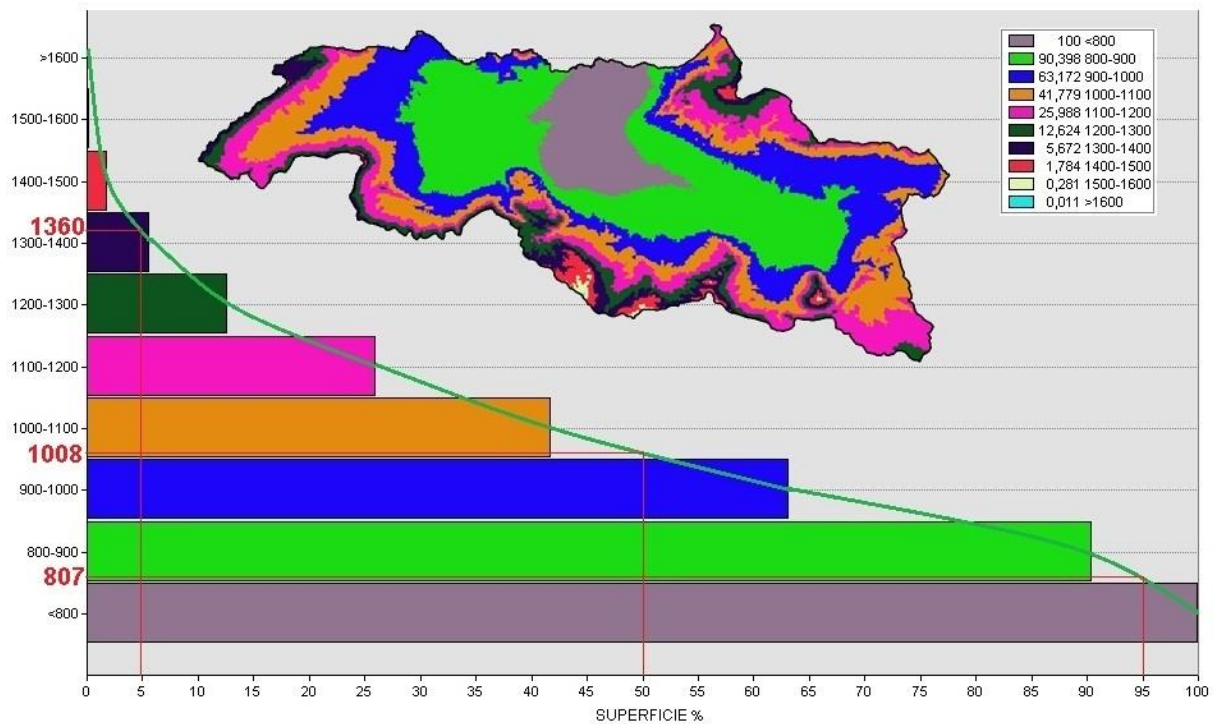
**Tableau N° 1 : Répartition des surfaces en fonction des tranches d'altitudes. bassin de Tébessa.**

Tranche d'altitude $H_i$ (m)	Surface partielle ( $S_i$ )		$\Delta H_i$ (côte moy) (m)	$\Delta H_i \times S_i$ (mxm <sup>2</sup> )	Surface cumulée (%)
	Km <sup>2</sup>	%			
1600-1624	0,107	0,011	1612	172,557	0,011
1500-1600	2,630	0,27	1550	4077,864	0,281
1400-1500	14,645	1,503	1450	21263,844	1,786
1300-1400	37,884	3,888	1350	51144,307	5,674
1200-1300	67,740	6,952	1250	84687,540	12,627
1100-1200	130,218	13,364	1150	149751,638	25,991
1000-1100	153,867	15,791	1050	161560,879	41,782
900-1000	208,453	21,39	950	198030,722	63,175
800-900	265,202	27,22	850	225496,622	90,401
742-800	93,561	9,60	771	72113,678	100



**Fig. 4 : Répartition des surfaces en fonction des altitudes.**

En fonction des données ainsi obtenues, le tracé de la courbe hypsométrique représentative sera aisée. Voir (Fig. 5).



**Fig. 5 :** Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques à travers le bassin de Tébessa.

L'examen de cette représentation graphique montre que l'aire comprise entre l'altitude 742 et 1000m est une plaine qui constitue les 58.21% de la surface totale.

La tranche d'altitude allant de 1000 à 1300m, traduit les 36.10% en superficie, ce sont des montagnes qui cernent la plaine ; au Nord (Dj. Belkif), à l'Est Dj. Dyr et à l'Ouest Dj. Serdies).

Les 5.69% restant c'est le secteur d'altitude dépassant les 1 600m, matérialisé par les monts qui bordent la plaine du côté Sud (Dj. Bouromane, Dj. Doukkane).

## II – 2 – 2 – Les altitudes caractéristiques

### II – 2 – 2 – 1 – Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de la carte topographique. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que celle minimale, considère l'endroit le plus bas ; généralement à l'exutoire. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant, et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

Ces deux données varient, dans le bassin de Tébessa, de l'ordre de 1 624m à 742m, d'où une différence, de l'ordre de 882m, entre le point culminant et l'exutoire.

**II – 2 – 2 – 2 – L'altitude moyenne**

Elle peut être déduite directement de la courbe hypsométrique (Fig. 5) ou, tout simplement, lue sur une carte topographique. On l'exprime par la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{A} \equiv m \quad \text{Avec :}$$

$H_{moy}$  : Altitude moyenne du bassin (m),  $A_i$  : Aire comprise entre deux courbes de niveau ( $Km^2$ ),

$h_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m),  $A$  : Surface totale du bassin versant ( $Km^2$ ).

$$A N : H_{moy} = 993.73m$$

Cette valeur renseigne sur l'importance de l'altitude, qui n'est pas pour autant négligeable, quoi que ça donne l'air d'apparaître modérée par rapport à l'ensemble du bassin versant.

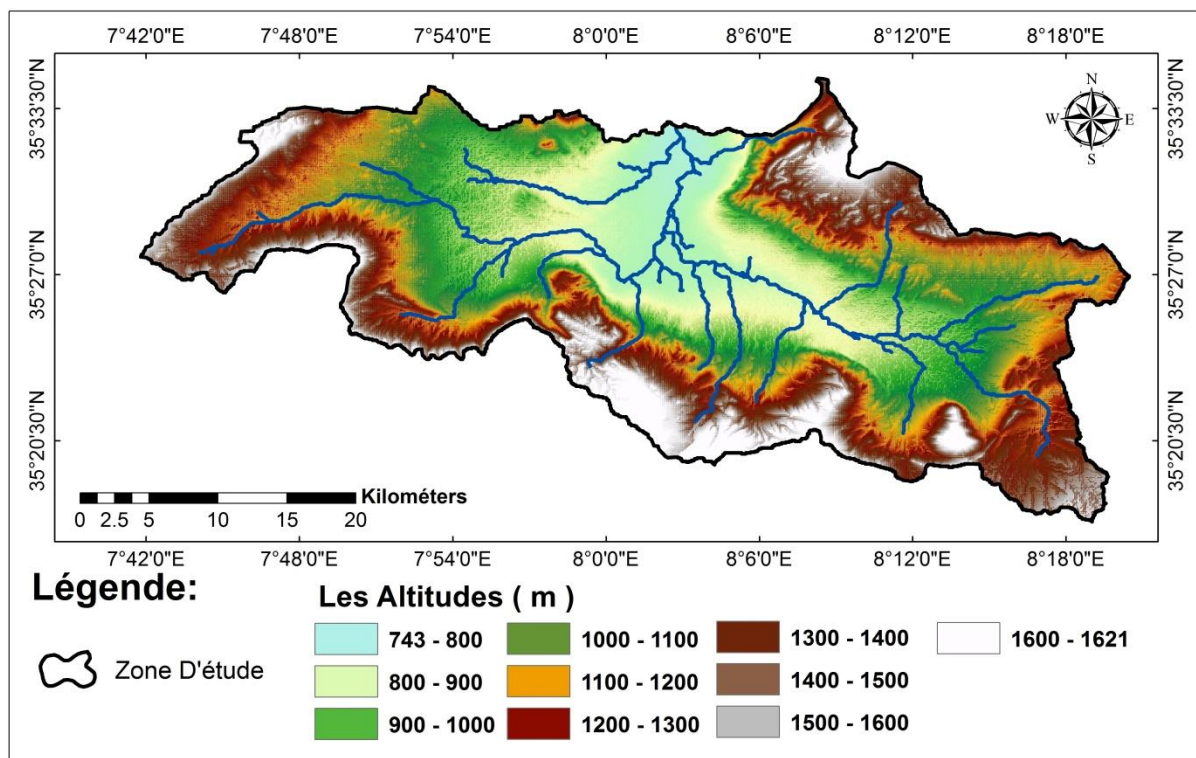


Fig. 6 : Carte de répartition des altitudes dans le bassin de Tébessa.

### II – 2 – 2 – 3 – L'altitude médiane

Elle correspond à la valeur lue, au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin ( $H_{50\%}$ ), sur la courbe hypsométrique. Si la dite courbe, du bassin en question, présente une pente régulière, cette grandeur sera semblable à la valeur de l'altitude moyenne.

Sur la courbe représentative du bassin de Tébessa, la valeur qui lui est correspondante est de l'ordre de  $H_m = 1008m$ . Elle n'est pas loin, en effet, de l'altitude moyenne.

### II – 2 – 3 – Les pentes

De point de vue hydrologique, le rôle du relief est irréfutable, puisque l'un des éléments déterminants de la topographie, sont les pentes qui, en outre, renseignent sur le ruissellement.

La caractérisation du relief peut être faite à l'aide, d'au moins, deux indices.

#### II – 2 – 3 – 1 – La pente moyenne

Considérée comme une variable indépendante, elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, et donc sur le temps de concentration ( $t_c$ ), et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

Par le calcul de la moyenne pondérée des pentes, (Carlier et Leclerc 1964), de toutes les surfaces élémentaires délimitées entre deux altitudes données, la relation suivante donne une valeur approchée de la caractéristique :

$$I_m = \frac{DL}{St} \equiv \% \quad \text{Avec :}$$

$I_m$  : Pente moyenne (m/Km).

$L$  : Longueur totale des courbes de niveau (Km).

$D$  : Équidistance entre deux courbes de niveau (m).

$St$  : surface du bassin versant ( $Km^2$ ).

Le développement de cette formule donne :

$$I_m = \frac{DL}{St} \quad \text{d'où} \quad I_m = \frac{DL}{Ll} \quad \text{donc} \quad I_m = \frac{D}{l}$$

Or  $D = H_{5\%} - H_{95\%}$  et  $l =$  largeur du rectangle équivalent.

$$AN : I_m = \frac{1360 - 807}{10,17}, \quad \text{d'où} \quad I_m = 54.37\%$$



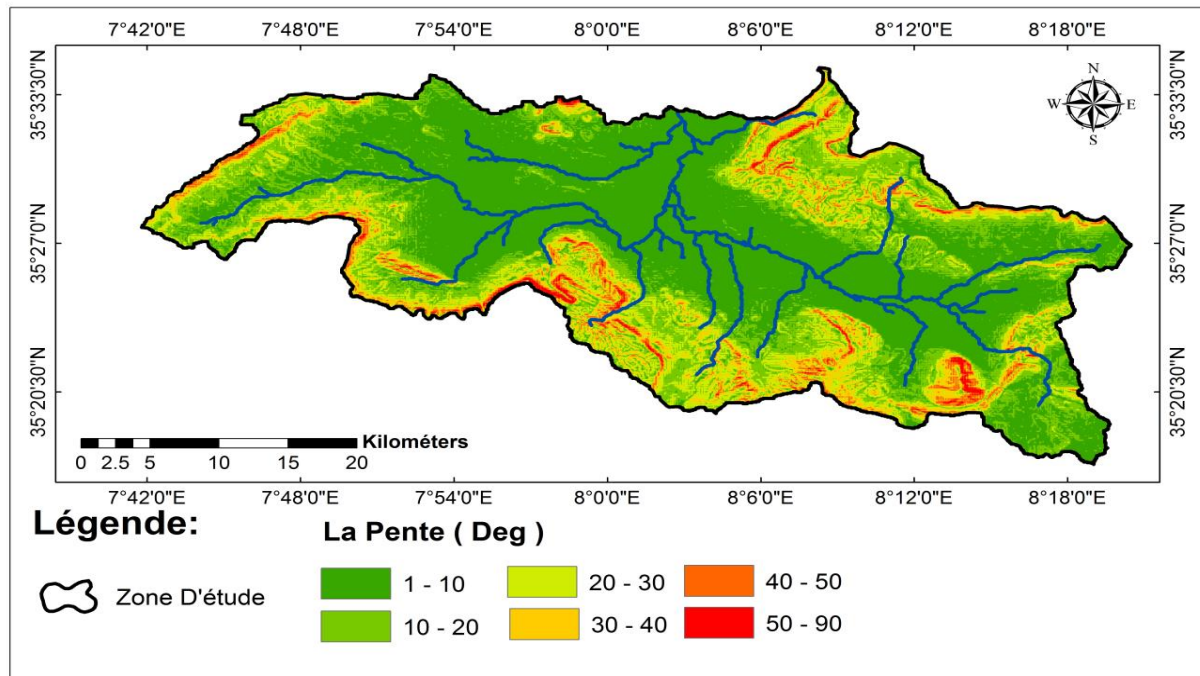


Fig. 7 : Carte de répartition des pentes dans le bassin de Tébessa.

## II – 2 – 3 – 2 – Les Indices de pente

### II – 2 – 3 – 2 – a – L'indice global de pente ( $I_g$ )

Les points pris, sur la courbe hypsométrique, sont tels que l'aire, supérieure ou inférieure, soit égale à 5% de la surface totale. On en déduit les altitudes  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$ , entre lesquelles s'inscrivent les 90% de la superficie du bassin, et la dénivelée utile ( $D$ ).

Cet indice est alors défini par l'expression du rapport de la dénivelée utile ( $D$ ) sur la longueur du rectangle équivalent ( $L$ ), et dont la relation s'écrit :

$$I_g = \frac{D}{L} m/km \quad \text{Avec :}$$

$L$  : Longueur du rectangle équivalent ( $Km$ ).

$D$  : Dénivelée utile ( $m$ ), donnée par :  $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ .

A N :  $H_{5\%} = 1415m$  et  $H_{95\%} = 854$  d'où  $D = 561m$  et  $L = 95.73Km$ .

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{561}{95.73}, \text{ donc } I_g = 5,77m/km, \text{ autrement dit } I_g = 0,57\%.$$

Cette valeur permet de qualifier, le relief du bassin de Tébessa, d'assez faible ( $I_g > 0.5$ ) et ce, selon la classification établie par les services de l'institut de recherches en développement (*IRD*), ex-office de recherches scientifiques et technologiques d'Outre Mer (*ORSTOM*).

Il est à noter que cet indice peut servir d'outil de comparaison entre bassins versants, et de moyen de leur classification, mais ne peut être significatif que s'il s'agirait de ceux ayant des surfaces d'environ  $25\text{Km}^2$ . Comme il présente, aussi, l'inconvénient de décroître, lorsque la surface augmente.

Il paraît, à cet effet, plus judicieux de faire appel à une grandeur qui l'exprime d'une manière plus manifeste :

### II – 2 – 3 – 2 – b – La dénivelée spécifique ( $D_s$ )

Elle présente l'avantage de dériver de l'expression de (l'indice global de pente) ou la pente globale ( $I_g$ ) ; admis étant inversement proportionnelle à la racine carrée de la surface, corrigée bien sûre de l'effet de celle-ci.

$$D_s = I_g \sqrt{A} . \text{ D'où } D_s = \frac{D}{L\sqrt{LI}} . \text{ On obtient : } D_s = D\sqrt{\frac{l}{L}} \equiv m.$$

Il apparaît que la dénivelée spécifique ne dépend que de l'hypsométrie ( $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ ), et de la forme du bassin ( $l/L$ ) et donne ainsi lieu à une seconde classification (du même service *IRD*), mais indépendamment de la surface.

$$D_s = 561\sqrt{\frac{10.17}{95.73}} \quad \text{D'où : } D_s = 180.24m.$$

Cette valeur permet de conférer au relief du bassin de Tébessa l'attribut d'assez fort ( $D_s > 100$ ). Celui-ci est en effet un élément conditionnant la réaction du bassin envers les pluies.

### II – 2 – 3 – 2 – c – L'indice de pente de Roche ( $I_p$ )

Il caractérise, au fait, la pente globale du bassin et s'exprime par la relation suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_1^n \sqrt{a_i d_i} . \quad \text{Avec :}$$

$L$  : Longueur du rectangle équivalent.

$a_i$  : Représente la fraction en % de l'aire comprise entre deux courbes de niveau voisines, distantes de  $d_i, \sqrt{a_i \cdot d_i}$ .

Tableau N° 02 : Indice de pente de Roche. Bassin de Tébessa.

Tranche d'altitude $H_i$ (m)	Surface partielle $a_i$ (%)	Différence de côte $d_i$	$a_i \cdot d_i$	$\sqrt{a_i \cdot d_i}$
1600-1624	0,011	24	0,264	0,513
1500-1600	0,27	100	27	5.19
1400-1500	1,505	100	150,5	12.249
1300-1400	3,888	100	388,8	19.718
1200-1300	6,953	100	695,3	26.368
1100-1200	13,364	100	1336,4	36.556
1000-1100	15,791	100	1579,1	39.737
900-1000	21,393	100	2139,3	46.252
800-900	27,226	100	2722,6	52.178
742-800	9,599	58	556,742	23.595
<b>Total</b>	100	/	9596.006	262.365

$$AN : L = 95.73Km \quad \text{et} \quad \sum \sqrt{a_i \cdot d_i} = 262.356. \quad \text{D'où : } I_p = 26.81.$$

La valeur de cet indice s'avère assez importante et laisse conclure l'importante discontinuité qui marque le relief du bassin.

## II – 3 – Hydrographie

### II – 3 – 1 – Réseau hydrographique

C'est un ensemble de cours d'eau, naturels (ou artificiels), pérennes (ou temporaires), qui drainent les eaux de ruissellement ou de restitution des nappes ; sous formes de sources ou tout au long des lits d'oueds.

Il est différencié selon quatre facteurs principaux ; la géologie (sensibilité à l'érosion, présence de structures conditionnant le sens du courant...), le climat (réseau dense en région montagneuses et humides...), la pente du terrain (réseau en phase érosive ou sédimentaire...) et la présence humaine (modification du tracé originel du réseau par le drainage, l'endiguement, construction de barrages...).

Il est souvent caractérisé par sa hiérarchisation, son profil en long et son développement (nombre de cours d'eau et leurs longueurs).

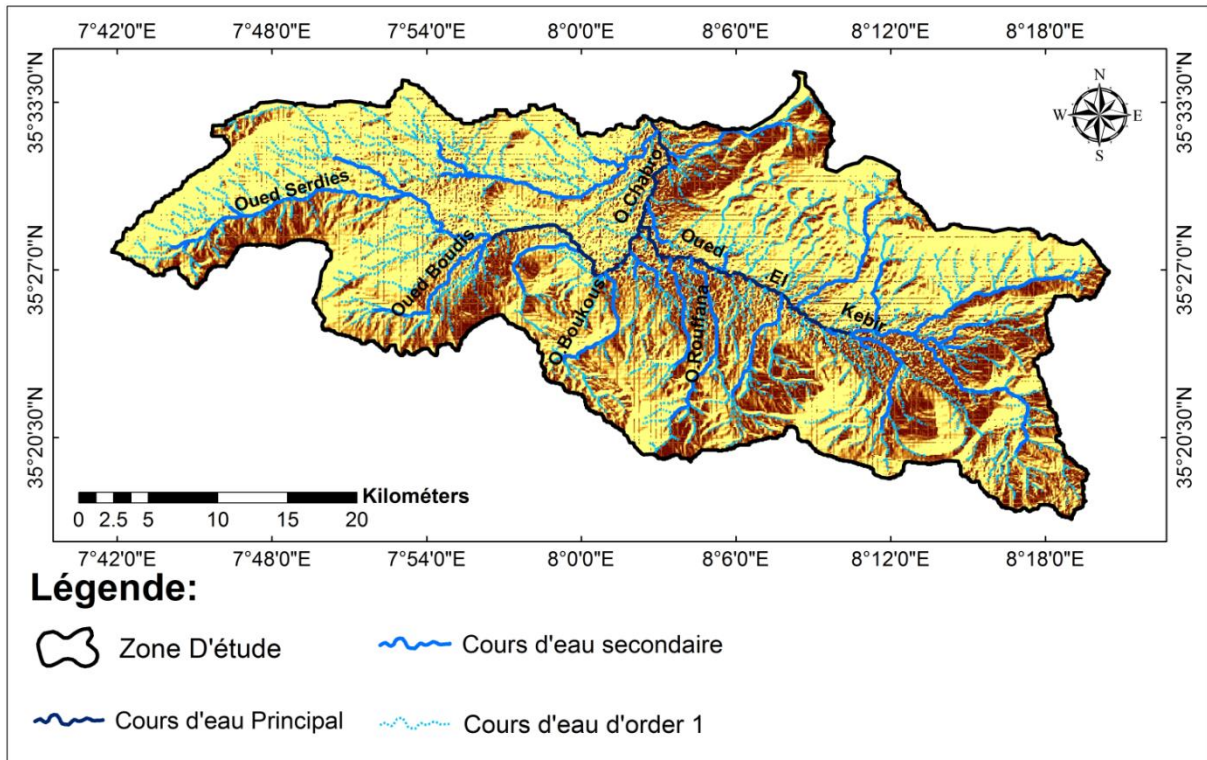


Fig. 8. Carte du réseau hydrographique du bassin de Tébessa.

La projection, de ce qui a été avancé plus haut, sur le bassin étudié permet de dire que :

De par sa situation (région semi-aride), le nombre de cours d'eau y est limité, cela n'empêche que le réseau est quand même dense, marqué de nombreux affluents secondaires, sinueux, intermittents et à pentes modérées. Les quelques Oueds importants qui collectent les eaux d'orages et les drainent à l'exutoire à savoir ;

- ✓ **Oued El Kebir**, qui prend son origine à l'Est et tend sa vallée selon une direction Est-Ouest sur une longueur d'environ 32,22Km (distance prise jusqu'au point de confluence avec Oued Chabro). C'est le thalweg principal. Il draine cette partie avec comme affluent, Oued Djebissa et celui du Hemadja. Il reçoit Oued Rouffana à deux kilomètres avant sa rencontre avec Oued Chabro.
- ✓ **Oued Serdies**, qui lui, trouve sa source à l'Ouest (Djebel Serdies) et reçoit à son tour, après un parcours de 24,92Km, Oued Boudiss et longe ensuite la partie occidentale de la plaine. Il est considéré comme le collecteur des eaux de ruissellement de l'Ouest et du Sud-ouest du secteur.

- ✓ **Oued Chabro**, qui apparaît suite à la rencontre de l'ensemble de ces cours, et devient le conduit principal du bassin, à peu près au centre de la plaine.

L'écoulement de l'entrelacement (du système) se fait de l'Est, du Sud et de l'Ouest, en premier lieu vers le centre, ensuite vers le Nord.

Les crues ne font jamais référence à une saison quelconque (humide), mais sont fonction particulièrement des orages qui se manifestent à la fin du printemps et au début de l'automne.

### II – 3 – 2 – Le degré de développement du réseau

#### ✓ La densité de drainage

Elle dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et, à un degré moindre, des conditions climatiques et anthropiques.

Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

Elle peut être exprimée par son expression inverse ;  $C = 1/D_d$  (selon Schumm), appelée constante de stabilité du cours d'eau.

La densité de drainage, introduite par Horton, est définie par la longueur totale des cours d'eau rapportée à la surface du bassin. C'est un paramètre qui renseigne sur le degré de densité ou de lâcheté du chevelu hydrographique.

L'expression suivante aide à lui donner une grandeur :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \equiv km/km^2. \quad \text{Avec :}$$

$D_d$  : Densité de drainage.

$L_i$  : Longueur de cours d'eau (Km),  $A$  : Aire du bassin ( $Km^2$ ).

$$AN : A = 974.4 Km^2, \quad \sum L_i = 4659km. \quad \text{D'où : } D_d = 4.87km/km^2.$$

### II – 3 – 3 – Le temps de concentration

C'est le temps que met une eau (ou une goutte d'eau), depuis l'élément (le point) hydrologiquement le plus éloigné en amont du bassin, pour parvenir à l'exutoire considéré.

Il est régi par de nombreux facteurs, dont l'intensité de pluie, la pente, la lithologie et le couvert végétal, qui peuvent agir ensemble ou séparément, pour entraver ou favoriser l'écoulement.

Ce paramètre peut être estimé par plusieurs formules, entre autres, celle de *Giandotti*, dont l'expression est la suivante :

$$t_c = \frac{4\sqrt{A+1,5.L_p}}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \equiv h. \quad \text{Avec :}$$

$t_c$  : Temps de concentration ( $h$ ).

$A$  : Surface du bassin ( $Km^2$ ).

$H_{moy}$  : Altitude moyenne ( $m$ ).

$L$  ou  $L_p$  : Longueur du thalweg principal ( $Km$ ).

$H_{min}$  : Altitude minimale ( $m$ ).

AN :  $t_c = 10,16h$ . D'où :  $t_c = 10\text{heures}, 09\text{ min et }36\text{ secondes}$ .

Le chevelu hydrographique est généré suite à l'interaction de tant de facteurs dont le climat, le relief, la lithologie.... Cette valeur paraît un peu élevée, vu la surface du bassin, la densité et la ramification du réseau. Cela résulte probablement des caractères physiques de ce dernier.

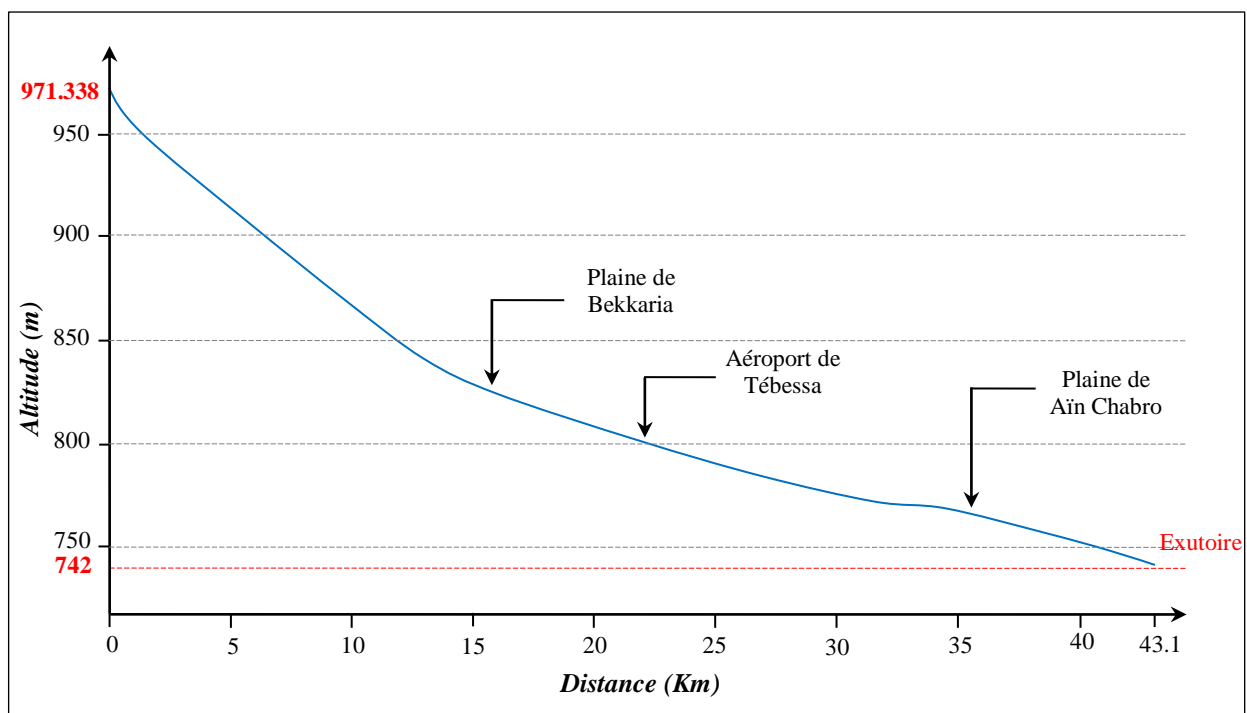


Fig. 9 : Profil en long du Talweg principal du bassin de Tébessa.

Tableau N° 03: Récapitulation des paramètres morphométriques. Bassin de Tébessa.

Paramètre (symbole)	Unité	Formule / moyen de détermination	Résultat
Altitude maximale ( $H_{max}$ )	$m$	Lue sur carte topographique	1 624
Altitude médiane ( $H_m$ ou $H_{50\%}$ )	$m$	Déduite de la courbe hypsométrique	1008
Altitude minimale ( $H_{min}$ )	$m$	Lue sur carte topographique	742
Altitude moyenne ( $H_{moy}$ )	$m$	$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{A} \equiv m$	993.73
Classe de relief ( $R$ )	$m/km$	Déduit de la $D_s$	Assez faible
Dénivelée spécifique ( $D_s$ )	$m$	$D_s = D \sqrt{\frac{l}{L}}$	180.24
Indice de compacité ( $K_c$ )	/	$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,90
Indice de pente moyenne ( $I_m$ )	%	$I_m = \frac{D}{l}$	54.37
Indice de pente global ( $I_g$ )	$m/km$	$I_g = \frac{D}{L}$	5.77
Indice de pente de Roche ( $I_p$ )	%	$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i d_i}$	26.81
Largeur du rectangle équivalent ( $l$ )	$km$	$l = \frac{P - 2L}{2}$	10.17
Longueur du rectangle équivalent ( $L$ )	$km$	$L = \frac{P - 2l}{2}$	95.73
Périmètre ( $P$ )	$km$	Curvimétré sur carte topographique	212.7
Surface ( $A$ ou $S_t$ )	$km^2$	Planimétrée sur carte topographique	974.4
Temps de concentration ( $t_c$ )	$h$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5LP}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$	10.16h

## Conclusion

La zone objet de cette étude fait partie du grand bassin versant de la Medjerdah et donc des hautes plaines orientales de l'Atlas saharien.

La topographie de la région est variée, où une plaine, d'altitude moyenne oscillant entre 742 et 1000m, est cernée par une série de monts qui atteignent les 1 400 voire les 1 600m d'altitude.

Selon l'indice de compacité ( $k_c = 1,9$ ) et les dimensions du rectangle équivalent, le bassin de Tébessa a une forme allongée, le relief y est qualifié d'assez faible ( $D_S = 180.24m$ ).

Les montagnes se répartissent sur 41.79% de la superficie tandis que la plaine occupe le reste (58.21%).

Toutes ces caractéristiques morphométriques influencent l'écoulement des eaux que l'impluvium est susceptible de recevoir, qui doivent mettre alors un temps de 10heures, 09 min et 36 secondes (temps de concentration) pour arriver à l'exutoire, avec une densité de drainage de  $D_d = 4.87km/km^2$ .

La conjugaison de ces facteurs à la nature lithologique du terrain, ne permettent pas une infiltration satisfaisante ; principale source d'alimentation des systèmes aquifères, et favorisent la perte d'énormes masses d'eau qui s'écoulent vers l'extérieur.



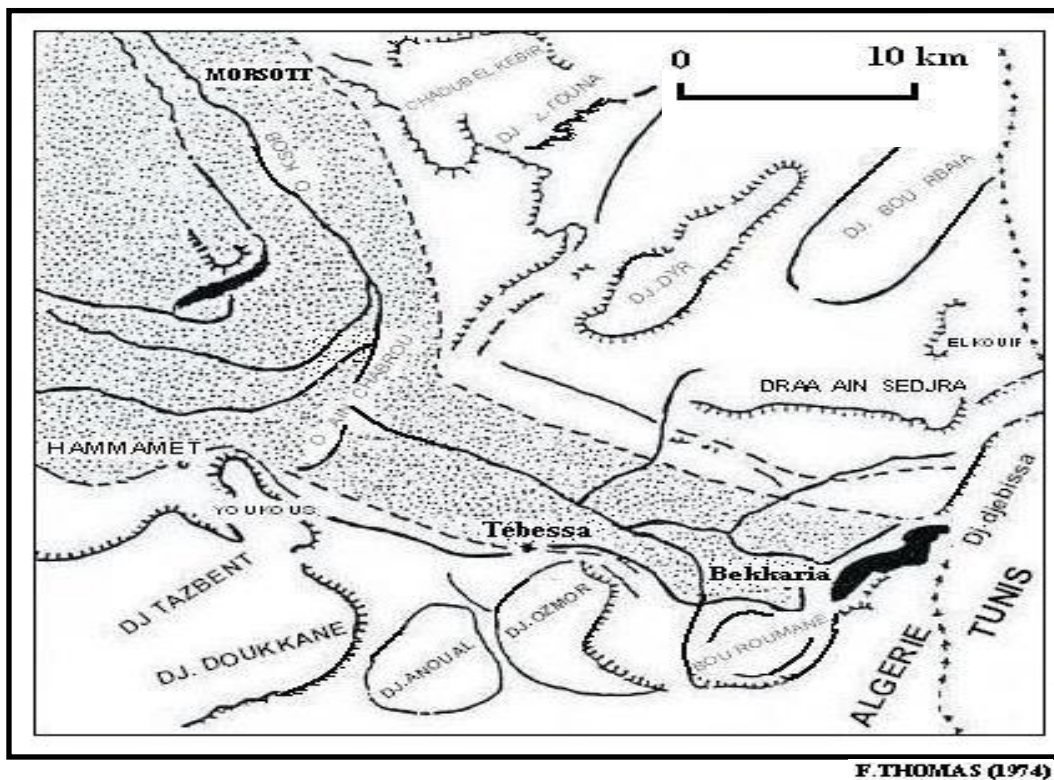
*CARACTÉRISTIQUES  
GÉOLOGIQUES*

## Introduction

Une étude géologique (lithologique et structurale) s'avère d'une importance capitale pour l'identification des formations susceptibles d'être des gisements d'eau souterraine et de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps.

## I – Géomorphologie

La plaine de Tébessa correspond à un grand fossé d'effondrement qui recoupe orthogonalement des plis anticlinaux et synclinaux d'axes *NE-SW*. Les grands accidents disloquant ces structures, ont donné à la région sa physionomie actuelle. La plaine est entourée de part et d'autre par deux grands ensembles d'affleurements calcaires, séparés par des dépressions (*Fig. 10*).



*Fig. 10 : Croquis géomorphologique de la région de Tébessa.*

- |            |                  |                                      |                                  |                          |
|------------|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 1          | 2                | 3                                    | 4                                | 5                        |
| 1 : Trias. | 2 : Quaternaire. | 3 : Limite d'unité géomorphologique. | 4 : Frontière Algéro-Tunisienne. | 5 : Accident tectonique. |

### **I – 1 – Les monts septentrionaux**

Le passage des hautes plaines de Mellègue aux monts de Tébessa se manifeste par le rétrécissement des plaines et par l'accentuation des unités géomorphologiques tel que le val perché de Dyr et celui de Bou Rbaia.

### **I – 2 – Les monts méridionaux**

Au sud, le fossé d'Ain Chabro tranche les monts de Nememcha, interrompant les formes du relief qui possédaient, auparavant, une certaine symétrie. Le relief devient de plus en plus complexe à l'Est de Djebel Doukkane ; la barrière orientée *E-W* s'incline vers le Nord-Est où elle ferme la plaine de Tébessa. Cette barrière se présente en petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmor, Djebel Bouroumane et celui de Djebissa.

## **II – Caractéristiques géologiques**

### **II – 1 – Le Trias**

Le Trias affleure en de nombreux endroits, à la faveur de pointements diapiriques, qui se seraient manifestés pour la première fois à l'Éocène.

Il constitue la majeure partie du Dj. Djebissa à l'extrémité est de la plaine. On le retrouve au Sud du Dj. Belkif, près du Dj. Hameimet Nord et enfin au Nord de Morsott où l'affleurement s'étend très largement en direction d'El Aouinet et de Souk Ahras.

Il est représenté par de grandes masses de gypses gris bleuté et parfois rougeâtre, et par des argiles vertes et bariolées. Ce faciès, indique l'existence d'importantes lagunes où se sont déposées de grandes quantités de marne, de gypse et probablement de sel (*F. Morel. 1955, Buisson 1974*).

### **II – 2 – Le Jurassique**

Il a été signalé l'absence des dépôts jurassiques dans la région (*Dubourdieu, 1956, Chevenine et al, 1989*), sauf que certains forages pétroliers les ont recoupés en dehors des zones diapiriques.

### **II – 3 – Le Barrémien**

Les seules formations qui se rapportent au Barrémien, affleurent au petit anticlinal de Sidi Embark au *NE* de Dj. Ouenza, sur le flanc *SW* de l'anticlinal de Mesloulou et le long de l'Oued Batma et au *NW* de Dehar Mesloulou (*Dubourdieu, 1956*).

Ailleurs, des mouvements d'effondrements (Boukhadra-Hameimat) et la poussée triasique, Ouenza, Boujaber (*Dubourdieu, 1956*), empêchent d'observer les sédiments antérieurs à l'Aptien.

Les formations barrémiennes sont représentées essentiellement par des marnes grises ou jaunes assez argileuses, à ammonites pyriteuses. Vers le sommet, ces marnes sont intercalées par de minces passées de calcaires noduleux gris clair à patine ocre (*Dubourdieu, 1956*). Ces formations ne dépassent pas les 250m d'épaisseur. Elles se sont déposées sur un haut fond assez proche de la surface (*Dubourdieu, 1956*), et témoignent des conditions de sédimentation en mer peu profonde. Ces conditions de sédimentation se sont poursuivies jusqu'au début de l'Aptien.

#### II – 4 – L'Aptien

Sur de vastes surfaces, l'Aptien prend dans "la zone des diapirs" de la région de Tébessa une grande importance par la nature de ses dépôts et leur développement substantiel (300 à 600m d'épaisseur) (*Fig. 11*). Il est formé de roches carbonatées néritiques qui se sont déposées dans des eaux chaudes peu profondes. Ces conditions ont favorisé l'essor des processus organogènes de la sédimentation qui a mené à la formation de différentes constructions. Á l'Aptien, la mer était plus étendue qu'au Barrémien. Le fait le plus marquant de cette période est la formation des récifs sur des rides allongées (*Dubourdieu, 1956*).

Durant l'Aptien supérieur, la région de Tébessa a connu le développement de nombreuses plates-formes isolées dont l'architecture est contrôlée par des remontées diapiriques (*Dubourdieu, 1956*). Ce complexe fait partie du domaine des hauts-fonds qui séparait, durant l'Aptien, un domaine profond (sillon de Sellaoua) d'un autre très subsident (sillon atlasique oriental). Ces faciès aptiens annoncent une régression fini- aptienne.

La formation aptienne débute par un Aptien essentiellement marneux composé d'une alternance de marnes, d'argile, de grés et de calcaire à Gastéropodes, Mollusques et Echinoïdes. Cet Aptien marneux est surmonté par un Aptien calcaire, formé de puissants blocs calcaires à ciment dolomitique, bioclastiques à orbitolines, rudistes et qualifiés de récifaux (*Dubourdieu, 1956*).

Le Clansayésien est composé, quant à lui, par des marnes grises à jaunes avec des intercalations gréseuses et calcaires (*Dubourdieu, 1956*). L'Aptien et les successions du Clansayésien apparaissent au cœur des anticlinaux de la région.





Étage	Sous étage	Lithologie	Épaisseur (m)	Description lithologique	
<b>CÉNOZOÏQUE</b>	<b>Quaternaire</b>		⑥ 10 - 30	Dépôts clastiques d'origine continentale.	
	Néogène	<b>Miocène</b>	⑤ 10 - 150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaires sableux avec intercalations d'argilites.	
			200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.	
Paléogène	<b>Éocène</b>				
<b>CRÉTACÉ</b>	<b>ÉURASIEN</b>		250 - 300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.	
			Maest		
			Compan	500 - 600	Marnes argileuses et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
			Con-Sant	500 - 600	Marnes argileuses et grises bleuâtres.
				④	
			Turo	180 - 250	Calcaires en banc, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
			Cénomman	900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure avec intercalations de calcaires marneux.
				③	
			Vracon	500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalation de calcaires argileux et argilites.
			Albien	480-600	Marnes grises et gris-foncées, noire dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
				②	
Clan	100 - 200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations			
	①				
Aptien	300 - 600	1- faciès clastiques, marnes argileuses avec intercalations des marnes sableuses et grès calcaires. 2- faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.			
	①				
Barrém	< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès de Mesloula).			
<b>JURASSIQUE</b>					
<b>Trias</b>			< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins dolomies et calcaires marno-dolimitique.	

Fig. 11 : Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa. D'après Dubourdiou 1956, 1959 ; David 1956 ; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi 1980 ; Otmanine 1996 ; Bouzenoune 1993 ; Vila et al 2000 ; Salmi – Laouar 2004.

### II – 4 – 1 – L'Aptien marneux

Il est présenté par de gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques à Orbitolines et de Mollusques. Parfois, on rencontre des intercalations de quelques niveaux de marnes feuilletées de couleur rouge violacée ou verte. On note la présence de quelques Lamellibranches, de moules internes de Gastéropodes au niveau de Djebel Bouroumane. Cette formation peut atteindre 450m d'épaisseur.

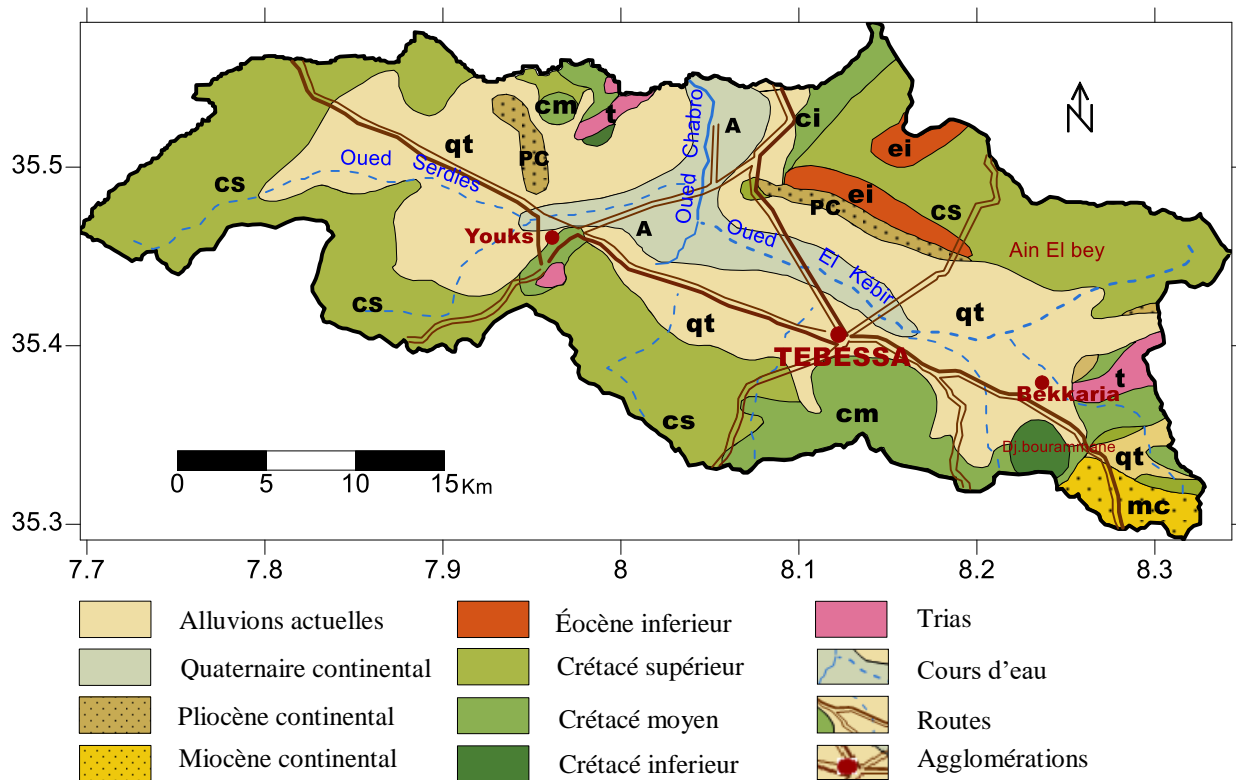


Fig. 12 : Carte géologique de la région de Tébessa, au 1/200 000<sup>ème</sup>.

### II – 4 – 2 – L'Aptien calcaire

Il surmonte l'Aptien marneux et renferme le plus souvent des miliolites, des rudistes et des lamellibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980) et une abondance de quartz automorphe.

L'épaisseur de cette formation varie entre 100 et 170 mètres. Ces calcaires sont considérés comme un métalotecte lithologique puisqu'ils encaissent l'essentiel de la minéralisation ferrifère et/ou polymétallique (Dubourdiou, 1956 ; Bouzenoune, 1993).

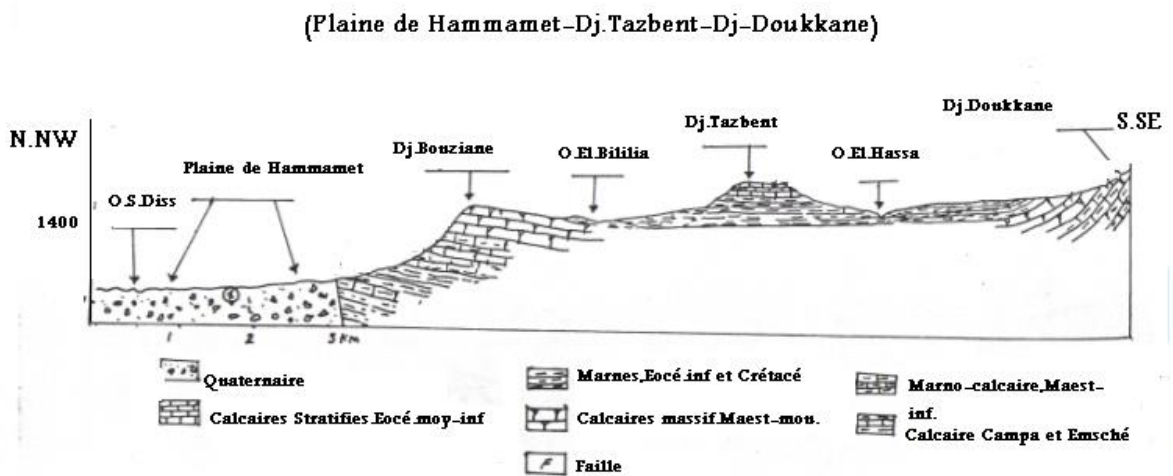
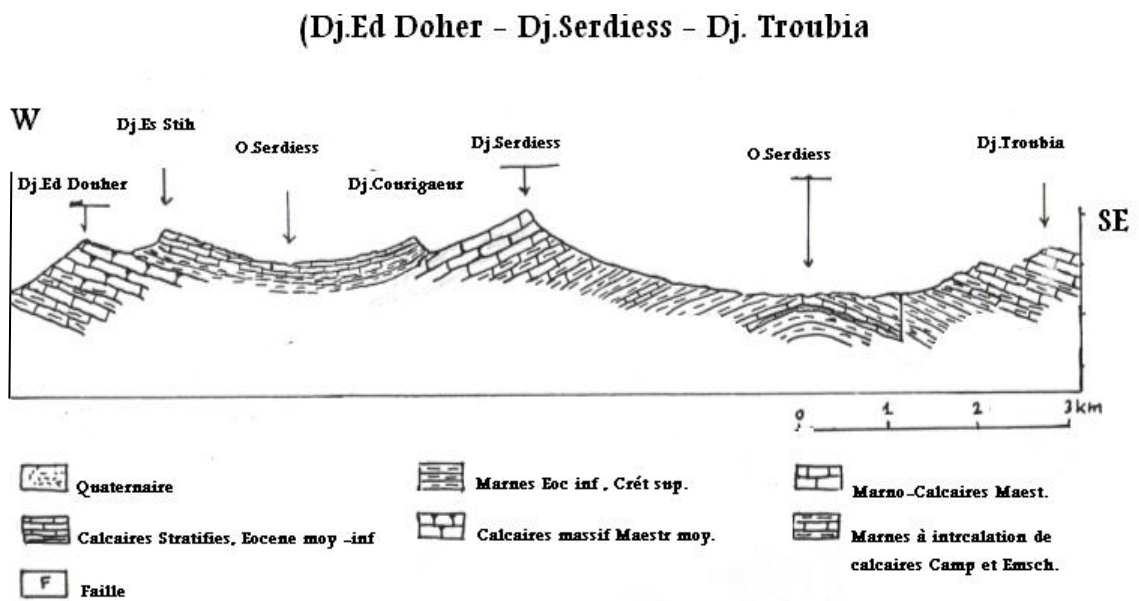
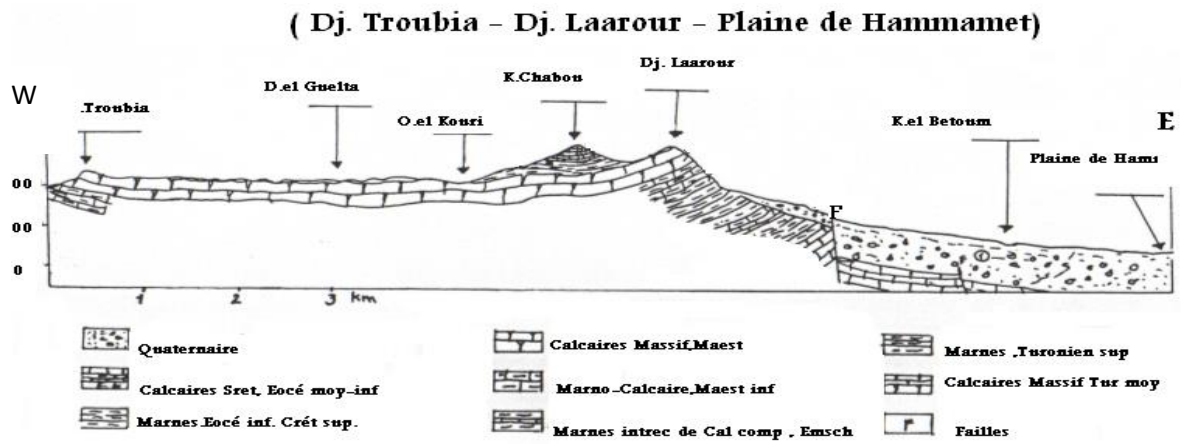


Fig. 13 : Coupes géologiques interprétatives dans la région de Hammamet.

### II – 4 – 3 – Le Clansayésien

Il affleure dans divers anticlinaux de la région étudiée, il s'agit de marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux (Dubourdiou ; 1956).

La formation aptienne présente une épaisseur totale de l'ordre de 700m en moyenne.

### II – 5 – L'Albien

Généralement, la formation albienne débute par un faciès carbonaté, qualifié de « récifal » dans sa partie inférieure et marneux et marno-calcaire dans sa partie moyenne à supérieure. Dans la région de Tebessa, il est marqué par une faune benthique dans des zones peu profondes. À l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évasés, plis en champignon, etc ...) généralement scellées par le Vraconien (Bouzenoune, 1993; Othmanine, 1987; Nedjari-Belhocène et Nedjari, 1984).

Une série monotone de marnes à argiles d'un gris foncé avec passage de calcaires à marnes noires est à signaler. Sa puissance varie de 20 à 150 mètres.

### II – 6 – Le Vraconien

Il est composé généralement par des marnes à intercalation de calcaires argileux et argilites de 500 à 600 mètres d'épaisseur (Dubourdiou, 1956). Il est généralement transgressif dans quelques régions sur le Trias (Thibiéroz et Madre, 1976) et sur l'Aptien (Othmanine, 1987).

Avec sa sédimentation marno-argileuse, le Vraconien forme un écran immédiat et un contrôle principal à la minéralisation polymétallique.

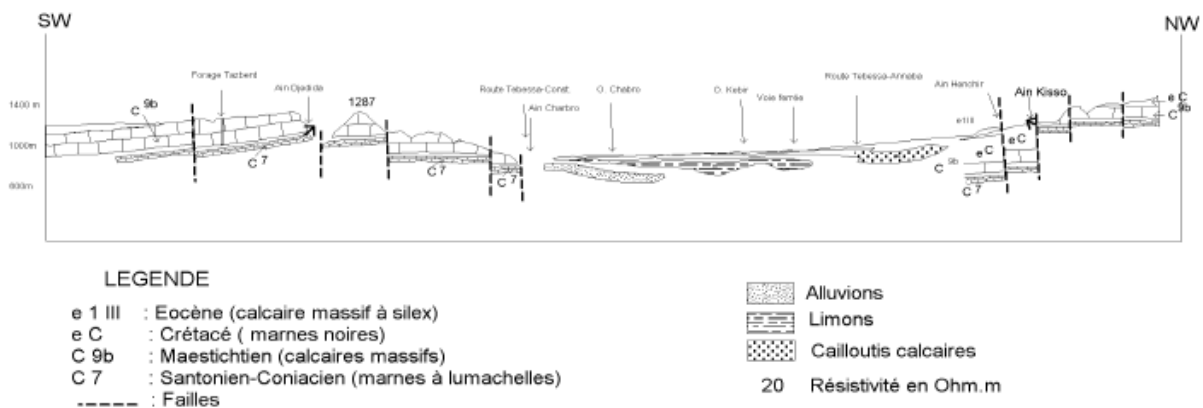


Fig. 14 : Coupe géologique schématique dans la zone d'étude (d'après J. Ricard 1975).



## II – 7 – Le Cénomanién

Dans la région de Tébessa, une série monotone de marnes argileuses verdâtres s'installe au Cénomanién inférieur. Au Cénomanién moyen, ces marnes admettent diverses intercalations calcaires peu développées avec une faune plus au moins abondante et de veinules de calcite fibreuse.

Au Cénomanién supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation cénomaniénienne est estimée entre 750 et 1100 mètres.

La sédimentation cénomaniénienne s'est déposée dans des conditions abyssales (profondes). Cette époque est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement NE-SW (*Othmanine, 1987*). À l'approche du Turonien, la sédimentation change rapidement en même temps que disparaissent les fossiles. Les marnes argileuses sont remplacées par des couches chargées en carbonate de chaux (*Duboudieu, 1956*). La limite supérieure du Cénomanién est difficilement distinguable (*Dubourdieu, 1956*).

## II – 8 – Le Turonien

Il se fait remarquer par son changement rapide de sédimentation vers des calcaires compacts donnant lieu à des reliefs accusés. Le Turonien constitue les flancs des grands anticlinaux et synclinaux et ses formations affleurent également en dehors des zones diapiriques.

L'analyse lithologique faite par Salmi-Laouar (2004) montre que la partie inférieure du Turonien dans le massif d'Essouabaa, épaisse de 200 mètres environ, est formée d'une série d'alternance stratocroissante de marnes, de calcaire marneux et de calcaires. Les marnes sont parfois argileuses de couleur grisâtre, d'ordre métrique à plurimétrique. L'épaisseur des bancs de calcaires marneux et des calcaires fins micritiques sont aussi d'ordre métrique à plurimétrique. L'étude de la microfaune a livré des sections du genre *Weithenella* et du genre *Hedbergella*. Sachant que ces genres sont très abondants à la limite Cénomanién-Turonien ainsi que dans le Turonien inférieur, l'âge turonien inférieur pour ces niveaux est admis et confirmé.

À partir du Turonien inférieur, les conditions abyssales qui régnaient, commencent à changer vers des conditions de mer chaude moins profonde. Au Turonien supérieur, une mer relativement profonde s'installe avec une accumulation d'une assise marneuse. Ce régime continue jusqu'au Campanien.

## II – 9 – Le Campanien-Santonien

Ils ne sont pas subdivisés à cause du manque d'éléments de datation. Ils sont représentés par des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris à plaquettes de calcite fibreuse et intercalation de marnes à lumachelles. Leur puissance varie de 200 à 600 mètres.

## II – 10 – Le Maestrichtien

Il est marqué par des calcaires blancs bien lités, d'environ 60 mètres d'épaisseur, recouverts par une très forte accumulation de marnes argileuses grises à noires (150m). Ces dernières admettent à leur base quelques intercalations de calcaires (*Dubourdiou, 1956*).

Le régime sédimentaire, au Campanien supérieur et au Maestrichtien, indique toujours la continuité des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et de mer chaude (*Chevenine et al, 1989*), avec une prédominance de calcaires crayeux rarement récifaux.

## II – 11 – Le Paléocène

Sa base présente des marnes analogues à celles du Maestrichtien supérieur qui s'intercalent à des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs.

## II – 12 – L'Éocène

Des calcaires à silex et d'autres à Nummulites caractérisent l'Éocène inférieur et moyen, près des périmètres de la région de Tébessa. Leur puissance est de 200 mètres.

## II – 13 – Le Miocène

Les dépôts du Miocène inférieur et moyen reposent transgressivement sur les formations anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias). Il s'agit d'une puissante accumulation de marnes et de grés dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin de Oulad Soukiès (NW de l'Ouenza) 1 000m (*Dubourdiou, 1956; Kowalski et Hamimed, 2000*).

À leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (*Bouzenoune, 1993*). Le remaniement de silex, réputé d'âge Yprésien à la base du Miocène témoigne de l'existence d'une mer éocène où se dépose une sédimentation marine durant l'Éocène et le Miocène inférieur à moyen. La sédimentation à la fin du Miocène indique le début d'une phase de régression.

La puissance moyenne du Miocène dans la région d'étude est de 150m (*Dubourdiou, 1956*).

## II – 14 – Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et sont distribués dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes (plaines et vallées actuelles). Ils sont formés de croûtes calcaires, limons éboulis, cailloutis et poudingues. La puissance du Quaternaire varie entre 10 et 30 m (*Dubourdieu, 1956*). Les formations lithologiques qui peuvent être distinguées sont les formations actuelles, les formations anciennes et le Plio-Quaternaire :

### II – 14 – 1 – Formations actuelles et récentes

- ✓ **Les Éboulis actuels** : ils existent au pied de tous les grands reliefs calcaires, mais ils se confondent, la plupart du temps, avec les éboulis anciens.
- ✓ **Les Travertins** : ils se déposent par les sources, surtout, de Tébessa et de Tenoukla.
- ✓ **Les Alluvions actuelles** : elles n'existent que rarement car, en règle très générale, les Oueds recourent les formations sur lesquelles ils coulent. Sur les bordures de la plaine, elles affectent l'allure de dépôts torrentiels.
- ✓ **Les Limons récents** : ils sont développés surtout dans la grande vallée de l'Oued kébir. Dans la Merdja de Tébessa, des dépôts de gypse alluvionnaire font l'objet d'exploitations locales.
- ✓ **Les Croûtes calcaires** : ce sont des dépôts superficiels dû à l'évaporation d'eau chargée de calcaire développés surtout sur les alluvions caillouteuses anciennes.

### II – 14 – 2 – Formations anciennes

- ✓ **Les Alluvions anciennes** : elles constituent les basses terrasses des Oueds et se raccordent généralement à des formations anciennes occupant latéralement de plus grandes surfaces ainsi que de niveaux localement discernables (cours amont de l'Oued Oglat el Rbaïb).
- ✓ **Les Alluvions anciennes de piedmont** : ce sont des formations de bordure de la plaine de Tébessa, argileuses ou caillouteuses. Dans le premier cas, elles sont constituées à partir des marnes sénoniennes à l'*W* et au *NE* de Tébessa, danomontiennes au *NW*, cénomaniennes au *SE* et dans le seconde cas, à partir des calcaires maestrichtiens à l'*W* et au *NE*, éocènes au *N*, turoniennes à l'*E*, enfin d'éléments très divers aux flancs du Dj. Djebissa. Ce sont, la plupart du temps, des cônes de déjection.

- ✓ **Le matériel d'épandage ancien en terrasse** : il est composé de cailloutis et d'argiles, peu épais en générale (sauf à l'W de Tébessa dans la région de Chabet el Hallouf), sur les marnes crétacées.
- ✓ **Le matériel d'épandage ancien : éboulis et cônes de déjection**
  - a. Éboulis et cônes de déjection anciens, ravinés par les Oueds actuels ;
  - b. Grands éboulis, amas de blocs, souvent énormes, de calcaires maestrichtiens paraissant soliflués, disloqués et en cours de destruction par l'érosion ;
  - c. Localement : anciens cônes de déjection rougeâtres, formés d'esquilles calcaires bien cimentées, empruntées exclusivement aux reliefs maestrichtiens au pied desquels ils se trouvent (Dj. Mestiri, Chabet el Hmara, Ksar Tebinet). Un pendage vers l'amont est parfois bien visible. Il peut s'agir, soit du rejet récent d'accidents de la bordure du fossé d'effondrement, soit de mouvements de solifluxion sur les marnes. Une période très humide a dû précéder à leur formation.
- ✓ **Les Cailloutis anciens du Dj. Djebissa** : ils sont souvent perchés sur les argiles à gypse du Trias ou sur les marnes cénomaniennes dans la région du Dj. Djebissa.

### II – 14 – 3 – Plio-Quaternaire (villafranchien)

Il est composé de :

- a. Argile rouge (O. Oglat Rbaïb, O. Kébir, K<sup>t</sup> el Kramassa, O. Serdiess) ;
- b. Conglomérats (contreforts, Est du Dj. Djebissa).

À K<sup>t</sup> Sefra et dans l'Oued Naguess (prés de Tébessa), l'argile et les conglomérats, alternant, n'ont pas été distingués. Quelquefois horizontaux, ces sédiments présentent, la plupart du temps, un pendage qui, s'il tient parfois à leur origine (dépôts de pente anciens à l'E du Dj. Djebissa), peut être aussi d'origine tectonique (O. Naguess, près de Tébessa).

À cette série se rapporte la plus grande partie des terrains de comblement du fossé d'effondrement. Un sondage, exécuté pour la recherche d'eau dans la basse plaine de Tébessa, les a traversés sur 171m. Ils renferment, en général, une faune d'Hélicidés. L'origine des sédiments détritiques est toujours immédiatement proche.

### III – Tectonique de la région

#### III – 1 – Les phases de l'orogénèse

Les différentes études sur la tectonique de la région ont permis de mettre en évidence la chronologie de la sédimentation, du plissement, du diapirisme et de la fracturation ainsi que, localement, les stades successifs d'effondrement du fossé de Morsott – Tébessa (Fig. 14).

Cette région a subi les cinq phases de l'orogénèse alpine (Kowalski *et al.*, 2002) :

##### a – La phase compressive fini-lutétienne

Elle est caractérisée par une contrainte maximale d'orientation  $N 320-330^{\circ}E$ . Elle se manifeste par des plis d'orientation atlasique  $N 50^{\circ}-60^{\circ}E$  bien visibles sur les cartes géologiques d'El-Aouinet (Dozet *et al.*, 1985), de Meskiana (Kuscer *et al.*, 1985) et de Morsott (Blés, Fleury., 1970), mais moins nettes sur la carte géologique de Tébessa (Durozoy, 1956) à cause de la superposition des phases ultérieures. Elle se manifeste clairement au SW de Tébessa (carte géologique d'Aïn Télijdjène, Vila., 1995).

##### b – La phase distensive du Miocène Inférieur

Elle est responsable de la formation et de développement du bassin d'El Ma Labiod au cours du Langhien-Serravallien et Tortonien, ainsi que celui des Oulad Soukies et du graben de Foussana et Kasserine en Tunisie.

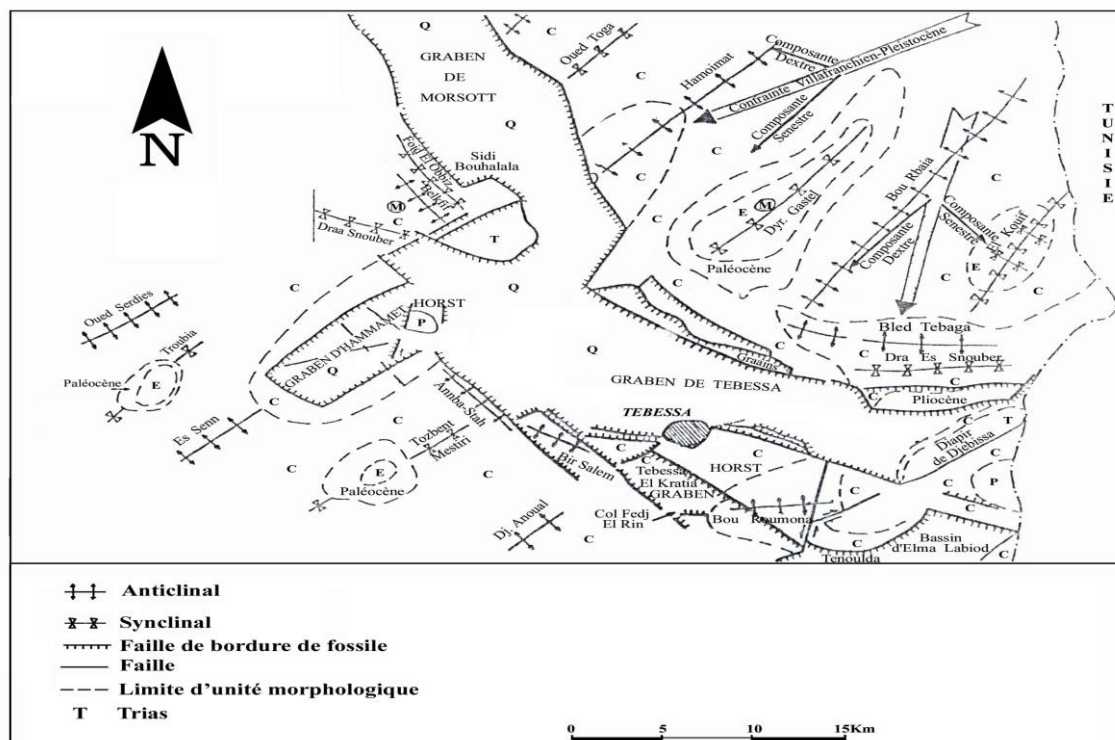


Fig. 15 : Esquisse tectonique des environs de Tébessa, d'après W. M. Kowaleski *et al.*

La distension miocène a facilité le diapirisme dans le fossé des Oulad Soukies, à Djebel Ouenza, à Djebel Boukhadra et dans la zone entre Djebel Belkif et Hameimat.

### **c – La phase compressive du Miocène supérieur**

Elle ne se manifeste que dans la zone de Sebkhia Sellaoua et plus au Nord. Dans la zone d'étude, ces manifestations sont amorties, en accord avec *Vila., 1980*. Les dernières manifestations de la compression miocène vers le Sud, ont été observées dans les monts de la Haute Mejerda.

### **d – La phase compressive du Pliocène inférieur**

Elle a une contrainte maximale  $N 0^{\circ}-20^{\circ}E$  responsable de la formation des plis orientés  $N90^{\circ}-110^{\circ}S$  (l'anticlinal de Bled Tebaga, le synclinal de Draa Es Snouber, l'anticlinal de Bir Salem et les replissements de l'anticlinal fini-Lutétien de Bouroumane, avec la formation de l'anticlinal de Bouroumane-Tella-Djebel Anoual) sur la carte de Tébessa. On observe aussi la formation du synclinal de Draa Snouber sur la carte de Meskiana.

L'effondrement du fossé de Morsott, provoqué par la composante senestre de la contrainte  $N 0^{\circ}-20^{\circ}E$  au cours du stade distensif, était accompagné par le percement du diapir de Belkif-Hameimat (diapirisme mio-pliocène), qui s'effondrait partiellement dans le fossé. La composante dextre facilitait la réactivation du diapirisme du Djebel Djebissa, qui se manifestait comme un diapirisme sous-marin à l'Aptien-Albien, provoquant la réduction drastique du profil Aptien-Albien de ce Djebel (*Vila, 1994*).

### **e – La phase compressive du Pliocène Supérieur**

Elle est responsable de la formation des structures plissées, plus jeunes que le fossé de Morsott, qui lui sont parallèles. Á cette phase appartiennent l'anticlinal de Djebel Belkif, le synclinal Faid Al *Lobba* (*Morel 1957*) et l'anticlinal d'Oued Anmba-Djebel Stah.

Ces plis, orientés  $N 160^{\circ}-170^{\circ} E$  sont formés par la contrainte maximale  $N 80^{\circ} E$  et détectés par *Blés (1969)* à El Kouif. La composante dextre de cette contrainte est responsable de l'effondrement du fossé de Tébessa lié avec l'effondrement et basculement d'une partie des structures plicatives du Pliocène inférieur (comme une partie de l'anticlinal de Bled Tebaga, et du synclinal de draa Snouber).

La composante senestre de cette contrainte a réactivé la montée du diapir de Djebel Belkif, avec sa couverture turonienne, et de la zone de Sidi Bouhalala.

Ce soulèvement diapirique a déformé le fossé de Morsott et parallèlement, se produisait la réactivation du diapir du Djebel Djebissa, qui monte jusqu'à maintenant.

La zone de jonction des fossés de Morsott (orienté *NNW-SSE*) et de Tébessa (orienté *WNW-ESE*) constitue une sorte de décrochement.

La prolongation septentrionale du fossé de Tébessa déborde cette zone de jonction en modifiant partiellement le synclinal de Draa Snouber (Pliocène inférieur) à l'Ouest du Djebel Belkif. Par contre les plis du Villafranchien inférieur, parallèles au fossé du Morsott, sont conservés. La composante senestre de la contrainte maximale du Plio – Villafranchien est responsable de la formation du fossé de Hammamet (*Fig. 15*). Le substratum de ce fossé basculé, est constitué d'un système de horsts et grabens orientés *SW - NE*.

### **III – 2 – La formation du fossé d'effondrement de Tébessa**

L'effondrement, dans toute la région étudiée, n'est observable qu'après la phase atlasique fini-lutétienne qui se manifeste dans l'Atlas Saharien par des plis dirigés *SW-NE*.

Le fossé de Morsott, dirigé *NNW-SSE*, s'est formé après le stade compressif de la phase Pliocène inférieur. La jonction entre le fossé de Morsott et le fossé de Foussana a été établie au cours du Villafranchien inférieur par la formation du fossé de Tébessa.

Les sédiments du Pliocène supérieur (Villafranchien inférieur), appartenant au premier stade d'effondrement du fossé de Tébessa, ont été en grande partie érodés en liaison avec le deuxième stade d'effondrement affectant presque toute la surface du fossé au Villafranchien supérieur (Pléistocène inférieur). Dans le fossé de Foussana, les sédiments du Miocène sont couverts par la formation d'Oued Segui (Villafranchien inférieur) qui est contemporaine des sédiments du premier stade d'effondrement du fossé de Tébessa.

Les puissantes séries de cailloutis témoignent dans le fossé de Tébessa de l'importance du deuxième stade d'effondrement du Pléistocène inférieur. Une subsidence beaucoup plus modérée après le deuxième stade d'effondrement a favorisé, au Pléistocène moyen, la sédimentation d'argiles au cours du troisième stade d'effondrement.

Au Pléistocène supérieur a eu lieu un quatrième stade d'effondrement très important dans la zone axiale du fossé de Tébessa. Selon *A. Zerdazi (1990)*, cet effondrement a provoqué la formation d'un graben d'une largeur d'environ *2Km*. L'ampleur de l'effondrement a provoqué l'érosion partielle des sédiments de *Q<sub>2</sub>* et le dépôt des galets de la série *Q<sub>3</sub>* dans les zones érodées.

La subsidence était ralentie rapidement au cours de l'Holocène, mais elle se poursuit encore actuellement. Trois séismes d'intensité 4-5 sur l'échelle de Richter ont eu lieu au cours de l'année 1995, semblant bien être en relation avec le stade de distension de la phase plio-quadernaire.

La zone axiale du graben de Tébessa, qui est actuellement le siège des dépôts alluvionnaires, poursuit son affaissement parallèlement aux soulèvements des marges du fossé lui-même.

### Conclusion

La région de Tébessa fait partie de la structure autochtone Nord-aurésienne (Aurès Nememcha) de l'atlas saharien (*Durozoy, 1956 ; Blès, 1969 ; Fleury, 1970 ; Vila, 1974 ; Kowalski et al., 1995, 1996, 1997*). Elle est constituée essentiellement des formations suivantes :

- Une formation triasique diapirique disloquant des formations subjacentes au niveau du Djebel Djebissa ;
- Des formations carbonatées représentées par d'importantes couches calcaire-marneuses et de marnes d'âge Crétacé à Tertiaire. Certaines de ces formations sont observables au niveau des bordures de la plaine de Tébessa, sujet de cette étude ;
- Un important dépôt alluvionnaire Mio-Plio-quadernaire qui repose en discordance avec les formations précédentes et forme ainsi le remplissage de la dépression, actuellement la plaine. Cette formation est observable surtout au piedmont des reliefs accidentés.



*GÉOMÉTRIE DE  
L'AQUIFÈRE*

## Introduction

La zone d'étude a fait l'objet de trois études géophysiques (*CGG 1970, 1975 et SOJERXPOR 1978*). Ces dernières avaient pour objectif de déterminer :

- ✓ La géométrie de l'aquifère ;
- ✓ La profondeur et la nature du substratum ;
- ✓ Les grands accidents en bordure qui accompagnent les fossés d'effondrement ;
- ✓ Les lentilles à lithologie grossière dans le remplissage alluvionnaires, avec la reconnaissance des zones à forte salure des eaux.

Dans le présent travail, nous nous intéressons uniquement aux formations alluvionnaires qui constituent l'aquifère le plus sollicité dans le zone d'étude.

On a réalisé un total de 681 sondages électriques au cours de ces travaux :

La campagne *CGG 1970* comporte :

- ✓ 242 SE en ligne AB = 1000m ;
- ✓ 105 SE en ligne AB = 3000m.

La campagne *CGG 1975* est une réinterprétation des résultats de celle de la *CGG 1970*.

L'étude *SOJERXPOR 1978* comporte :

- ✓ 80 SE en ligne AB = 6000m ;
- ✓ 242 SE en ligne AB = 2000m ;
- ✓ 12 SE en ligne AB = 1000m.

### I – Implantation des profils

Les profils ont été orientés *SW – NE*, suivant lesquels les sondages électriques ont été réalisés, comme l'illustre la carte suivante. (*Fig. 16*).

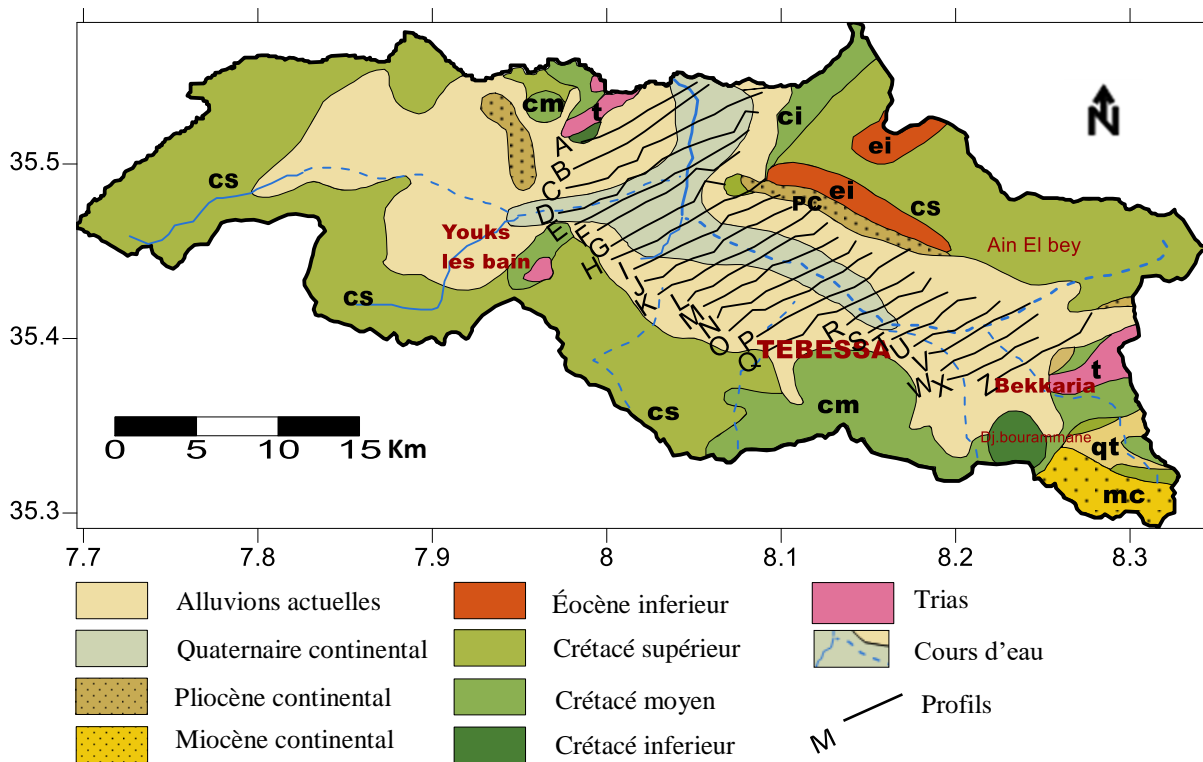


Fig. 16 : Carte de position des coupes géoélectriques (CGG 1970).

## II – Échelle de résistivité

Six sondages paramétriques ont été réalisés à partir des forages 501, 502, 503, 504, FG<sub>1</sub>, SER<sub>1</sub>. Ils ont conduit aux valeurs de résistivités suivantes :

Tableau N° 04 : Échelle de résistivité – plaine de Tébessa –

Étage géologique	Formations géologiques	Résistivité (ohm.m)
Quaternaire	✓ Limons salés du centre de la plaine.	1 - 3
	✓ Limons et argiles.	5 - 10
	✓ Alluvions argilo-sableuses.	15 - 20
	✓ Alluvions sableuses.	25 - 50
	✓ Éboulis secs.	300 - 400
	✓ Éboulis humides.	70-100
Plio-quaternaire	✓ Marnes à gypse du Villafranchien.	0.5 - 2
	✓ Alluvions caillouteuses du Pliocène.	30 - 50
	✓ Alluvions argileuses du Pliocène.	3 - 5
Éocène	✓ Calcaire blanc à silex (Éocène moyen).	100-200
Crétacé	✓ Marnes noires du Dano-Montien.	2 - 8
	✓ Marnes noires du Dano-Montien.	100 - 1000
	✓ Calcaire Maestrichtien.	5 - 10
	✓ Marnes et Calcaire marneux Emscheriens.	50 - 1000
	✓ Calcaire Turonien.	5 - 25
	✓ Marnes et Marno-calcaire Cénomaniens.	150 - 200
	✓ Calcaire-Dolomie Aptien.	variable suivant le faciès.
	✓ Trias.	

### III – Interprétation des résultats

#### III – 1 – Les coupes géoélectriques

L'observation de ces coupes a permis de différencier les zones suivantes :

##### III – 1 – 1– Zone de Bekkaria

Les profils  $U$ ,  $V$ ,  $X$  sont d'entre ceux qui longent la zone de Bekkaria et mettent en évidence l'existence des niveaux suivants avec, de bas en haut :

- ✓ Le premier, où la résistivité varie de  $2-10\Omega m$  ; valeur que l'on peut attribuer aux marnes Dano-Montiennes ;
- ✓ Le second, plus épais en bordure Sud-ouest, d'une résistivité allant de  $20-50\Omega m$ , qui correspond aux cailloutis calcaires ;
- ✓ Le troisième, de résistivité de l'ordre de  $8-10\Omega m$ , correspondant aux argiles détritiques.
- ✓ Le quatrième, de résistivité de l'ordre de  $10-30\Omega m$ , qui correspond à une formation argilo-sableuse.

##### III – 1 – 2 – Zone de Tébessa

Cette zone est traversée par les profils ( $Q$ ,  $O$ ,  $L$ ) qui montre de bas en haut :

- ✓ Une zone de résistivité de  $1-3\Omega m$  qui pourrait correspondre, d'après l'échelle de résistivité, aux formations salées. Mais celle-ci augmente jusqu'au  $10\Omega m$ , laissant supposer qu'il s'agit de marno-calcaire avec du gypse ;
- ✓ Un niveau de résistivité de  $10-20\Omega m$  de faciès argilo-sableux au centre, et  $50\Omega m$  en bordure, il s'agit de cailloutis calcaire ;

On remarque une grande perturbation au niveau du profile ( $O$ ) due à l'hétérogénéité du terrain. En bordure, on observe une grande valeur de résistivité de l'ordre de  $100-300\Omega m$ , il s'agit des calcaires maëstrichtiens ;

- ✓ En surface, on remarque une formation de résistivité allant de  $2-10\Omega m$  qui disparaît en bordure, c'est une résistivité qu'on peut attribuer aux argiles détritiques.

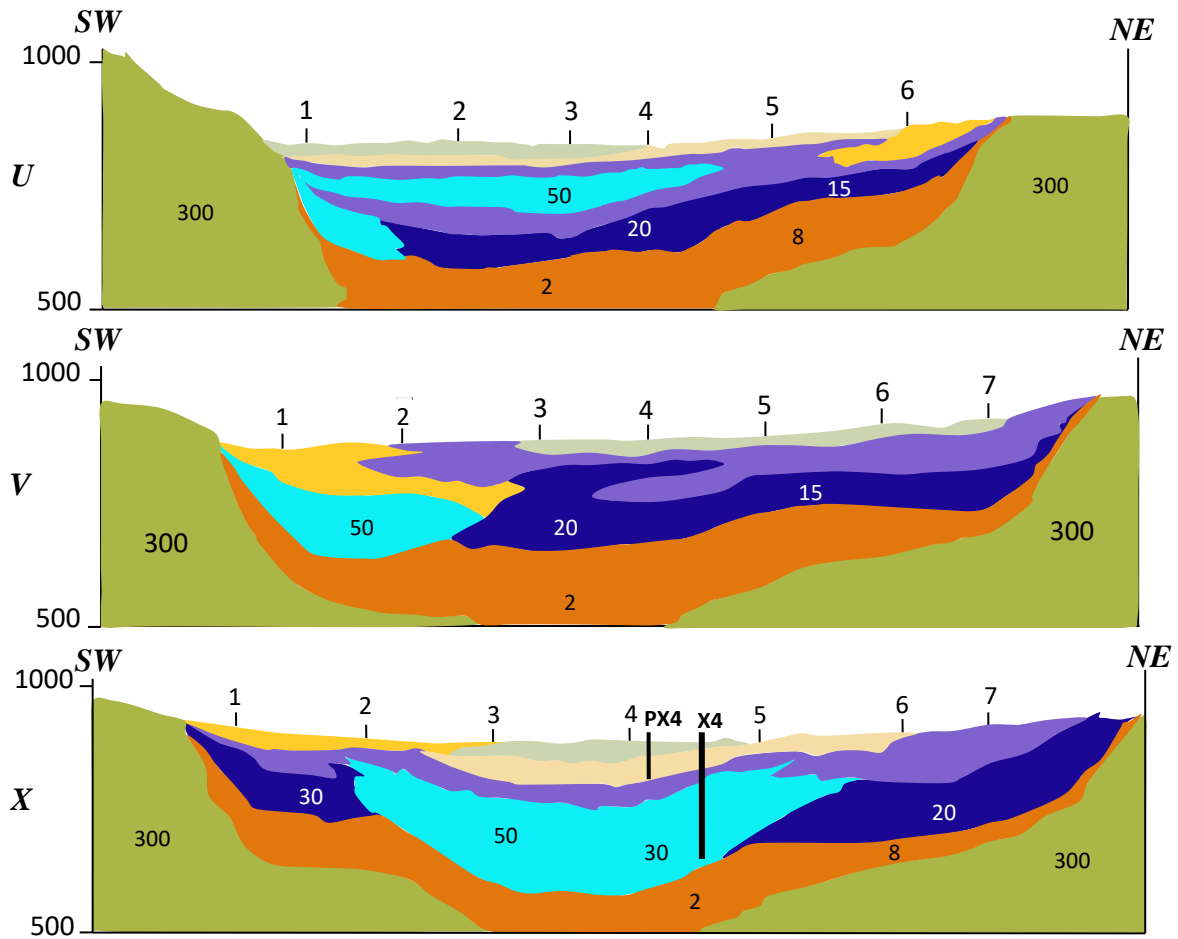
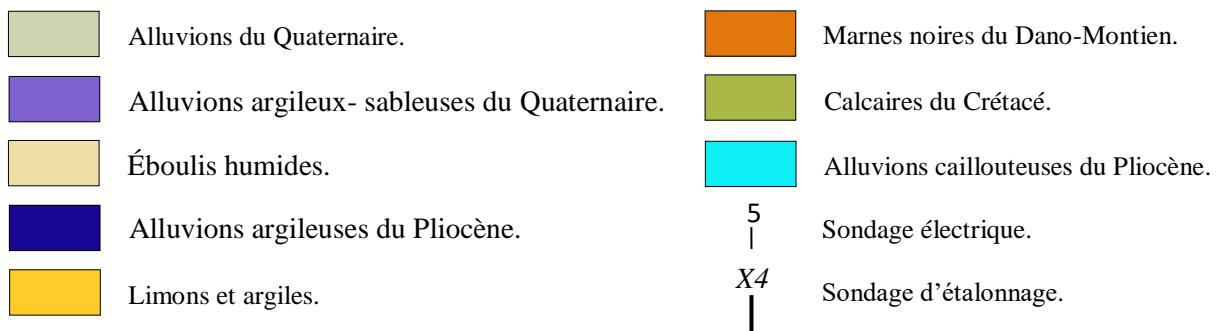


Fig.17 : Coupes géoélectriques (U, V, X) dans la zone de Bekkaria (CGG 1975).



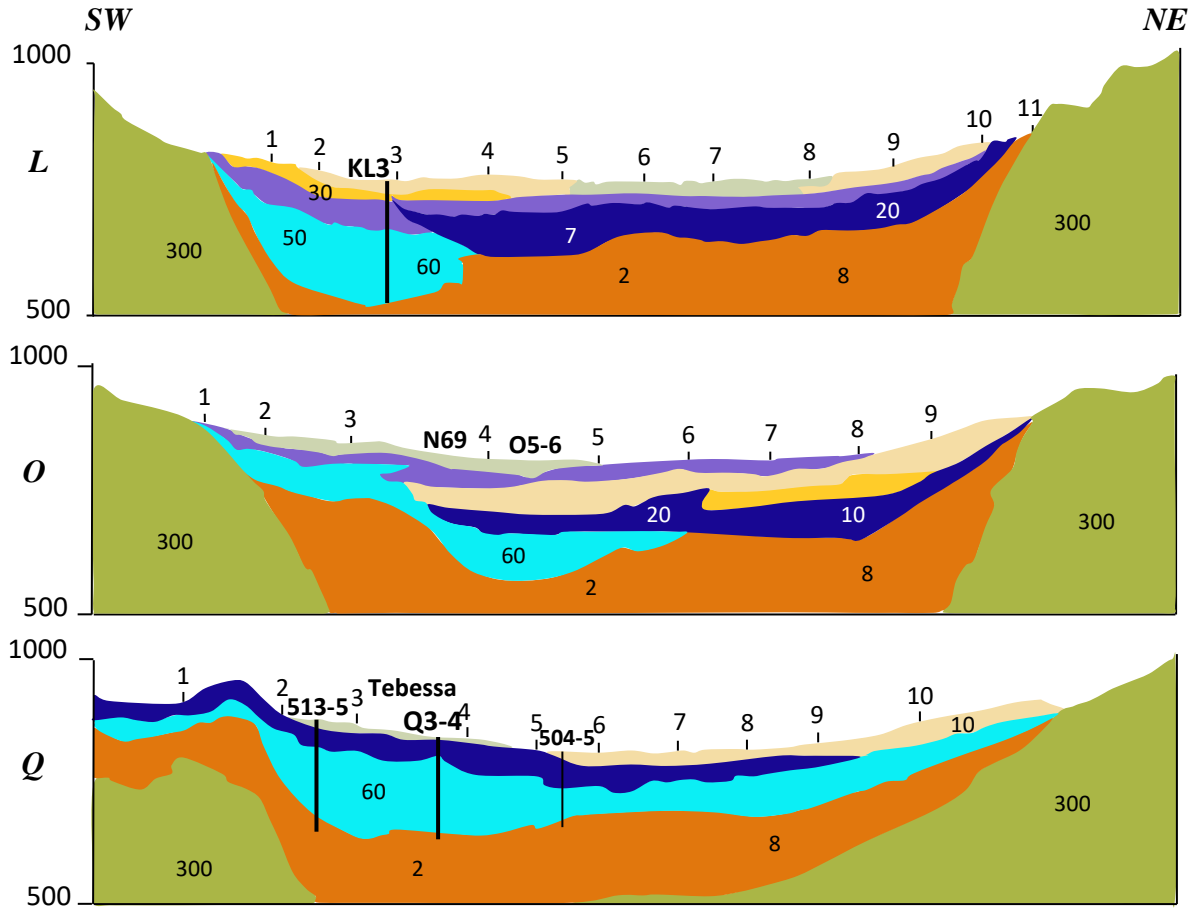
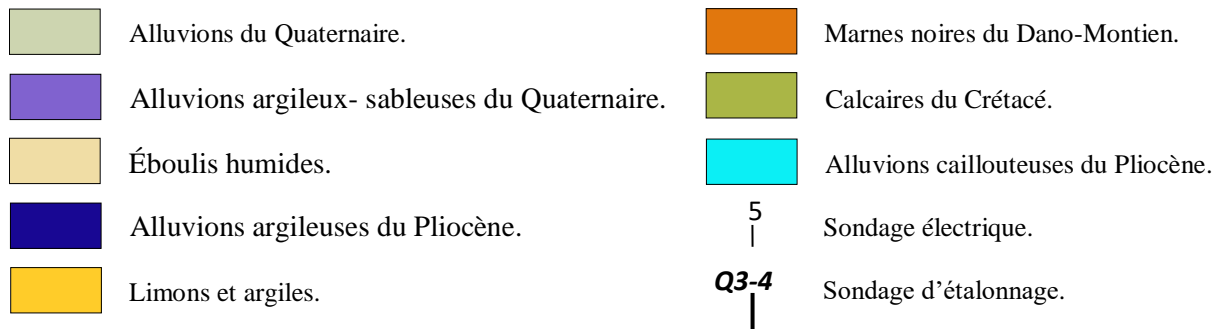


Fig.18 : Coupes géoélectriques (Q, O, L) dans la zone de Tébessa (CGG 1975).



### III – 1 – 3 – Zone d'Aïn Chabro

Elle est traversée par les profils (J, G, F) et on retient les niveaux suivants :

- ✓ À la base, une formation de résistivité de 2-10Ωm, correspondant aux marnes dano-montiennes.
- ✓ En bordure Sud –ouest, une épaisse formation possède une résistivité qui varie entre 30 et 70Ωm et qui est attribuée aux cailloutis calcaires.

Cette formation disparaît au centre de plaine, laissant place aux formations argilo-sableuses ; ce qui apparaît au niveau du profil (F) ;

- ✓ Un niveau de résistivité de 15-30Ωm, correspondant aux formations argilo-sableuses.

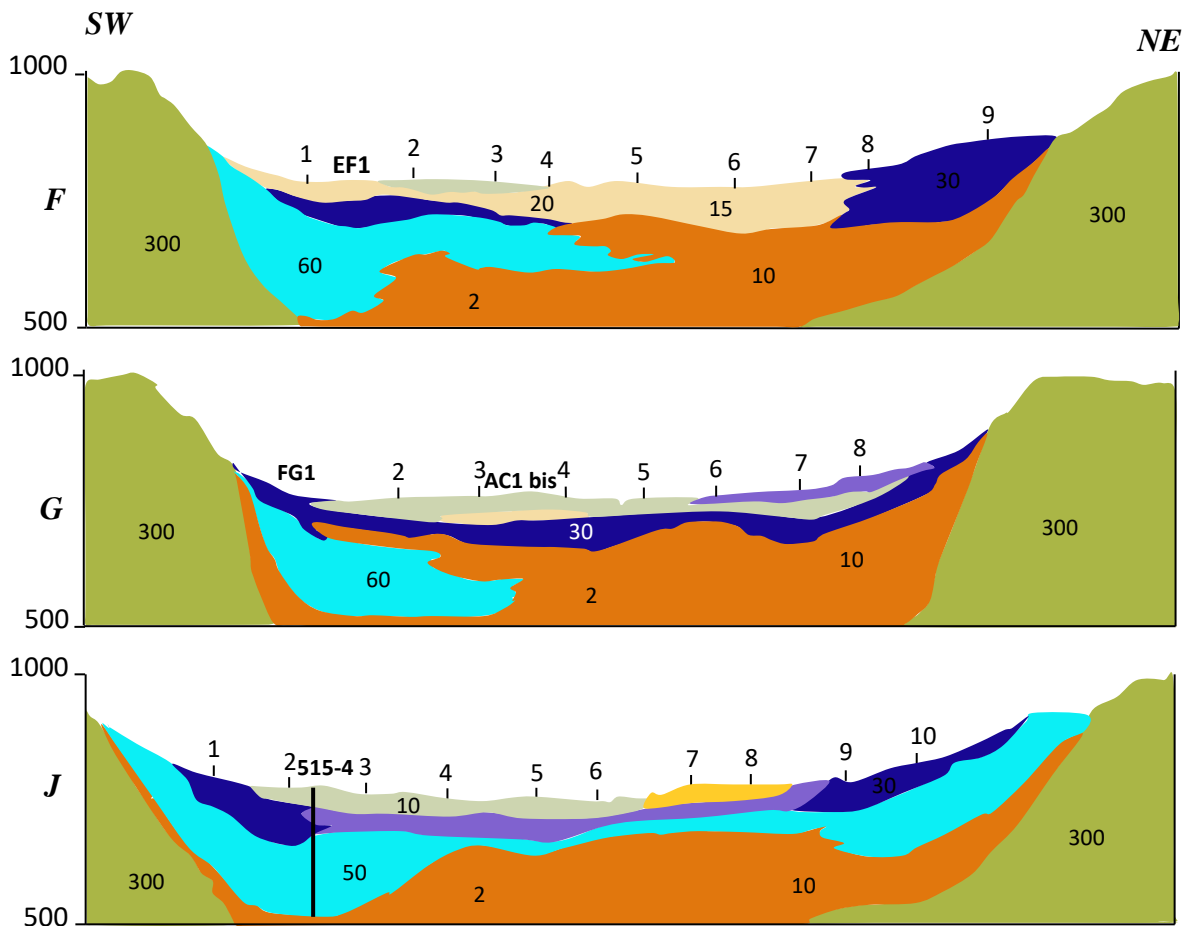
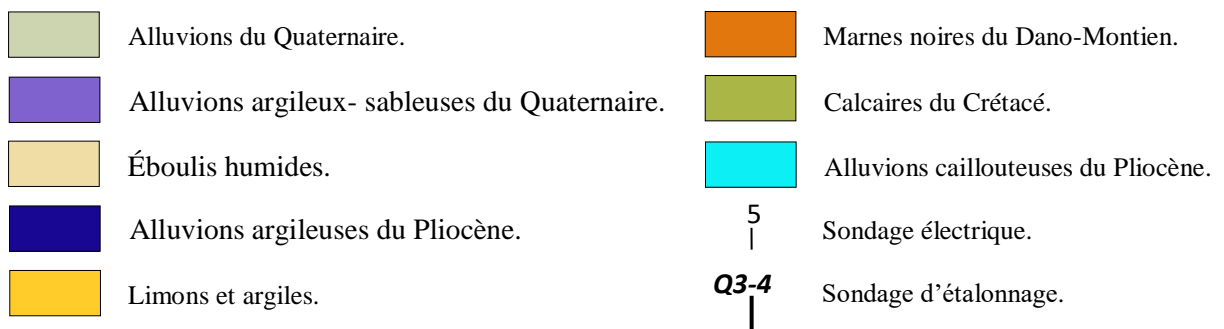


Fig.19. Coupes géoélectriques (J, G, F) dans la zone d'Aïn Chabro (CGG 1975).



### III – 2 – Carte des résistivités $AB = 600 m$

La carte des résistivités permet de donner une image qualitative de l'épaisseur et de la nature du recouvrement. Dans la partie axiale de la plaine, les résistivités apparentes sont très faibles ; inférieures à  $10\Omega m$ , du fait soit de la salure, soit d'une forte teneur en argiles. En bordure, les résistivités plus élevées, supérieures à  $15-20\Omega m$ , représentent un recouvrement plus résistant, et notamment les éboulis plus grossiers, cône de déjection (Bekkaria, NW de Tébessa, Nord de Youks-les bains) soit la présence du substratum à faible profondeur.

On peut dire, d'une façon générale, que la salinité de la nappe intervient dans une large mesure sur la résistivité, notamment sur les niveaux inférieurs. Ceci expliquerait que dans le centre de la plaine, les épaisseurs des niveaux résistants paraissent généralement moindres que sur les bordures.

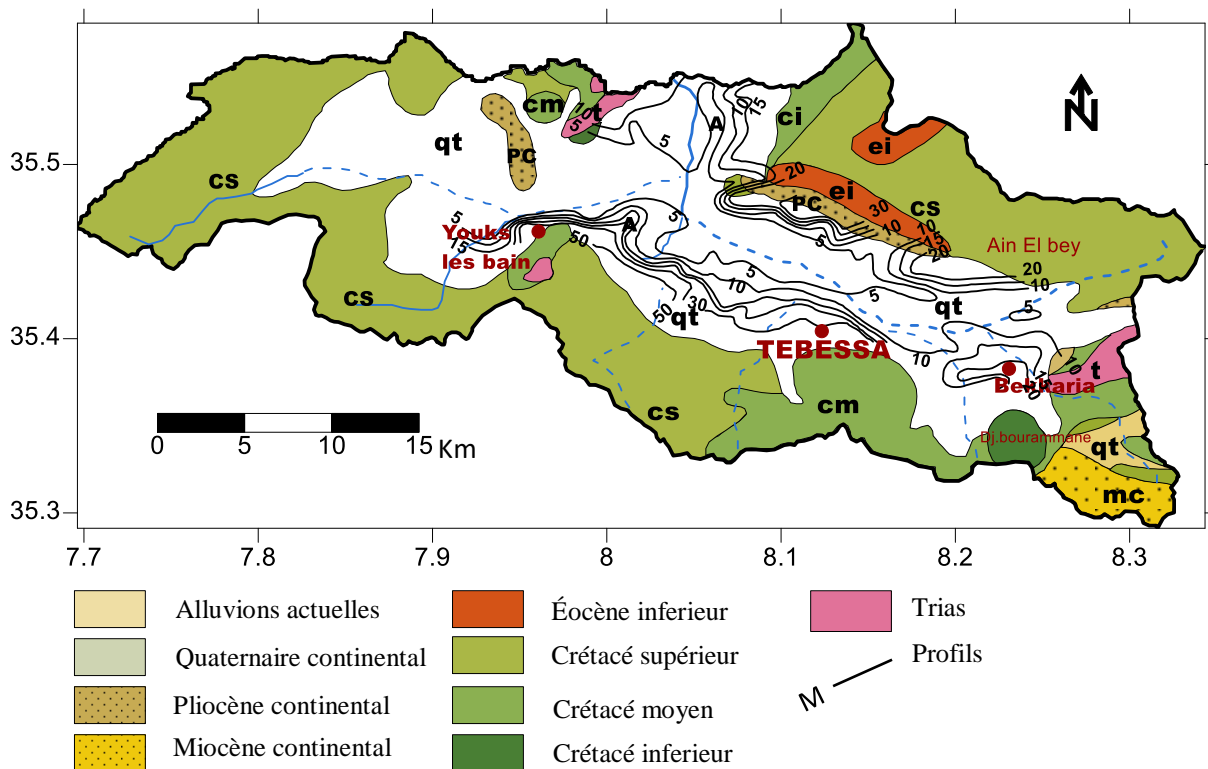


Fig. 20 : Carte des résistivités  $AB = 600$ .

### III – 3 – Épaisseur du recouvrement résistant

D'après la carte du recouvrement résistant, on constate que dans la plaine de Tébessa, entre Bekkaria et Tébessa, les épaisseurs sont assez importantes de 200 à 250m. On retrouve également de fortes épaisseurs dans la partie NW de la plaine, mais entrecoupées par des zones de très faibles épaisseurs. Ces dernières correspondent probablement à des zones de fortes salures du niveau inférieur. Elles se répartissent notamment dans l'axe de la plaine.



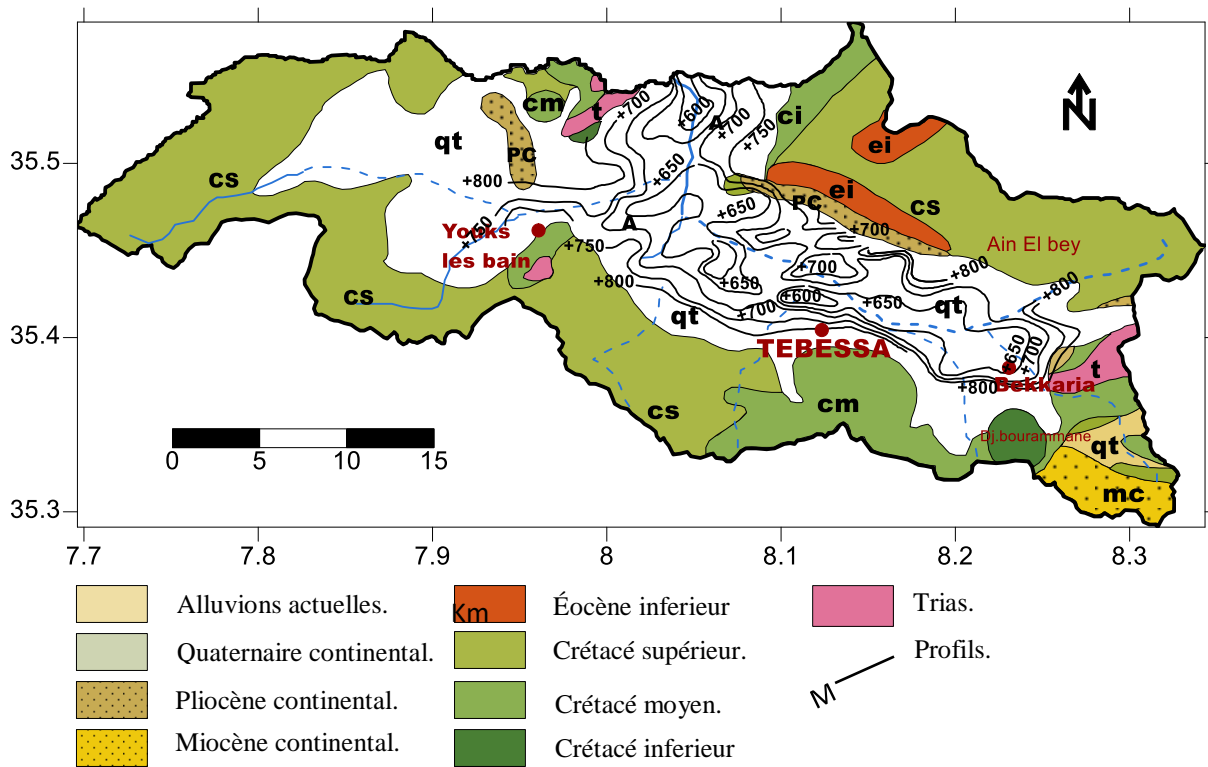


Fig. 21 : Carte du recouvrement de la plaine de Tébessa.

## Conclusion

D'après cette étude géophysique, nous constatons l'existence de différentes formations aquifères, où affleurent les formations alluvionnaires (graviers, galets, sables, qui s'intercalent avec des argiles) d'âge quaternaire, qui constituent le matériel de remplissage du bassin. Ces formations sont d'une porosité d'interstice ; leurs résistivités varient de 20 à 100  $\Omega m$ .

Quant au premier niveau, supposé être aquifère et qui correspond à la nappe phréatique, on signale qu'il est constitué de matériel à porosité d'interstice se déposant avec quelques discontinuités et des épaisseurs variables. Les résistivités varient de 5 à 100  $\Omega m$ .

On remarque que la résistivité diminue des bordures vers le centre de la plaine. En tenant compte de la nature du matériel de remplissage et sa relation avec la répartition de la résistivité, on peut juger que la zone étudiée est caractérisée par une hétérogénéité du matériel aquifère.

*CARACTÉRISTIQUES  
HYDROCLIMATOLOGIQUES*

## Introduction

La connaissance de la variation spatio-temporelle du type de climat et aussi des caractéristiques hydroclimatologiques du milieu naturelle est utile pour rendre fiable toute étude hydrogéologique envisagée.

Il est alors indispensable d'avoir le plus de détails sur les variations des températures, des précipitations, le régime des vents..., puisque ces paramètres ont un rôle déterminant dans le régime des cours d'eau et par conséquent la fluctuation/renouvellement des réserves en eau souterraines et de leur qualité et contribuent en outre à estimer l'Évapotranspiration, le Ruissellement, l'Infiltration...etc, éléments nécessaires à toute tentative d'établissement de bilan d'eau et son impact sur le comportement des systèmes aquifères, ainsi que du fonctionnement hydrologique du système naturel.

### I – Réseau d'observation

Pour réussir le suivi des paramètres climatiques, la région est dotée de trois stations ; Tébessa, Hammamet et Aïn Kissa. Néanmoins, pour les températures et pour des raisons de commodité, nous n'avons retenu que celle de Tébessa.

Leurs références sont données au tableau suivant (*Tableau N° 05*).

**Tableau N° 05 : Références des stations pluviométriques.**

**Source ANRH.**

<i>Nom de la station</i>	<i>N° de code</i>	<i>Coordonnées Lambert</i>			<i>Appareil utilisé</i>	<i>Date de mise en service</i>
		X (km)	Y (km)	Z (m)		
<i>Tébessa</i>	12.03.01	991.900	247.200	890.000	PV. PG.T	Sep 1906
<i>Hammamet</i>	12.03.04	976.500	251.750	875.000	PV.PG	Avril 1975
<i>Aïn Kissa</i>	12.03.06	992.1	257.4	1078.000	PV	Oct 1972

Ces stations sont réparties comme le montre la figure suivante (*Fig. 22*).

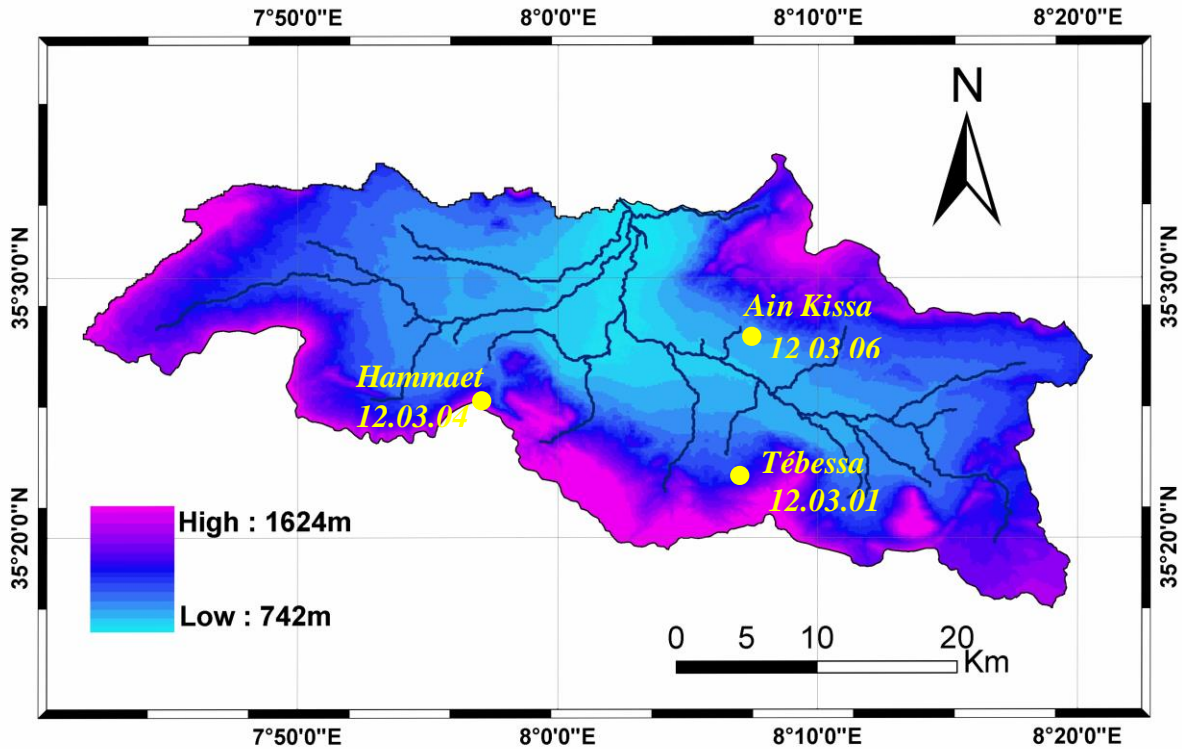


Fig. 22 : Stations pluviométriques et leurs codes – Bassin de Tébessa.

## II – Facteurs météorologiques déterminants

Le présent travail a nécessité la collecte de plusieurs données, nous avons alors sollicité les services de quelques établissements dont l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH de Constantine, de Tébessa) et ceux de la station aéroportuaire de Tébessa.

Il faut signaler aussi que la carte pluviométrique et celle de climat d'Algérie ; travaux respectivement de *C. Paquin, M. Chaumont (1 913-1 963)* et ceux de *P. Seltzer (1 913-1 938)*, nous ont été d'une grande utilité.

### II – 1 – Le régime des vents

D'après les services météorologiques, les vents qui touchent la région de Tébessa, sont caractérisés par leur vitesse et leur intensité. Ils ont comme directions dominantes, soit celle *NW* soit *SE*.

Les effets du sirocco sont possibles en toute saison, mais ils sont fréquents surtout en été, où ils peuvent provoquer des hausses remarquables et brusques de températures.



Fig. 23 : Variation des vitesses maximales du vent. Station de Tébessa (1991 – 2016).

## II – 2 – L'humidité relative de l'air

C'est le rapport de la valeur de la tension de vapeur réelle observée à celle de la tension de vapeur saturante, prises au même degré de température.

Les séries d'observation permettent de remarquer que le mois de Juillet est le plus sec, avec un taux d'humidité de l'ordre de 40 %, tandis qu'Avril est le mois le plus humide, avec un taux d'environ 70 %.

## II – 3 – La neige

La région, objet de cette étude fait partie, selon *P. Seltzer*, de la zone d'enneigement moyen au sol, équivalent de cinq à dix jours par an. L'épaisseur de la quantité tombée est de l'ordre de quelques centimètres voire moins, surtout ces dernières décennies.



Fig. 24 : Photographies prises le 31/12/2014 montrant la neige aux versants.

En effet, tous les massifs de bordure, en particulier le versant Sud-ouest des reliefs et notamment les monts de Djebel Es'Sen (1193m), Djebel Tazbent (1427m), le versant Sud-est dont les sommets sont enneigés en ligne droite Est-Ouest, depuis le Djebel Bouroumane (1545m) jusqu'au Djebel M'teguinaro (1712m), ainsi que celui Nord-est tels que Djebel Dyr (1472m), Draa Aïn Sedjra (1255m).

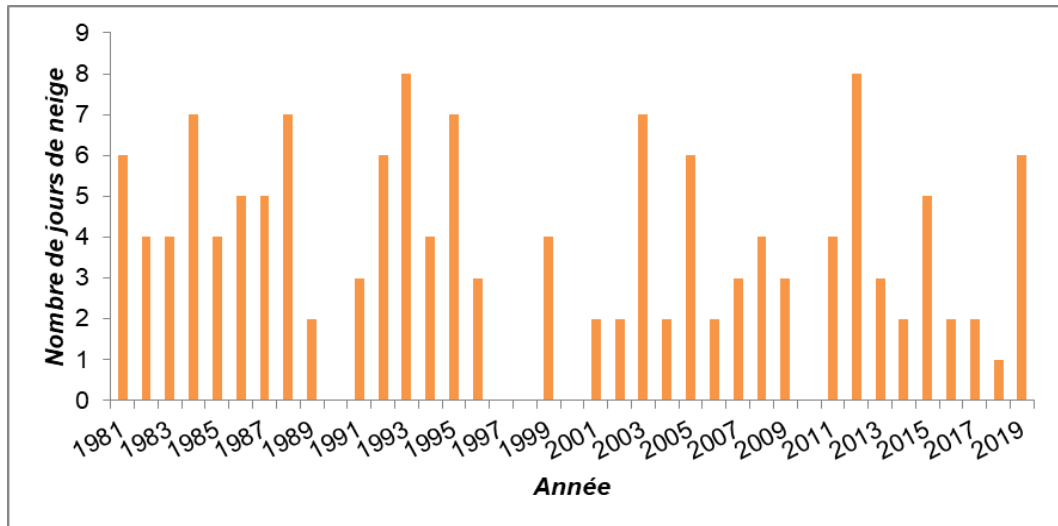


Fig.25 : Répartition des jours de neige, période d'observation 1981/2019. Station de Tébessa.

La surface du bassin susceptible d'être enneigée est relativement importante et joue un rôle important, car elle se situe aux piedmonts des monts calcaires. Ces quantités de neige contribuent au phénomène d'infiltration, après une fonte plus ou moins lente.

## II – 4 – La pluviométrie

Considéré comme le premier facteur important du cycle de l'eau, la pluviométrie joue un rôle primordial dans les mécanismes et le comportement du bassin Hydrographique.

Le suivi et l'enregistrement de ce paramètre a pour finalité l'estimation de la lame d'eau tombée et son impact sur la forme et le régime des écoulements. La variabilité de la pluviométrie conditionne aussi les apports aux nappes d'eau souterraines.

À l'échelle de notre région, elle se distingue par son irrégularité spatio-temporelle.

### II – 4 – 1 – Les précipitations annuelles et leur variabilité

L'examen des valeurs de précipitations, enregistrées au niveau des trois stations contrôlant le bassin, pour une période de cent douze (112) ans d'observation (1906/07 à 2018/19), a révélé que leur variation en fonction du temps est marquée par un écart considérable entre l'année la plus arrosée, (597.8mm/an pour la station de Hammamet – en

1917/18, 634.7mm/an à Tébessa – en 1972/73 – 581.7mm/an à Aïn Kissa – en 1917/18) et celle la plus sèche (154.1mm/an à Tébessa en 1937/38, 155.9mm/an à Hammam durant 1937/38 et 64.4mm/an en 1937/38 à Aïn Kissa).

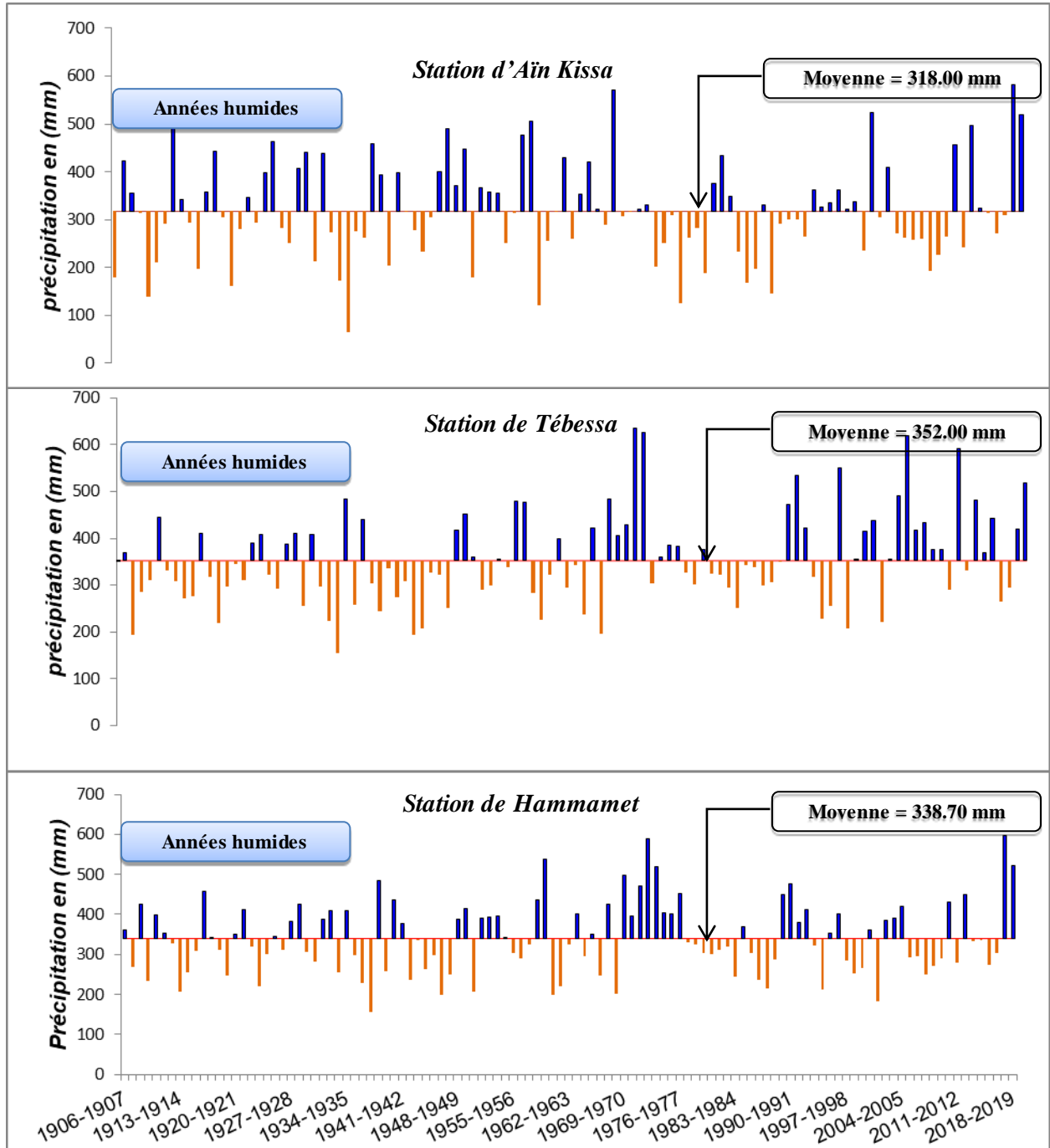


Fig. 26 : Répartition inter – annuelle des précipitations aux stations d'observation (1906 – 2019).

Nous remarquons que les moyennes annuelles enregistrées, au niveau des trois stations (318.00mm à Aïn Kissa, 338.70mm à Hammamet et 352.01mm à Tébessa), sont presque voisines, à quelques millimètres près.

Ces écarts (entre années humides et sèches) indiquent soit un excédent ou un déficit des précipitations, de l'année considérée, par rapport à la moyenne. Ils sont donnés par l'expression :

$$e_i = \frac{P_i - P_n}{P_n} \cdot 100. \quad \text{Avec :}$$

$e_i$  : écart à la normale de l'année considérée.

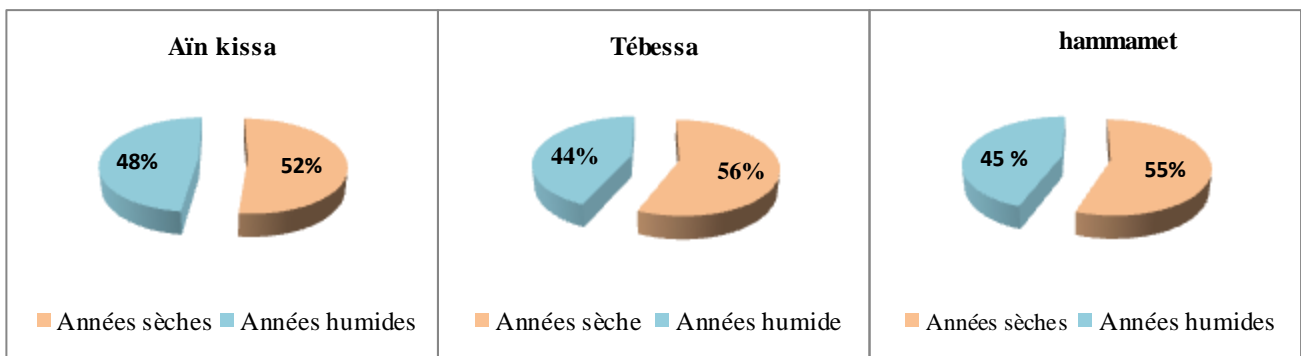
$P_i$  : total de l'année (humide ou sèche) considérée (mm).

$P_n$  : moyenne interannuelle des précipitations (mm) de la série d'observation (112ans).

**Tableau N° 06 : Écart à la normale des précipitations annuelles (1 906/07 ÷ 2 018/19).**

Paramètre Station	Pi (mm) total année extrême				Écart à la normale	
	Sèche	Période	Humide	Période	Année sèche	Année humide
Aïn kissa	64.4	1937/38	597.8	1917/18	-79.74	82.92
Hammamet	155.9	1937/38	588.8	2012/13	- 53.97	76.50
Tébessa	154.1	1937/38	634.7	2012/13	- 56.22	80.31

Sur la série d'observation (112 ans), une dominance, quoi qu'irrégulière, des années sèches (51.85% à Aïn Kissa, 55% à Hammamet et 55.5% à Tébéssa) est à signaler. Les années humides ne constituent que les 48.15% à Aïn Kissa, 38.89% à Hammamet et 44.5% à Tébéssa, de la dite période.



**Fig. 27 : Répartition des années sèches et humides aux stations d'observation.**

La précipitation moyenne calculée sur cent douze années est de l'ordre de 336.23mm, ce qui est confirmé par la carte des précipitations moyennes annuelles, établie selon la plateforme Google Earth Engine (moyenne des années 1981/82 – 2018/19). (cf. fig. 28).



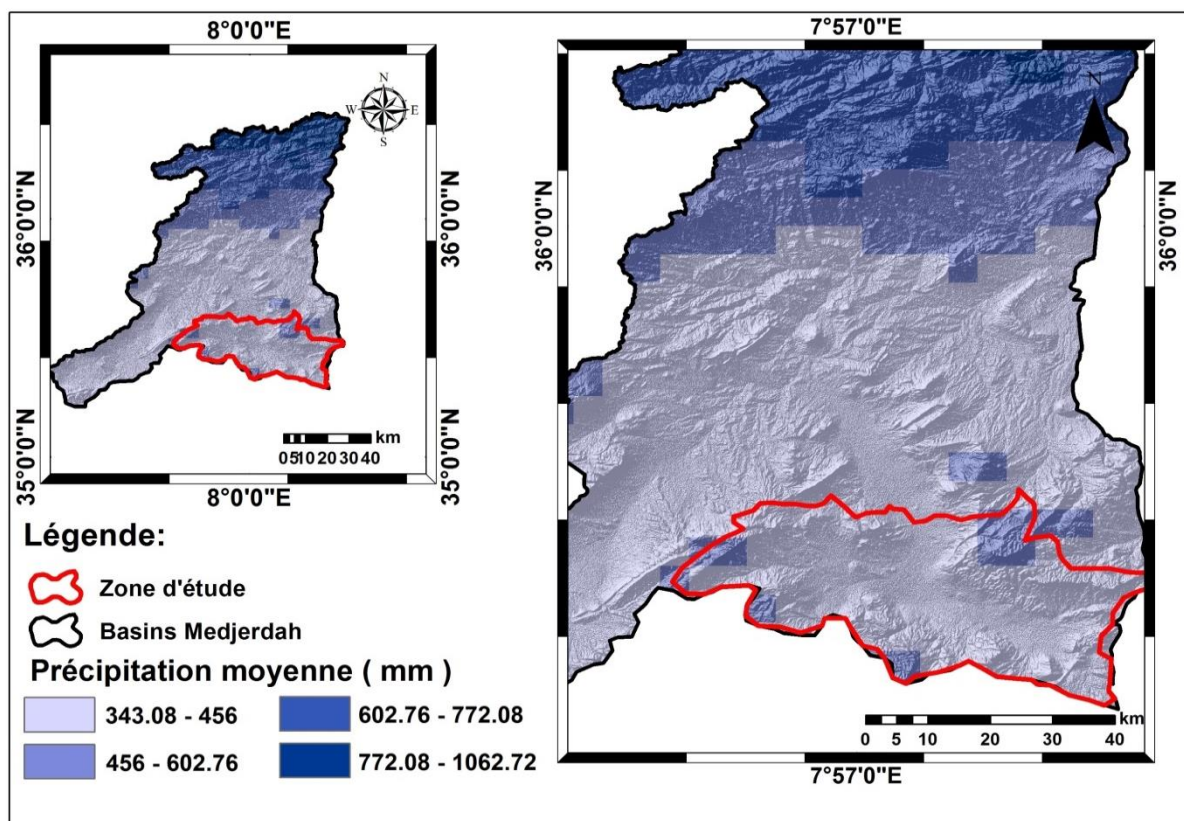


Fig. 28 : Répartition des précipitations moyennes annuelles. Bassin de Tébessa  
Google earth engine (1981 – 2019).

Au cours de cette même période, le maximum et le minimum atteignent respectivement 598.46mm et 124.80mm.

#### II – 4 – 2 – Les précipitations mensuelles

La répartition des précipitations influence directement les régimes hydrologiques tels que les écoulements, l'infiltration...etc., et par conséquent les réserves. Il s'avère alors judicieux d'assurer un suivi et faire une estimation quantitative pour avoir une idée sur l'état des lieux des stocks.

Tableau N° 07 : Mois humide et mois sec à la station pluviométrique de Tébessa.

Station	Code	Mois humide	Mois sec
Tébessa	12-03-01	Septembre : 44mm	Juillet : 15.4mm

Le dépouillement des valeurs enregistrées de ce paramètre, confirme en effet leur variabilité. Les valeurs extrêmes, retenues, sont récapitulées au tableau précédent (cf. Tab7).

Le mois de Juillet est le plus sec tandis que Septembre est le plus humide. Cette variation est traduite par la représentation en histogramme, ci-dessous (Fig. 29).

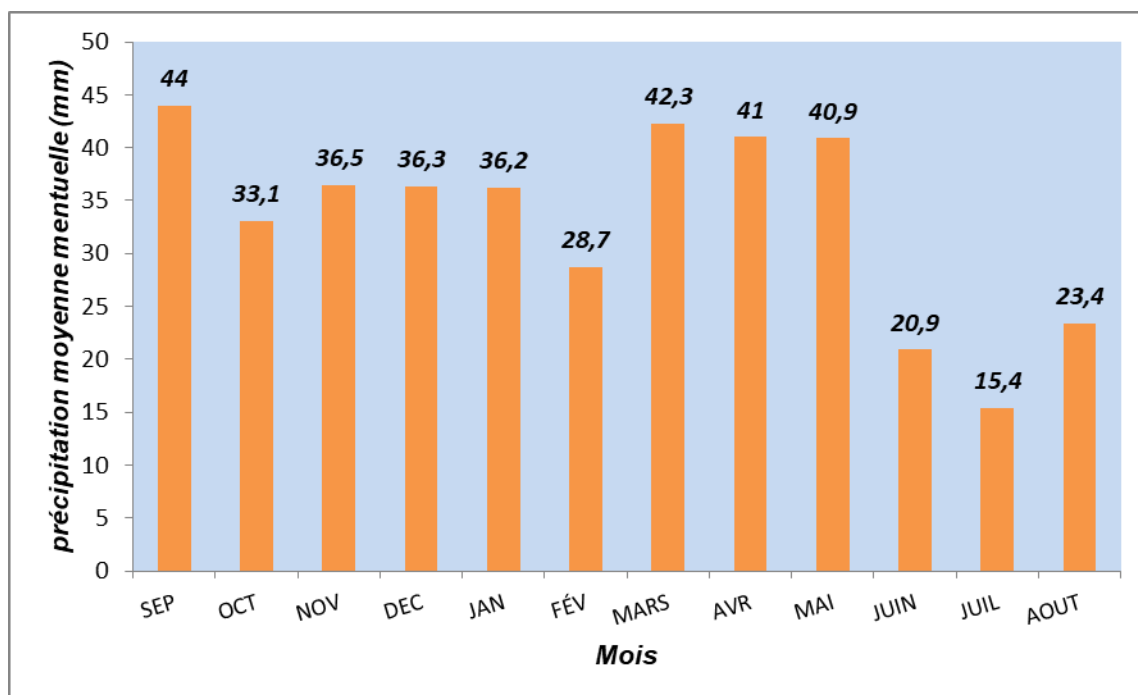


Fig. 29 : Répartition des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa (1981/82– 2017/18).

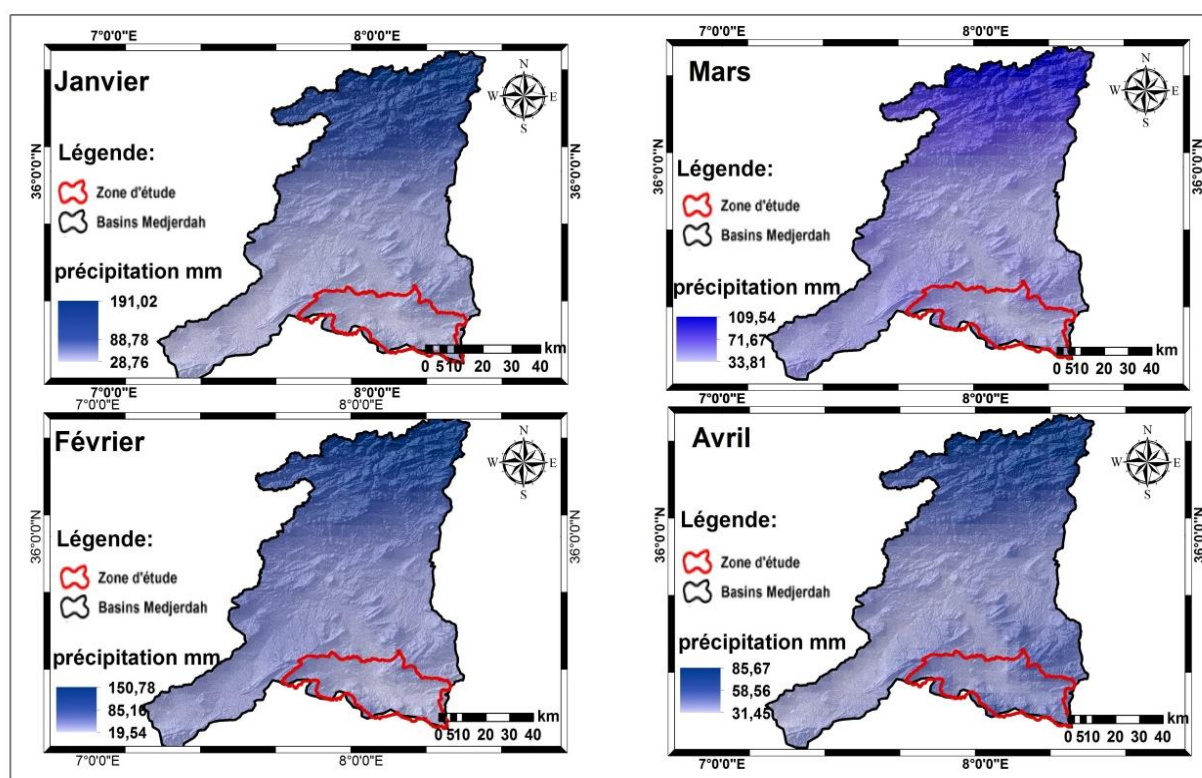


Fig. 30a : Cartes des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa. Google Earth Engine (1981/82– 2017/18).

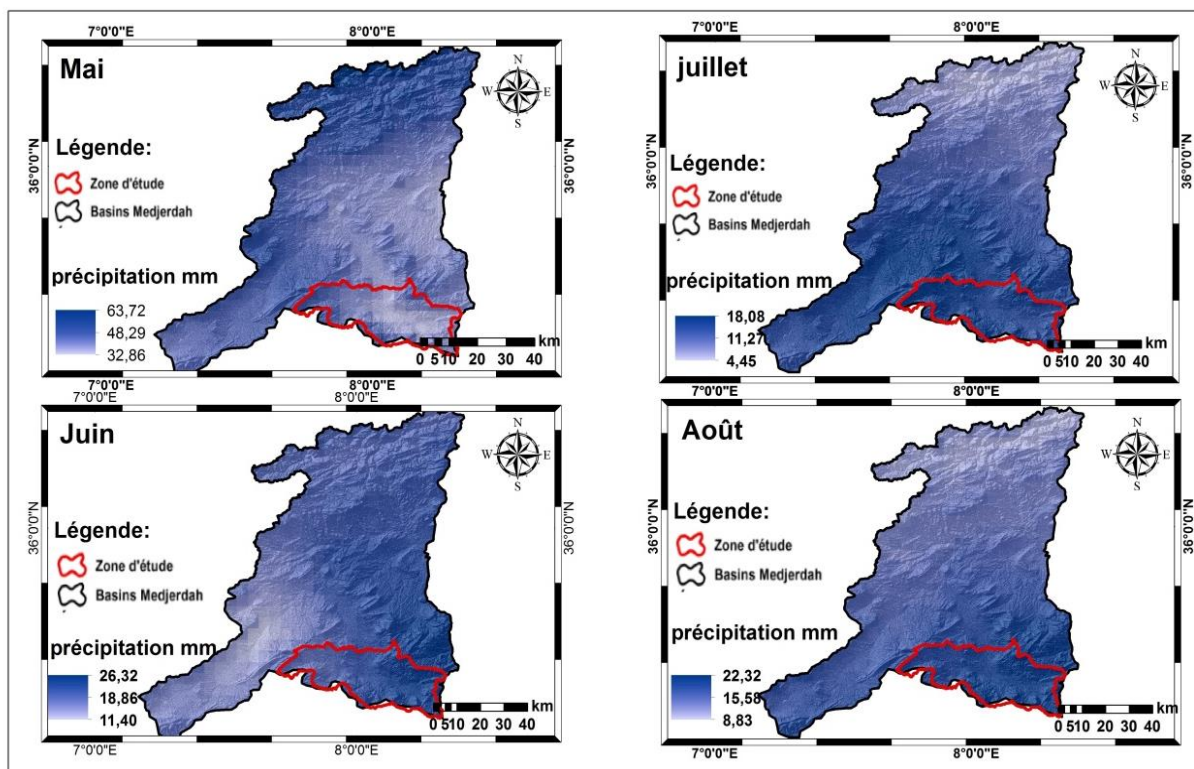


Fig. 30.b : Cartes des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa. Google Earth Engine (1981/82 – 2017/18).

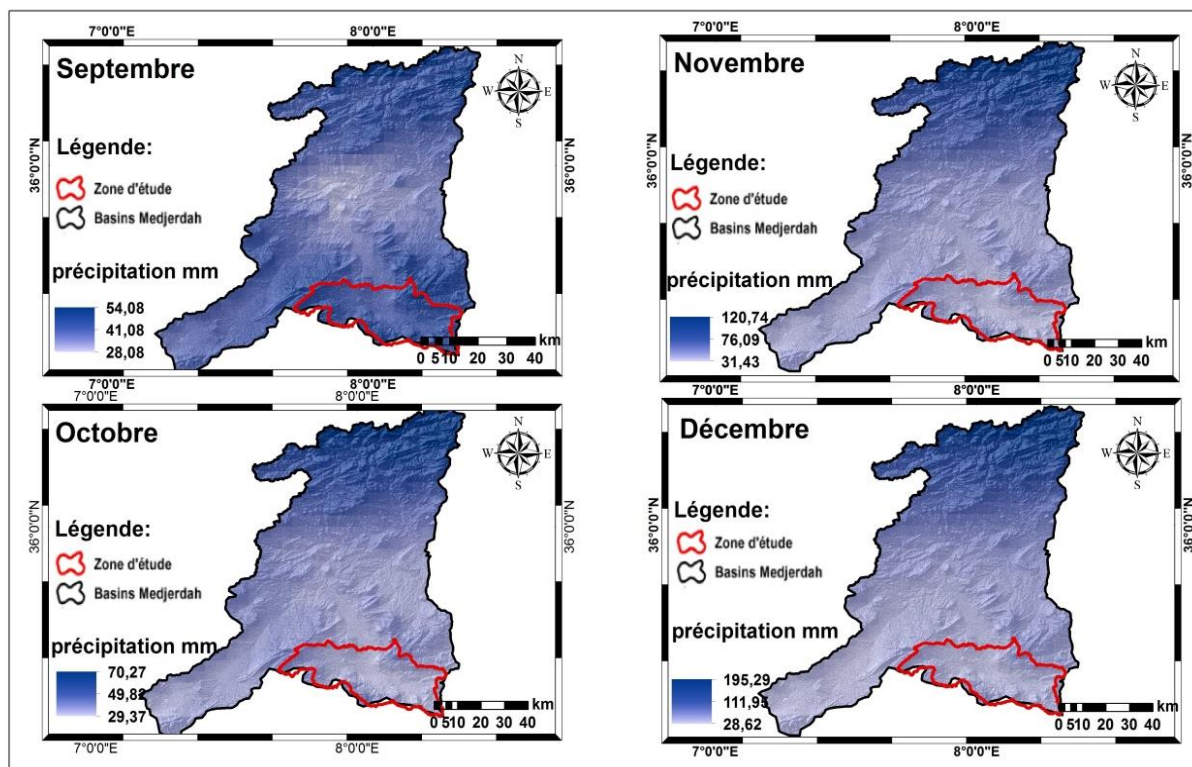


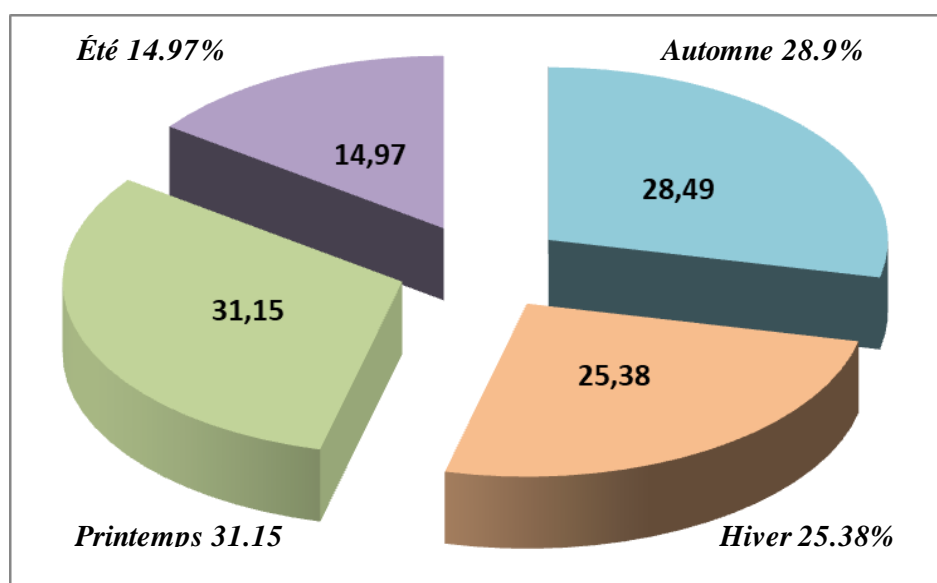
Fig. 30.c : Cartes des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa. Google Earth Engine (1981/82 – 2017/18).

Dans le tableau suivant (Tableau N°08) sont reportées les valeurs des moyennes mensuelles et saisonnières, des hauteurs de précipitations observées, obtenues via la plateforme de Google Earth Engine, relatives au bassin de Tébessa.

**Tableau N° 08 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières. Bassin de Tébessa (1981/82 – 2018/19).**

<i>Mois Bassin</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Déc</i>	<i>Jan</i>	<i>Fév</i>	<i>Mar</i>	<i>Avr</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>juil</i>	<i>Août</i>
<i>Tébessa</i>	44	33.1	36.5	36.3	36.2	28.7	42.3	41	40.9	20.9	15.4	23.4
	<i>Automne</i>			<i>Hiver</i>			<i>Printemps</i>			<i>Été</i>		
	113.6mm $\equiv$ 28.49 %			85.7mm $\equiv$ 25.38 %			124.2 mm $\equiv$ 31.15 %			59.7 mm $\equiv$ 14.97 %		

La continuité des saisons est à chaque fois interrompue, ce qui témoigne ce que nous avons déjà avancé pour ce qui est de l'irrégularité de la répartition des précipitations et de leur variabilité. Le printemps et l'automne sont, relativement, les mieux arrosés alors que l'hiver et notamment l'été sont secs.



**Fig. 31 : Répartition saisonnière des précipitations. Bassin de Tébessa. (Google Earth Engine – 1981/82 – 2018/19).**

## II – 5 – Les températures

La température est parmi les paramètres les plus déterminants dans la caractérisation du climat. Son importance apparaît dans les essais d'évaluation du taux d'évaporation, d'évapotranspiration, de déficit d'écoulement...etc, qui sont tous des éléments nécessaires pour l'estimation du bilan hydrologique.

À défaut de réseau d'observation et d'archive (stations de Hammamet et Aïn Kissa), conjugués aux lacunes observées aux enregistrements de la station de Tébessa, nous avons préféré utiliser les données de la plate – forme Google Earth Engine.

### II – 5 – 1 – Variation des températures

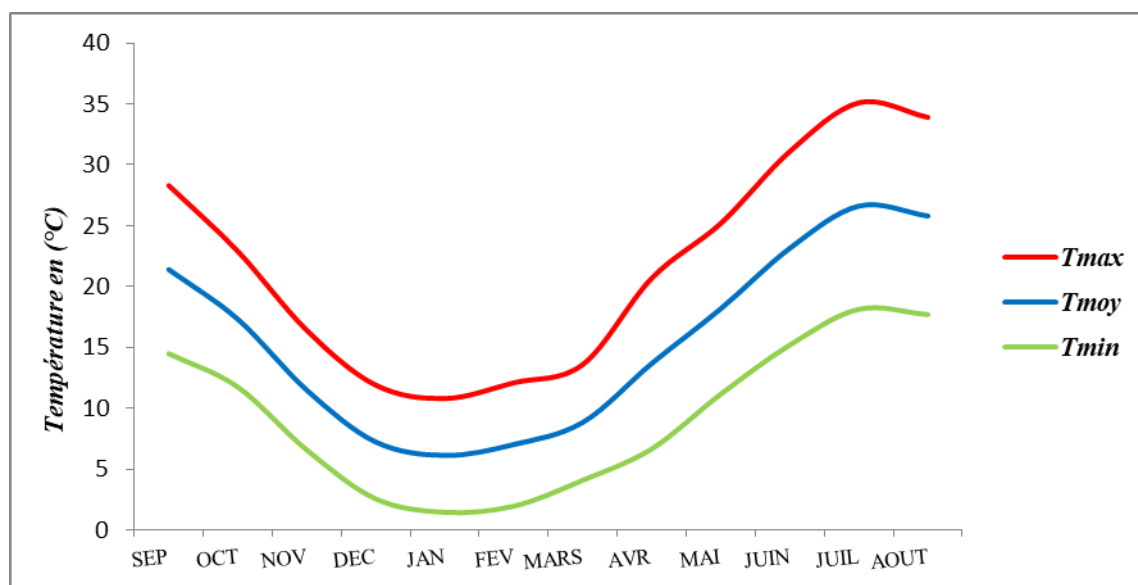
L'examen des séries de valeurs de température montre que la moyenne annuelle de ce paramètre est de l'ordre de  $15.78^{\circ}\text{C}$ . Janvier est le mois le plus froid ( $6.1^{\circ}\text{C}$ ) alors que Juillet est le mois le plus chaud ( $26.6^{\circ}\text{C}$ ). (cf. Tableau N°9).

**Tableau N° 09 : Valeurs de la température moyenne mensuelle (min & max). Bassin de Tébessa.**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
<i>Tmax</i>	28.3	22.9	16.4	11.9	10.8	12.1	13.6	20.7	25.2	31.1	35.1	33.9
<i>Tmoy</i>	21.4	17.3	11.5	7.2	6.1	7.0	8.8	13.7	18.2	23.1	26.6	25.8
<i>Tmin</i>	14.5	11.7	6.6	2.6	1.5	2.0	4.1	6.7	11.2	15.2	18.1	17.7

Il y a lieu de signaler qu'effectivement en hiver il fait plus frais, par contre en été la température se voit à la hausse (à l'échelle de notre région), lors du passage du vent du Sud.

Pour mieux visualiser la répartition de cette variabilité, nous avons procédé à la représentation graphique suivante (cf. Fig. 31).



**Fig. 32 : Variation des températures moyennes mensuelles. Bassin de Tébessa. Google Earth Engine (1981/82 – 2018/19).**

La carte de la figure ci-après (cf. fig. 32), confirme cette théorie de non stabilité des conditions qui règnent sur toute la région.

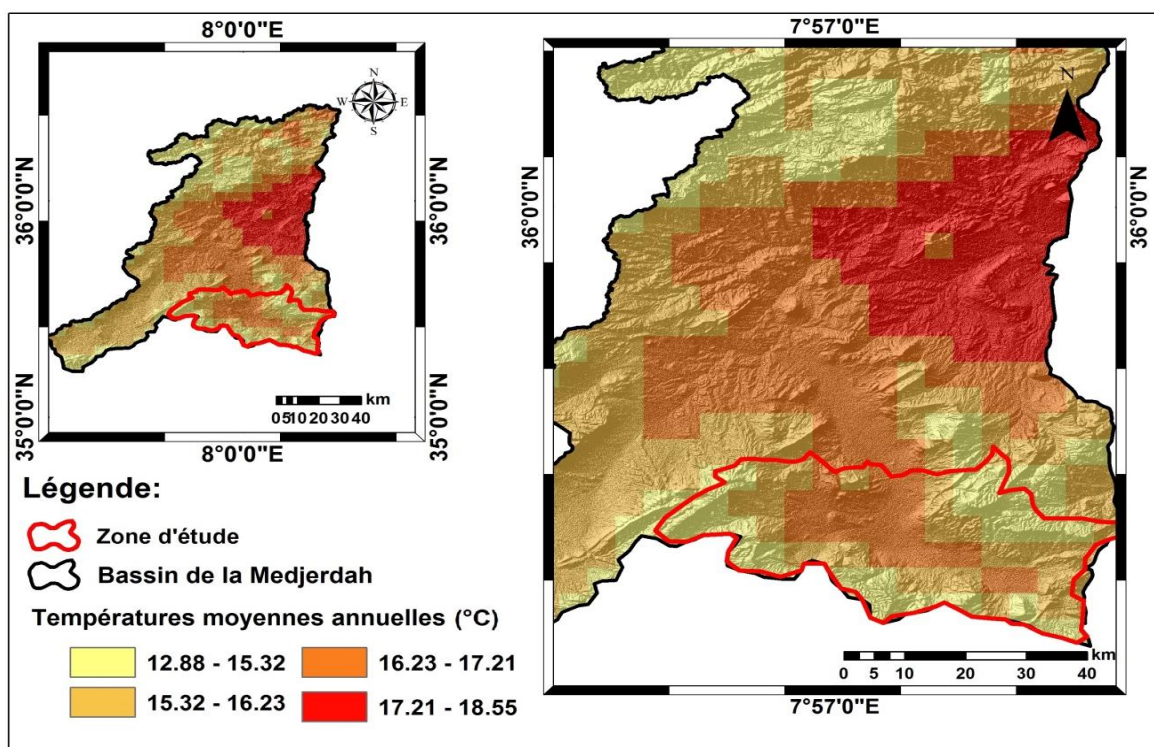


Fig. 33 : Répartition des températures moyennes annuelles. Bassin de Tébessa.  
Google Earth Engine (1981/82 – 2018/19).

### III – Les indices climatiques

#### III – 1 – L'indice d'aridité de E. DE MARTONE

DE Martonne avait établi un indice, en 1923, en fonction des températures et des précipitations (fig. 33), qui peut être facilement déterminé par la relation suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \text{ Avec :}$$

$P$  : précipitation annuelle moyenne (mm).

$T$  : température annuelle moyenne (°C).

Suivant les valeurs de (I) obtenues, DE. Martonne a établi la classification suivante :

- $I < 5$  : le climat est hyperaride ;
- $5 < I < 7.5$  : il est désertique ;
- $7.5 < I < 10$  : on parle de climat steppique ;
- $10 < I < 20$  : il est semi-aride ;
- $20 < I < 30$  : le climat est tempéré.

Tableau N° 10 : Indice d'aridité de E. DE Martone et type de climat. 1981/82 – 2018/19.

Paramètre Bassin	Précipitation (mm)	Température (°C)	Indice d'aridité	Observation
Tébessa	398.7	15.9	15.39	Climat semi-aride

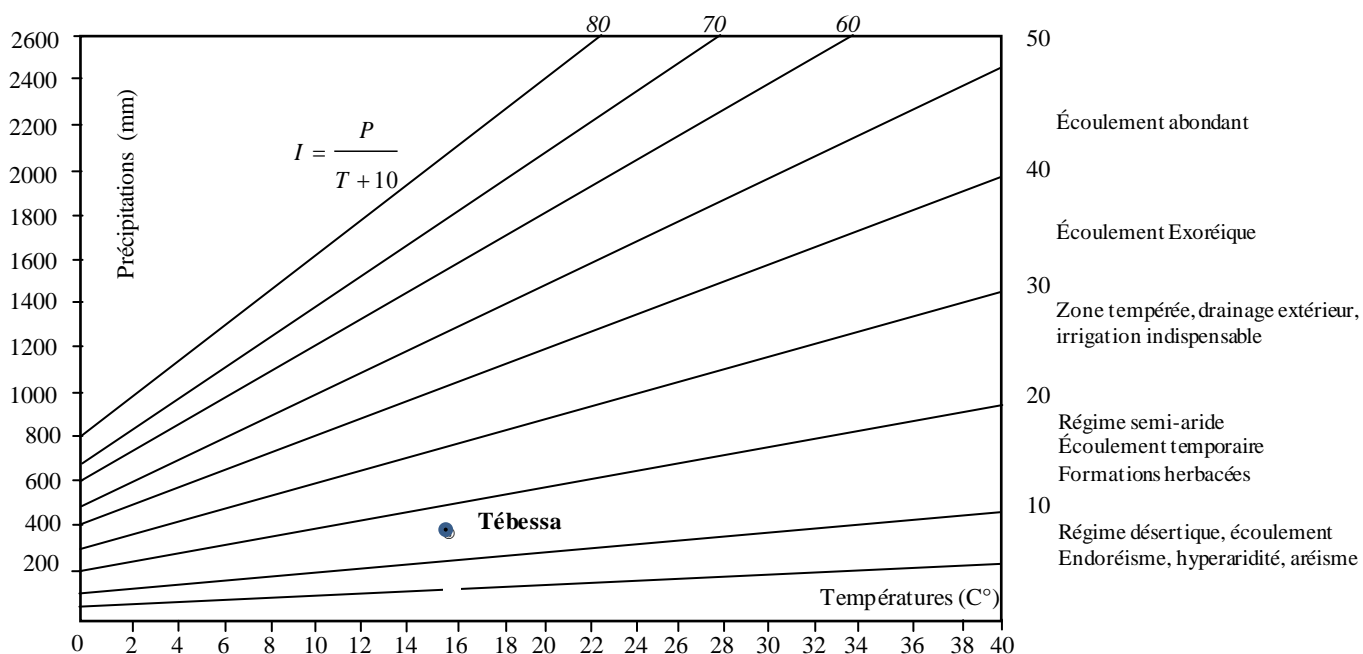


Fig. 34 : Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone, 1923.

D'après la valeur de (I), (13.91 à Tébessa), 15.39, ce graphique confirme que le climat annuel est bel et bien semi-aride.

### III – 2 – L'indice d'aridité mensuel

La détermination de cet indice se fait par l'utilisation des températures et des précipitations moyennes mensuelles selon l'expression suivante :

$$I = \frac{12P}{T + 10} \quad \text{Avec :}$$

P : Moyenne mensuelle des précipitations (mm) ;

T : Moyenne mensuelle des températures (°C).

Tableau N° 11 : Indice d'aridité mensuel. Bassin de Tébessa. 1981/82 – 2018/19.

Mois Station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Tébessa	16.81	14.54	20.37	25.33	26.98	20.26	27.00	20.76	17.40	07.58	5.05	7.84

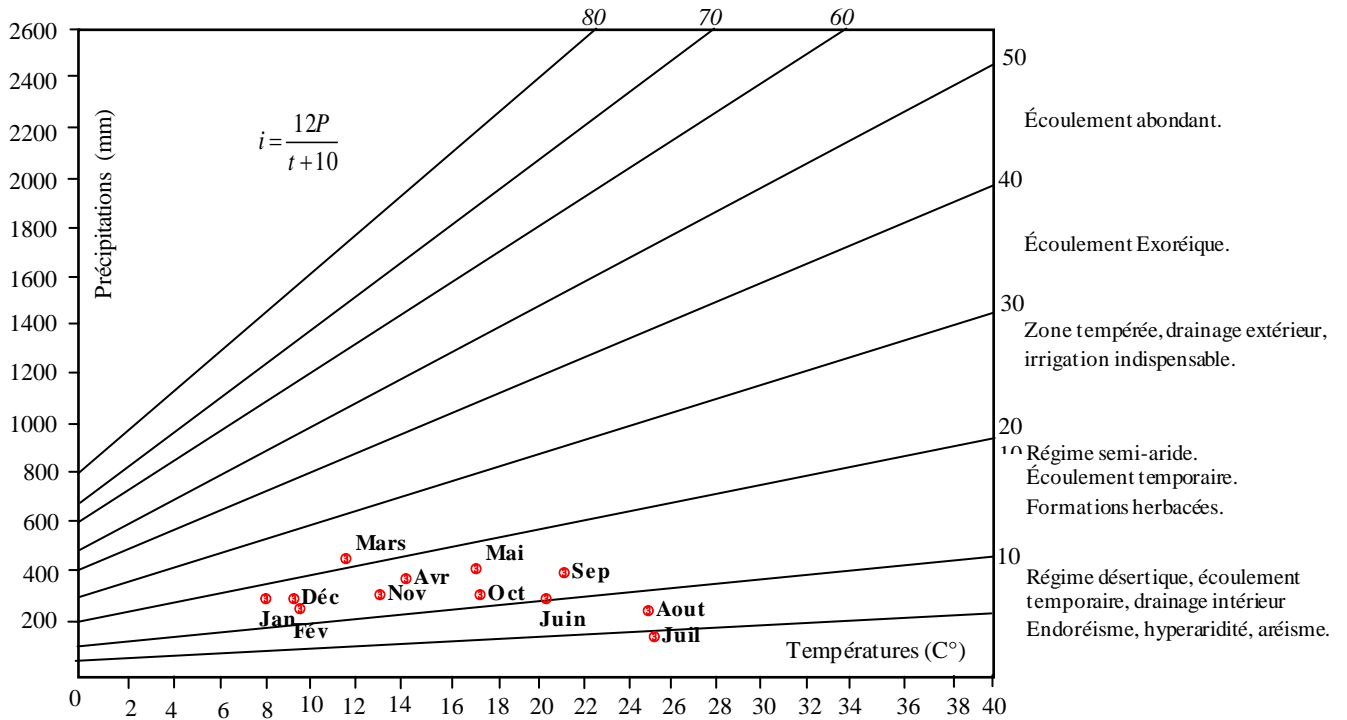


Fig. 35 : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de E. DE Martone PV. 1 923. Bassin de Tébessa.

IV – Diagramme pluviothermique

Selon F. Bagnouls et Goussen, un mois sec est celui dont le total moyen des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne ( $P \leq 2T$ ).

Le diagramme pluviothermique est établi en portant les températures en ordonnées, à une échelle double de celle des précipitations et les mois agricoles sont reportés en abscisse.

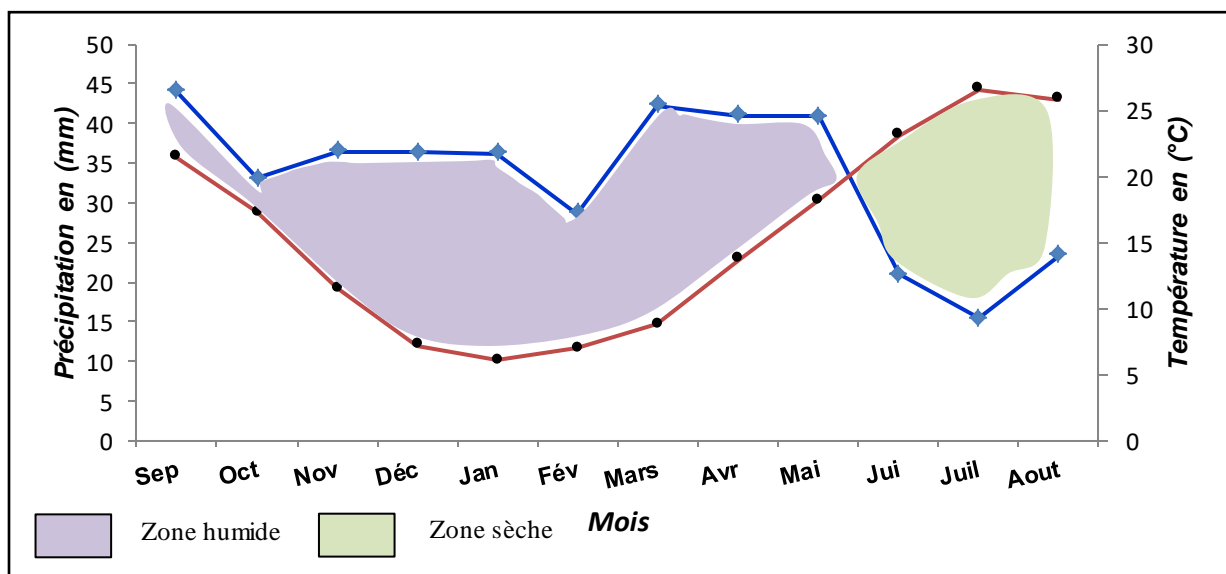


Fig. 36 : Diagramme pluviothermique. Bassin de Tébessa. 1981/82 – 2018/19.



Si on remarque sur le graphique que la courbe représentative des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la saison est dite humide. Elle est sèche dans le cas contraire. Les valeurs de températures et de précipitations utilisées pour l'établissement de ce diagramme sont prises pour une série d'observation homogène de 38 ans (1981/82 - 2018/19).

Le diagramme (Fig. 35) obtenu pour notre cas laisse dire que la saison humide débute au mois de Septembre et continue jusqu'à la fin du mois de Mai.

## V – Le bilan hydrique

Il traduit la suite des différentes phases du phénomène météorique aqueux (pluie, neige, grêle) atteignant le sol, avant leur retour vers l'atmosphère. L'estimation du bilan hydrologique peut se faire par l'application de la formule suivante (G. Castany 1982) :

$$P = ETR + R + I \equiv mm \quad \text{Où :}$$

$P$  : précipitations annuelles ( $mm$ ).                       $ETR$  : évapotranspiration réelle annuelle ( $mm$ ).

$R$  : ruissellement ( $mm$ ).                                       $I$  : infiltration ( $mm$ ).

### V – 1 – Étude de l'évapotranspiration

C'est un paramètre qui a son influence dans le cycle hydrique. IL est défini comme étant la somme de quantités d'eau ( $mm$ ) reprises de la surface du sol, quand se combinent les effets de l'évaporation et de la transpiration. Sa détermination est un peu difficile, puisque les facteurs dont il dépend (l'humidité, la température, l'insolation et le couvert végétal) sont interdépendants.

#### V – 1 – 1 – Estimation de l'évapotranspiration réelle ( $ETR$ )

C'est une fraction de l' $ETP$  qui dépend de l'état du stock en eau du sol. Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'évapotranspiration potentielle, si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la réserve facilement utilisable. En cas d'insuffisance, elles sont limitées à une quantité plus faible, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle (G. Castany).

Son évaluation se fait en utilisant soit la formule de *L. Turc* ou celle de *Coutagne*.

#### V – 1 – 1 – 1 – Formule de *Coutagne*

Le déficit d'écoulement calculé à partir de cette expression, qui fait aussi intervenir température et précipitation, peut être rapproché de l' $ETR$ .

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

Cette formule n'est applicable que lorsque  $0,125\lambda < P < 0,5\lambda$  et  $\lambda = \frac{1}{0,4T + 0,8}$

Où :

$D$  : Déficit d'écoulement ( $m/an$ ) ;

$P$  : Précipitation annuelle ( $m$ ),

$T$  : Température moyenne annuelle ( $^{\circ}C$ ).

**Tableau N° 12 : Applicabilité de la formule de Coutagne. Bassin de Tébessa.**

Paramètre Bassin	$\lambda$	$\lambda/8$	$\lambda/2$	$P$	$\lambda/8 < P < \lambda/2$	Observation
<i>Tébessa</i>	0.139	0.0173	0.0695	398.7	Non comprise	Méthode non applicable

Cette formule n'est donc pas applicable car la condition  $0,125\lambda < P < 0,5\lambda$  n'est pas satisfaite.

#### V – 1 – 1 – 2 – Formule de L. Turc

Cette expression permet de déterminer directement l'ETR annuelle d'un bassin versant à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \equiv mm \quad \text{Avec :}$$

$P$  : Précipitation moyenne annuelle ( $m$ ) ;

$T$  : Température moyenne annuelle ( $^{\circ}C$ ) ;

$L$  : Facteur qui tient compte des échanges de chaleur ( $L = 0,05T^3 + 25T + 300$ ).

**Tableau N° 13 : Estimation de l'ETR selon la méthode de L. Turc annuelle.**

Paramètre Bassin	Précipitation (mm)	Température ( $^{\circ}C$ )	$L$	ETR (mm)
<i>Tébessa</i>	398.7	15.9	898.48	380.80

#### V – 1 – 1 – 3 – Méthode de Wundt

La valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement ( $De$ ) est déduite d'un abaque (fig.36), dans lequel on tient compte de la température et de la précipitation annuelles.

Le report du point représentant le bassin de Tébessa, en fonction des données (température, précipitation), sur l'abaque montre que la valeur de l'ETR déduite de cette dernière, est de l'ordre de  $380,80mm$ . Ce qui équivaut presque les 100% des précipitations voire plus. Le quotient d'écoulement ne dépasse pas les 10%.

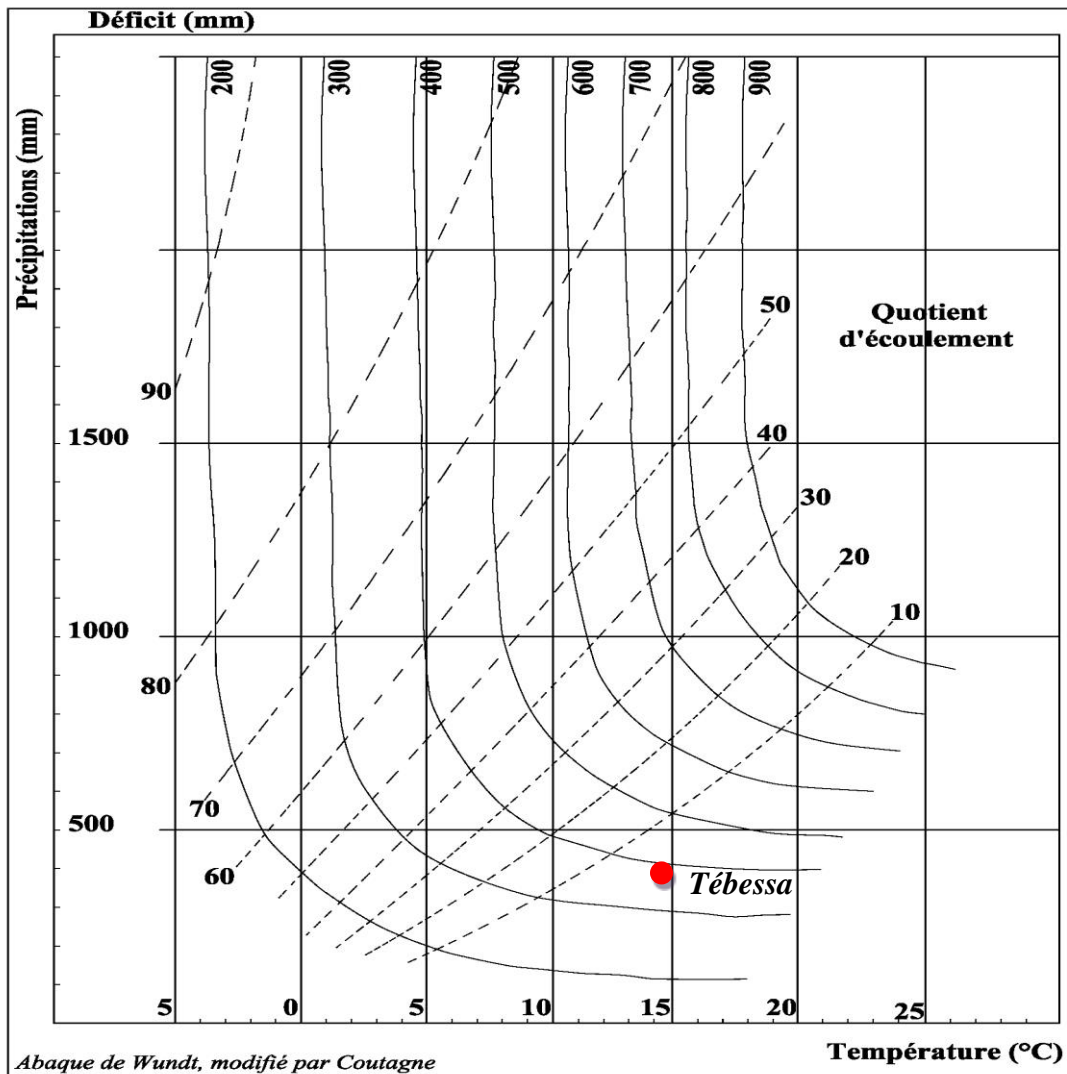


Fig. 37 : Abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE.

V – 1 – 2 – Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

V – 1 – 2 – 1 – Formule de C.W. Thornthwaite

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle, non corrigée, est rendu possible par l'application de la formule de C.W. Thornthwaite qui tient compte des températures moyennes mensuelles et de l'indice thermique. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left( \frac{10T}{I} \right)^a \equiv mm \quad \text{Avec} \quad I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{et} \quad i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} .$$

L'exposant (a) est donné par l'expression de Serra, après simplification de la longue formule de C.W. Thornthwaite :  $a = \frac{1.6}{100} \cdot I + 0.5$  Où :

*ETP* : évapotranspiration potentielle du mois considéré (*mm*). *i* : indice thermique mensuel.

*T* : température moyenne mensuelle du mois considéré ( $^{\circ}C$ ), *I* : indice thermique annuel.

L'évapotranspiration potentielle corrigée peut être déterminée en faisant intervenir un coefficient correctif (*k*) qui dépend de la latitude, selon l'expression suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left( \frac{10T}{I} \right)^a \cdot k \equiv mm \text{ Avec :}$$

*K* : Coefficient de correction (ou d'ajustement mensuel).

Les résultats de calcul sont récapitulés dans les tableaux suivants (Tab 14).

**Tableau N° 14 : Résultats de calcul de l'ETP selon la formule de C. W. Thornthwaite.**

Mois Paramètre	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
<i>I</i>	9.03	6.56	3.52	1.75	1.36	1.67	2.37	4.59	7.06	10.18	12.57	11.99
<i>ETPnc</i>	96.08	67.65	34.20	15.87	12.05	15.14	22.18	45.76	73.35	109.49	138.06	131.09
<i>K</i>	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16
<i>ETPc</i>	98.96	65.62	29.42	12.85	10.49	12.87	22.84	50.34	88.75	133.57	171.19	152.06

Pour notre bassin, nous avons obtenu une valeur totale de l'ETP de 848.96mm/an.

#### V – 1 – 2 – 2 – Formule de L. Turc

Cette expression permet d'estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, considérant la durée réelle d'insolation ainsi que l'humidité relative de l'air, par :

$$ETP_{mois} = 0.40 \frac{T}{T+15} (I_g + 50) \equiv mm \text{ Avec :}$$

*T* : température moyenne mensuelle du mois considéré à l'abri ( $^{\circ}C$ ).

*I<sub>g</sub>* : radiation globale moyenne du mois considéré reçue au sol ( $cal/cm^2/j$ ).

Si l'humidité de l'air durant le mois considéré est inférieure à 50%, on fait appel à un terme correctif (*k*) qui sera ensuite multiplié par l'ETP du mois. Ce terme est défini par :

$$K = 1 + \frac{(50 - h_r)}{70} \quad \text{Où :}$$

*h<sub>r</sub>* : est l'humidité relative de l'air.

Si la radiation globale (*I<sub>g</sub>*) n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation (*h*) par la formule :

$$I_g = I_g A (0.18 + 0.62 \frac{h}{H}). \text{ Avec :}$$

$I_gA$  : radiation globale théorique en ( $cal/cm^2/j$ ).

H : durée théorique des jours du mois.

**Tableau N° 15 : Résultats de calcul de l'ETP par la méthode de L. Turc.**

Mois Paramètre	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
T (°C)	21.40	17.32	11.48	7.23	6.13	7.03	8.85	13.69	18.18	23.15	26.62	25.80
$I_g(cal/cm^2/j)$	576	393	248	215	255	320	490	625	777	820	880	780
$h_r(\%)$	57.04	62.98	69.72	72.62	72.33	68.36	66.38	61.93	56.20	49.17	41.52	45.12
ETP (mm)	147.20	94.96	51.69	34.48	35.38	47.22	80.13	128.82	181.27	211.16	237.92	209.94
ETP totale (mm)	<b>1460.18</b>											

### V – 1 – 2 – 3 – Discussion des résultats

L'estimation de l'ETR par diverses méthodes montre que les valeurs sont voisines. Par contre pour l'ETP, une large différence marque les valeurs, ce qui peut être imputable à certains paramètres spécifiques à la méthode de calcul.

**Tableau N° 16 : Valeurs de l'ETP et de l'ETR et méthodes d'estimation. Bassin de Tébessa.**

Paramètre	Méthode de détermination	Tébessa
ETP (mm)	L. Turc	1460.18
	C. W. Thornthwaite	848.16
ETR (mm)	L. Turc	380.80
	Wunndt	385.40
	Coutagne	Non applicable.

### V – 2 – Estimation de la réserve facilement utilisable

C'est la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, dont le degré de saturation est fonction de plusieurs facteurs :

- ✓ La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle ;
- ✓ La profondeur du niveau piézométrique de la nappe d'eau de l'aquifère ;
- ✓ Le couvert végétal ;
- ✓ Le climat de la région.

Tenant compte de tous ces paramètres, J. Richard a estimé la RFU, lors d'une étude qui s'est rapportée à la plaine de Tébessa, entre 25 et 26mm.

Une autre étude agropédologique effectuée par le cabinet le *Petit*, en 1966/67, sur la région, considère que la *RFU* varie entre 23mm et 35mm.

### V- 3 – Bilan d'eau par la méthode de C. W. Thornthwaite

Pour établir le bilan mensuel, par la méthode de C.W. Thornthwaite, on fait intervenir l'évapotranspiration moyenne (réelle et potentielle). Il s'articule sur l'hypothèse suivant :

- ✓ La satisfaction de l'*ETR* est prioritaire sur l'écoulement.
- ✓ Le calcul de l'*ETR* peut se faire selon deux cas :
  - Si  $P > ETP$ , alors  $ETR = ETP$ , il y a donc un excédent ;
  - Si  $P < ETP$ , alors  $ETR = P + RFU$ .

Les paramètres du bilan sont les suivants :

$T^\circ$  : température mensuelle ( $^\circ\text{C}$ ).

$Pr$  : précipitation mensuelle (mm).

$i$  : indice thermique.

$RFU$  : réserve facilement utilisable (mm).

$ETR$  : évapotranspiration réelle (mm).

$K$  : coefficient de latitude.

$ETP$  : évapotranspiration potentielle (mm).

$Def$  : déficit agricole (mm).

$BE$  : bilan d'eau.

$EXC$  : excédent (mm).

Pour effectuer une quelconque vérification, on utilise l'une des expressions suivantes :

$$P = \sum ETR + \sum Exc \equiv mm. \text{ A.N : } P = 336.2 + 62.5 = 398.7mm.$$

$$ETP = \sum ETR + \sum Def \equiv mm. \text{ A.N : } ETP = 336.2 + 536.7 = 851,3mm.$$

**Tableau N° 17 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite, 1981/82 – 2018/19.**

Mois \ Paramètre	$T_p$	$IT$	$CL$	$ETP_c$	$Pr$	$BH$	$RFU$	$ETR$	$Def$	$Exc$
Sep	21.4	9.0	1.03	99.2	44	- 55.2	0.0	44.0	55.2	0.0
Oct	17.3	6.6	0.97	65.8	33.1	- 32.7	0.0	33.1	32.7	0.0
Nov	11.5	3.5	0.86	29.5	36.5	7.0	7.0	29.5	0.0	0.0
Déc	7.2	1.7	0.81	12.9	36.3	23.4	29.0	12.9	0.0	1.5
Jan	6.1	1.4	0.87	10.5	36.2	25.7	29.0	10.5	0.0	25.7
Fév	7.0	1.7	0.85	12.9	28.7	15.8	29.0	12.9	0.0	15.8
Mars	8.8	2.4	1.03	22.9	42.3	19.4	29.0	22.9	0.0	19.4
Avr	13.7	4.6	1.10	50.4	41	- 9.4	19.6	50.4	0.0	0.0
Mai	18.2	7.1	1.21	89.0	40.9	- 48.1	0.0	60.5	28.5	0.0
Juin	23.1	10.2	1.22	134.0	20.9	- 113.1	0.0	20.9	113.1	0.0
Juill	26.6	12.6	1.24	171.8	15.4	- 156.4	0.0	15.4	156.4	0.0
Août	25.8	12.0	1.16	152.6	23.4	- 129.2	0.0	23.4	129.2	0.0
Annuel	<b>15.6</b>	<b>72.7</b>		<b>851.3</b>	<b>398.7</b>	<b>- 452.6</b>		<b>336.2</b>	<b>515.1</b>	<b>62.5</b>

#### V – 4 – Interprétation du bilan hydrologique

L'examen du bilan hydrique, établi selon la méthode de *C.W. Thornthwaite*, après utilisation des données extraites de la plate – forme Google Earth Engine, nous aide à voir comment se manifestent les différents paramètres hydrologiques.

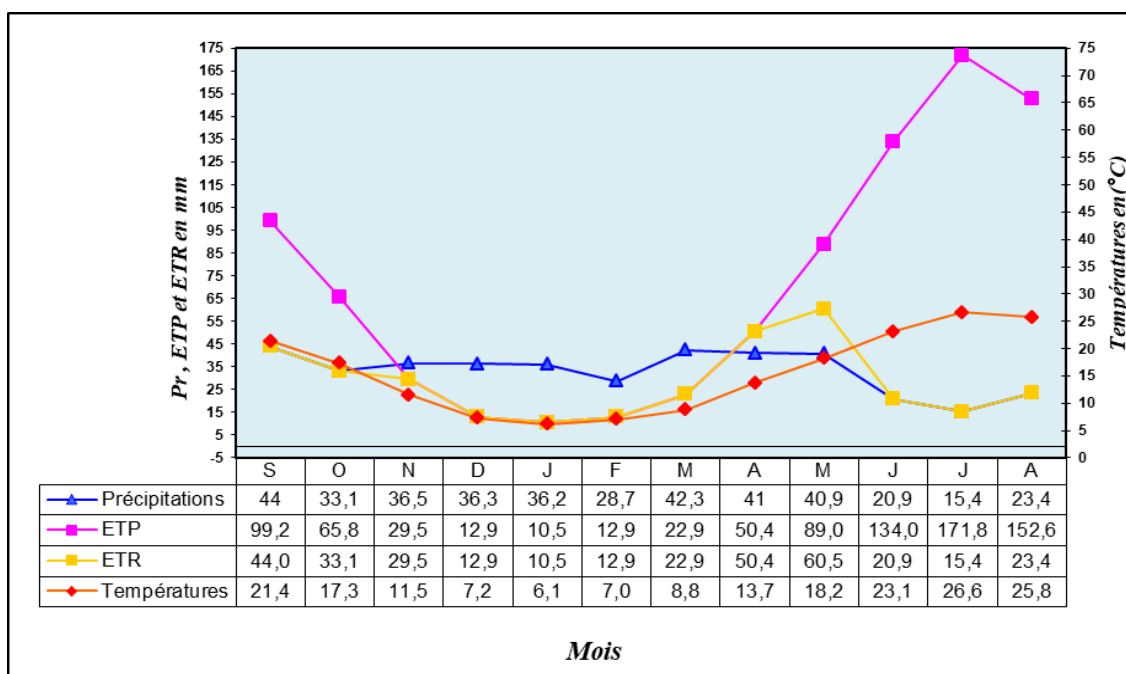


Fig. 38.a : Représentation graphique du bilan hydrique selon la méthode de *C.W. Thornthwaite* (1981/82 – 2018/19).

Il est à signaler que la hauteur d'eau précipitée atteint son maximum au mois de Septembre ( $44mm$ ) suite aux pluies torrentielles, tandis que l'évapotranspiration est plus faible au mois de janvier ( $10.5mm$ ), plus élevée au mois de Mai et sensiblement égale aux précipitations pour le mois de Septembre ( $44mm$ ).

La reconstitution du stock débute de Novembre à Décembre, elle atteint son maximum entre Décembre, Janvier, Février et Mars où la *RFU* sera satisfaite ( $29mm$ ), et continue jusqu'au début du mois d'Avril, l'épuisement du stock se fait sentir. À partir du mois de Mai, on assiste à une période de sécheresse qui se traduit par un déficit agricole qui s'étale sur six mois (Mai – Octobre).

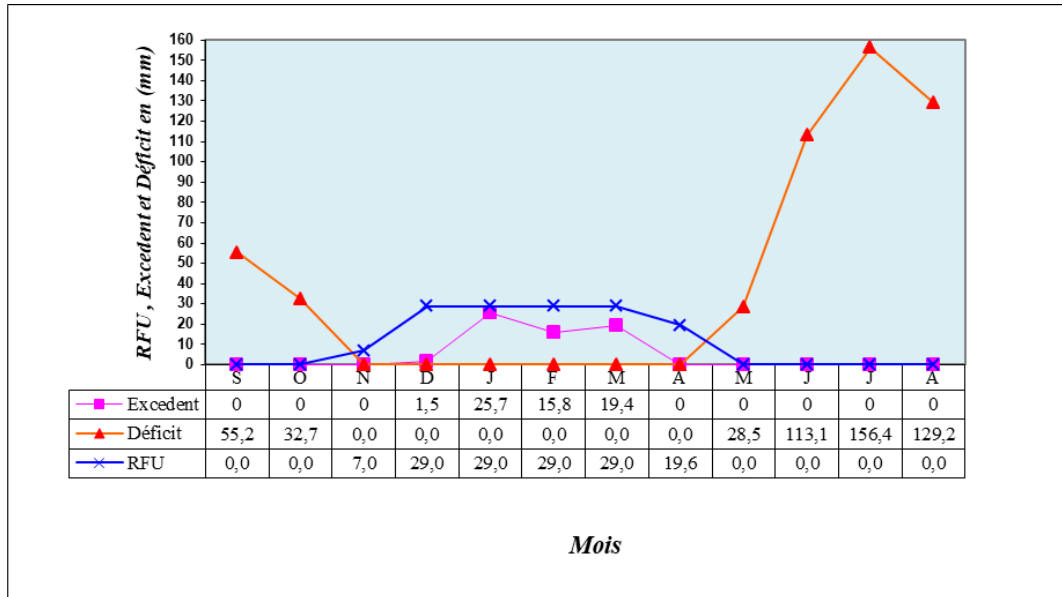


Fig. 38.b : Représentation graphique du bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwait (1981/82 – 2018/19).

V – 5 – Répartition des précipitations

V – 5 – 1 – Le ruissellement

La formule empirique de Tixeront-Berkaloff, ci-après, qui s’appliquerait le plus souvent aux bassins hydrologiques en climat semi-aride à aride, s’appuyant sur la théorie suivante :

- ✓ Si les précipitations sont vues à la hausse, le ruissellement lui, tend à une grandeur qui leur soit analogue (déduction faite de l’ETP plafonnée à la valeur de l’ETP) ;
- ✓ Si les précipitations tendent à s’anéantir, le ruissellement se réduit à néant et le rapport ruissellement/pluviométrie tend par conséquent vers zéro.

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \equiv m \quad \text{Si } P < 600mm.$$

Cette expression est modifiée par Romantchok (1 974).

$$R = \frac{P^3}{3} \equiv m \quad \text{Si } P > 600mm. \quad \text{Avec :}$$

R : ruissellement (m).

ETP : évaporation potentielle (m), moyenne à l’échelle du bassin.

P : précipitation moyenne annuelle (m), prise comme lame d’eau moyenne reçue à l’échelle du bassin.



Tableau N° 18 : Estimation du ruissellement selon la méthode de Tixeront-Berkaloff.

<i>Paramètre</i> <i>Bassin</i>	<i>Précipitation (mm)</i>	<i>ETP (mm)</i>	<i>R (mm)</i>
<i>Tébessa</i>	398.7	851.3	29.15

Une moyenne de 29.15mm de ruissellement à travers le bassin versant est à estimer.

### V – 5 – 2 – L'infiltration

On est appelé d'avoir recours à l'équation générale du bilan qui permettrait d'avoir d'admissibles approches du paramètre, puisque tous les composants de l'équation sont connus.

$$P = ETR + R + I. \text{ D'où } I = P - ETR - R. \text{ Avec :}$$

*I* : infiltration efficace moyenne annuelle (mm).

*P* : précipitation moyenne annuelle (mm).

*ETR* : évapotranspiration réelle annuelle (mm).

*R* : ruissellement annuel (mm).

Tableau N° 19 : Estimation de l'infiltration dans le bassin de Tébessa.

<i>Paramètre</i> <i>Bassin</i>	<i>Précipitation</i>		<i>Évapotranspiration</i>		<i>Ruissellement</i>		<i>Infiltration</i>	
	<i>P (mm)</i>	<i>P %</i>	<i>ETR (mm)</i>	<i>ETR %</i>	<i>R (mm)</i>	<i>R %</i>	<i>I (mm)</i>	<i>I %</i>
<i>Tébessa</i>	398.7	100	336.2	84.32	29.15	7.31	33.35	8.36

Si on se réfère aux résultats, on doit dire que la moyenne de l'infiltration à travers le bassin, qui est 8.36% de la moyenne annuelle des précipitations, reste faible par rapport aux fractions d'eau reprises par le phénomène d'évapotranspiration. Cet état doit, sans doute, avoir un effet négatif sur la reconstitution des réserves et l'alimentation du système aquifère.

### Conclusion

À travers cette étude, nous pouvons dire que notre région se caractérise par un climat semi-aride typique des hautes plaines, qui sont en général, le fief des étés chauds et des hivers très froids.

Les effets du sirocco sont possibles en toute saison, mais très fréquents en périodes estivales. L'impact du gel est plus grave encore.

La pluviométrie, quant à elle, d'une répartition spatio-temporelle non uniforme, est très souvent marquée par sa violence. Les moyennes annuelles des précipitations sont de l'ordre de  $398.7\text{mm/an}$  et celles des températures sont d'environ  $15.6^{\circ}\text{C}$ .

Le bilan d'eau dans son ensemble est déficitaire ; avec une *ETR* moyenne de  $336.2\text{mm/an}$  ce qui équivaut presque les  $84.32\%$  des précipitations, un ruissellement faible, environ  $7.31\%$  du total des précipitations. Ainsi que l'infiltration qui est de l'ordre de  $8.36\%$ , ce qui laisse penser que l'alimentation du système aquifère n'est pas forcément tributaire de l'infiltration, mais se fait beaucoup plus des bordures calcaires.

*CARACTÉRISTIQUES  
HYDROGÉOLOGIQUES*

## Introduction

Une bonne connaissance des systèmes aquifères nécessite des outils de base dont l'hydrogéologie qui accorde un intérêt bien particulier aux nappes d'eau souterraines. Une idée détaillée sur la géométrie, la structure et la configuration de ces complexes s'avère d'une très grande utilité.

Certains moyens et méthodes se voient indispensables pour mieux comprendre leur comportement, particulièrement le volet hydrodynamique (les conditions aux limites, la perméabilité, la transmissivité, le sens d'écoulement, diverses relations possibles existant entre ces systèmes, la fonction capacitive du réservoir, la répartition spatiale des charges et des potentialités hydrauliques ...etc.) et ce, pour l'établissement de programmes d'exploitation et de gestion de la ressource utilisable, à court, à moyen et à long terme.

Les études ont montré que les différentes sollicitations des diverses catégories d'utilisateurs provoquent la perturbation du régime naturel de ces systèmes. Pour faire une perspective sur la nappe alluviale de *Tébessa*, on tentera, à travers ce chapitre, une interprétation des données récoltées (estimées nécessaires) et d'évoquer les principaux types de résultats obtenus.

### I – Structure du système

Dans le présent travail, notre intérêt est concentré sur la nappe alluviale, cependant nous avons estimé qu'il est quand même utile d'apporter quelques éclaircissements sur les différents niveaux aquifères à travers la région. Il s'est avéré, selon l'étude de sa structure géologique et hydrogéologique, que le système aquifère, à travers la région de *Tébessa*, est un peu compliqué. Parmi ceux qu'on a pu identifier, seuls deux horizons méritent de les décrire :

- ✓ L'un rencontré dans les formations calcaires, se localise beaucoup plus aux bordures, tandis qu'au centre, les forages ne l'ont pas, probablement, encore atteint ;
- ✓ Le second, contenu dans les formations alluviales (argiles remaniées, cailloutis, sables ...etc.).

#### I – 1 – La nappe alluviale et le milieu poreux

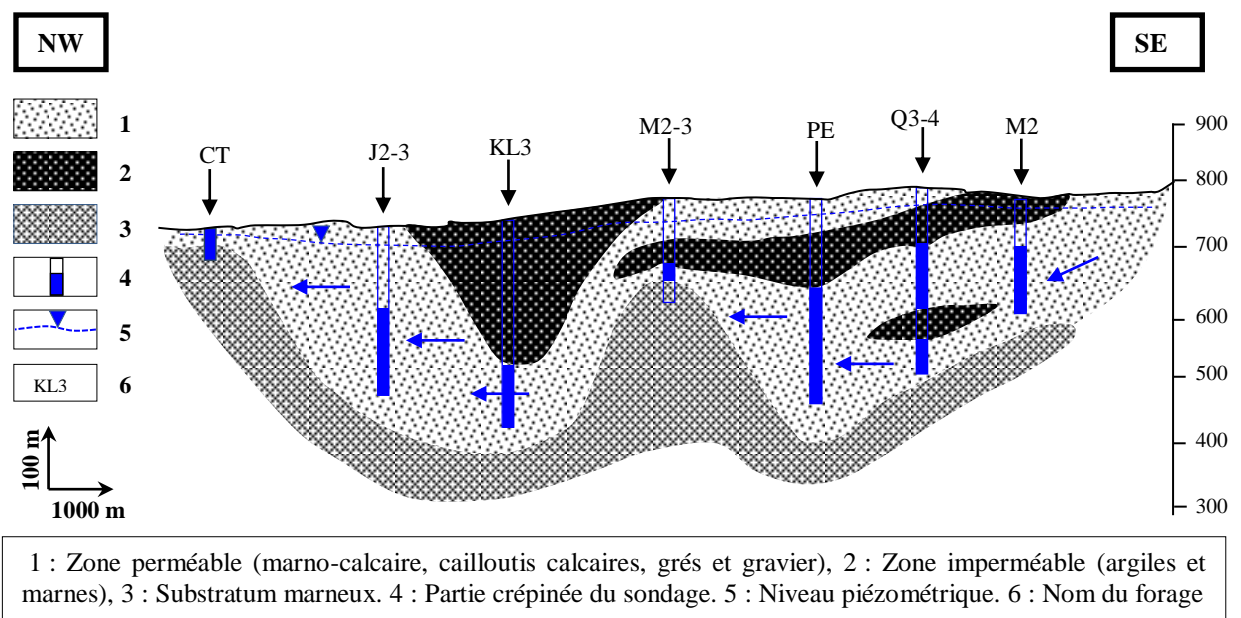
Le bassin d'effondrement *Tébessa – Morsott*, qui est composé essentiellement de matériaux de remplissage mi – plio – quaternaire, occupe la quasi – totalité de la plaine et forme de ce fait un milieu favorable pour le piégeage et le stockage des eaux provenant soit directement de l'infiltration ou des systèmes limitrophes.

L'ensemble des travaux qu'on a menés montrent que la résistivité est un peu variable. Elle croît, de valeurs ne dépassant pas les  $20\Omega m$  au centre (à cause du taux de salinité relativement élevé et de la taille réduite des sédiments), pour atteindre des chiffres oscillant de  $20$  à  $100\Omega m$  (atteignant parfois les  $200\Omega m$ ) aux bordures.

La série détritique de ce milieu se distingue, d'un fossé à l'autre, par la complexité de son hydrogéologie, se matérialisant par ce qui suit :

- ✓ Le grano – classement latéral ;
- ✓ Le type de matériaux de remplissage dominant (quaternaire, miocène ou pliocène) ;
- ✓ Les formations qui bordent le fossé (calcaire éocène, maestrichtien, turonien ou Trias) ;
- ✓ La grande variation de la profondeur du substratum.

Ceci n'a jamais été un handicap pour les autorités en le choisissant et le privilégiant pour l'implantation d'un grand nombre d'ouvrages de captage, vu l'importance de son réservoir.



**Fig. 39 : Coupe hydrogéologique à travers la plaine d'Aïn Chabro. In Rouabhia et al. 2009.**

## I – 2 – La nappe des calcaires et le milieu fissuré

Le milieu fissuré se compose particulièrement de formations calcaires (du turonien, du maestrichtien et de l'éocène). Celles de l'éocène peuvent être rencontrées sur de faibles profondeurs, particulièrement aux bordures. En revanche au centre, ces calcaires sont loin d'être atteints par l'ensemble des forages à cause de la profondeur de ce niveau (estimée de  $500m$  –  $2000m$  selon M. ZERDAZI).

Ce milieu se distingue par un potentiel hydraulique non négligeable qui se fait sentir à travers le jaillissement de plusieurs sources tout au long de ces formations, à l'image de celle d'*Ain Kissa* (au Nord – est), celle de *Bouakous* (au Sud – ouest) et celle de *Gaâgaâ* à l'Ouest.

Le F9 est l'un des deux ouvrages implantés à *Boulhef*. Ils exploitent les calcaires du maestrichtien du *Dyr*. Une étude géophysique (faite par M. *KACHI. S*) montre que ces forages atteignent une profondeur de *150m* et lors des essais à l'air lift, ils ont fourni un débit de *60l/s* causant un rabattement de *0,4m*, le niveau s'est ensuite stabilisé à *26m*.

## II – Potentialité de l'aquifère

Il faut signaler que les eaux de surface sont rares, donc la majorité du volume d'eau, à l'échelle du bassin de *Tébessa*, est extraite des systèmes aquifères et elle est devenue la source privilégiée d'approvisionnement en eau des diverses catégories d'usagers.

Il est évident que la nappe alluviale forme le patrimoine hydrique de la région, sur lequel toutes les politiques de gestion et défis sont basés. En plus des précipitations atmosphériques qu'encaisse son impluvium, l'alimentation du système se fait du *Nord* comme du *Sud*, via les formations calcaires crétacés des bordures.

Pour répondre au mieux à la demande des divers secteurs, l'exploitation des forages implantés à travers la plaine constitue un grand pourcentage de la ressource mobilisable.

### II – 1 – Les forages étatiques

Une batterie de forage composée de cent onze (*111*) ouvrages dont dix-sept (*17*) à *Bekkaria*, trente et un (*31*) à *Tébessa* et vingt-trois (*23*) à *Hammamet*. Le débit pompé varie de quatre *4* à *45l/s*, avec une fréquence de pompage de *30j* par mois et une durée de *08* à *24/24h*.

### II – 2 – Les puits et les forages non étatiques

Les services de la direction des ressources en eau (*DRE*, ex *DHW*) ont, en collaboration des services de la direction des services agricoles (*DSA*), attribué aux agriculteurs de la région plusieurs permis de réalisation de forages et ce, depuis l'adoption du programme du plan national de développement agricole (*PNDA*). Environ quatre cent soixante-dix (*470*) sont répartis sur l'ensemble de la plaine.

## III – L'étude de la piézométrie

L'étude et la cartographie piézométrique trouvent leur importance notamment dans la connaissance de la morphologie des systèmes aquifères, de leur comportement hydraulique, hydrodynamique ainsi que de leurs conditions aux limites ...etc.

Pour pouvoir identifier le sens d'écoulement des eaux souterraines, connaître l'origine d'alimentation des nappes d'eau, déceler un quelconque lien possible entre diverses unités ainsi que l'évolution temporelle de la surface piézométrique, cette représentation cartographique s'avère un outil indispensable.

### III – 1 – Inventaire des points d'eau

Le nombre d'ouvrage de captage (puits et forages) implantés à l'échelle du bassin de *Tébessa* est considérable. Certains d'entre eux sont étatiques (à usage lucratif) les autres sont illicites.

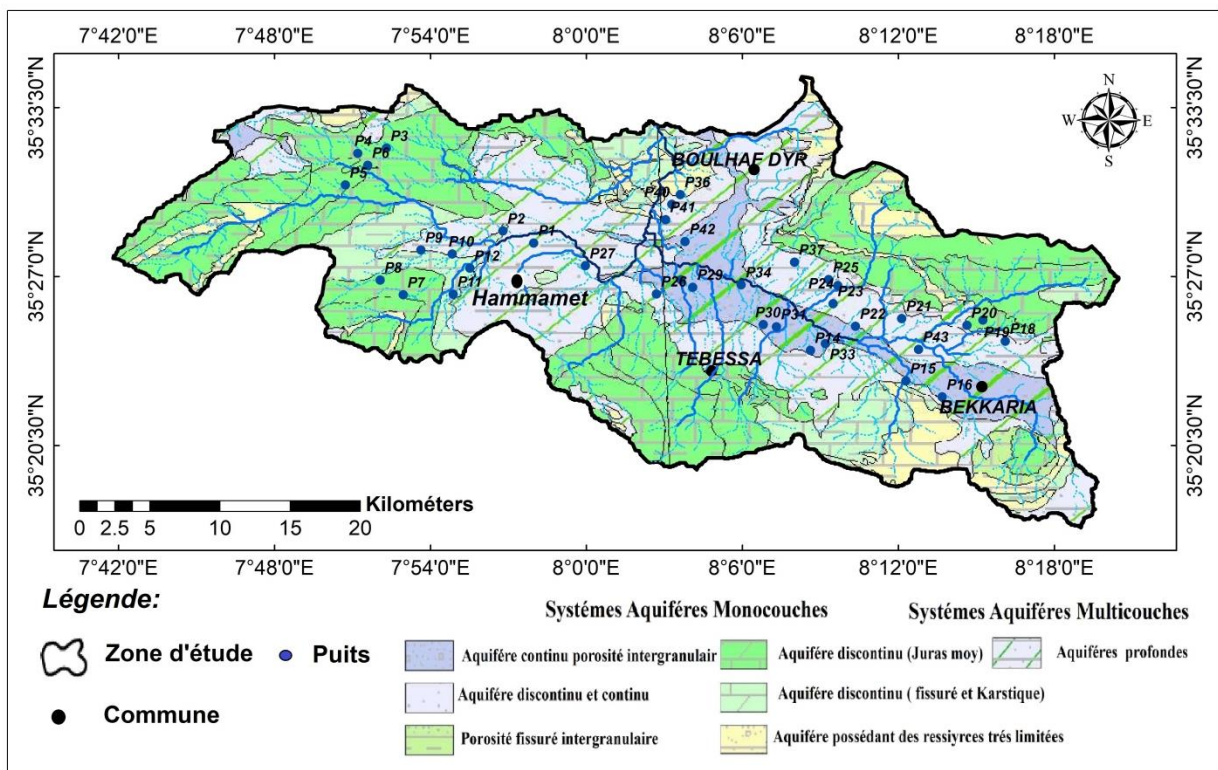


Fig. 40 : Carte d'inventaires des puits. Plaine de Tébessa.

Les plus récents sont réalisés à l'aide d'appareils modernes et sont donc plus profonds, complets et captent la nappe alluviale tandis que les plus anciens sont exécutés d'une manière traditionnelle et anarchique et donc à moindre profit.

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressés aux seuls ouvrages qui captent la nappe alluviale. Nous avons recensé plus de cent vingt-cinq (125) puits, cinquante-cinq (55) forages et cinq (05) piézomètres, lors d'une campagne menée en *Mai 2020*.

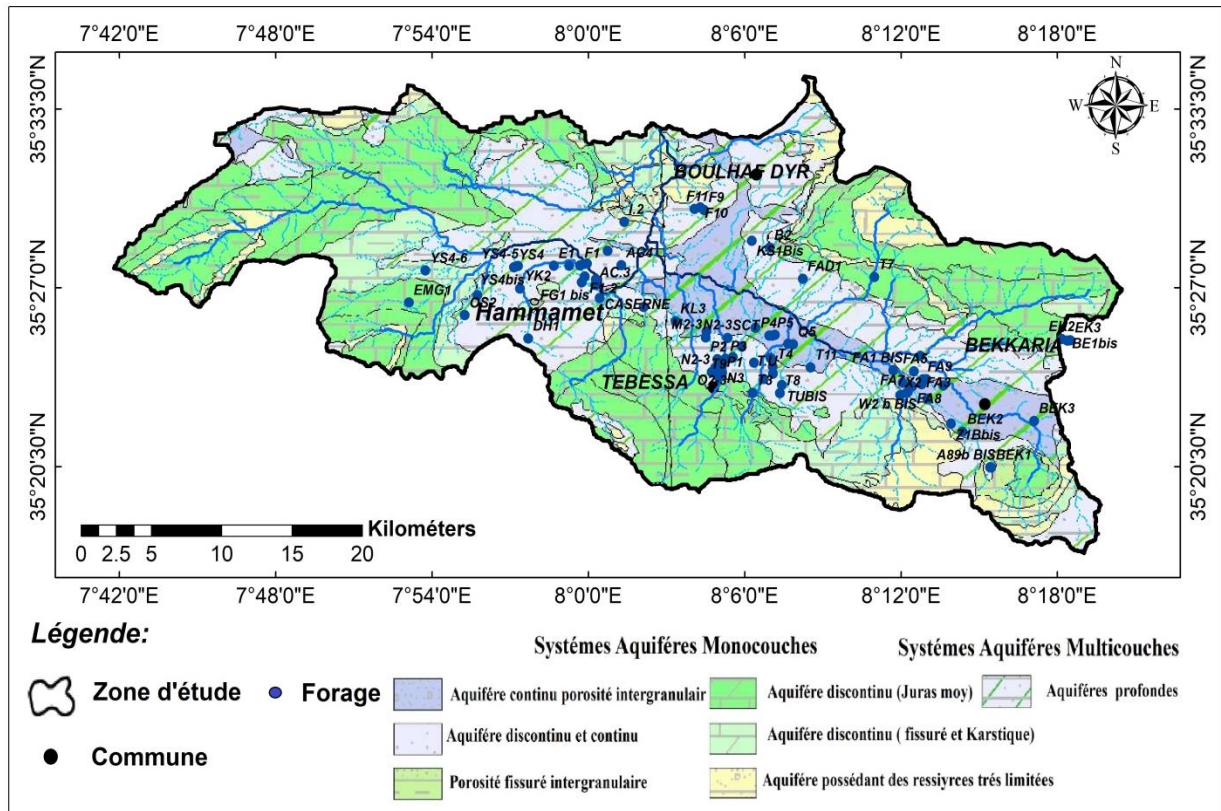


Fig. 41 : Carte d'inventaires des forages. Plaine de Tébessa.

### III – 2 – Le suivi de la piézométrie

Dans l'intention d'atteindre l'objectif, préalablement visé, nous avons effectué une campagne de mesure piézométrique (en *Mai 2020*), sur l'ensemble des ouvrages accessibles, implantés à travers la plaine, que nous avons estimés représentatifs, où nous nous sommes servis de deux sondes piézométriques (de *100* et *200m*).

Nous avons ensuite procédé à la comparaison des valeurs ainsi enregistrées avec celles de la campagne réalisée par les services de l'*ANRH* en *1994*, avec une confrontation cartographique. Les données ainsi obtenues sont utilisées pour le tracé des cartes piézométriques, qu'on a réalisé via l'outil informatique par l'utilisation du logiciel *Golden software 2014* (*Surfer 12*).



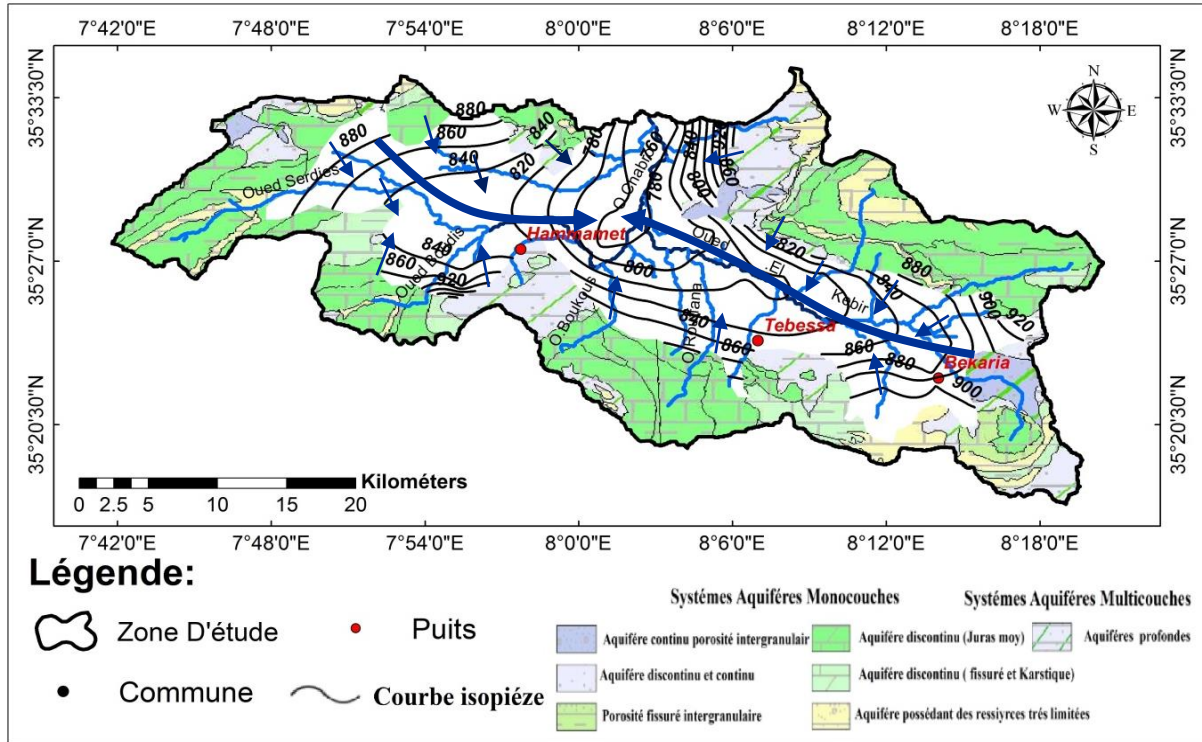


Fig. 42 : Carte piézométrique. (ANRH, Juin 1994. Plaine de Tébessa.

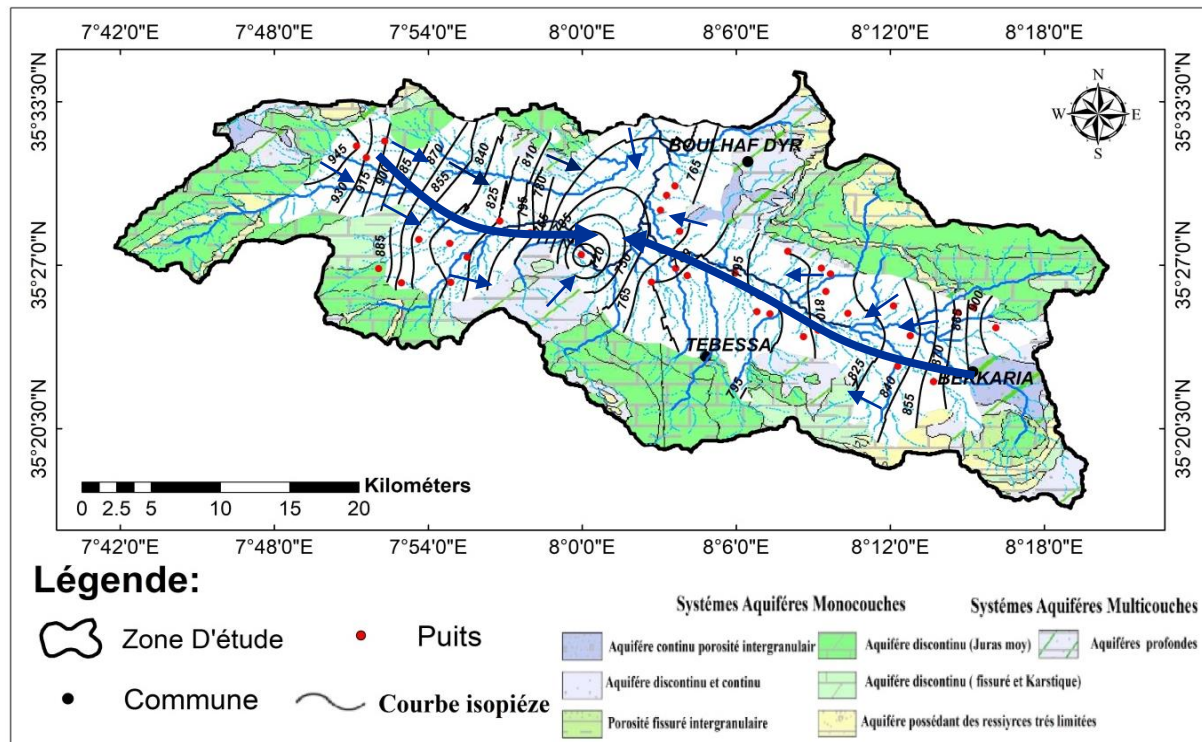


Fig. 43 : Carte piézométrique. Par djebassi.t, Mai 2020. Plaine de

Après observation de ces deux représentations cartographiques (1994 et 2020), nous avons pu constater que la morphologie de la surface piézométrique a subi un changement notable, durant ces deux décennies (1994 ÷ 2020).

- ✓ Les eaux souterraines venant de la région de *Bekkaria* (Nord – est, Est et Sud – est) prennent une direction dominante Est – Ouest, pour se diriger vers le centre. Celles venant de *Tébessa*, se dirigent du Sud et du Nord vers l’axe de la plaine et rejoignent les eaux venant de *Bekkaria*. Les eaux venant de la région de *Hammamet* prennent, en revanche, une direction opposée (Ouest –Est). Toutes ces eaux se rencontrent au centre de la plaine (à *Aïn Chabro*) et là, la situation a beaucoup changé. En 1994, ces eaux continuaient leur trajet vers l’exutoire (vers le Nord), tandis qu’actuellement elles restent concentrées dans la zone d’*Aïn Chabro*. Cette dernière ne se comporte plus comme zone de convergence proprement dite, mais en zone dépressionnaire, suite aux exploitations insensées ;
- ✓ La variabilité du gradient hydraulique est vraiment ressentie entre la région de *Hammamet*, où il est de l’ordre de 0,6%, le centre qui se caractérise par une bonne perméabilité où il avoisine les 0,4%, et la région de *Bekkaria* (à l’Est) où il se voit encore à la hausse oscillant de 2,4 à 3,1%.

### III – 3 – Les apports du système et conditions aux limites

De par sa situation, ses caractéristiques hydrauliques et hydrodynamiques ainsi que du contexte hydrogéologique régional, l’étude du comportement du système aquifère de la région de *Tébessa* montre que l’alimentation se fait de la manière suivante :

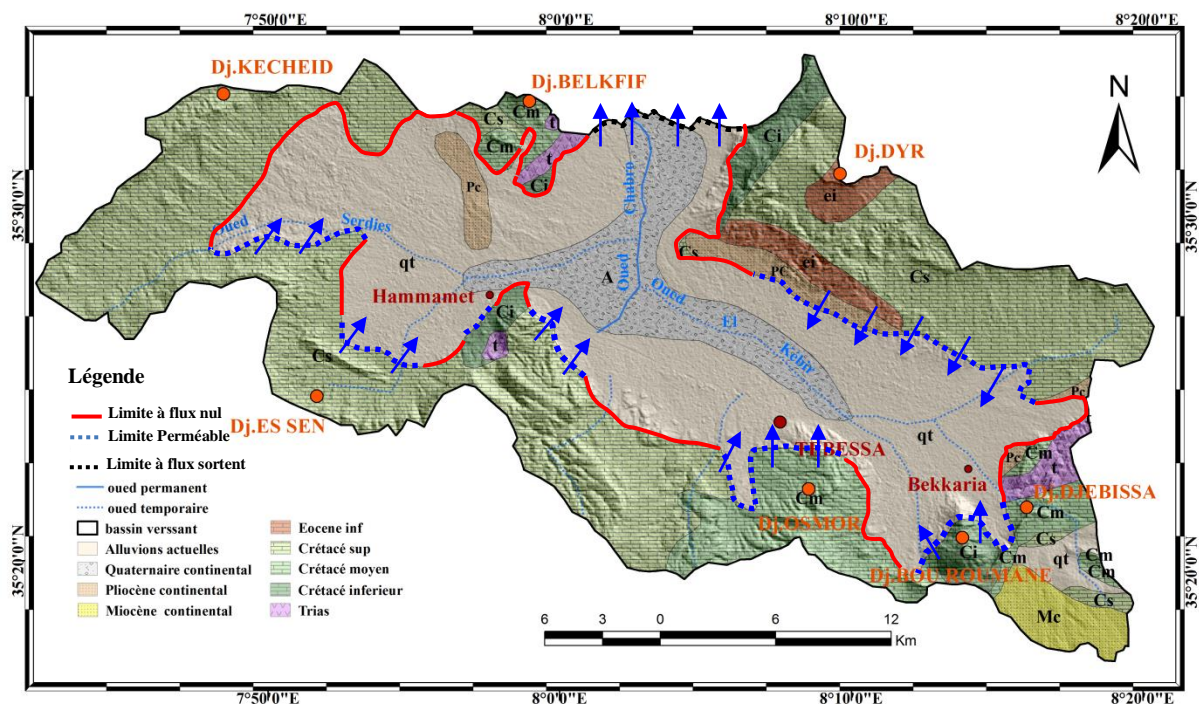


Fig. 44 : Carte des conditions aux limites du système aquifère du bassin de Tébessa.  
- ANRH1975 Modifiée -

1. Suite aux infiltrations des eaux de précipitations, particulièrement en faveur des zones à forte perméabilité surtout à *Bekkaria*, *Aïn Chabro* et *Hammamet*, et là où affleure le remplissage alluvionnaire, constituant ainsi les apports directs au profit de la nappe alluviale. Cette infiltration devient presque nulle, surtout au centre, à cause soit de l'apparition des argiles ou des dépôts fins.  
Les eaux de surfaces, en particulier celles d'Oued *Bouakous* et d'Oued *Serdies*, qui viennent se perdre dans les alluvions notamment à *Hammamet* et *Aïn Chabro*, constituant un apport non négligeable au dit système.
2. Le milieu fissuré lui, est alimenté par les précipitations (pluies, fonte de neiges...) grâce à son étendue et à la prolifération et l'envergure des fissures, particulièrement aux bordures, grâce aux jeux de failles affectant les bordures et qui mettent en contact direct les formations du remplissage et celles fissurées et aux cônes de déjections, précisément à *Bekkaria*, où cette structure reçoit les eaux provenant des calcaires de *Dj. Bourommane*.
3. L'alimentation de la nappe alluviale par les calcaires fissurés des bordures doit être signalée quoi qu'elle soit assez ambiguë. La complexité de cet état était générée par les jeux de failles qui, par endroits, ont provoqué une discontinuité du niveau fissuré et l'apparition des marnes ont mis en contact direct les formations du remplissage et celles fissurées. Il est fort probable qu'une alimentation en profondeur existe en faveur de ces failles toujours.

#### IV – Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde

La nappe profonde étant sollicitée par un grand nombre de forages. Ces derniers captent différentes formations, ainsi dans la région de *Bekkaria*, l'aquifère peut être constitué soit par des calcaires fissurés (*ZI Bis*), soit par des sables (*A89*), alluvions (*W2bis*). Il en est de même pour les autres zones (*Tébessa* et *Aïn Chabro*), voir fig. 45 (*a, b, c*).

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques déduites des essais de pompages, réalisés sur d'anciens ouvrages, montrent que la transmissivité varie de  $0,22.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (*QR5*) à  $8,5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (*BE1*), tandis que la perméabilité oscille entre  $0,4.10^{-5}$  (*KL3*) et  $8.10^{-5} \text{ m/s}$  (*BE1*).

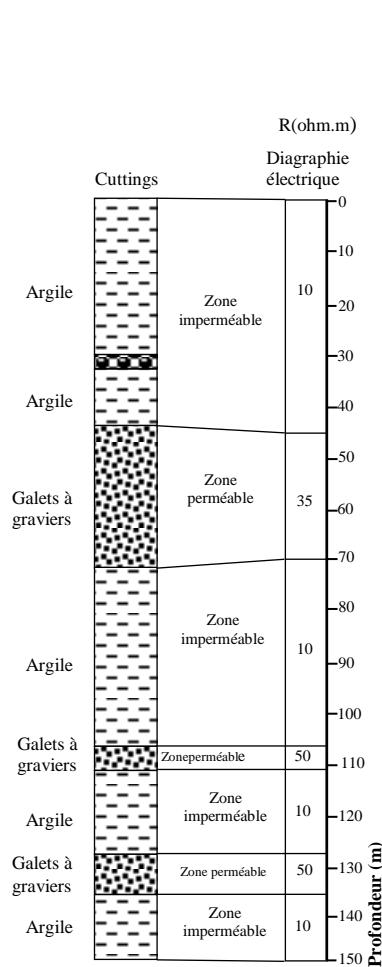


Fig.45a forage Merdja NHA (Tébessa)

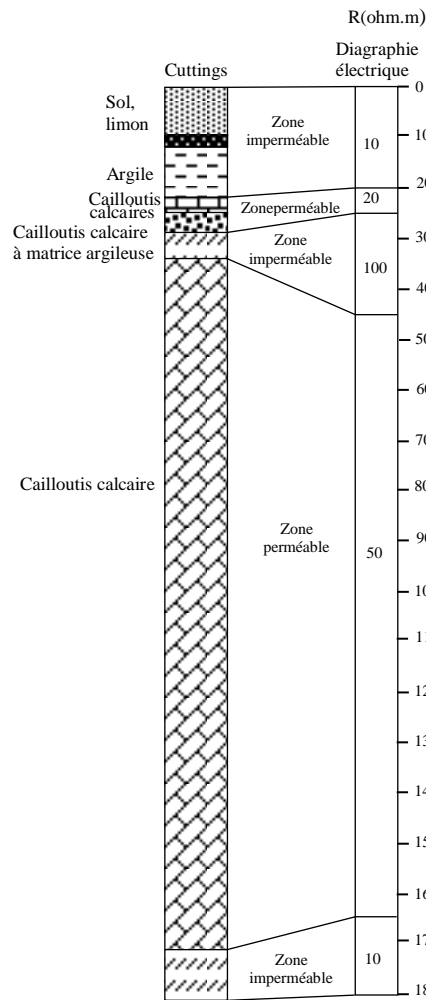


Fig.45b. forage F2-3 (Aïn Chabro)

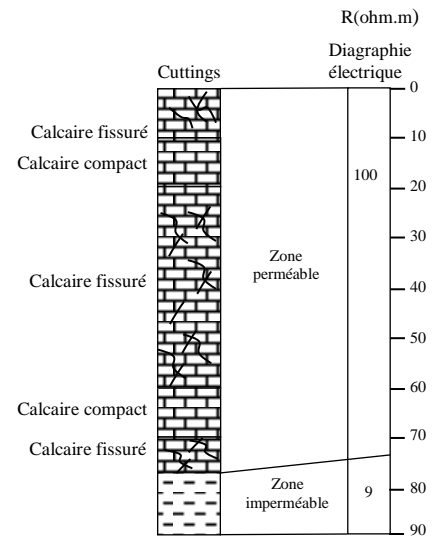


Fig. 45 c. forage Z1bis (Bekkaria)

De nouveaux forages, six au total, ont été réalisés ultérieurement, par les services de l'ANRH (2018), pour renforcer l'AEP du chef-lieu de wilaya (Tébessa).

Tableau N° 20 : Données des forages profonds réalisés par l'ANRH.

Nom	Coordonnées Lambert		Profondeur (m)	NS (m)	Q critique Q (L/s)	Q d'exploitation (L/s)	Rabat critique ΔS (m)
	X (m)	Y (m)					
N3	988990.39	246872.97	209	123.6	14.2	08	35.83
N2-3	988370.56	246887.77	650	77.0	20	15	112.21
O2-3	988569.85	247204.25	550	124.10	46.67	20	15.21
P2	988662.42	247760.12	550	106.10	53	33	70.42
P1	988950.19	247407.93	550	107	71	33	72.3
P3	989120.75	247823.11	550	101	68	33	45



**Fig. 46 : Transport et montage de l'appareil de forage/ installation du chantier P3.**

À la suite d'essais de pompages effectués sur ces ouvrages on a pu déterminer de nouvelles valeurs desdits paramètres. Sauf que nous étions contraints de ne mesurer que la transmissivité, suite à la remontée rapide. Cette dernière est estimée à  $5,85.10^{-1}m^2/s$  (P3),  $4,5.10^{-4}m^2/s$  (P2) et  $4.10^{-3}$  (O2 – 3). La perméabilité peut avoisiner, en moyenne, les  $1,95.10^{-3}m/s$ .

Nous allons essayer de donner quelques détails sur ces forages et sur les caractéristiques qu'on a déduits des essais de pompages qui y sont effectués.

**Tableau N° 21 : Données lithologiques du forage P3.**

<b>Profondeur (m)</b>		<b>Formation</b>
<b>De</b>	<b>À</b>	
0.00	200.00	Conglomérat avec intercalation d'Argile.
200.00	212.00	Argile.
212.00	230.00	Gravier.
230.00	240.00	Argile.
240.00	300.00	Cailloutis calcaires.
300.00	326.00	Argile.
326.00	366.00	Gravier à silex.
366.00	374.00	Argile.
374.00	538.00	Grès.
538.00	550.00	Marne.

Forage P3

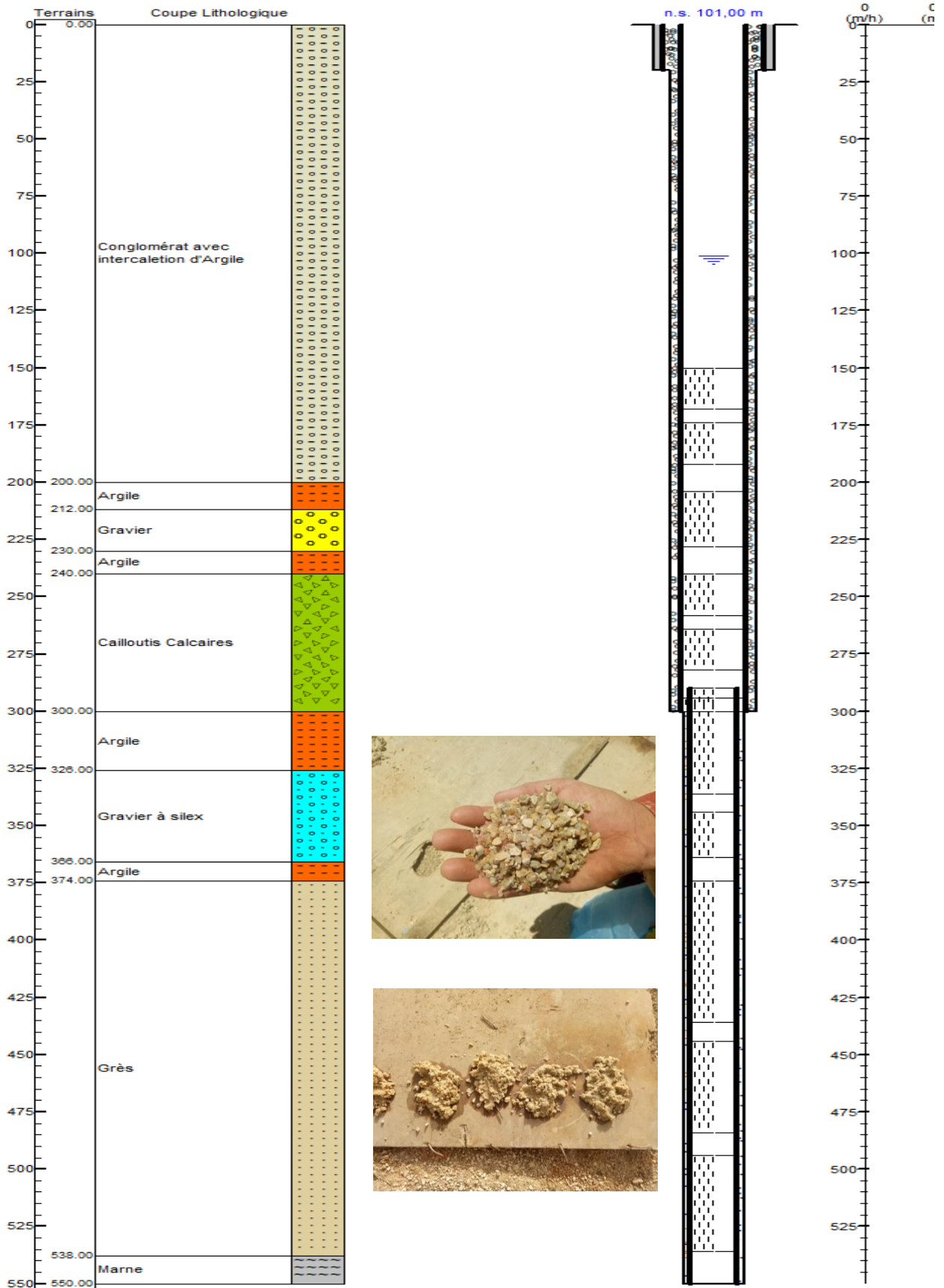


Fig. 47a : Coupe lithologique et programme d'équipement du forage P3.



Fig. 47b : La descente de tubage API 9<sup>1/2</sup>".  
Le 02/06/2018



Fig. 47c : Mise en place du gravier.  
Le 03/06/2018

### IV – 1 – Résultats des essais de pompage

#### A – Le forage P3

##### ➤ Les essais par palier

Nous avons procédé aux essais de pompage par palier où nous avons réalisé trois (03), de quatre (04) heures chacun. Les résultats sont récapitulés dans la représentation suivante.

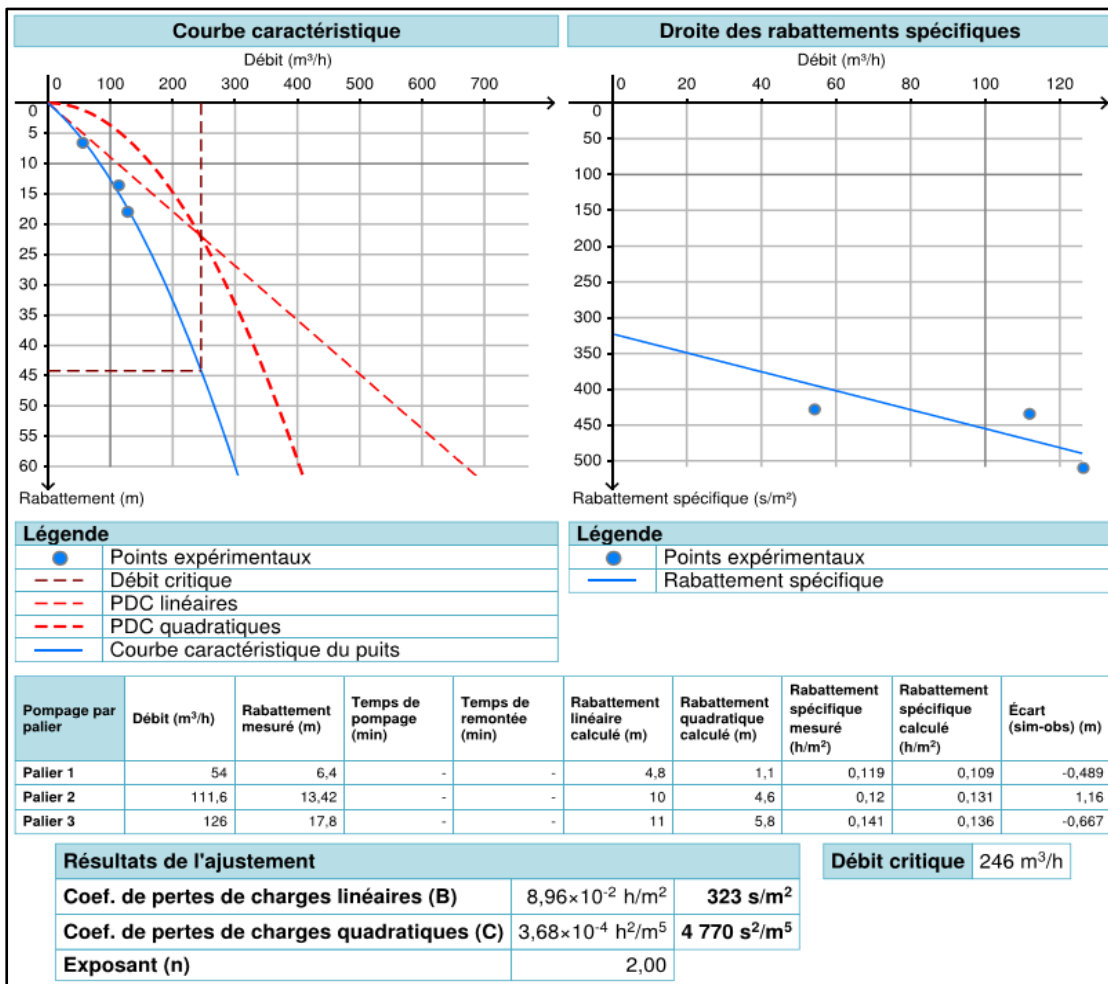


Fig. 48 : Représentation et résultats des essais de pompage par palier. Forage P3.

- ✓ D'après la droite des rabattements spécifiques en régime stable, le rabattement ( $S$ ) peut s'écrire :

$$S = 323 * Q + 4770 * Q^2. \text{ Où :}$$

$S$  : le rabattement en (m).

$Q$  : le débit en  $m^3/s$ .

Donc pour un débit ( $Q$ ) de  $50l/s$ ,  $S = 28.07m$ .

- ✓ D'après la courbe des rabattements en fonction des débits, le débit critique et de l'ordre de  $246m^3/h$  soit  $68l/s$  avec un rabattement de  $45m$ .

### ➤ La courbe de descente

La courbe des rabattements en fonction du temps est interprétée suivant la méthode de *JACOB*.

$$T = \frac{0.192 * Q}{\Delta s}$$

$T$  : transmissivité en  $m^2/s$ .

$S$  : différence d'ordonnée (m) sur la courbe de remontée ou de descente pour un temps de cycle logarithmique.

La valeur de transmissivité a été calculée à l'aide de cette formule. Elle est de :

$$T = 5.856.10^{-1}m^2/s.$$

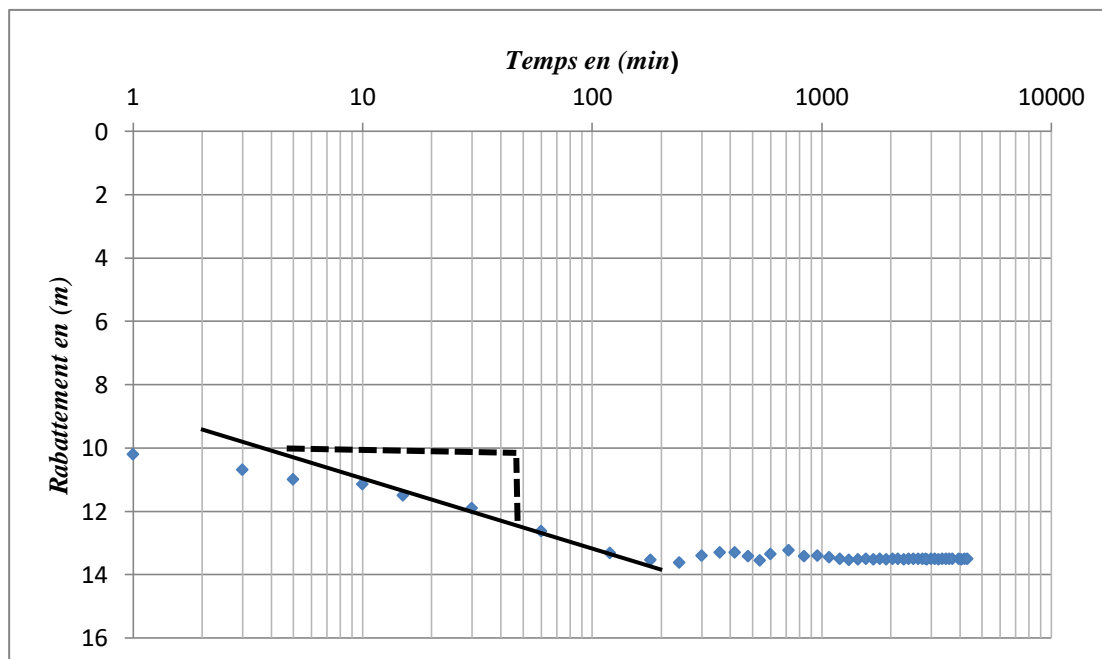
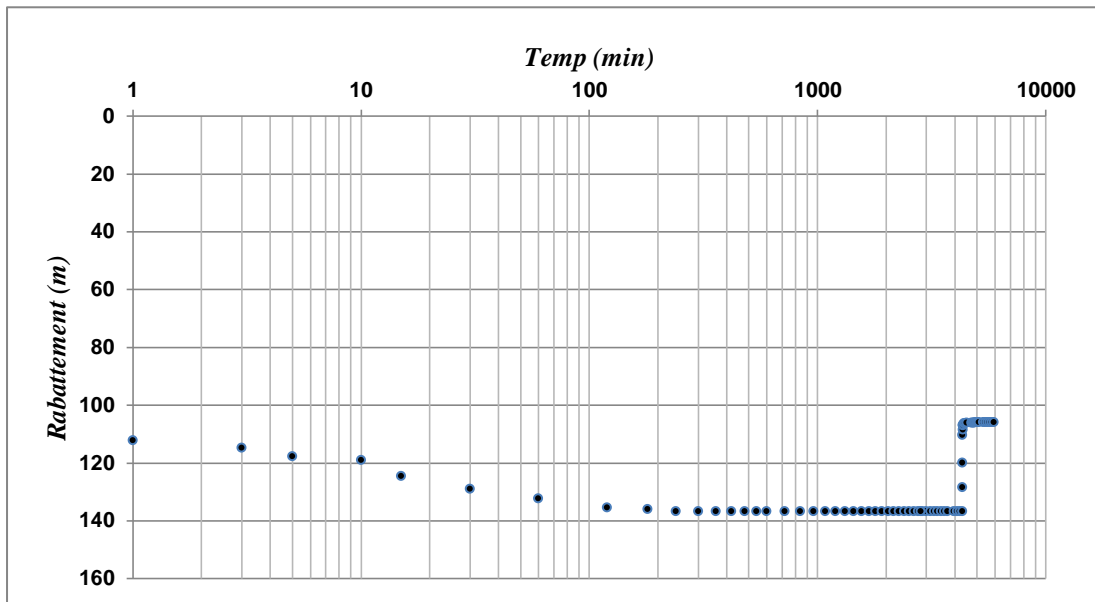


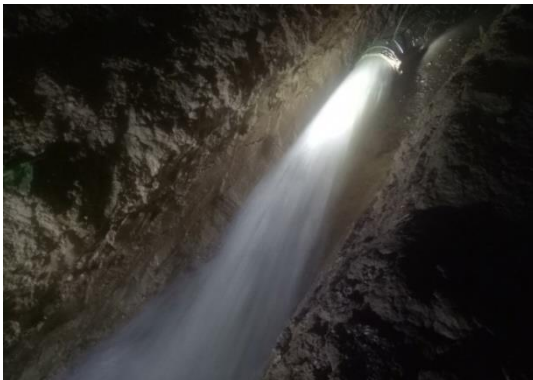
Fig. 49 : Courbe de descente (essais de pompage de longue durée). Forage P3.





*Fig.50a : Courbe de descente et de remonté (forage P3).*

Comme nous l'avons signalé, et suite à la remonté rapide du niveau dynamique (10.88m en 01 min) la détermination de la perméabilité était impossible.



*Fig. 50b : Développement du forage P3 à la pompe à 04<sup>h</sup>23*



*Fig. 50c : Essais de pompage par palier. Le 08/06/2018*



*Fig. 50d : Équipement du forage P3 par les services de l'ADE. Le 18/07/2018.*

Après les opérations de développement et d'essai de pompage, nous avons retenu les résultats suivants :

- ✓ Le niveau statique  $N_s = 101m$  ;
- ✓ Le niveau dynamique  $ND = 114.51m$ , pour un débit de pompage  $Q = 32l/s$  ;
- ✓ Le rabattement  $S = 13.51m$  ;
- ✓ Le débit critique  $Q_c = 68 l/s$  provoque un rabattement de  $45m$  ;
- ✓ Le débit d'exploitation  $Q_{ex} = 50l/s$  ;
- ✓ La transmissivité  $T = 5.85 \times 10^{-1} m^2/s$ .

## B – Le forage P2

Les diverses formations géologiques rencontrées, lors des opérations de forage de cet ouvrage (P2), sont regroupées dans le tableau suivant (Tab.22).

**Tableau N° 22 : Données lithologiques du forage P2.**

Profondeur (m)		Formation
De	À	
0.00	5.00	Argile.
5.00	25.00	Cailloutis.
25.00	224.00	Calcaire avec passage d'argile.
224.00	280.00	Calcaire.
280.00	295.00	Argile.
295.00	435.00	Grès.
435.00	550.00	Calcaire.

### ➤ Les essais par palier

Comme pour son prédécesseur, des essais par palier ont été effectués pour ce forage également. Le nombre de paliers était aussi de trois (03), d'une durée équivalente (04 heures), tout en respectant le temps de remontée (niveau initial), après chaque palier de pompage (d'une durée presque égale).

Les résultats relatifs à ces essais sont reportés aux représentations ci-après (Fig.51).

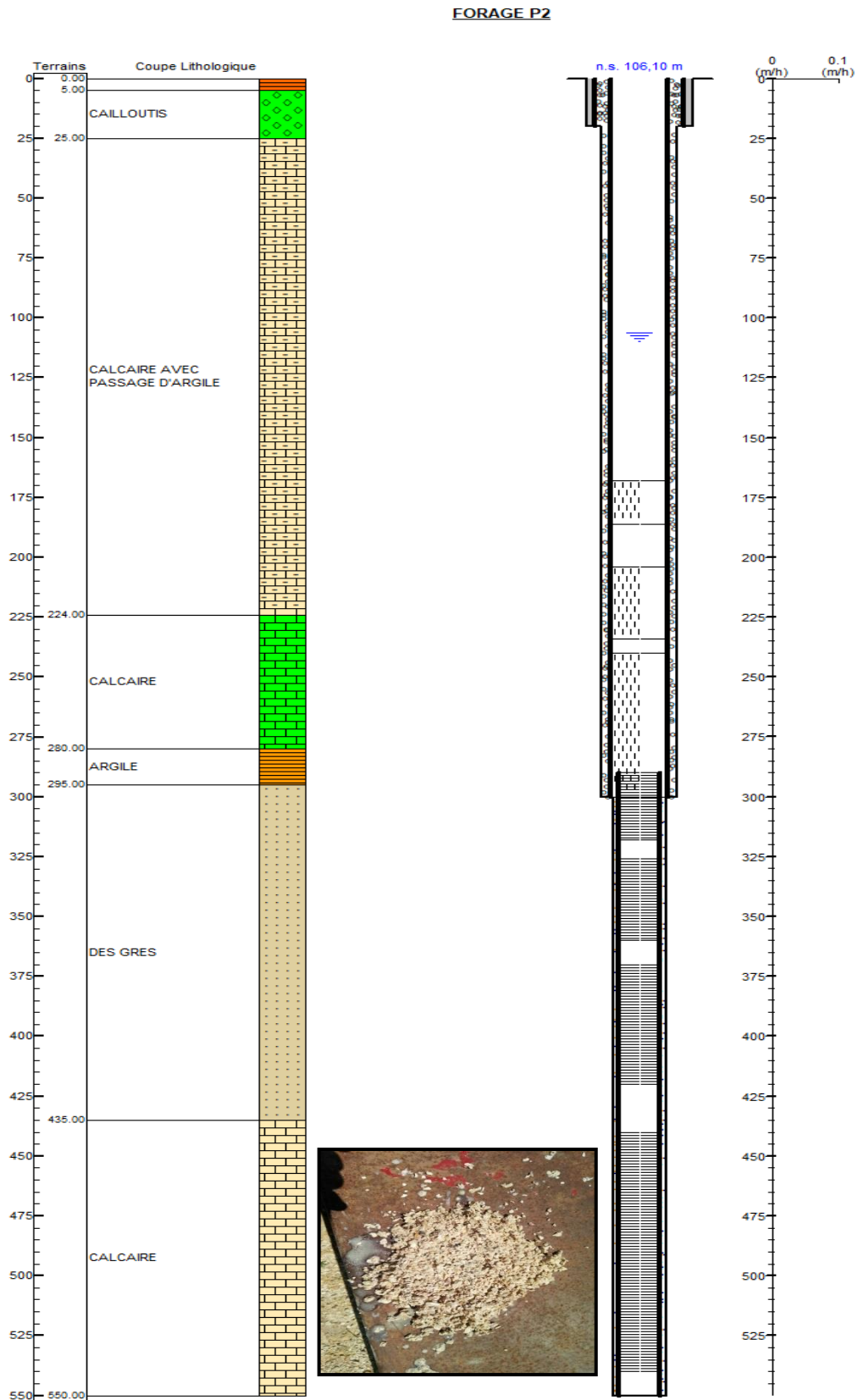


Fig. 51 : Coupe lithologique et programme d'équipement du forage P2.

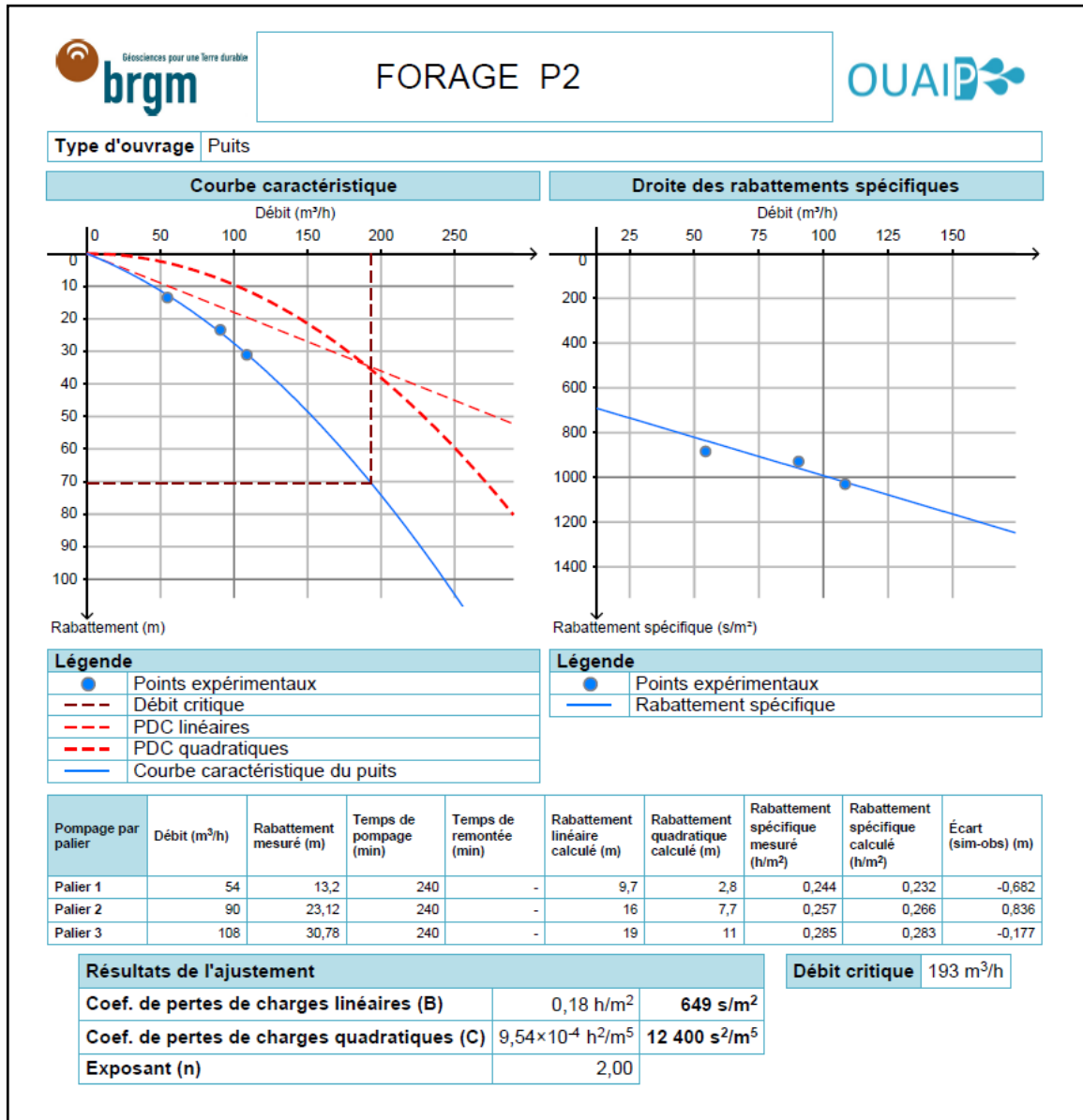


Fig. 52 : Représentation et résultat des essais de pompage. Forage P2.

D'après la droite des rabattements spécifiques, en régime stable, le rabattement (S) peut s'écrire selon l'expression suivante :

$$S = 649 * Q + 12400 * Q^2. \text{ Où :}$$

S : le rabattement en (m).

Q : le débit en m³/s.

Donc pour un débit (Q) de 40l/s, S = 45.8m.

D'après la courbe des rabattements en fonction des débits, le débit critique est de l'ordre de 193m³/h, soit 53.61l/s avec un rabattement de 70.42m.

- Les essais de longue durée
  - Courbe de descente

La courbe des rabattements en fonction du temps est interprétée suivant la méthode de *JACOB*.

$$T = \frac{0.192 * Q}{\Delta s} \equiv m^2/s. \quad \text{Avec :}$$

$T$  : transmissivité en  $m^2/s$ .

$S$  : différence d'ordonnée (m) sur la courbe de remontée (ou de descente) pour un temps de cycle logarithmique.

La valeur du paramètre transmissivité ( $T$ ) peut alors être déterminée à partir de la formule précédente.

$$T = 4.5 \cdot 10^{-4} m^2/s$$

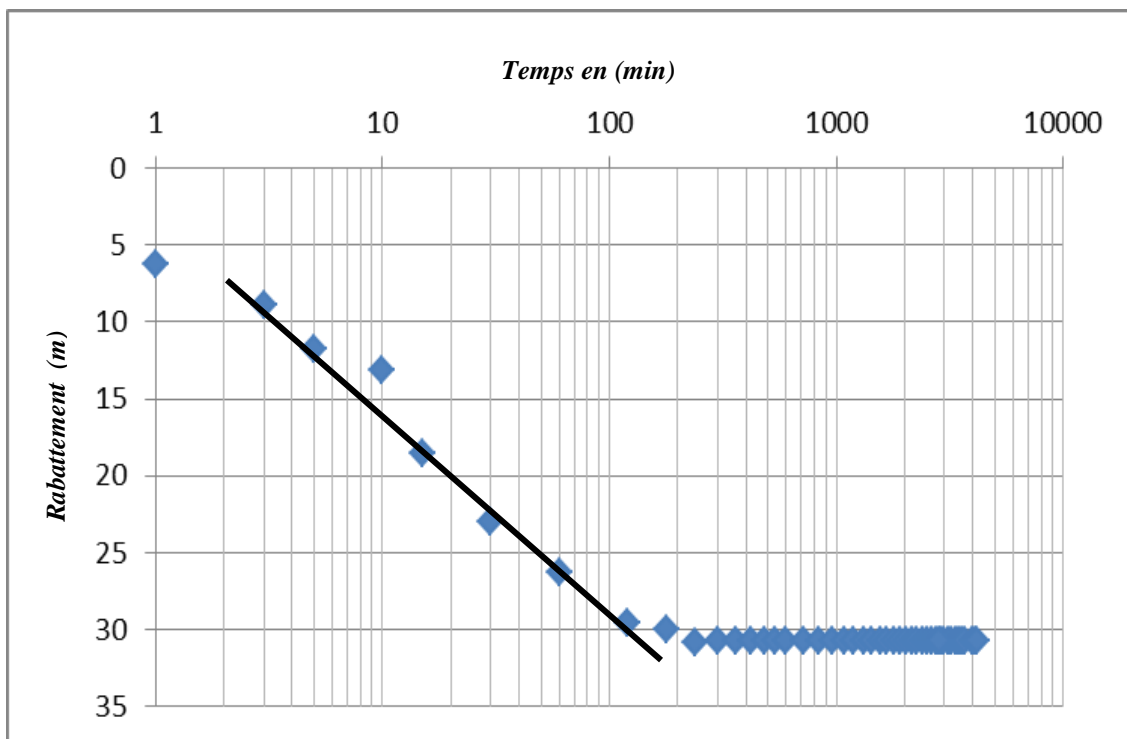


Fig.53 : Courbe de descente (essai de pompage de longue durée) forage P2.

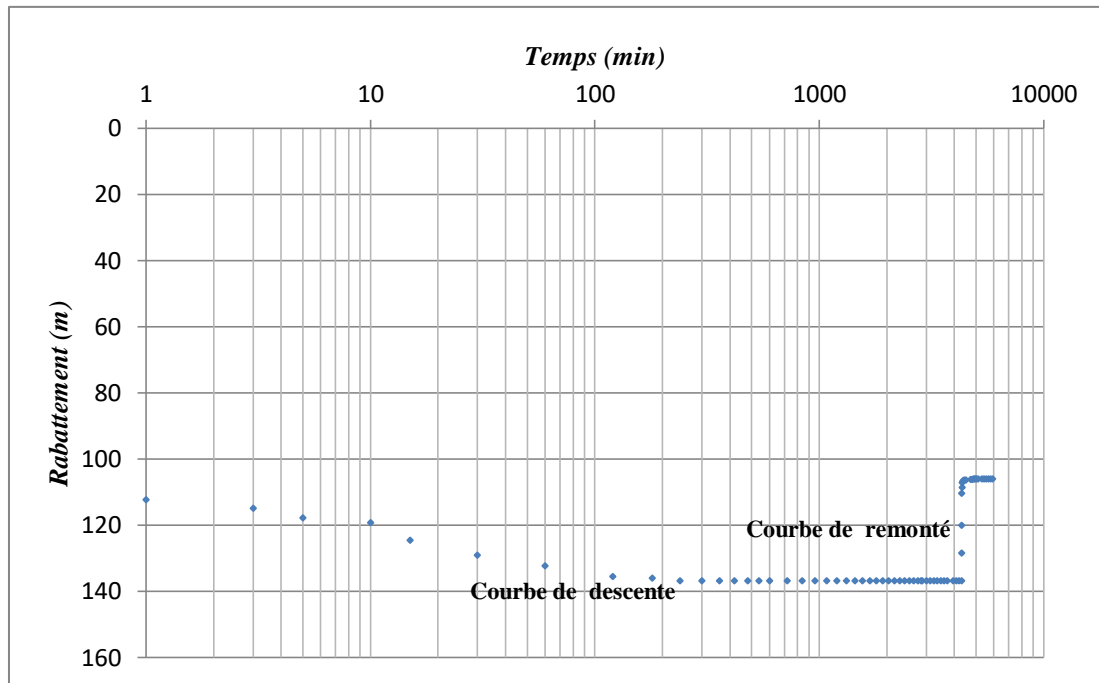


Fig. 54a : Courbe de descente et de remontée. Forage P2.

Suite à la remontée rapide du niveau dynamique, (28.19m en 10 min), il nous était impossible de déterminer la perméabilité.



Fig. 54b : Développement du forage P2 à la pompe.



Fig. 54c : Essais de pompage par palier.



Fig. 54 d : Équipement du forage P2 par les services l'ADE.

Les résultats retenus, des opérations de développement et d'essai pompages, sont :

- ✓ Le niveau statique  $N_s = 106.10m$  ;
- ✓ Le niveau dynamique  $ND = 136.82m$ , pour un débit de pompage de  $Q = 30l/s$  ;
- ✓ Rabattement  $S = 30.72m$  ;
- ✓ Le débit critique  $Q_c = 53 l/s$  et un rabattement de  $70.42m$
- ✓ Le débit d'exploitation  $Q = 40l/s$  ;
- ✓ La transmissivité  $T = 4.5 \times 10^{-4} m^2/s$ .

### B – Le forage O.2 – 3

Dans le tableau suivant (tab. 23) sont récapitulées les données lithologiques ou diverses formations géologiques traversées par le forage (O2 – 3).

**Tableau. N° 23 : Données lithologiques du forage O2 – 3.**

<i>Profondeur (m)</i>		<i>Formation</i>
<i>De</i>	<i>À</i>	
0.00	6.00	Argile.
6.00	30.00	Galets.
30.00	40.00	Argile.
40.00	134.00	Gravier.
134.00	202.00	Calcaire avec une perte totale à la côte de 202m.
202.00	242.00	Sable fin.
242.00	550.00	Perte totale.

FORAGE O.2.3

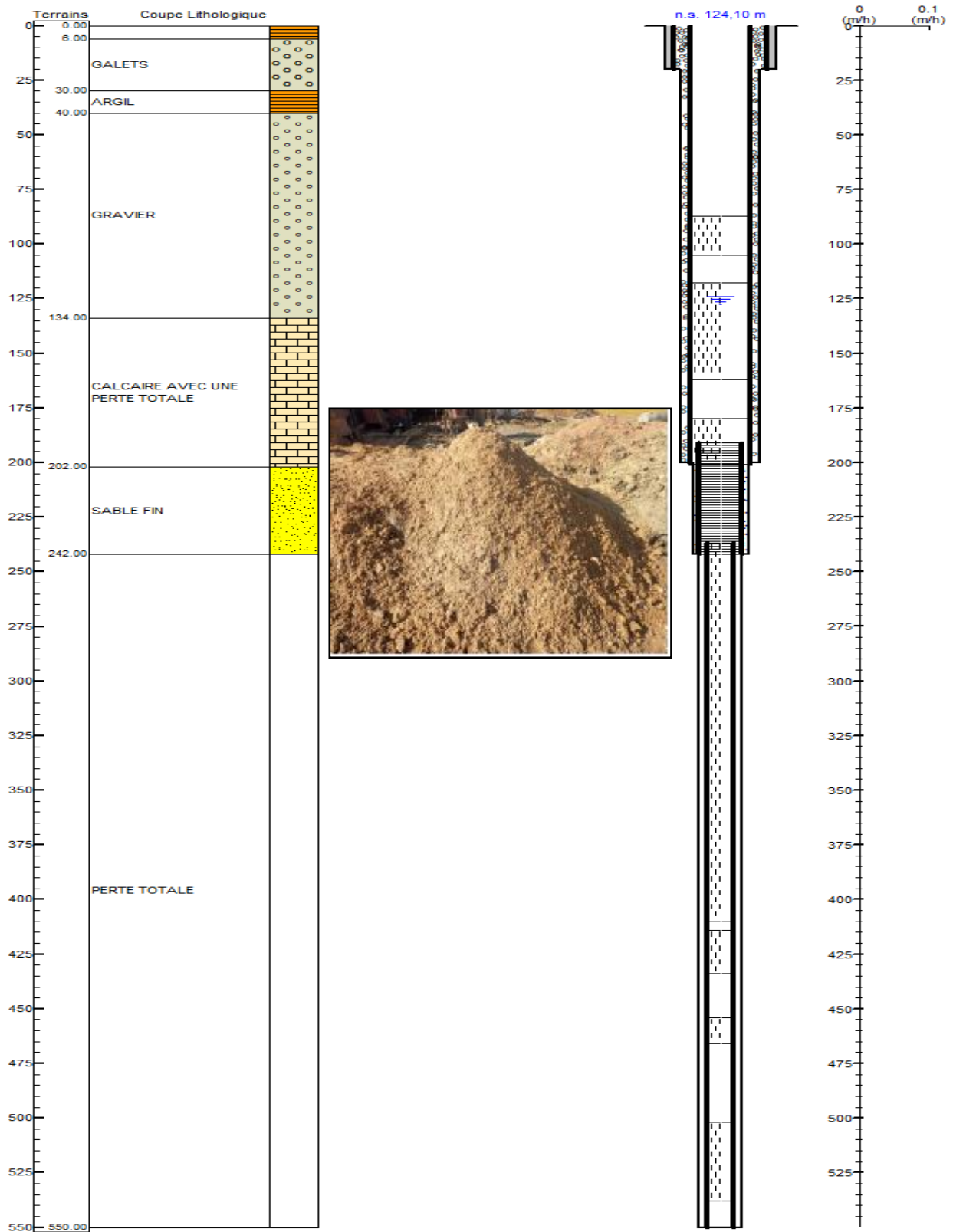


Fig.55 : Coupe lithologique et programme d'équipement du forage O2.3.



➤ Résultats des essais de pompage  
 ▪ Les essais par palier

Les résultats de ces essais sont représentés en graphique dans la figure suivante (fig. 56).

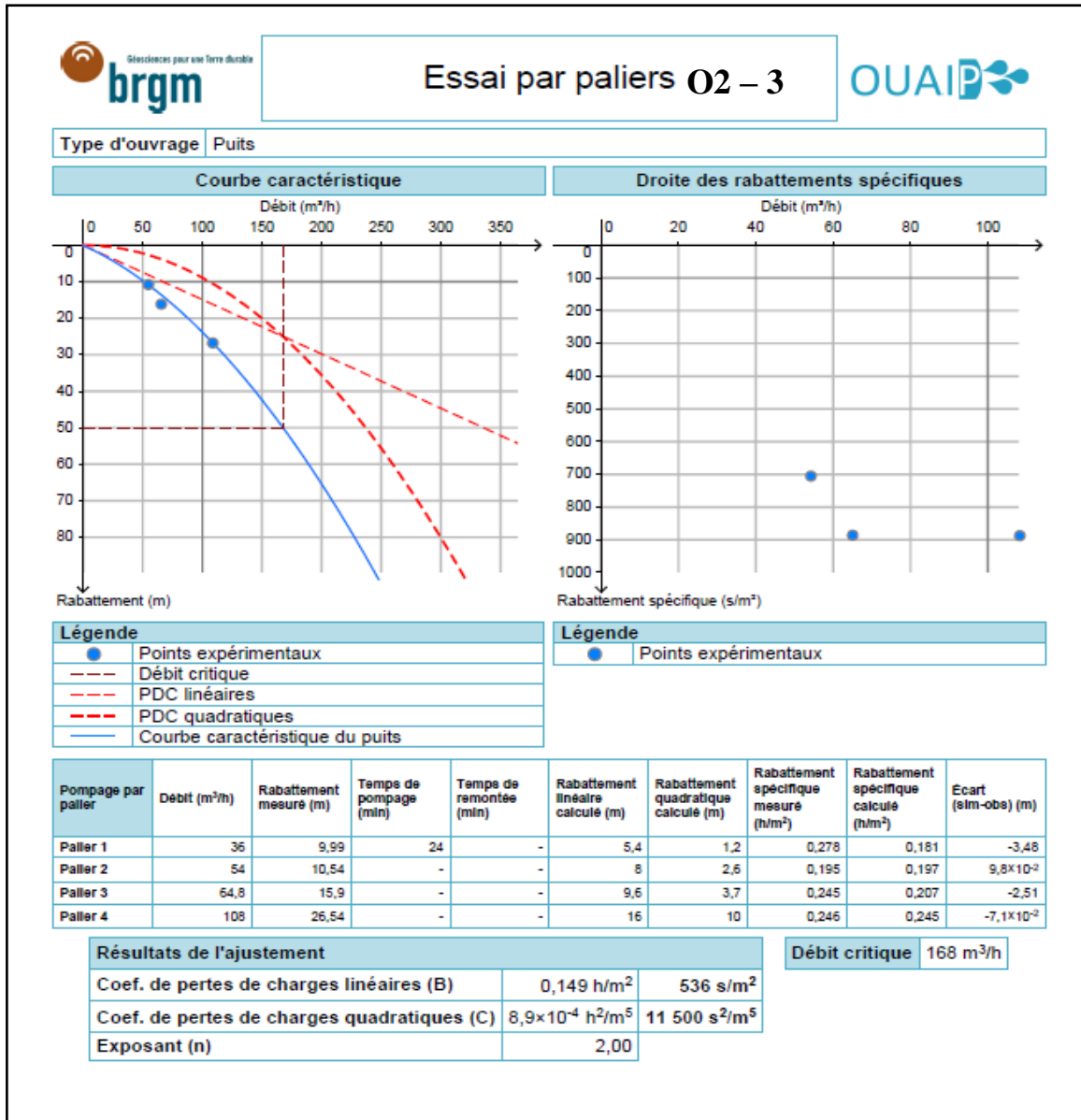


Fig. 56 : Représentation et résultat des essais de pompage. Forage O2 – 3.

D’après la droite des rabattements spécifiques, en régime stable le rabattement (S) peut s’écrire :

$$S = 536 * Q + 11500 * Q^2. \text{ Où :}$$

S : le rabattement en (m).

Q : le débit en m³/s.

Donc pour un débit de  $30\text{l/s}$  le rabattement est de  $S = 26.43\text{m}$ .

Le débit critique, obtenu à partir de la courbe des rabattements en fonction des débits, est de l'ordre de  $168\text{m}^3/\text{h}$  soit  $46.67\text{l/s}$  avec un rabattement de  $50\text{m}$ .

➤ **Les essais de longue durée**

▪ **La courbe de descente**

L'interprétation de la courbe des rabattements en fonction du temps est faite suivant la méthode de *JACOB*.

$$T = \frac{0.192 * Q}{\Delta s}$$

Avec :

$T$  : transmissivité en  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$S$  : différence d'ordonnée (en mètre) sur la courbe de remontée (ou de descente) pour un temps de cycle logarithmique.

La valeur de la transmissivité, calculée en utilisant la formule suscitée est de :

$$T = 4.06 * 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}.$$

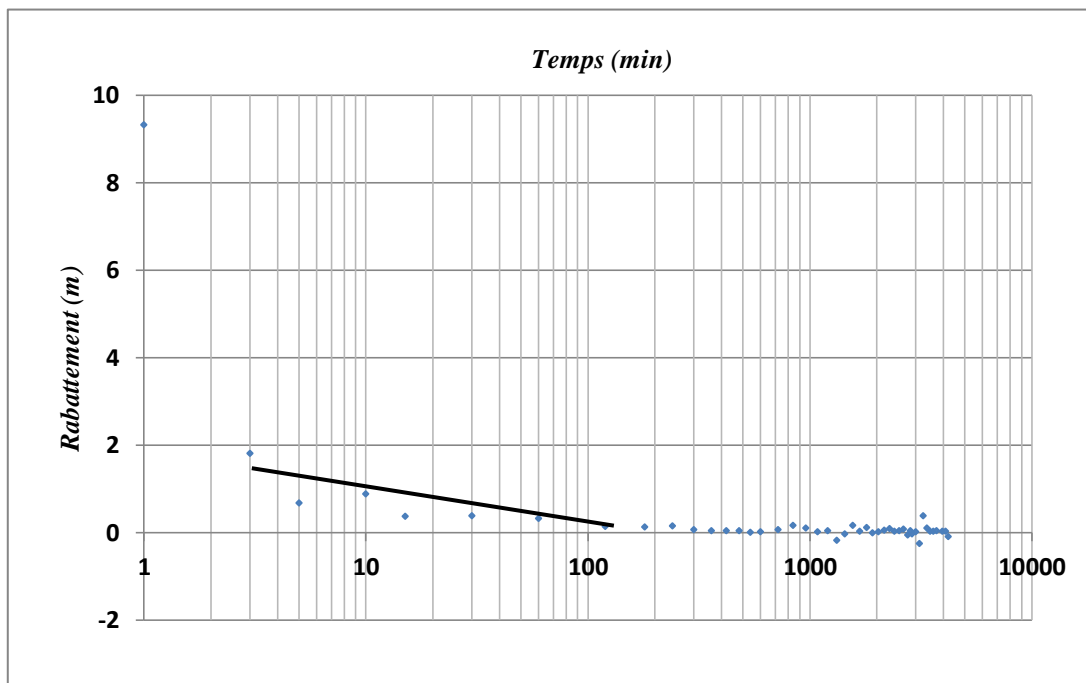


Fig. 57 : Courbe de descente (essais de pompage de longue durée .Forage O2.3.

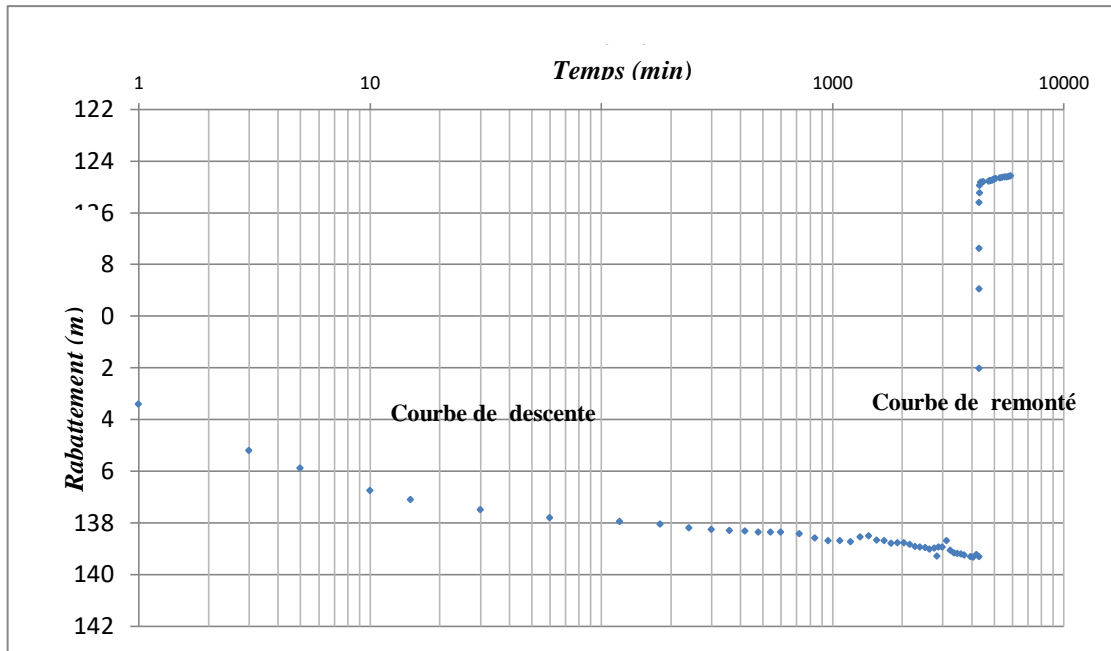


Fig. 58 : Courbe de descente et de remontée. Forage O2.3.

Les résultats qu'on a pu retenir de ce développement et de ces essais de pompage sont :

- ✓ Le niveau statique  $N_s = 124.10m$  ;
- ✓ Le niveau dynamique  $ND = 139.31m$  pour un débit de  $20l/s$  ;
- ✓ Le rabattement  $S = 15.21m$  ;
- ✓ Le débit critique  $Q_C = 46.67 l/s$  causant un rabattement  $S = 70.42m$  ;
- ✓ Le débit d'exploitation  $Q_{ex} = 20l/s$  ;
- ✓ La transmissivité  $T = 4.06 \times 10^{-4} m^2/s$ .

### III – 2 – Cartographie des paramètres hydrodynamiques

#### a – La carte de transmissivité

Elle présente une morphologie variable due à l'hétérogénéité du système aquifère.

Cette variation révèle trois secteurs :

- ✓ À l'Ouest (secteur de Aïn Chabro), la transmissivité est importante, elle atteint  $3,8.10^{-3} m^2/s$ , ceci est due à la présence de gros graviers (cailloutis de calcaire qui caractérise l'aquifère) ;
- ✓ Au secteur de Tébessa, ce paramètre connaît une diminution remarquable. Au centre de la plaine, les valeurs sont faibles (de l'ordre de  $0,6.10^{-3} m^2/s$ ) résultant des formations argileuses et marneuses. Sur les bordures méridionales calcaires, les valeurs deviennent plus importantes atteignant  $3.10^{-3} m^2/s$ .

- ✓ Le secteur de *Bekkaria*, la transmissivité devient sensiblement élevée pour atteindre des valeurs de  $1,4.10^{-3} m^2/s$ . Cette augmentation est due à la présence de formations sableuses.

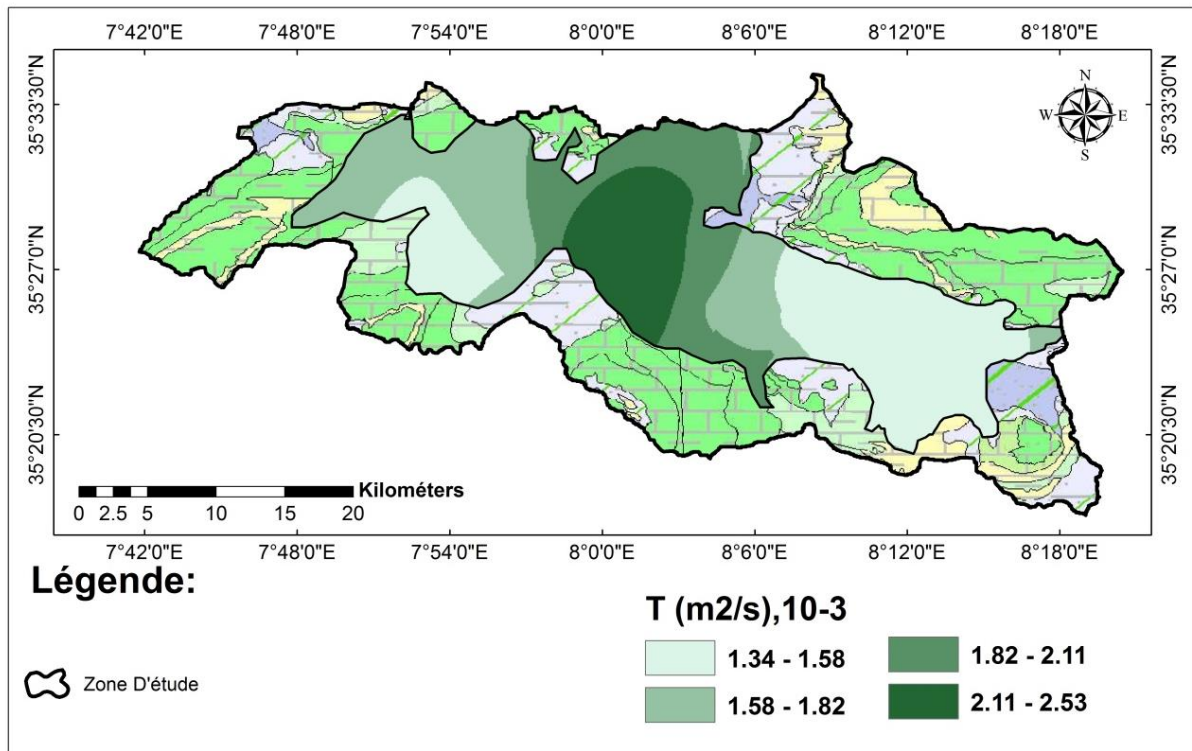


Fig. 59 : Carte de Transmissivité – plaine de Tébessa –

### b – La carte de perméabilité

- ✓ Le secteur d'*Aïn Chabro* est caractérisé par des valeurs élevées, atteignant  $4.10^{-5} m/s$  ;
- ✓ Le secteur de *Tébessa* se caractérise par des valeurs qui deviennent faibles au centre de la plaine, à cause de la présence des formations imperméables (argile et marne), elles sont de l'ordre de  $6.10^{-6} m/s$  ;
- ✓ La bordure méridionale est caractérisée par des valeurs élevées, dues à l'influence des calcaires de bordure alimentant la nappe latéralement. Elles peuvent atteindre  $3.10^{-5} m/s$ , cette variation est due à l'hétérogénéité de la géologie au niveau de ce secteur ;
- ✓ Le secteur de *Bekkaria*, les valeurs sont relativement importantes dans cette zone, elles oscillent entre  $6.10^{-6}$  et  $1.4.10^{-5} m/s$ .

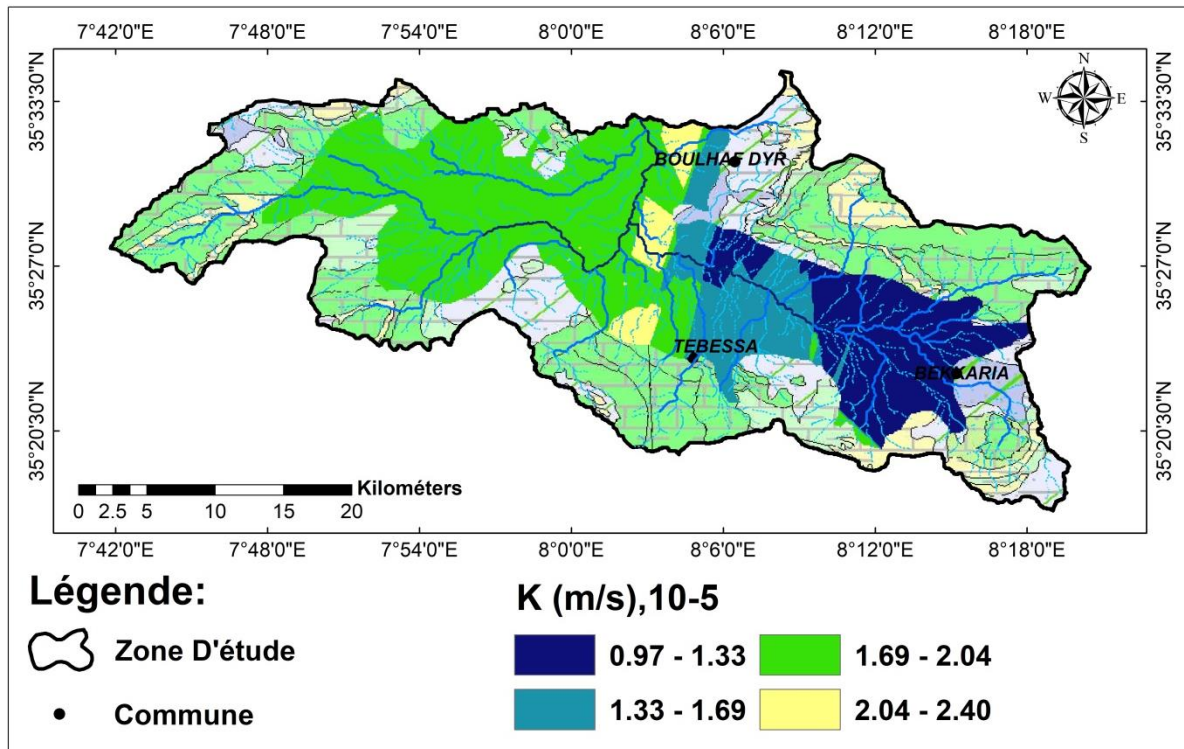


Fig. 60 : Carte de perméabilité – Plaine de Tébessa –

## Conclusion

L'étude piézométrique montre que l'écoulement, des eaux souterraines prend deux directions préférentielles. Celles de la région de *Bekkaria*, se dirigent du *Nord*, du *Sud* et de l'*Est* vers l'axe de la plaine pour se diriger ensuite vers l'*Ouest*. Celles de la région de *Tébessa*, ont une direction *Sud-Nord* pour rejoindre les eaux venant de l'*Est* et donc le même axe. Les eaux provenant de la région de *Hammamet*, en revanche, prennent une direction *Ouest-Est* pour converger vers le centre. Toutes ces eaux se rencontrent vers le côté d'*Aïn Chabro* et changent de sens d'écoulement vers le *Nord*, via l'exutoire du bassin.

Les données de forages disponibles ont permis le classement des zones selon leurs caractéristiques hydrodynamiques. Ce classement mettra la zone d'*Aïn Chabro* en premier lieu, en suite *Bekkaria* et à la fin, la zone de *Tébessa*.

*CARACTÉRISTIQUES  
HYDROCHIMIQUES*

## Introduction

Pour mener à bien une étude hydrogéologique, il faut disposer de plusieurs données et maîtriser certaines connaissances dont le chimisme, des eaux souterraines et superficielles, auquel il faut accorder un intérêt particulier, puisque la qualité de l'eau constitue plus qu'un enjeu environnemental voire un facteur déterminant quel que soit son domaine d'utilisation, et sa connaissance s'avère indispensable avant qu'elle ne soit recommandée aux divers usagers.

Le processus de chimisme des eaux est fortement lié à certains paramètres tels que la nature géologique du milieu récepteur, le temps de séjours/vitesse de circulation des eaux ... etc, que ces facteurs agissent ensemble ou séparément.

Il est régi par les équilibres calco-carboniques ( $Ca^{++}$ ,  $HCO_3^-$ ), conjugués à l'impact d'éléments d'origine biologique ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ , et  $NH_4^+$ ) ou naturelle ( $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl$ ).

Il est recommandé de prendre les mesures permettant de discerner d'éventuels interdépendances pouvant exister entre la matrice et l'eau, en tant que vecteur, ce qui permet de caractériser et de classifier les ressources hydriques, de suivre la variation spatio-temporelle de leurs qualité et aboutir à une identification des aquifères selon leurs faciès.

Il sera alors aisé de détecter et de localiser une quelconque pollution, et prendre par conséquent les mesures préventives adéquates. Dans le cas contraire, et en l'absence de programmes de lutte planifiés, les risques seront difficiles à contourner (santé, menace des écosystèmes, dégradation des sols...), avec les charges supplémentaires qu'ils engendrent en vue de les anéantir.

De telles interactions se répercutent sur la teneur de l'eau considérée, notamment en éléments majeurs ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  .....).

Plusieurs facteurs conditionnent les concentrations en ces éléments naturels, tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre l'eau et la roche...etc.

## I – Paramètres physico-chimiques et identification des faciès

### I – 1 – Caractérisation des eaux de la nappe

#### I – 1 – 1 – Prélèvements

Lors de la campagne effectuée, (Déc 2018), les échantillons d'eau prélevés ont été destinés aux analyses nécessaires. Les points d'eau ciblés ont été présélectionnés pour qu'ils soient les mieux représentatifs de toute la plaine. L'ensemble de ces ouvrages ont une profondeur moyenne inférieure à 60 m.

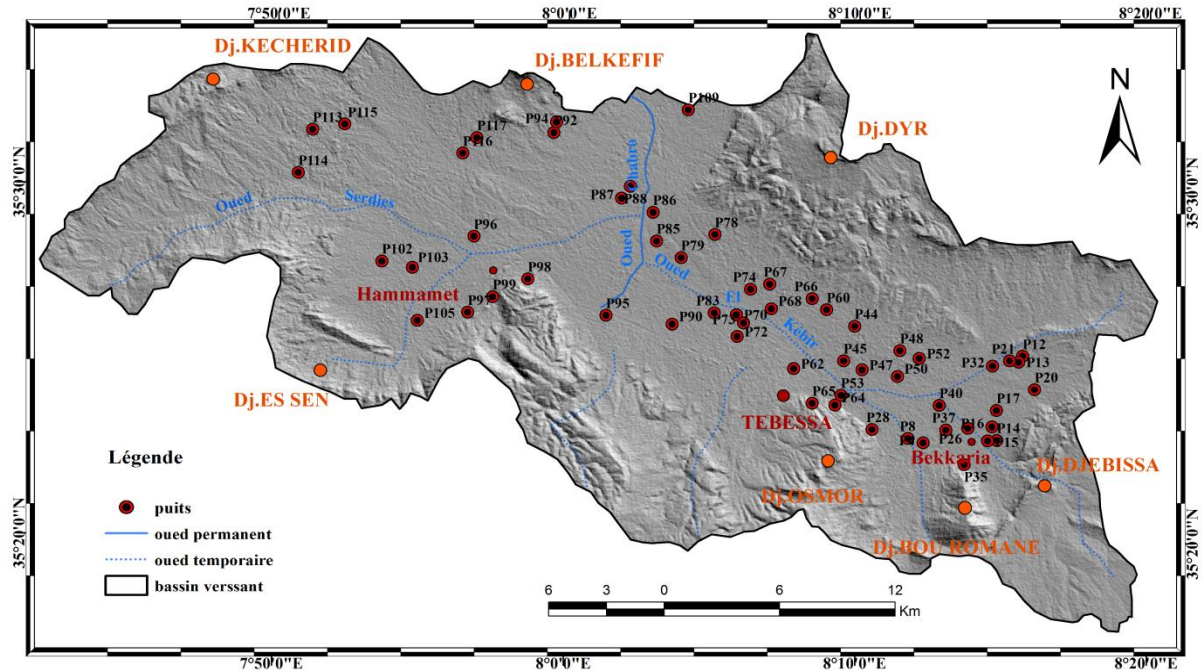


Fig. 61 : Carte des points d'eau sujets à des prélèvements – plaine de Tébessa –

### I – 1 – 2 – Les mesures in situ

Lors des campagnes, notre intérêt s'est beaucoup plus concentré sur la détermination de quatre paramètres physiques (pH, conductivité électrique,  $T^{\circ}$  et oxygène dissous,). Leurs mesures ont été effectuées, en même temps que les prélèvements (in situ), à l'aide d'une valise multi-paramètre de terrain.

### I – 1 – 3 – Les analyses aux laboratoires

L'ensemble des éléments majeurs ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $HCO_3^{-}$ ) ont été sujet à une analyse complète.

#### I – 1 – 3 – 1 – Les paramètres physiques

##### I – 1 – 3 – 1 – a – La température

C'est un paramètre qui régit la solubilité des sels et des gaz et permet de distinguer les eaux de surface de celles souterraines. Il est fonction soit du climat et donc de la  $T^{\circ}$  de l'air (eau de surface) ou de la profondeur (gradient géothermique, réactions chimiques pour l'eau profonde). La mesure de ce paramètre s'est faite in situ, à l'aide d'un thermomètre à mercure.

Les valeurs obtenues montrent que les eaux de la plaine ont une température allant de  $16$  à  $19^{\circ}C$ .



**I – 1 – 3 – 1 – b – Le potentiel d’Hydrogène**

Conditionnant l’équilibre physico-chimique, le *pH* caractérise l’acidité ou la basicité d’une eau (ou d’une solution) et par conséquent sa concentration en ions ( $H^+$ ). Il permet de dire si celle-ci est agressive, corrosive ou entartrante, caractère qui lui est conféré en fonction de sa teneur en ions issus du milieu naturel, des rejets urbains et industriels ou du lessivage des terres agricoles.

Lors des campagnes menées, les valeurs enregistrées du *pH*, à l’échelle de notre bassin, varient, de 6.14 à 8.22 en moyenne, mais sans écarts notables.

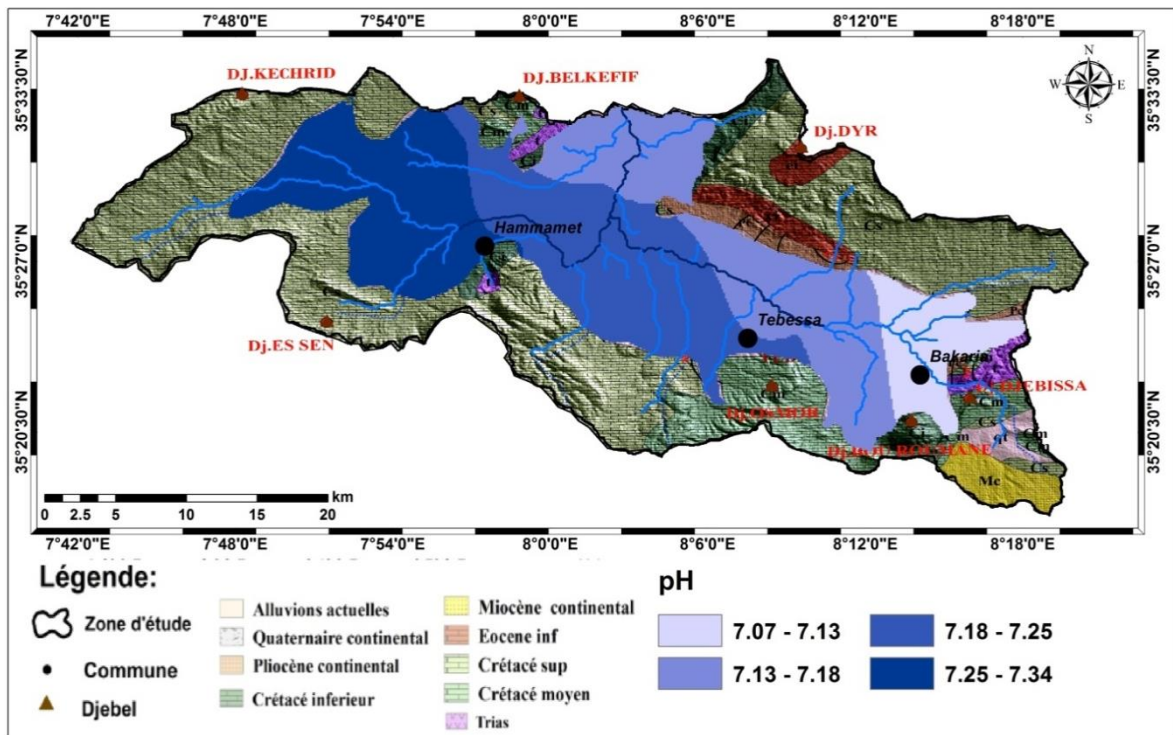


Fig. 62 : Carte de répartition du *pH*. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

**I – 1 – 3 – 1 – c – La conductivité électrique *CE***

C’est l’aptitude d’une eau à laisser circuler (plus ou moins vite) un courant électrique. La connaissance de ce paramètre, (ou de son inverse la résistivité), permet de suspecter une quelconque modification des différents horizons aquifères, et d’y palper la minéralisation.

Elle est directement proportionnelle à la teneur en sels dissous d’une eau. Ces valeurs sont ramenées à 25°C, et exprimées en  $\mu s/cm$ , selon la relation suivante :

$$CE_{25} = CE_{Tmes} * \frac{1}{(1 - 0.022)(25 - Tmes)} \quad \text{Avec :}$$

$T_{mes}$  : température de mesure (°C).  $CE_{25}$  : conductivité électrique ( $\mu S.cm^{-1}$ ) corrigée à 25°C.

L'organisation mondiale de la santé (OMS) a recommandé une certaine classification des eaux, selon les plages de valeurs du paramètre suscité. Selon cette dernière, on a dressé le tableau suivant, (Tab.23), qui récapitule l'ensemble de données relatives à la région d'étude.

Tableau N  23 : Normes et classification des eaux selon leurs conductivités (OMS 1 994).

Plaine de Tébessa.

Classe de qualité	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	2 500	3 000	3 500	4 000	> 4 000
Puits	P <sub>4</sub> , P <sub>8</sub> , P <sub>12</sub> , P <sub>28</sub> , P <sub>35</sub> , P <sub>37</sub> , P <sub>40</sub> P <sub>62</sub> , P <sub>64</sub> , P <sub>65</sub> , P <sub>67</sub> , P <sub>68</sub> , P <sub>72</sub> , P <sub>73</sub> , P <sub>74</sub> , P <sub>78</sub> , P <sub>79</sub> , P <sub>83</sub> , P <sub>85</sub> , P <sub>87</sub> , P <sub>88</sub> , P <sub>90</sub> , P <sub>94</sub> , P <sub>95</sub> , P <sub>96</sub> , P <sub>97</sub> , P <sub>99</sub> , P <sub>102</sub> , P <sub>103</sub> , P <sub>105</sub> , P <sub>109</sub> .	P <sub>21</sub> , P <sub>116</sub> .	P <sub>26</sub> , P <sub>32</sub> .	P <sub>113</sub>	P <sub>13</sub> , P <sub>14</sub> , P <sub>17</sub> , P <sub>20</sub> , P <sub>44</sub> , P <sub>45</sub> , P <sub>47</sub> , P <sub>48</sub> , P <sub>50</sub> , P <sub>52</sub> , P <sub>60</sub> , P <sub>66</sub> , P <sub>70</sub> , P <sub>86</sub> , P <sub>92</sub> , P <sub>98</sub> , P <sub>114</sub> , P <sub>115</sub> , P <sub>117</sub> .

Nous remarquons que les plus fortes valeurs sont enregistrées du côté de *Bekkaria* (6960 à 7070  $\mu\text{s/cm}$ ) et du côté de *Dj. Belkefif* (11550 à 10150  $\mu\text{s/cm}$ ), ceci est probablement due aux effets des formations évaporitiques de *Dj. Djebissa*   l'Est de la plaine et de *Dj. Belkefif* au Nord.

Le centre de la plaine, notamment la zone d'*Ain Chabro*, se caractérise par de plus faibles valeurs, (cf. fig. 63).

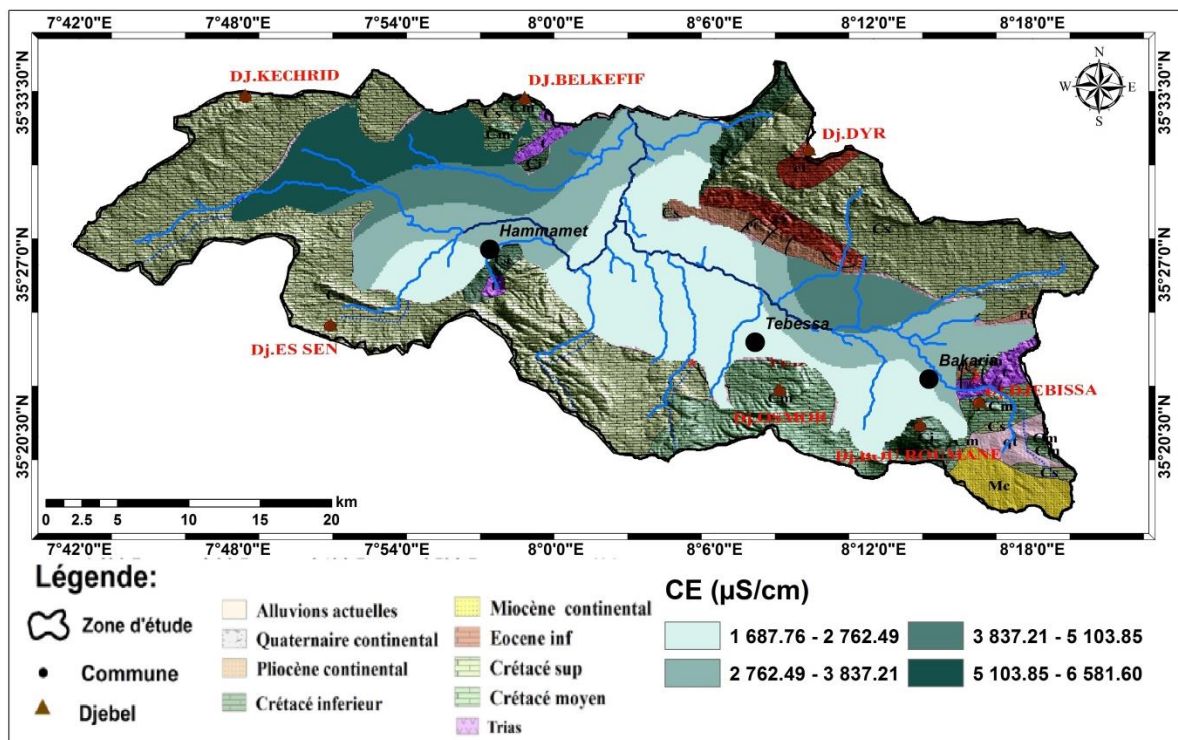


Fig. 63 : Carte de répartition de la conductivité. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

I – 1 – 3 – 2 – Les paramètres chimiques

I – 1 – 3 – 2 – 1 – Les éléments chimiques majeurs

I – 1 – 3 – 2 – 1 – 1– Les cations

Les différentes méthodes d’analyse utilisées visent beaucoup plus de déceler, les éléments chimiques majeurs dont :

- ✓  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  comme cations ;
- ✓  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $NO_3^-$  comme anions.

Elles avaient pour objectif la détermination des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale.

a – Le calcium ( $Ca^{++}$ )

L’ion  $Ca^{++}$ , a deux origines naturelles probables, la dissolution des formations carbonatées et/ou des formations gypsifères.

La concentration moyenne en cet élément atteint les  $258mg/l$ . Les teneurs augmentent du centre ( $190$  à  $260mg/l$ ) vers les bordures de la plaine ( $459$  à  $793mg/l$ ).

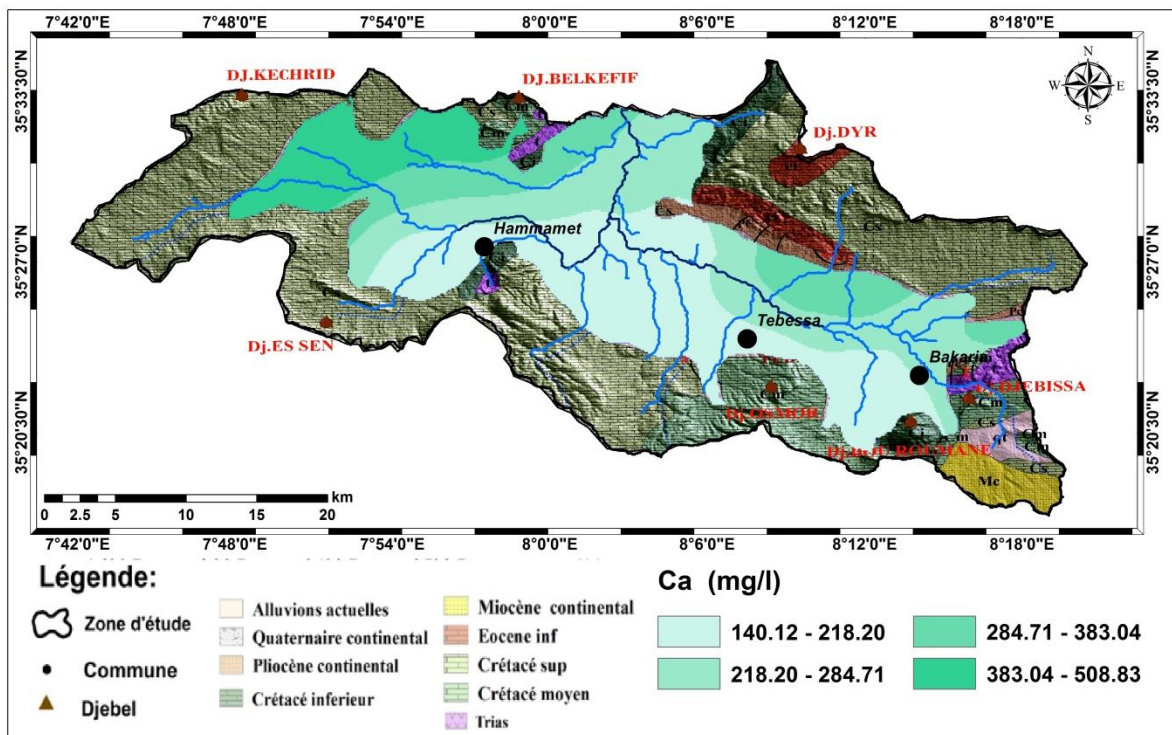


Fig. 64 : Carte de répartition des concentrations en  $Ca^{++}$ . Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

Ainsi, les eaux des ouvrages avoisinant les formations carbonatées (la limite nord et nord-est) ont des teneurs de l'ordre de 400 à 500mg/l et ceux limitrophes des formations gypsifères (bordures nord-ouest) touchent les 800mg/l (le cas du P<sub>92</sub> et P<sub>117</sub>).

L'écart entre les valeurs extrêmes est relativement important ce qui traduit une grande variation des teneurs en ion Ca<sup>++</sup>, qui provient de deux origines naturelles différentes, soit la dissolution des formations carbonatées ou des formations gypsifères.

**b – Le magnésium Mg<sup>++</sup>**

Le magnésium est issu de la dissolution des formations dolomitiques (formations carbonatées riches en magnésium) et accompagne souvent le calcium.

La moyenne de la concentration en Mg<sup>++</sup> tourne autour des 86mg/l, ce qui laisse dire que plus de 77% des eaux de puits dépassent la norme recommandée (50mg/l).

C'est surtout en bordures que les fortes concentrations sont observables (240 à 180mg/l), suite à la dilution des calcaires dolomitiques. Au cœur de la plaine par contre, que ce soit à Bekkaria, à Tébessa ou à Hammamet, ces teneurs sont vues à la baisse, ne dépassant même pas les normes (15 à 40mg/l).

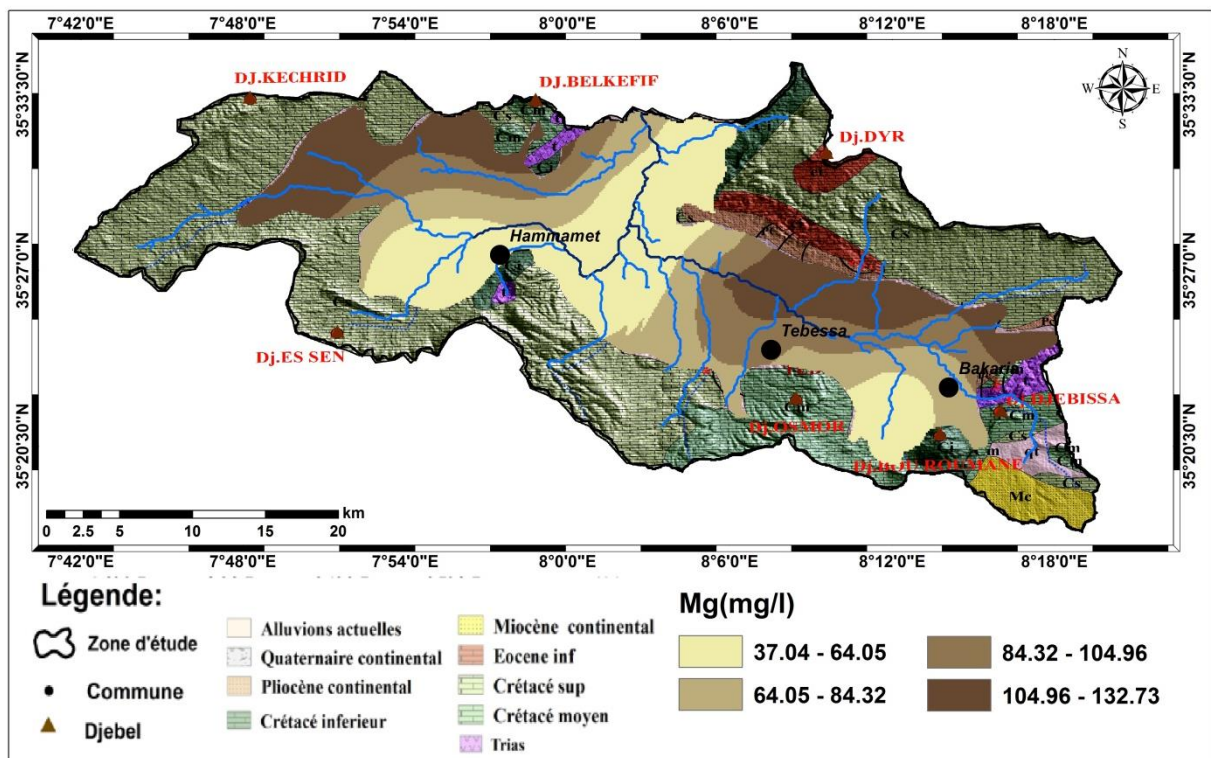


Fig. 65 : Carte de répartition des concentrations en Mg<sup>++</sup>. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

### c – Le sodium $Na^+$

Le sodium se rencontre toujours associé à d'autres éléments chimiques (chlorures, sulfates ...) et il est donc rare qu'il soit isolé.

Il trouve son origine, soit des eaux marines (obtenue par l'évaporation progressive des marais salants), du sel gemme (chlorure de sodium), des formations marneuses et gypsifères (la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium) ou tout simplement d'un usage industriel.

La moyenne de la concentration en sodium est d'environ  $373\text{mg/l}$  et par conséquent 60% des eaux de puits ont des teneurs supérieures à la norme ( $150\text{mg/l}$ ).

Les plus élevées d'entre elles caractérisent les puits situés à l'extrême Est ( $500$  à  $600\text{mg/l}$ ) à *Bekkaria* (formations triasiques de *Dj. Djebissa*), au Nord-est ( $400$  à  $700\text{mg/l}$ ) probablement à cause des lentilles d'argile et de marne, ( $1025\text{mg/l}$ ) au Nord (formations évaporitiques de *Dj. Belkefif*) et au Nord-ouest ( $1000$  à  $1400\text{mg/l}$ ) présence de marnes cénomaniennes.

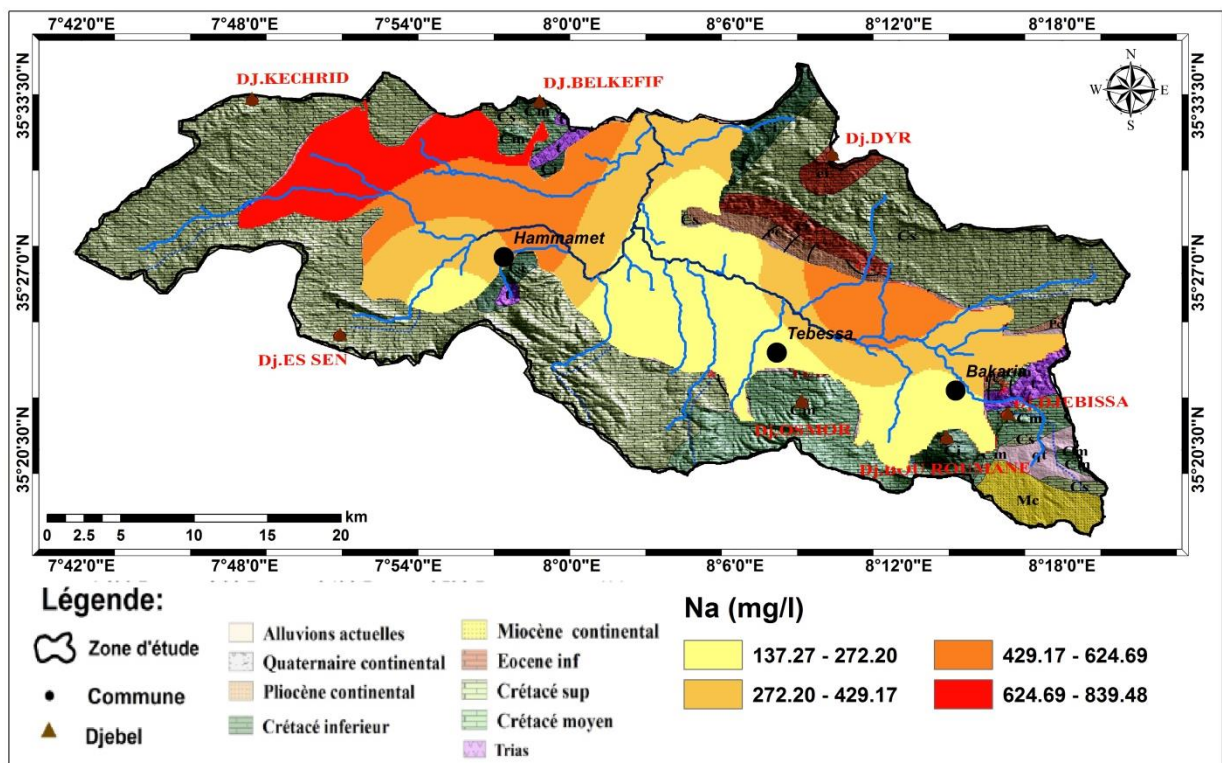


Fig. 66 : Carte de répartition des concentrations en  $Na^{++}$ . Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

On note que ces concentrations diminuent tout en allant vers le cœur de la plaine (de  $30$  à  $140\text{mg/l}$ ), ce qui se traduit par le phénomène d'échange de base ; les eaux de bordures, initialement riches en sodium, libèrent le  $Na^+$  et récupèrent le calcium contenu dans le sol.



Fig. 67 : Photographies montrant l'épaisseur des marnes. Plaine de Tébessa.

I – 1 – 3 – 2 – 1 – 2 – Les anions

a – Les chlorures  $Cl^-$

Les chlorures sont caractérisés par leur grande mobilité et ont la particularité de ne pas se combiner facilement aux autres éléments, comme ils ne sont pas adsorbés par les formations géologiques. Loin de la mer, leur présence est un bon indicateur de pollution.

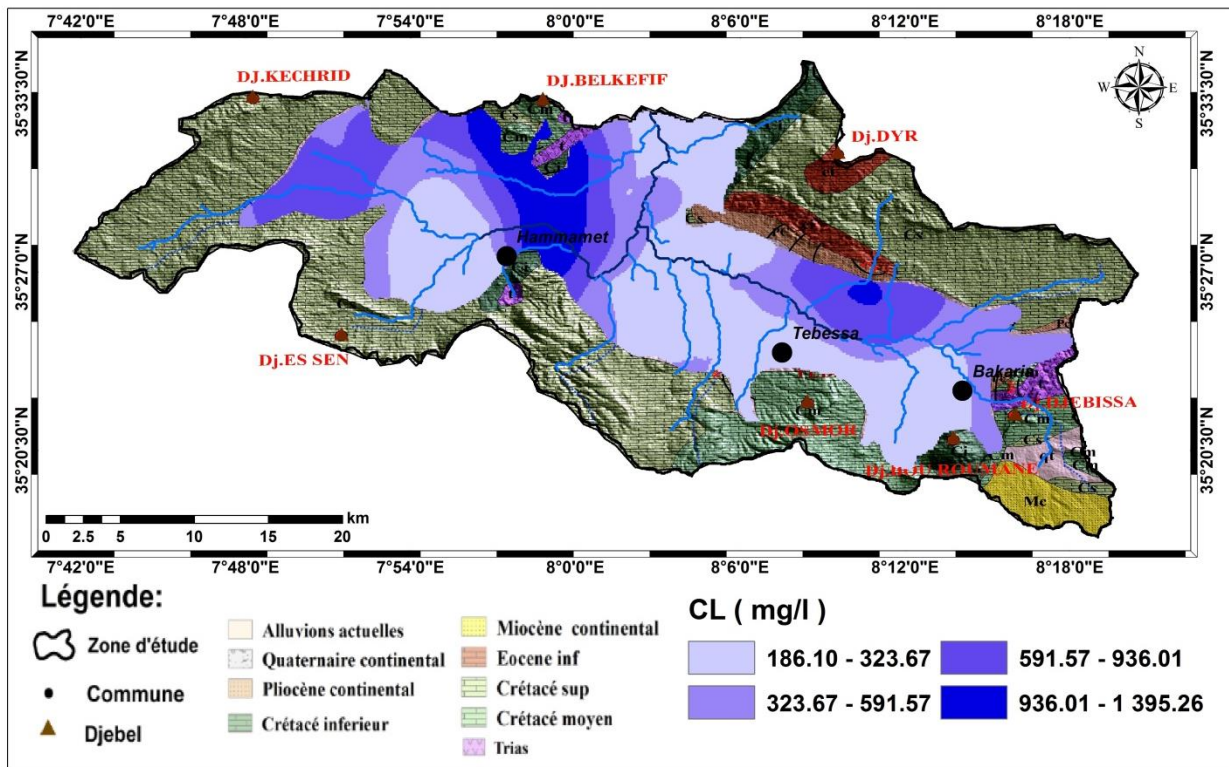


Fig. 68 : Carte de répartition des concentrations en  $Cl^-$ . Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

Beaucoup de puits (53 % des puits) ont donné des teneurs en  $Cl^-$  qui dépassent la norme (fixée par l'OMS à 250 mg/l).

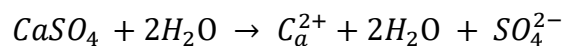
La région de *Dj. Belkefif* se caractérise par des teneurs très élevées (2025mg/l au  $P_{92}$  et 1850mg/l au  $P_{98}$ ), suite à la dissolution des formations évaporitiques. Au Nord-ouest, ces teneurs diminuent mais restent au-delà des normes (1850mg/l au  $P_{117}$  et 800mg/l au  $P_{115}$ ) ; présence de marnes.

Au Sud-est, on rencontre encore des concentrations importantes (1000mg/l au  $P_{44}$  et 950mg/l au  $P_{52}$ ) suite à l'influence des formations argileuses et marneuses. À *Bekkaria*, ces valeurs varient de (300 à 800mg/l) à cause des formations évaporitiques de *Dj. Djebissa*.

Le centre de la plaine se caractérise par des concentrations relativement faibles.

### b – Les sulfates $SO_4^{2-}$

La présence des sulfates dans l'eau est générée par la dissolution des formations gypsifères conformément au processus suivant :



À l'échelle de notre plaine, cet ion tire son origine de la dissolution du gypse contenu dans les marnes cénomaniennes et du lessivage des dépôts évaporitiques.

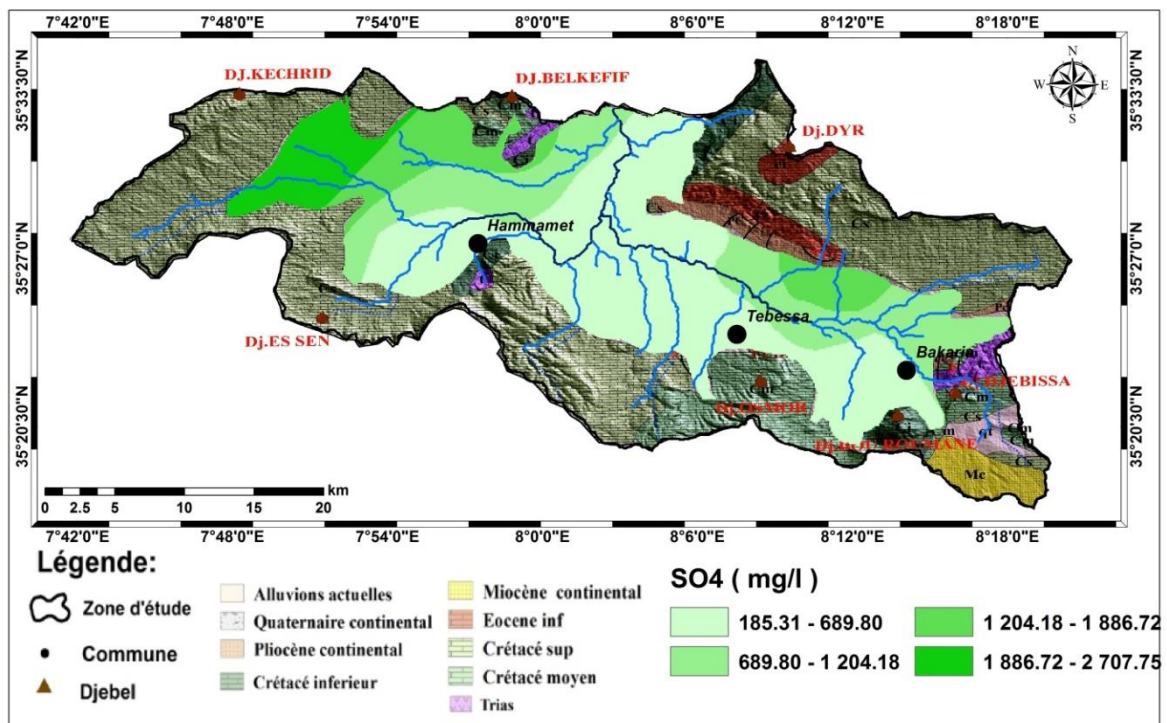


Fig. 69 : Carte de répartition des concentrations en  $SO_4^{2-}$ . Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

À proximité des bordures Est, la présence des formations gypsifères de *Dj. Djebissa*, sont à l'origine de l'augmentation des teneurs en  $SO_4^{2-}$  (800mg/l au  $P_{16}$  et 1800mg/l au  $P_{13}$ ).

Au Nord-est aussi, on enregistre 1450mg/l au P<sub>44</sub> et 1940mg/l au P<sub>52</sub> et ce, à cause de la présence des argiles et des marnes.

Ces teneurs sont vues à la hausse notamment du côté de Dj. Belkefif (3300mg/l au P<sub>92</sub> et 2160mg/l au P<sub>117</sub>) en faveur des gypses et au Nord-ouest (3160mg/l au P<sub>115</sub> et 3820mg/l au P<sub>114</sub>).

**e – Les bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>**

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées selon la réaction suivante :



La concentration en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de l'ensemble des puits de la plaine (63%) dépasse la norme (250mg/l), quoi qu'elle soit légèrement supérieure dans la plus part d'entre eux.

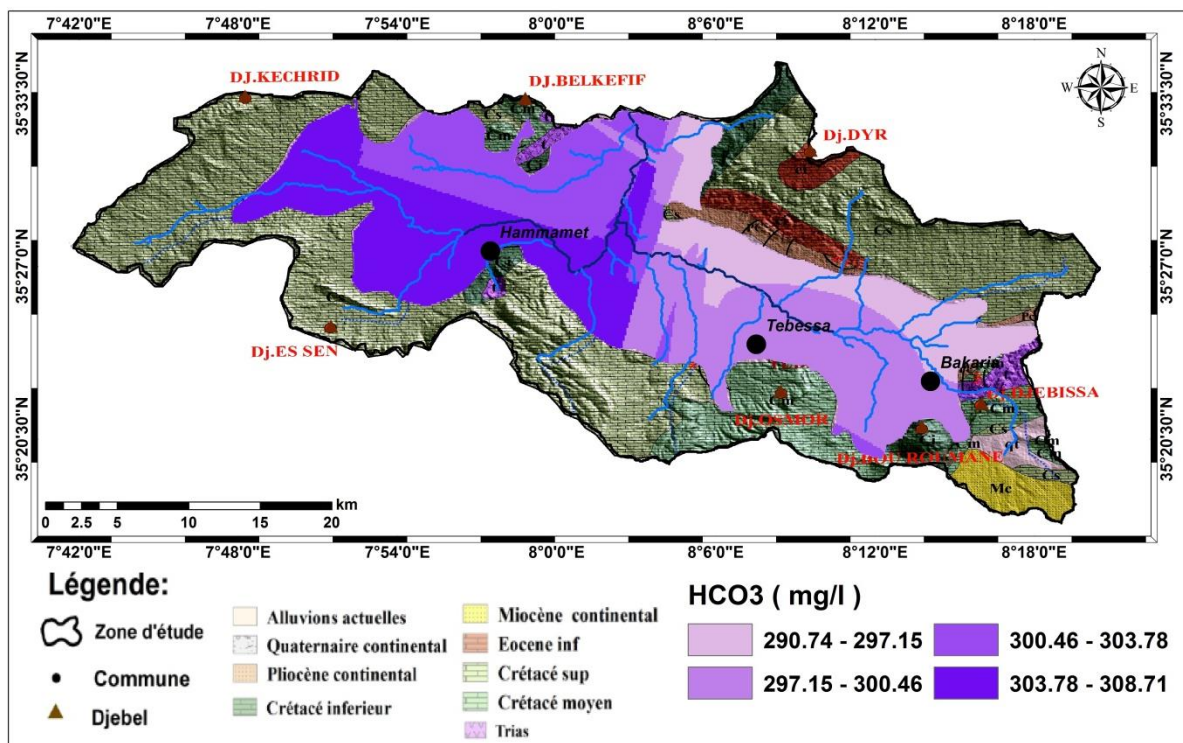


Fig. 70 : Carte de répartition des concentrations en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

Les fortes teneurs sont enregistrées au niveau des bordures, de 400 à 900mg/l à l'Est (Bekkaria), suite à la dissolution des formations carbonatées de Dj. Bourommane, à Hammamet, de 300 à 400mg/l (P<sub>97</sub>, P<sub>98</sub>), à cause des formations toujours carbonatées de Dj. Bouziane et Dj. Stah.



Le centre de la plaine se caractérise lui aussi par des concentrations importantes en  $HCO_3^-$  (entre 250 et 500mg/l), après enrichissement des eaux par les calcaires des bordures, notamment sud (*Dj. Doukkane, Ozmor*) et nord (*Dj. Boulhef*). Ceci confirme que la plaine est alimentée par les bordures.

### I – 1 – 3 – 2 – Représentations graphiques et identification des principaux faciès

Les faciès hydrochimiques sont le plus fréquemment utilisés dans le domaine de l'hydrogéologie pour mieux connaître l'aspect qualitatif des eaux naturelles et surtout son évolution spatio-temporelle et décrire leur composition sommairement (*Jaekli 1970*).

Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser certaines méthodes, plus commodes, telles que les représentations graphiques en diagrammes (*Schoeller-Berkalof, Piper, Stiff...etc*) et ce, pour mettre en relief les particularités de ces eaux.

Les analyses des échantillons prélevés ont été effectuées aux services du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (*ANRH*). Les résultats d'analyse ont été représentés, selon les diagrammes suscités, comme suit :

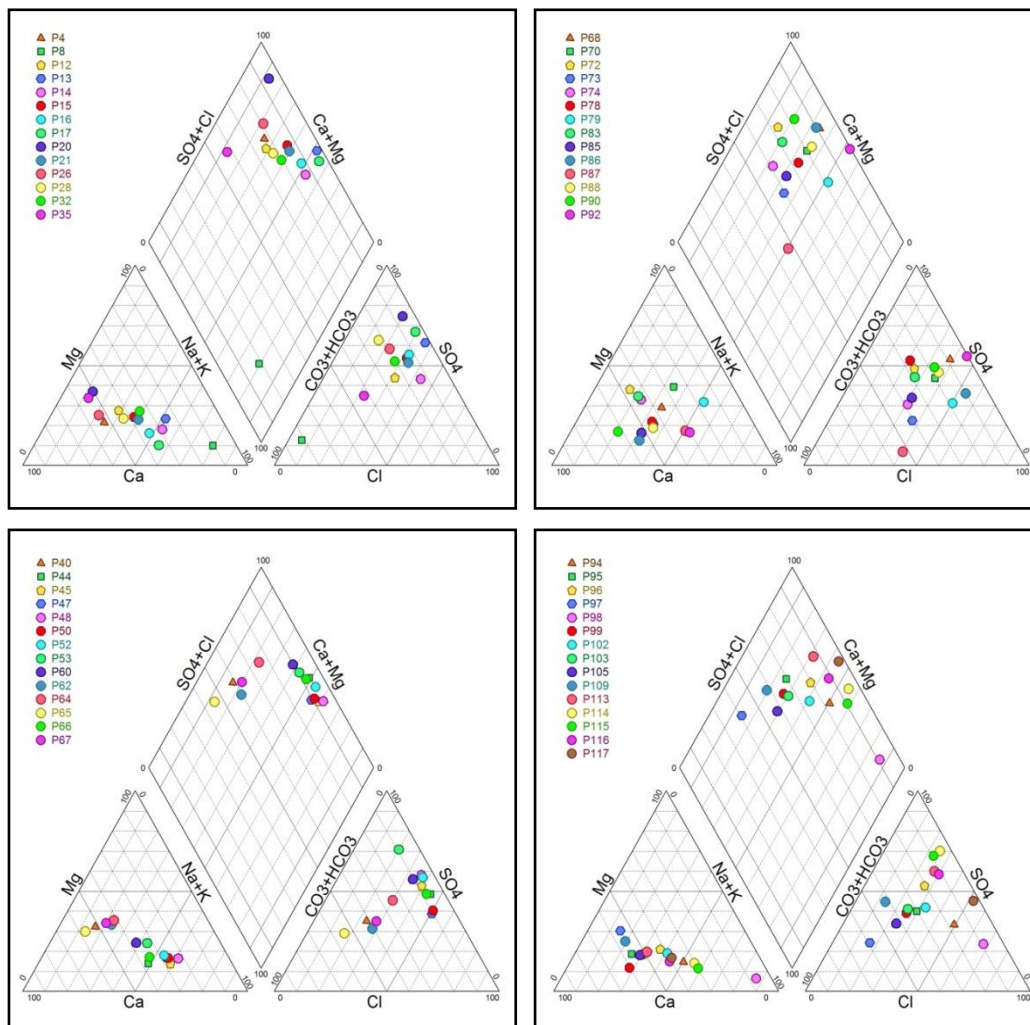
#### I – 1 – 3 – 2 – 1 – Représentation selon le diagramme de *Piper*

Ce diagramme est composé de deux triangles, (permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique) et d'un losange (synthétisant le faciès global), à l'aide duquel il est possible de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément.

Les nuages de points concentrés dans un pôle, représentent la combinaison des éléments cationiques et anioniques pour les différents échantillons.

Suite aux diverses formules caractéristiques et représentations graphiques, les faciès dominants des eaux souterraines de la région sont :

- ✓ Le sulfaté-calcique, qui se répand sur tout le bassin ;
- ✓ Le sulfaté-sodique qui se répartit surtout à l'Est (*Bekkaria*) et au Nord-ouest (*Belkefif* et extrême Nord de *Hammamet*) ;
- ✓ Le bicarbonaté-calcique ; à proximité des formations carbonatées (*Dj. Bourommane* à l'Est et *Dj. Es 'Sen* au Sud-ouest).



**Fig. 71 : Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de Piper. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).**

### I – 1 – 3 – 2 – 2 – Représentation selon le diagramme de *Schoeller-Berkaloff*

Ce type de représentation, établie par *Schoeller* et repris par *Berkaloff*, porte sur un papier semi logarithmique les quantités en réactions des anions et des cations sur l'axe des ordonnées et sur les abscisses les éléments chimiques, à pas régulier, et ceci pour chaque point d'eau de prélèvement.

Plusieurs analyses chimiques peuvent être représentées en même temps, sur ce type de diagramme et chaque échantillon est matérialisé par une ligne brisée.

La concentration de chaque élément chimique est reportée sur une ligne verticale, en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent ceci indique un changement de faciès chimique.

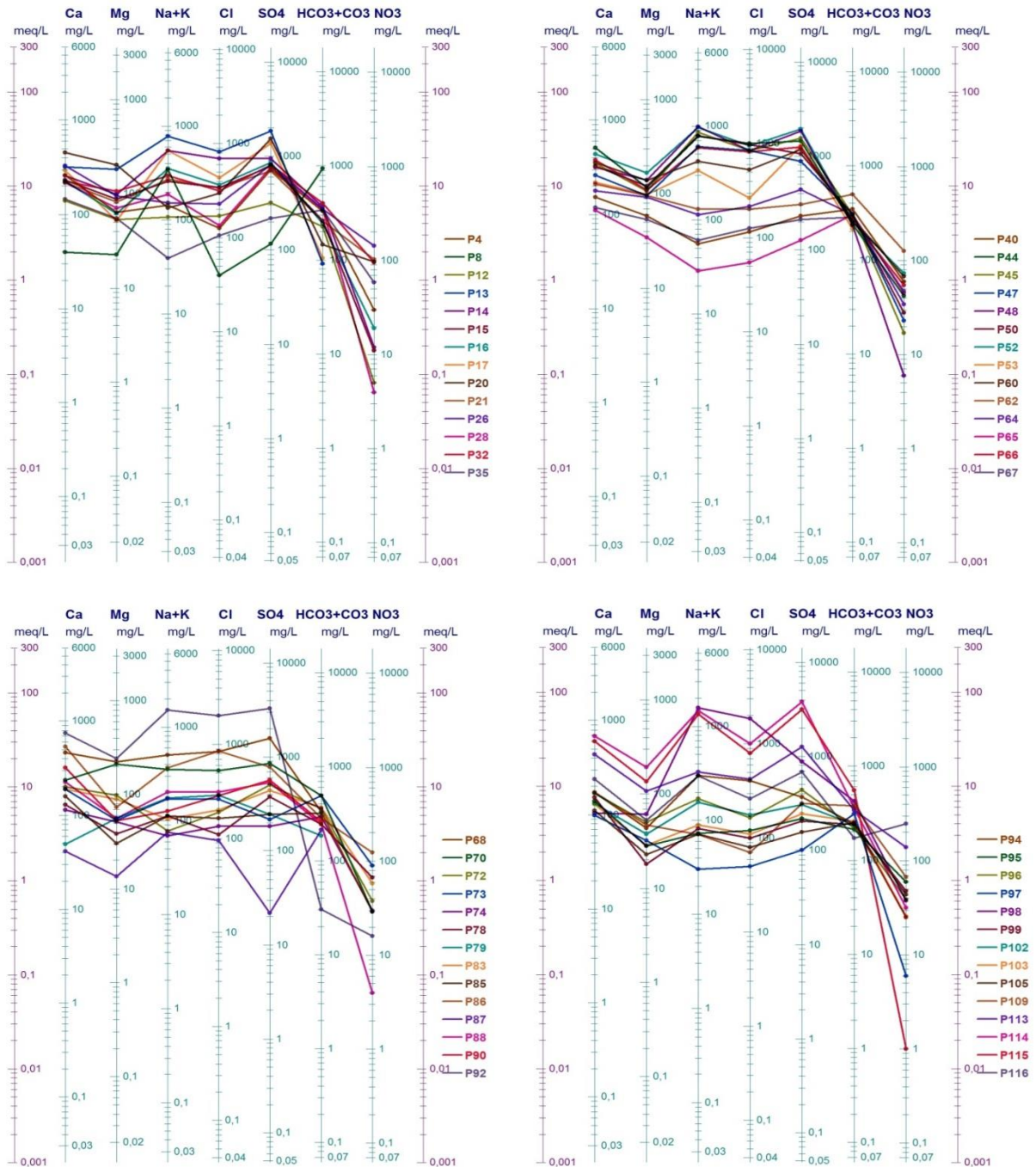


Fig. 72 : Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

Les principaux faciès hydrochimiques des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tébessa, que nous avons obtenus selon cette représentation, sont récapitulés, avec leurs pourcentages, au tableau suivant (Tab. 24) :

Tableau N° 24 : Faciès chimiques dominants des eaux souterraines de la plaine de Tébessa.

Compagne	Faciès chimiques (%)				
	Sulfaté calcique	Sulfaté sodique	Bicarbonaté calcique	Bicarbonaté sodique	Chloruré sodique
Décembre 2018	42.82	37.5	12.5	3.57	3.75

### I – 1 – 3 – 3 – Cartographie hydrochimique

Suite aux diverses formules caractéristiques et représentations graphiques, les faciès dominants des eaux souterraines de la région sont, le sulfaté-calcique, le sulfaté-sodique, le bicarbonaté-sodique, le bicarbonaté-calcique et le chloruré-sodique (cf. Fig. 73).

La répartition des différents faciès dépend de la lithologie et de l'hydrodynamisme de la nappe (du système aquifère).

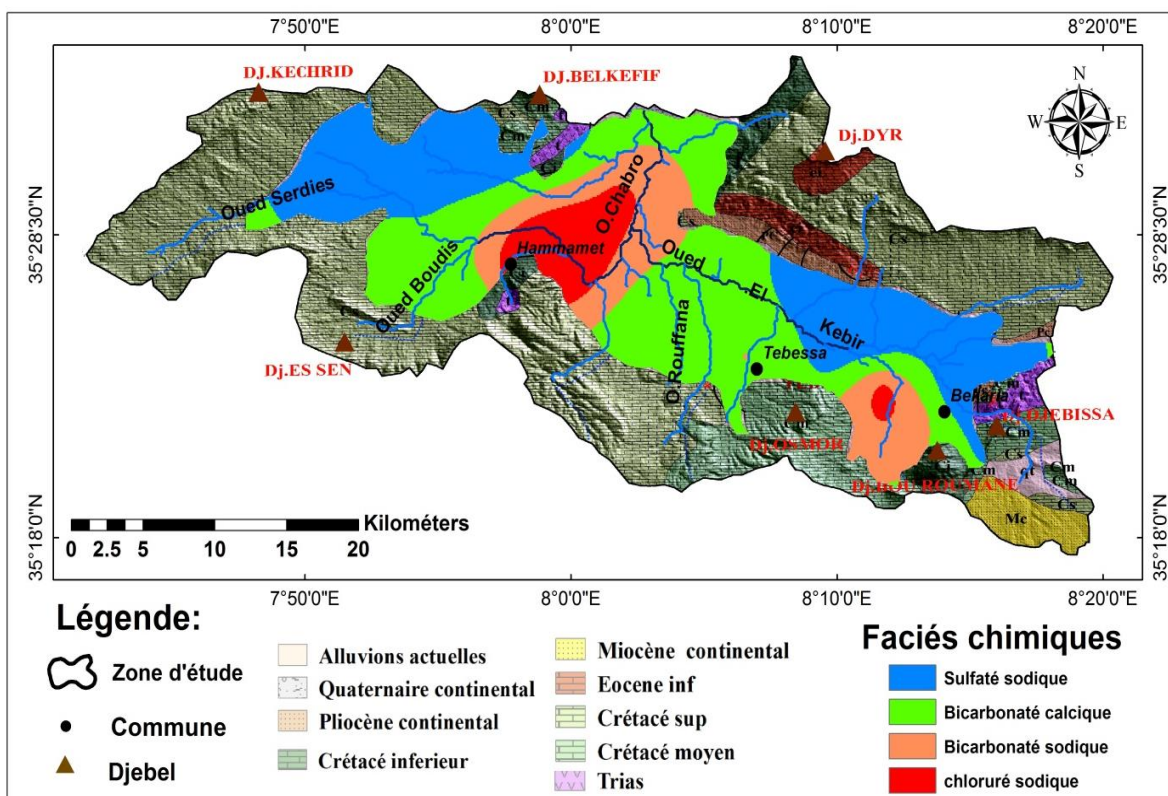


Fig. 73 : Représentation cartographique des faciès hydrochimiques des eaux de puits (Plaine de Tébessa).

## II – Les eaux de la plaine de Tébessa et leur habitude pour l'irrigation

### II – 1 – Introduction

Une irrigation de cultures ou d'espaces verts qui met en œuvre une eau quelconque n'est pas une opération négligeable. En effet, les eaux peuvent véhiculer des pollutions qui peuvent être génératrices de tant de problèmes, entre autres, menace à la santé publique, la conservation des sols, la protection de l'environnement et des écosystèmes, qui ne doivent être ni sous-estimés ni exagérés.

L'approche interdisciplinaire a été incontournable, car la problématique est marquée par la multitude de chemins et liens à risque entre eaux polluées, sol, végétaux, exploitants, revendeurs, traiteurs, consommateurs, ménages,...etc.

La région de Tébessa connaît une relance agricole, ce qui sous-entend, faire appel à des systèmes de fertirrigation et de traitements phytosanitaires, et d'avantage d'eau.

Comme tout le pays d'ailleurs, depuis les dernières décades, une sécheresse accrue plane sur les lieux, accompagnée d'une action physique préoccupante ; l'évapotranspiration.

La conjugaison de toutes ces contraintes peut nuire quant au devenir des eaux de la plaine, et par conséquent non seulement leur qualité sera mise en cause, suite aux dégradations perpétuelles et aux modifications de leur taux de salinité, mais aussi leur quantité ; par épuisement continu.

Il est à cet effet, impératif d'étudier leur comportement quant à leur emploi agricole, par le biais de différentes méthodes.

### II – 2 – Le risque de salinité

Le principal critère d'évaluation de la qualité d'une eau naturelle, dans la perspective d'un projet d'irrigation, est sa concentration totale en sels solubles. On considère deux catégories de conséquences d'une salinité excessive de l'eau d'irrigation :

- ✓ Les dommages vis-à-vis du sol et donc, indirectement, à l'égard des rendements cultureux.
- ✓ Les pertes causées aux cultures.

#### II – 2 – 1 – La salinisation

L'eau est prélevée du sol sous l'action conjuguée des plantes et de l'évaporation. Une large part de sels apportés lors des irrigations y sera alors abandonnée ; ce qui conduit à l'augmentation de la salinité de l'eau du sol.

La pression osmotique de cette dernière croît avec sa concentration en sels dissous, la plante consacre alors l'essentiel de son énergie non pas à se développer, mais à ajuster la concentration en sel de son tissu végétal de manière à pouvoir extraire du sol l'eau qui lui est indispensable.

En 1969, Richards a établi une échelle de qualité des eaux d'irrigation, en fonction de leur salinité, évaluée par leur conductivité électrique.

Tableau N° 25 : Classe de qualité de salure de l'eau d'irrigation (Richards, 1969 in J. Perigaud, 1977).

Qualité de l'eau	Conductivité électrique (mmhos/cm)	Sels solubles correspondants estimés en NaCl (mg/l)
I. Excellente.	< 0,25	< 160
II. Faible salinité.	0,25 ÷ 0,75	160 ÷ 500
III. Forte salinité.	0,75 ÷ 2,25	500 ÷ 1 500
IV. Très forte salinité.	2,25 ÷ 5	1 500 ÷ 3 600

En dessous de  $700\mu\text{s/cm}$ , il n'y a pratiquement pas de culture dont le rendement soit affecté par la salinité. Entre  $700$  et  $3\ 000\mu\text{s/cm}$ , le maintien des rendements est encore possible avec des méthodes culturales adéquates.

Quand une tendance à l'enrichissement en sels de la solution du sol menace les rendements culturels, elle doit être compensée par des irrigations supérieures aux besoins en eau de la culture, pour entraîner la solution du sol excessivement enrichie en ions en dessous de la zone racinaire.

Le choix du mode d'irrigation doit tenir compte de la qualité de l'eau. La méthode à la raie est fortement déconseillée, celle par submersion ou localisée, offrent au contraire de bons résultats.

### II – 2 – 1 – a – Origine de la salinité

Les échantillons d'eau souterraine ont été reportés sur un diagramme  $CT$  par rapport à  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  pour montrer les différents types d'eau dans la zone d'étude, comme le montre la (Figure 74).

Cependant, les différents échantillons d'eau ont été classés en fonction de leur composition chimique à l'aide du diagramme de Piper (Piper, 1944).

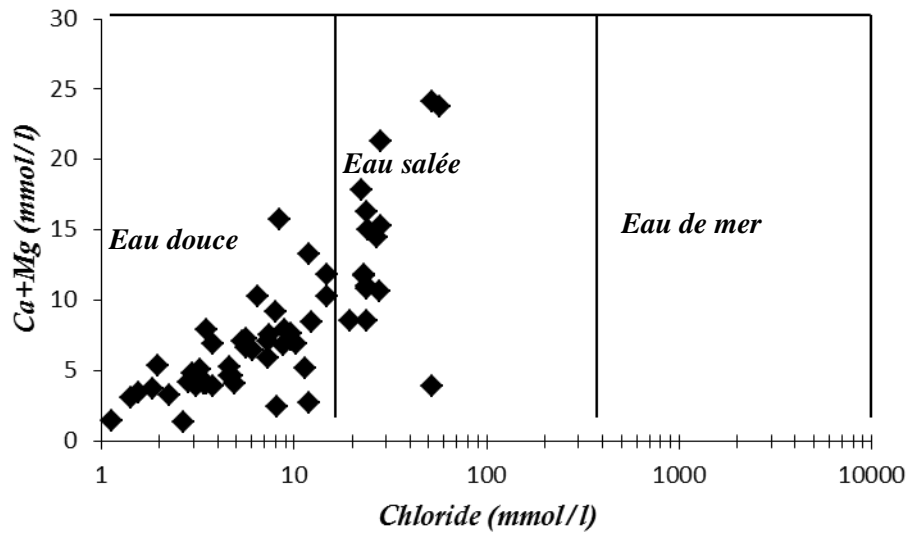


Fig. 74 : Cl contre  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  en mmol/L pour les échantillons d'eaux souterraines. (D'après Uzukpumwa 1981).

Cette classification est basée sur la concentration des quatre principaux anions (bicarbonate, sulfate, chlorure et nitrate) et sur les quatre principaux cations (sodium, potassium, calcium et magnésium). Afin de déterminer les différents types de faciès chimiques, qui sont de type sulfaté-calcique (qui se répand sur tout le bassin), le sulfaté-sodique (qui se répartit surtout à l'Est – *Bekkaria*) et au Nord-ouest (*Belkefif* et extrême Nord de *Hammamet*) où les formations évaporitiques sont prédominantes.

Le résultat est indiqué par une augmentation rapide des concentrations en sodium, en sulfates et en chlorures dans l'aquifère. En suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines, l'eau change de composition chimique et devient plus saline. La concentration élevée en sodium indiquant généralement le processus d'échange de cations et à un degré moindre, le bicarbonaté-calcique (à proximité des formations carbonatées – *Dj. Bourommane* à l'Est et *Dj. Es'Sen* au Sud-ouest) avec une faible concentration en salinité.

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté les éléments majeurs en fonction des chlorures (Figure 75). Ce dernier est un élément conservé ; ne participant pas aux interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité des eaux et constitue un traceur de mélange.

La disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée (eau de pluie-eau de mer) peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange.

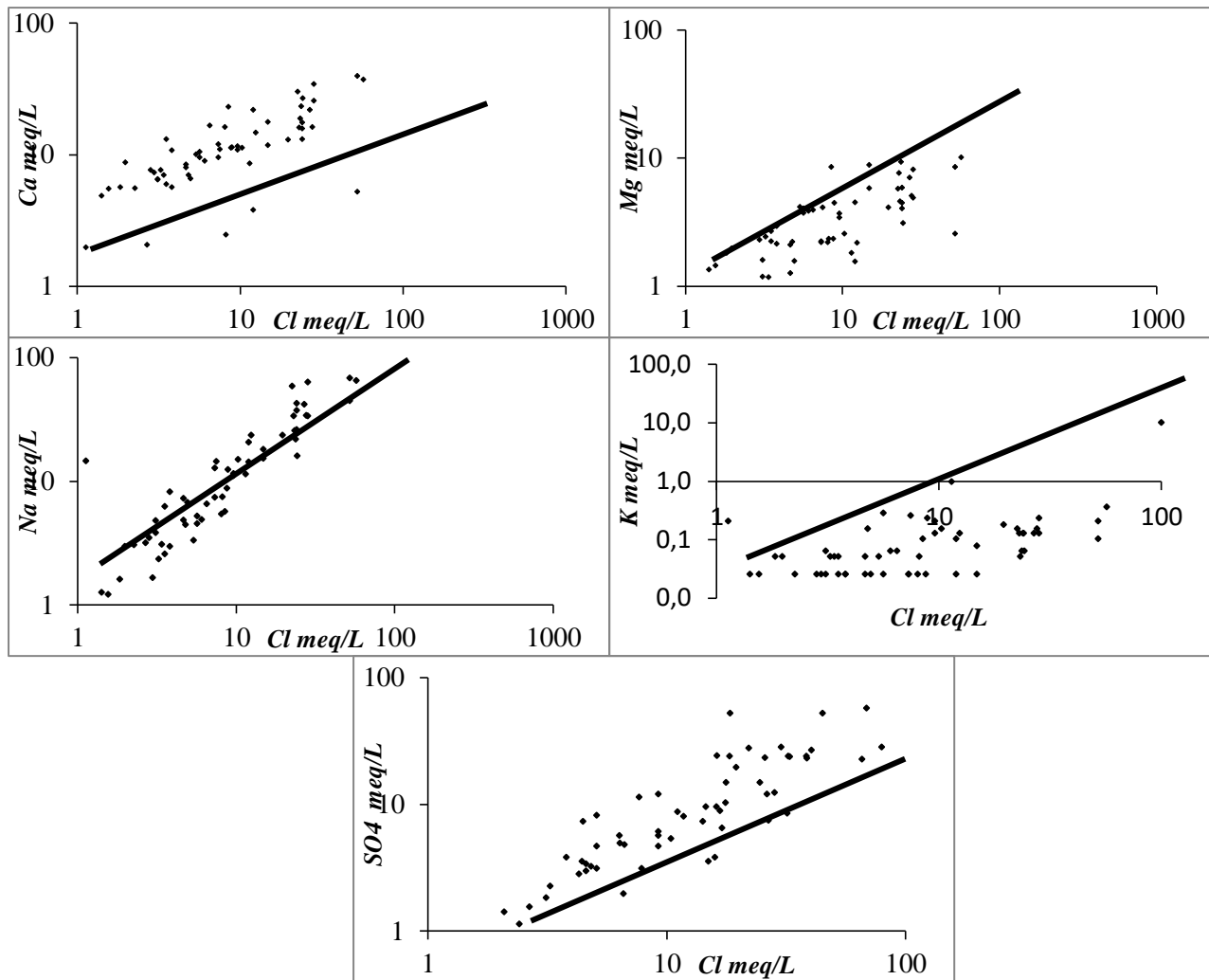


Fig. 75 : Relation entre Ca, Mg, Na, K, Sr,  $SO_4$  et le Cl des eaux souterraines et l'eau de pluie – eau de mer.

Les échantillons d'eaux souterraines, prélevés des différents points, montrent en général un enrichissement en  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ , et  $SO_4^{2-}$  et un appauvrissement en  $Mg^{2+}$ .

Les réactions majeurs reconnues comme responsables d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments dans les eaux souterraines sont l'échange  $Ca^{2+} - Mg^{2+}$  (dû à l'interaction eau-roches carbonatées), l'échange de base  $Na^+ - Ca^{2+}$  ou  $Na^+ - Mg^{2+}$  (la réduction ou la dissolution des sulfates).

Dans un environnement carbonaté, l'enrichissement simultané en  $Ca^{2+}$  et l'appauvrissement en  $Mg^{2+}$  est expliqué surtout par le phénomène d'interaction eau – roche comme la dolomitisation, dissolution et précipitation.

La réaction d'échange  $Ca^{2+} - Mg^{2+}$  par dolomitisation a été signalée comme cause principale de diminution du rapport Mg/Ca dans les eaux des aquifères carbonatés. Cette diminution est progressive selon l'âge croissant des terrains aquifères, contrôlée par l'équilibre entre calcite et dolomite et fortement dépendante de la température.



La réaction des sulfates favorise la dissolution des minéraux carbonatés, ceci pourrait changer d'avantage le rapport  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ . La faisabilité des échanges de base de  $Na^+ - Ca^{2+}$  ou  $Na^+ - Mg^{2+}$  a été démontrée sur des roches carbonatées, par des expériences au laboratoire. Il a été démontré qu'un faible pourcentage d'argile dans les roches carbonatées pourrait aboutir à des changements appréciables des concentrations en  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  dans les eaux salées par échange de base.

La relation entre  $Mg^{2+}$  et  $Cl^-$  montre un appauvrissement en  $Mg^{2+}$  des échantillons d'eau analysés par rapport à la droite de mélange. Cet appauvrissement peut-être dû à l'absence des formations dolomitiques.

La relation entre  $SO_4^{2-}$  et  $Cl^-$  montre que la quasi-totalité des points se trouvent au-dessus de la droite de mélange eau douce – eau salée à l'exception de quelques points qui se trouvent en dessous de cette droite.

L'enrichissement des points en sulfates est lié à la présence des évaporites sur les limites et/ou à une contamination d'origine agricole. Dans cette région l'infiltration des eaux d'irrigation et pluviométrique chargées en sels et fertilisants (les sulfates constituent l'un des principaux composants des fertilisants utilisés dans la région) se trouve facilité par la faible profondeur de la nappe et la bonne perméabilité des terrains aquifères (alluvions,  $10^{-3}$  m/s).

Le graphe  $Cl^-$  contre  $Na^+$  montre que la majorité des points se trouvent en dessous de la droite de mélange. Étant donné que la teneur en  $Na^+$  devrait équilibrer la teneur en  $Cl^-$ , le déficit en  $Na^+$  est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère et se traduisant par une adsorption de  $Na^+$  et une libération de  $Ca^{2+}$ .

La relation entre le  $Ca^{2+}$  et le  $Cl^-$  illustre bien ceci en montrant que les points sont souvent au-dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée.

La relation entre le  $K^+$  et le  $Cl^-$  indique que la majorité des points se trouve en-dessous de la droite de mélange traduisant un appauvrissement en  $K^+$ .

## II – 2 – 2 – La sodisation

L'accumulation de sodium sur le complexe adsorbant des sols peut dégrader leurs propriétés physiques, leur capacité de drainage et donc leur perméabilité conditionne la productivité des terres irriguées.

Un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux dans le complexe adsorbant provoque une défloculation des argiles, une destruction du sol qui se traduit par une réduction de la perméabilité et de la porosité des couches superficielles de ce dernier.

L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines, autrement dit, les colloïdes du sol fixent le sodium, qui exerce une action nuisible indirecte sur la végétation et affaiblit les caractéristiques physiques du sol qui devient, par conséquent compact et asphyxiant.

D'autre part, à proportions égales de sodium et d'alcalino-terreux dans la solution, la tendance à la sodisation du sol est d'autant plus forte que la concentration en cations totaux dans la solution est plus élevée.

Ainsi, les risques de sodisation relatifs à une eau d'irrigation sont caractérisés par deux paramètres :

- ✓ Le sodium adsorption ratio (*SAR*), qui rend compte du rapport entre les concentrations en sodium et en alcalino-terreux ;
- ✓ La conductivité électrique de l'eau appliquée.

Le *SAR* défini comme étant égal à :

$$\frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{++} + Mg^{++})}{2}}}, (Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}, \text{étant exprimés en } \text{még/l}).$$

Cette grandeur peut être ajustée pour mieux tenir compte du calcium susceptible de demeurer sur le sol après une opération d'irrigation.

L'*U.S. Salinity Laboratory* a proposé un diagramme qui, à partir des valeurs du *SAR* et de la conductivité, classe les eaux d'irrigation en fonction des risques de sodisation et de salinité (cf. Fig76) diagramme de wilcox).

## II – 2 – c – Type de sels

La concentration totale en sels dissous n'est pas en elle seule un facteur déterminant, la composition qualitative des sels constitutifs d'une eau, destinée pour une quelconque irrigation, doit être munie d'une attention particulière.

En effet, la présence de certains ions, même en faibles concentration, s'avère nuisible voire indésirable.

On cite entre autres :

- **Le Bore** qui est indispensable à la croissance des végétaux, mais à des concentrations faibles. Si au contraire, ces dernières excèdent 1mg/l, cet élément devient toxique pour les plantes les plus sensibles.

- **Le chlore et le sodium**, peuvent avoir, comme avancé plus haut, un impact sur le sol et sur la production végétale, vu le phénomène inhibitif qui s'y engendre, outre les autres dommages et ce, selon la pratique culturale et le mode d'irrigation.

## II – 2 – d – Facteurs déterminant l'usage agricole d'une eau

La description et la classification des eaux destinées à l'irrigation sont régies par plusieurs paramètres, que ces derniers agissent en action isolée ou combinés, notamment dans la détérioration des aptitudes de ces eaux.

En plus des éléments toxiques et la concentration totale en sels dissous (exprimée en termes de résidu sec et donc par la conductivité électrique), on cite aussi le paramètre de salinité potentielle, la concentration relative en sodium.

Le rapport de leurs actions dans la nature est exprimé aussi par des relations mathématiques :

- **La salinité totale**, est traduite en termes de minéralisation globale et exprimée en valeurs de conductivité électrique ( $CE$ ). Cette grandeur est proportionnelle aux valeurs du résidu sec ( $RS$ ). On peut l'exprimer par la relation suivante :

$$RS = 0.7CE \equiv mg/l \quad \text{et} \quad CE \equiv \mu S/cm.$$

Et à la pression osmotique( $\pi$ ) aussi tel que :

$$\pi = 3.6 \times 10^{-4} CE \equiv atm$$

- **La salinité potentielle**, est représentée par les anions sulfates et chlorures selon la relation de *Doneen (1961)* :

$$SP = Cl^- + \frac{1}{2} SO_4^{--} \equiv méq/l.$$

- **Le sodium adsorption ratio**, qui renseigne sur un éventuel rapport avec le calcium récalcitrant après irrigation, et sur la teneur en Na qui nuit à la perméabilité s'il est en excès et perturbe les cultures.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}. \quad \text{Avec} \quad Na^+, Ca^{++}, Mg^{++} \text{ en } méq/l.$$

- **Le pourcentage en sodium**

$$Na\% = \frac{100r(Na^+ + K^+)}{(Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+)} \quad \text{Où : } Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+, K^+ \text{ sont en méq/l.}$$

- **Le pourcentage d'échange de sodium**

$$ESP = \frac{100[-a + b(SAR)]}{1 + [-a + b(SAR)]}. \quad \text{Avec } a = 1.26 \times 10^{-2} \quad \text{et } b = 1,475 \cdot 10^{-2}.$$

## II – 3 – Aptitude des eaux à l'irrigation

### II – 3 – a – Classification des eaux par la méthode du S.A.R

C'est une échelle qui se compose de cinq classes, identifiant les eaux selon leurs qualités et leurs caractéristiques, et leur affectant en conséquence leur catégorie d'usage.

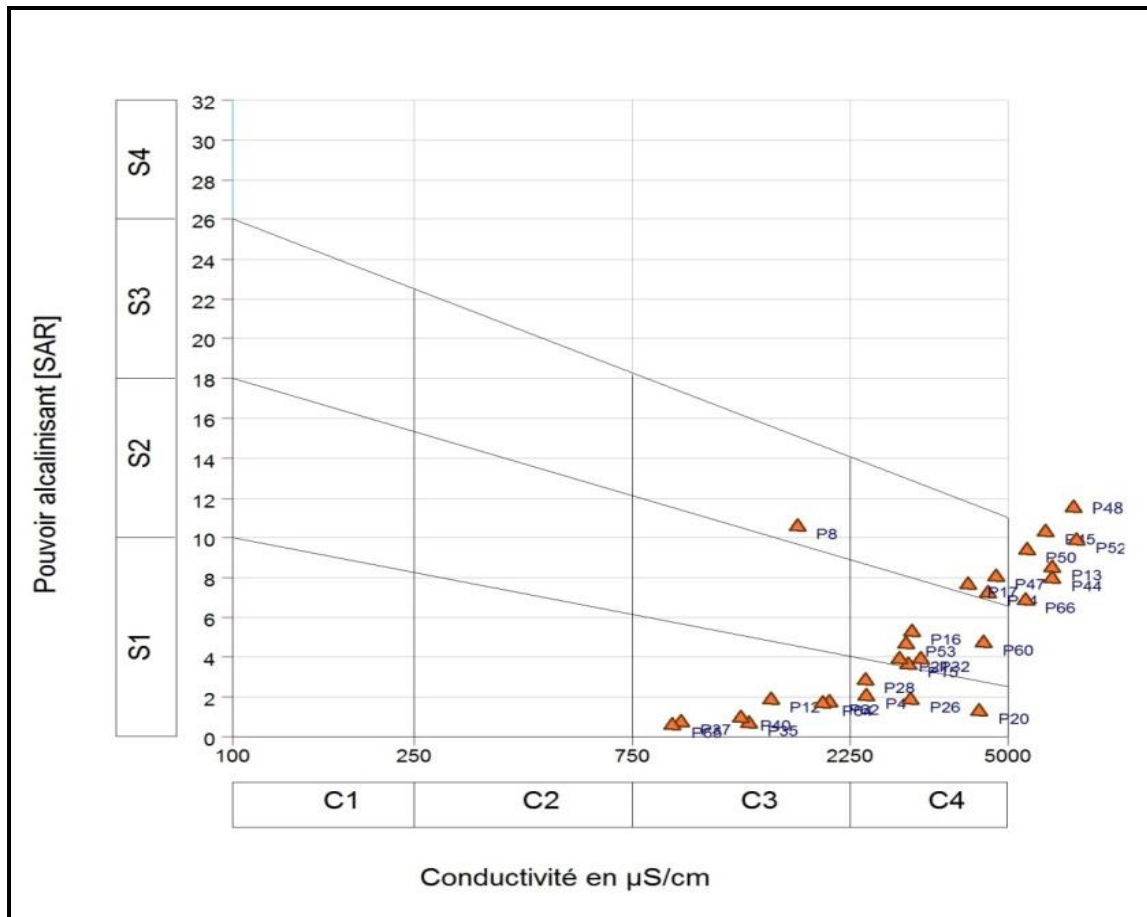
**Tableau N° 26 : Classification des eaux par la méthode du SAR et leur état d'utilisation.**

Degré	Qualité	Classe	État d'utilisation
1 <sup>er</sup>	Excellente	C <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	Eau à utilisation sans danger pour l'irrigation de la plus part des sols.
2 <sup>eme</sup>	Bonne	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub> C <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes en sels.
3 <sup>eme</sup>	Admissible	C <sub>2</sub> S <sub>3</sub> C <sub>3</sub> S <sub>1</sub> C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes en sels, sur des sols bien drainés cependant, l'évolution de la salinité doit être contrôlée.
4 <sup>eme</sup>	Médiocre	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub> C <sub>4</sub> S <sub>1</sub> C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	Eau fortement minéralisée, pouvant convenir en général, à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes en sels sur des sols bien drainés et lessivés.
5 <sup>eme</sup>	Mauvaise	C <sub>3</sub> S <sub>4</sub> C <sub>4</sub> S <sub>3</sub> C <sub>4</sub> S <sub>4</sub>	Eau ne convenant pas à l'irrigation, mais peuvent être utilisée sous certaines conditions ; sols très perméables, bon lessivage.

- **Le Diagramme de Wilcox**

Les valeurs des facteurs ainsi obtenues sont reportées sur des diagrammes, en combinaison avec la conductivité électrique, pour enfin aboutir à la fameuse classification cherchée, quant à l'usage agricole de l'eau en question, dans les diverses pratiques culturales.

Pour cette fin, nous utilisons le diagramme de *Wilcox*.



**Fig. 76 :** Représentation des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

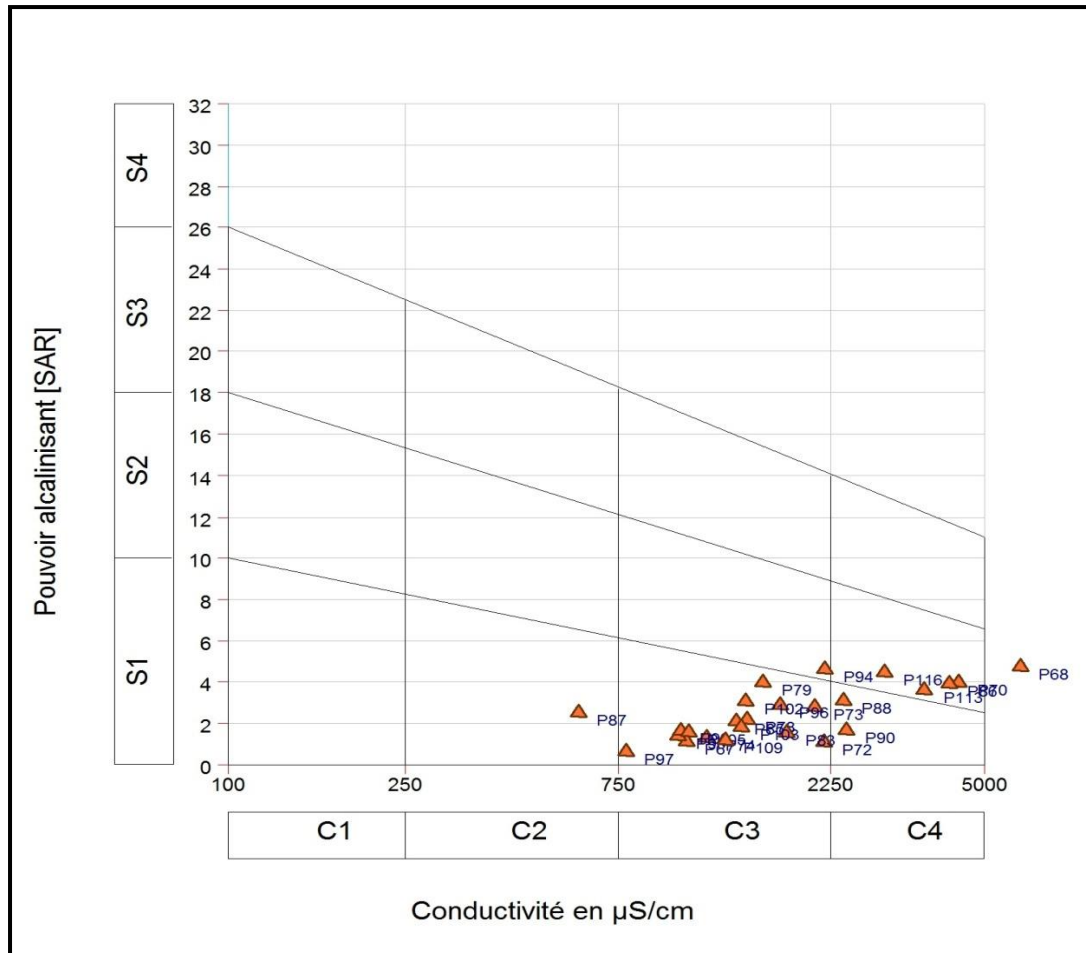


Fig. 77 : Représentation des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

L’observation de ce diagramme (Fig.77), fait ressortir pour notre région, les classes suivantes :

Tableau N° 27 : Classification des eaux par la méthode du SAR et leur état d’utilisation.

Qualité	Classe	Puits correspondants
Bonne	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	P <sub>87</sub>
Admissible	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	P <sub>12</sub> , P <sub>35</sub> , P <sub>37</sub> , P <sub>40</sub> , P <sub>62</sub> , P <sub>65</sub> , P <sub>67</sub> , P <sub>72</sub> , P <sub>73</sub> , P <sub>74</sub> , P <sub>78</sub> , P <sub>79</sub> , P <sub>83</sub> , P <sub>85</sub> , P <sub>92</sub> , P <sub>95</sub> , P <sub>96</sub> , P <sub>97</sub> , P <sub>99</sub> , P <sub>102</sub> , P <sub>103</sub> , P <sub>105</sub> , P <sub>109</sub> .
	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	P <sub>94</sub>
Médiocre	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	P <sub>8</sub>
	C <sub>4</sub> S <sub>1</sub>	P <sub>4</sub> , P <sub>20</sub> , P <sub>26</sub> , P <sub>28</sub> , P <sub>88</sub> , P <sub>90</sub> .
	C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	P <sub>15</sub> , P <sub>16</sub> , P <sub>21</sub> , P <sub>32</sub> , P <sub>53</sub> , P <sub>60</sub> , P <sub>70</sub> , P <sub>86</sub> , P <sub>113</sub> , P <sub>116</sub> .
Mauvaise	C <sub>4</sub> S <sub>3</sub>	P <sub>14</sub> , P <sub>17</sub> , P <sub>47</sub> .

Conformément à cette classification, les eaux de la plaine de Tébessa sont admissibles, et doivent par conséquent être utilisées en irrigation avec un contrôle de l'évolution de leur salinité et effectuer un drainage continu des sols.

Elles deviennent fortement voire excessivement minéralisées, leur qualité est donc médiocre à très mauvaise. Elles peuvent convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes en sels surtout que le sol le permet, notamment à l'Est (*Bekkaria*) et au centre (*Aïn Chabro*) où la perméabilité est bonne et le lessivage est important en période de crue.

### III – Analyse en Composantes Principales

La méthode d'analyse multidimensionnelle utilisée est l'analyse en composante principale (ACP).

"L'analyse en composantes principales (ACP) consiste à exprimer un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux, ces facteurs rendant compte d'une fraction de plus en plus faible de la variabilité des données.

Cette méthode permet de représenter les données originelles (individus et variables) dans un espace de dimension inférieure à l'espace originel, tout en limitant au maximum la perte d'information. La représentation des données dans des espaces de faible dimension (ici 2 dimensions) en facilite considérablement l'analyse." Extrait de XLSTAT.

#### III – 1 – But de la méthode

Le but de l'ACP est de permettre une visualisation de données multidimensionnelles et l'étude de la structure des variables. Il s'agit de proposer une représentation simple des paramètres analysés sur les différents points d'eau sur un graphique en deux dimensions.

La clé d'interprétation est simple :

- ✓ Chacun des axes résulte d'une composition des (n) éléments analysés, ainsi les coordonnées (X) et (Y) de chaque point d'eau projeté sur un graphique ;
- ✓ Les similitudes de faciès physico-chimiques vont se traduire graphiquement par la proximité des points représentatifs de chaque échantillon.

#### III – 2 – Principe de la méthode

Les données constituent un tableau à deux entrées :

- ✓ Celle des variables chimiques ;
- ✓ Celle des échantillons qui constituent les unités statistiques.

Les valeurs des variables pour toutes les unités statistiques peuvent être représentées par un nuage de points, aussi bien dans l'espace des variables que dans l'espace des unités statistiques.

Le principe de l'analyse consiste à chercher des plans de projections sur lesquels la projection s'effectuerait avec un minimum d'erreur. Ces plans sont caractérisés par deux axes factoriels dont le calcul est effectué à partir des variances et des covariances des variables.

Le premier axe ( $F1$ ) est tel qu'il détermine le maximum de variance, c'est-à-dire, le maximum d'inertie des nuages. Le second axe ( $F2$ ) est perpendiculaire à ( $F1$ ), de telle façon qu'il exprime le maximum de variance non déterminé par ( $F1$ ). Le troisième axe ( $F3$ ) est perpendiculaire à ( $F1$ ) et ( $F2$ ) et exprime le maximum de variance non exprimée par les deux premiers.

En règle générale, on projette les unités statistiques jusqu'à ce que 90% environ de la variance totale soit exprimée.

À chaque axe factoriel est associé un facteur et après la mise en évidence des principaux facteurs responsables de la structure observée, l'ACP permet de décrire le nuage graphiquement, soit dans l'espace des variables, soit dans celui des unités statistiques.

### III – 3 – L'espace des variables

Les variables initiales sont projetées dans les différents plans factoriels pour que toutes les variables aient le même poids, les variables se projettent dans un cercle de rayon (1) appelé cercle de corrélation. Puisque la distance entre le centre du cercle et une variable est proportionnelle à la corrélation multipliée avec le facteur engendrant l'espace, plus une variable est située près du cercle, mieux elle est représentée.

Dans le plan considéré, et c'est à partir de ce graphique que sont définis les différents facteurs responsables de la structure observée.

### III – 4 – L'espace des unités statistiques

Dans les différents plans factoriels, les unités statistiques possèdent deux nouvelles coordonnées appelées composantes principales. Cette représentation permet de synthétiser leur position par rapport aux facteurs, donc aux variables. En plus des descriptions des graphiques, le dépouillement des résultats est nécessaire, à savoir :

- ✓ La matrice des coefficients de corrélations, elle donne la liaison qui existe entre toutes les variables deux à deux ;



- ✓ Le tableau des valeurs propres de facteurs (variance exprimée par chaque variable) : permet d'apprécier l'importance du caractère représenté par un axe factoriel par rapport aux autres. Cette variation peut s'exprimer aussi en % ;
- ✓ Le tableau des vecteurs propre sur chaque axe : ce sont ces coordonnées qu'on utilise pour reporter les points du nuage dans l'espace des variables ;
- ✓ Le tableau des coefficients de corrélation carrés des variables avec chaque axe factoriel : coefficients permettant d'apprécier l'importance du rôle joué par chaque variable dans la détermination de l'axe.

Graphiquement, cette importance est exprimée par le fait qu'une variable est projetée loin de l'origine suivant l'axe factoriel en question.

### III – 5 – Traitement de données et interprétation des résultats

Le traitement de nos données par analyse en composantes principales (ACP) a donc été réalisé à l'aide de XLSTAT, version 6.2007 (version démo) : le plan factoriel 1-2 permet d'extraire majoritairement la variance totale des échantillons.

Cette ACP a été effectuée sur les eaux d'une cinquantaine de points d'eau qui sont utilisés pour expliquer la variation de treize (13) variables.

Pour le traitement, nous avons choisi huit (08) axes qui expriment 98.72% des renseignements pour la première campagne et 99.66 % pour la deuxième. (Tab.28).

**Tableau N° 28 : Différentes variables et axes (Décembre 2018).**

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>
<b>Valeur propre</b>	6.410	2.230	1.216	0.898	0.775	0.601	0.472	0.232
<b>Variabilité (%)</b>	49.307	17.155	9.353	6.910	5.965	4.621	3.632	1.784
<b>% cumulé</b>	49.307	66.462	75.815	82.725	88.690	93.311	96.943	98.727

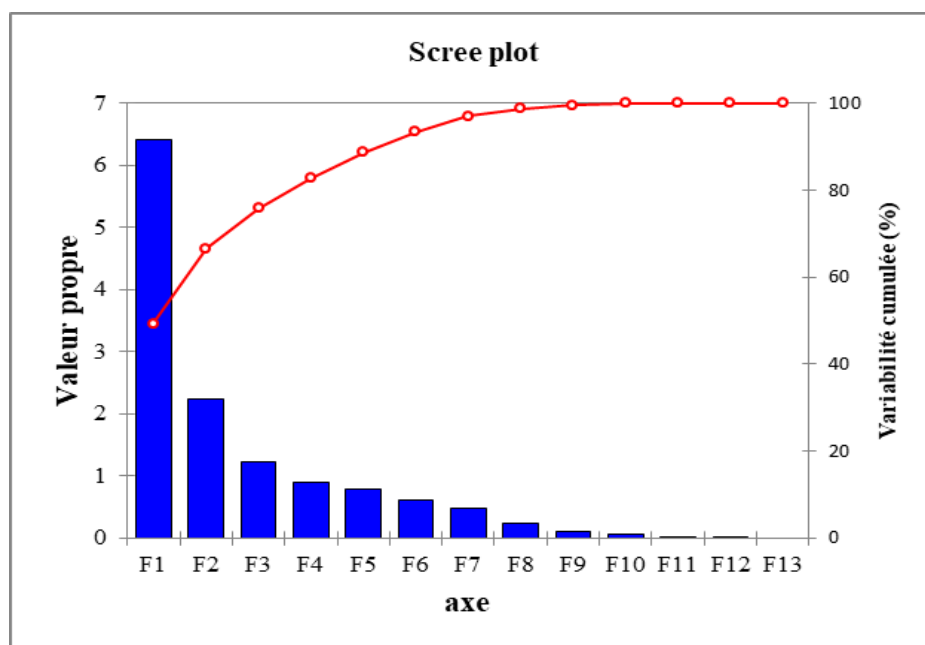


Fig. 78 : Histogramme des valeurs propres et variabilités cumulées (Décembre 2018).

Tableau N° 29: Corrélations entre les variables et les facteurs (Décembre 2018).

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>
<i>pH</i>	- 0.150	0.703	0.172	- 0.504	- 0.417	0.004	0.127	0.050
<i>CE</i>	0.989	0.061	- 0.055	- 0.097	0.039	- 0.048	- 0.027	- 0.009
<i>RS</i>	0.989	0.059	- 0.057	- 0.096	0.036	- 0.043	- 0.033	- 0.011
<i>Ca<sup>++</sup></i>	0.944	0.008	0.055	0.134	0.090	0.003	0.265	- 0.098
<i>Mg<sup>++</sup></i>	0.827	- 0.117	0.018	0.141	- 0.388	0.324	- 0.102	0.116
<i>Na<sup>+</sup></i>	0.888	0.149	- 0.125	- 0.298	0.125	- 0.192	- 0.172	0.026
<i>K<sup>+</sup></i>	0.072	0.092	0.836	- 0.265	0.420	0.196	- 0.033	0.015
<i>Cl<sup>-</sup></i>	0.957	- 0.098	- 0.037	- 0.102	- 0.063	0.112	- 0.139	- 0.143
<i>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></i>	0.935	0.049	- 0.103	- 0.120	0.179	- 0.179	0.095	0.146
<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	0.317	- 0.341	0.674	0.345	- 0.328	- 0.316	- 0.042	0.009
<i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	- 0.002	0.961	0.084	0.136	- 0.120	- 0.070	- 0.077	- 0.104
<i>TH</i>	0.964	- 0.041	0.045	0.146	- 0.095	0.132	0.137	- 0.020
<i>TAC</i>	0.189	0.713	- 0.027	0.616	0.238	0.050	- 0.034	0.080

### III – 6 – Matrice de corrélation

L'examen du tableau N° 31 relatif à la matrice de corrélation (Déc 2018) permet de distinguer que, pratiquement, toutes les variables sont corrélées entre elles. Il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique d'une part et les sulfates, le sodium, le calcium et les chlorures d'autre part.

Tableau N° 30 : Matrice de corrélation entre les variables (Décembre 2018).

Variables	pH	CE	RS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
pH	<b>1</b>									
CE	-0.043	<b>1</b>								
RS	-0.059	0.562	<b>1</b>							
Ca	-0.231	<b>0.803</b>	0.492	<b>1</b>						
Mg	-0.139	0.705	0.486	0.796	<b>1</b>					
Na	0.041	<b>0.928</b>	0.546	0.681	0.622	<b>1</b>				
K	-0.028	0.252	0.220	0.133	0.135	0.283	<b>1</b>			
Cl	-0.100	<b>0.878</b>	0.534	0.727	0.673	<b>0.903</b>	0.281	<b>1</b>		
SO <sub>4</sub>	-0.089	<b>0.889</b>	0.544	<b>0.877</b>	0.806	<b>0.852</b>	0.197	0.735	<b>1</b>	-
HCO <sub>3</sub>	0.433	-0.123	-0.102	-0.205	-0.136	-0.035	-0.020	-0.187	-0.168	<b>1</b>

D'autres corrélations moins significatives entre la conductivité électrique d'une part et les bicarbonates permettent de dire que la salinité de l'eau est due beaucoup plus aux formations salifères telles que le gypse, l'anhydrite, le sel gemme ...etc.

La forte liaison qui existe entre les sulfates et le calcium confirme cette tendance.

### III – 7 – Analyse des cercles ACP

Le cercle ACP est déterminé par les axes (F1) et (F2) qui fournissent 66.46% de l'information totale pour la campagne effectuée en Décembre 2018. L'axe (1) correspond classiquement aux principaux éléments responsables de la minéralisation de l'eau (chlorures, sodium, calcium, magnésium ...etc).

L'axe (2) s'oppose, quant à lui, aux autres éléments(les bicarbonates surtout).

#### III – 7 – 1 – L'espace des variables (Fig.82 et 83).

L'axe (F1) horizontal exprime 49,31% de la variance de la même campagne. Il est déterminé par ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $CE$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , liés aux formations évaporitiques).

L'axe (F2) est déterminé par les bicarbonates de bordure.

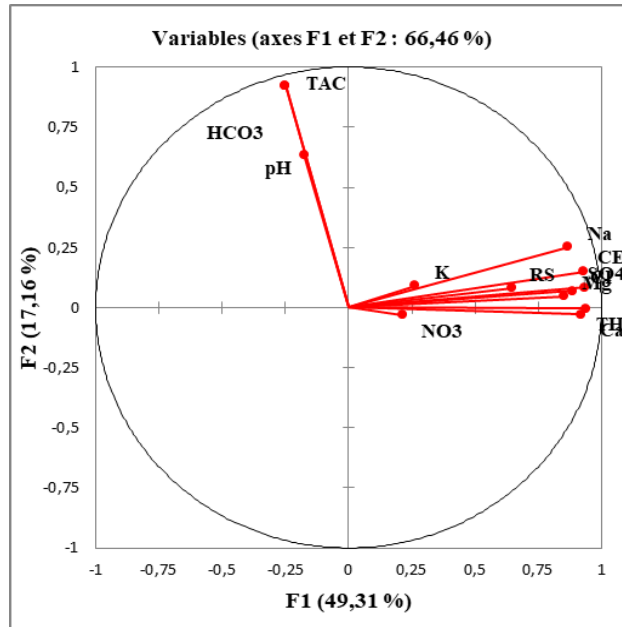


Fig. 79 : Analyse en composante principale des eaux de la nappe alluviale. Plaine de Tébessa (Décembre 2018).

### III – 7 – 2 – L’espace des individus

Le graphe de la figure suivante (Fig. 80) met en évidence deux grandes familles d’eau qui s’opposent deux à deux. L’axe (F1) montre l’opposition entre les eaux bicarbonatées d’une part et les eaux riches en éléments de salinité d’autre part.

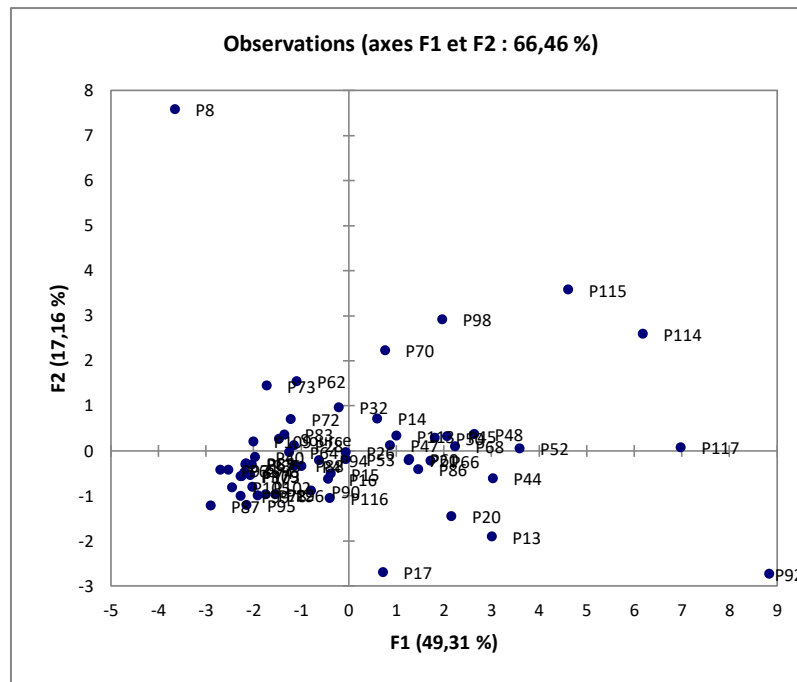


Fig. 80 : Représentation graphique des Individus (Décembre 2018).

La composition chimique des eaux est directement influencée par l'alimentation de l'aquifère, c'est-à-dire par les formations géologiques qui constituent cet aquifère ou qui forment ses limites.

### **Conclusion**

Suite à cette étude on a pu retenir que les eaux de la plaine de Tébessa ont des caractéristiques physico-chimiques relativement variables ; une température allant de 14 à 19°C, un *pH* de 6,8 à 8,3 et une conductivité électrique oscillant de 600 à 11500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

Leur faciès dominant est Sulfaté-sodique ou Sulfaté-calcique et peut parfois être Bicarbonaté-calcique et ce, suite au lien étroit aux roches encaissantes.

Dans l'ensemble, ces eaux sont admissibles et peuvent alors être utilisées en irrigation avec un contrôle de l'évolution de leur salinité. Dans le cas où elles deviennent extrêmement salinées, on doit les utiliser sous certaines conditions ; choisir des espèces et des pratiques culturales adéquates, opter pour les régions à perméabilité élevée, effectuer un drainage continu des sols.

*CARACTÉRISATION DES  
RISQUES DE POLLUTION*

## Introduction

La pollution constitue une menace persistante pour tout type de terrain et surtout pour la ressource en eau, ce qui rend sa localisation, sa remédiation ou son atténuation une question épineuse pour les scientifiques et les autorités locales.

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées à travers le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité.

L'objectif est de visualiser cette pollution, d'estimer son degré de menace et de cartographier les zones vulnérables et/ou à haut risque. Pour ce faire, diverses méthodes ont été utilisées dans le présent travail, afin de pouvoir se prononcer quant à cette question. On cite entre autres la méthode DRASTIC, GOD, SI et FIG.

### I – Description de la méthode DRASTIC

La méthode dite DRASTIC était introduite au cours des années 1980 par la National Water Well Association (N W W A). Parmi ses objectifs l'estimation des risques de pollution des eaux souterraines (Suais et Durbar, 1993) ; (Vrba et Zaporozec, 1995). Ce procédé permet d'établir des cartes de vulnérabilité qui découlent de la synthèse et la maîtrise de données lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région.

Le terme DRASTIC est au fait un ensemble d'acronymes correspondant aux initiales des sept paramètres déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité (Bézégues et *al.* 2002) :

- **D** : épaisseur de la zone non saturée ;
- **R** : la recharge efficace ;
- **A** : les matériaux de l'aquifère ;
- **S** : le type de sol ;
- **T** : la topographie ou la pente ;
- **I** : l'impact de la zone vadose ou zone non saturée ;
- **C** : la perméabilité ou la conductivité hydraulique du système aquifère.

Chacun de ces paramètres doit lui correspondre un poids (valeur prédéterminée) compris entre 1 et 5, traduisant l'importance du paramètre dans les processus de transport et l'atténuation des contaminants. On affecte au paramètre prépondérant un poids égal à cinq (5) tandis que celui ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant se voit assigner un poids égal à l'unité (1).

Les valeurs attribuées aux poids des paramètres de la méthode DRASTIC utilisées sont celles définies par Aller et al. (1987). Voir tableau suivant (tab. 31).

**Tableau N° 31 : Poids des paramètres DRASTIC (Aller et al. 1987).**

<i>Paramètre</i>	<i>Poids</i>
D : profondeur du plan d'eau.	5
R : recharge efficace.	4
A : Matériau de l'aquifère.	3
S : Type de sol.	2
T : Pente du terrain.	1
I : Impact de la zone non saturée.	5
C : Conductivité hydraulique.	3

À chacun de ces sept (7) paramètres est associée une cote variant de 1 à 10, définie en fonction d'intervalles de valeurs, dont la plus petite représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination (Dc, Rc, Ac, ...).

Nous avons élaboré une carte paramétrique, pour chaque paramètre DRASTIC, en se basant sur les notations et les coefficients de pondération accordés aux critères.

Les notations accordées aux paramètres DRASTIC sont illustrées sur le tableau suivant (d'après Lallemand – Barrès 1994). (tab. 32).

Le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC, notée (ID), propre à chaque unité hydrogéologique est obtenu, par la somme des produits de chaque cote par son poids, selon l'équation (1) (Osborne et al. 1998) :

$$ID = Dc \times Dp + Rc \times Rp + Ac \times Ap + Sc \times Sp + Tc \times Tp + Ic \times Ip + Cc \times Cp \dots\dots\dots (1).$$

P : étant le poids du paramètre (variant de 1 à 5).

C : la cote associée (variant de 1 à 10).

L'indice, ainsi calculé, représente une mesure du niveau de risque de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. Ce risque croît avec la valeur de l'indice. Il peut prendre une valeur maximale de 226 (100 %) et une valeur minimale de 23 (0 %).



Tableau N° 32 : Notations accordées aux paramètres DRASTIC (Lallemand-Barrès 1994).

<p><b>D : distance à la nappe</b> <b>Epaisseur de la ZNS</b></p> <p><b>Valeurs (m)</b>                      <b>notation</b></p> <p>0 à 2                                      10</p> <p>2 à 4                                      9</p> <p>4 à 6                                      8</p> <p>6 à 8                                      7</p> <p>8 à 10                                     6</p> <p>11 à 14                                   5</p> <p>14 à 18                                   4</p> <p>18 à 25                                   3</p> <p>25 à 33                                   2</p> <p>&gt; à 33                                    1</p>		<p><b>R : recharge</b></p> <p><b>Valeurs (mm)</b>                      <b>Notation</b></p> <p>0 à 5                                      1</p> <p>5 à 10                                    3</p> <p>10 à 15                                   6</p> <p>15 à 25                                   8</p> <p>&gt; à 25                                    9</p>	
<p><b>A : nature de la zone saturée</b></p> <p>Calcaire karstique                      10</p> <p>Basalte                                    9</p> <p>Sable et gravier                        8</p> <p>Calcaire massif                         6</p> <p>Grès massif                              6</p> <p>Shales en séquence                    6</p> <p>Métamorphique altérée, grés        4</p> <p>Métamorphique                         3</p> <p>Shale massif                             2</p>		<p><b>S : type de sol</b></p> <p>Peu épais ou absent                    10</p> <p>Gravier                                    10</p> <p>Sable                                        9</p> <p>Argile, agrégats                        7</p> <p>Limon sableux                          6</p> <p>Limon                                       5</p> <p>Limon silteux                            4</p> <p>Limon argileux                         3</p> <p>Argile non agrégé et non fissuré                            1</p>	
<p><b>T : pente</b></p> <p><b>Pente (%)</b>                              <b>Notation</b></p> <p>0 à 2                                      10</p> <p>2 à 6                                      9</p> <p>6 à 8                                      8</p> <p>8 à 10                                     7</p> <p>10 à 12                                    5</p> <p>12 à 18                                    3</p> <p>&gt;à 18                                      1</p>		<p><b>I : impact de la zone vadoze</b></p> <p>Calcaire karstique                      10</p> <p>Basalte                                    9</p> <p>Sable et gravier                        8</p> <p>Sable et gravier avec silt et argile   6</p> <p>Calcaire lité, grés, shale            6</p> <p>Grés                                        6</p> <p>Calcaire                                    6</p> <p>Shale                                        3</p> <p>Silt/Argile                                1</p>	
<p><b>C : conductivité hydraulique</b></p> <p><b>Valeur (m/s)</b>                              <b>Notation</b></p> <p><math>&gt;9,4 \cdot 10^{-4}</math>                                      10</p> <p><math>4,7 \cdot 10^{-4}</math> à <math>9,4 \cdot 10^{-4}</math>                              8</p> <p><math>32,9 \cdot 10^{-5}</math> à <math>4,7 \cdot 10^{-4}</math>                              6</p> <p><math>14,7 \cdot 10^{-5}</math> à <math>32,9 \cdot 10^{-5}</math>                              4</p> <p><math>4,7 \cdot 10^{-5}</math> à <math>14,7 \cdot 10^{-5}</math>                              2</p> <p><math>4,7 \cdot 10^{-6}</math> à <math>4,7 \cdot 10^{-5}</math>                              1</p>			

Engel et al (1996) ont établi une classification qui permet de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de leur faire correspondre des classes de vulnérabilité.

Tableau N° 33 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode DRASTIC (ENGEL et AL.1996).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< à 101
Moyen	101 à 140
Élevé	140 à 200
Très élevé	> à 200

Il n'est possible d'aboutir à l'estimation de cet indice (de vulnérabilité) que par une analyse comparative entre différentes unités hydrogéologiques. À cet effet, on a développé un système de représentation du degré de vulnérabilité, afin de permettre aux utilisateurs une visualisation immédiate de ce dernier. Le principe consiste à exprimer le degré de vulnérabilité en pourcentage faisant appel à l'équation suivante :

$$ID\% = \frac{(ID-23) \times 100}{203} \dots\dots\dots (2).$$

Avec :

ID : Indice de vulnérabilité calculé de l'unité hydrogéologique.

### I – 1 – Base de données et acquisition

L'application de la méthode DRASTIC nécessite une collecte importante de données ayant trait à divers axes (hydrogéologie, géologie, morphologie, pédologie et topographie du milieu naturel). Chaque paramètre nécessite un certain nombre de données (Tab.34).

Le traitement de toutes ces données s'est effectué à l'aide des logiciels ArcGis 9.3 et SURFER10 et a permis de construire la base de données physique de la zone d'étude.

Tableau N° 34 : Données utilisées pour le calcul et la cartographie des paramètres DRASTIC.

Symbole	Paramètre	Type & source d'information	Poids
<b>D</b>	Épaisseur de la ZNS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Courbe de niveau (MNT).</li> <li>• Compagne piézométrique (Mai 2020).</li> <li>• Etude des unités hydrogéologiques ANRH 2011.</li> </ul>	<b>5</b>
<b>R</b>	Recharge nette		<b>4</b>
<b>A</b>	Lithologie de l'aquifère	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Coupes lithologiques de forages ANRH.</li> <li>✓ Carte géologique Tébessa 1/50000.</li> </ul>	<b>3</b>
<b>S</b>	Type de sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Coupes lithologiques de forages ANRH.</li> <li>✓ Carte géologique Tébessa 1/50000.</li> </ul>	<b>2</b>
<b>T</b>	Topographie	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Courbe de niveau (MNT) Arcgis.</li> </ul>	<b>1</b>
<b>I</b>	Zone non saturée	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Coupes lithologiques de forages ANRH.</li> <li>✓ Etudes géophysique.</li> </ul>	<b>5</b>
<b>C</b>	Perméabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Etude géophysique et hydrogéologique.</li> <li>✓ Les résultats des essais de pompages.</li> </ul>	<b>3</b>

## I – 2 – Élaboration des couches thématiques des sept paramètres DRASTIC

### I – 2 – 1 – Épaisseur de la zone non saturée (D)

L'épaisseur de la zone non saturée joue un rôle primordial dans la qualification de la capacité de l'aquifère à être affecté par l'infiltration d'un polluant.

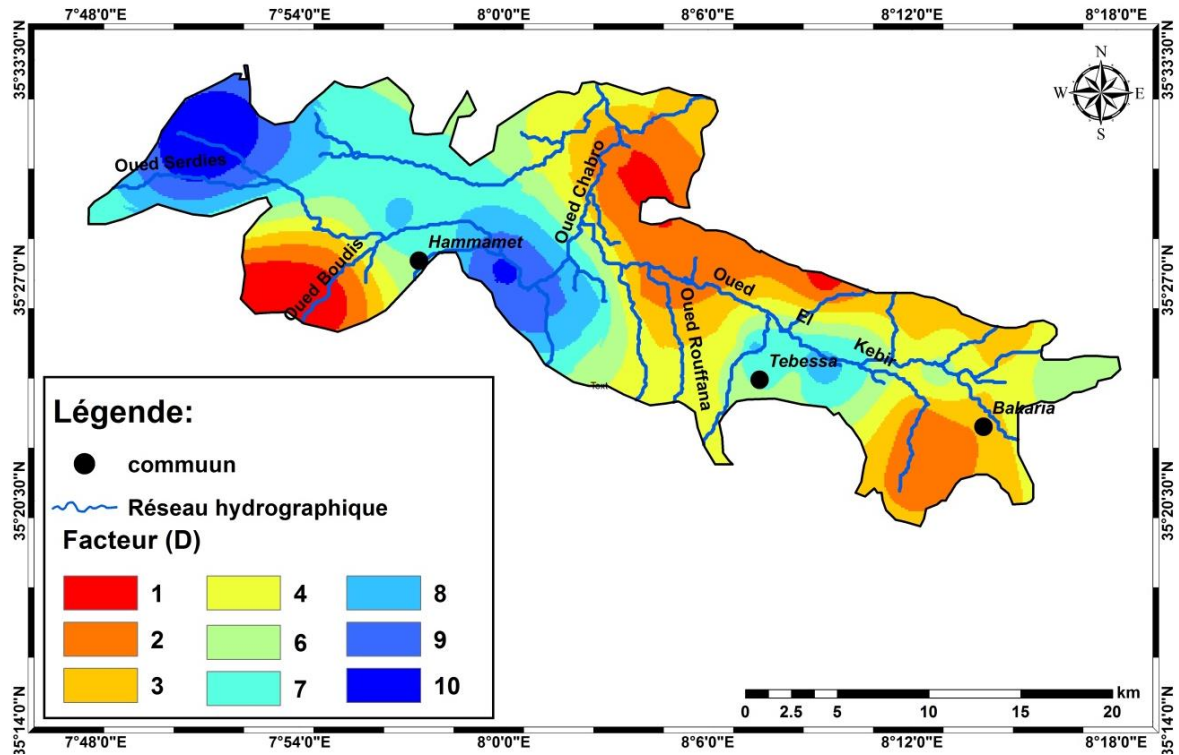


Fig. 81 : Épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

Elle est déterminée par la différence d'altitude entre la courbe de niveau (MNT) et le niveau d'eau. Les données sont réparties sur l'ensemble de la région, comme le montre la carte précédente (Carte N°81).

Cette figure fait ressortir de forts indices notamment à El Merdja, au centre et à l'extrême Nord – ouest de la plaine de Tébessa. Ce qui explique que la profondeur du niveau d'eau est près de la surface ( $P_{33} = 0m$ ). Par contre les plus faibles indices se situent au Sud – ouest de la région d'El Hammamet. Le reste de la zone d'étude présente un indice moyen.

Les classes ainsi retenues pour ce paramètre sont récapitulées dans le tableau N° 32.

Tableau N° 35 : Cotation du paramètre profondeur de l'eau.

Profondeur de la nappe en (m).				
Classe	Dc	Dp	Dc*Dp	Superficie %
0 – 2	10	5	50	4.11
2 – 4	9	5	45	6.07
4 – 6	8	5	40	7.82
6 – 8	7	5	35	17.7
8 – 10	6	5	30	12.4
14 – 18	4	5	20	17.30
18 – 25	3	5	15	15.2
25 – 33	2	5	10	15.10
> 33	1	5	5	4.32

### I – 2 – 2 – La recharge efficace (R)

La nappe se recharge principalement de l'infiltration directe des eaux de précipitations (à travers les sédiments grossiers des bordures), des eaux de ruissellements ou des crues dans les lits des affluents de l'Oued principal, (notamment l'Oued Bouakous et Chabro).

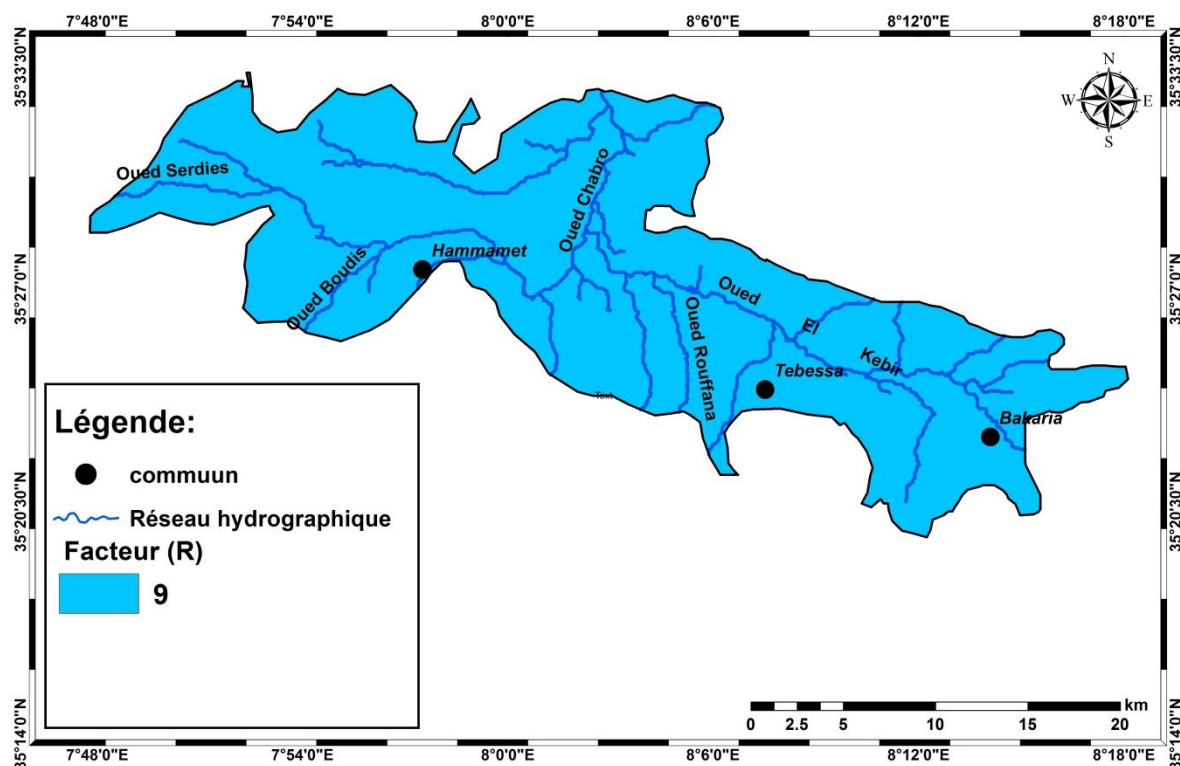


Fig. 82 : Carte représentative de la recharge nette dans la zone d'étude.

On peut constater que l'infiltration est la même sur toute la plaine de Tébéssa et ce, selon l'observation de la carte de recharge (Fig.82).

La valeur moyenne de l'infiltration efficace, déduite du calcul du bilan hydrique, est de 33.35mm. Conformément à la méthode DRASTIC, un poids de 4 est attribué à la recharge efficace, pour l'intervalle se situant à plus de 25mm. Les valeurs de ce paramètre sont reportées au tableau N° 36.

Tableau N° 36 : Cotation de la recharge de la nappe.

La recharge efficace (R)				
Classe	Rc	Rp	Rc*Rp	Superficie %
> 25mm	9	4	36	100

### I – 2 – 3 – Matériaux de l'aquifère (A)

Le matériel constituant la zone saturée et celle non saturée du système aquifère de Tébesa a été décrit sur une base descriptive d'une centaine de coupes d'ouvrages exploitant l'aquifère en question.

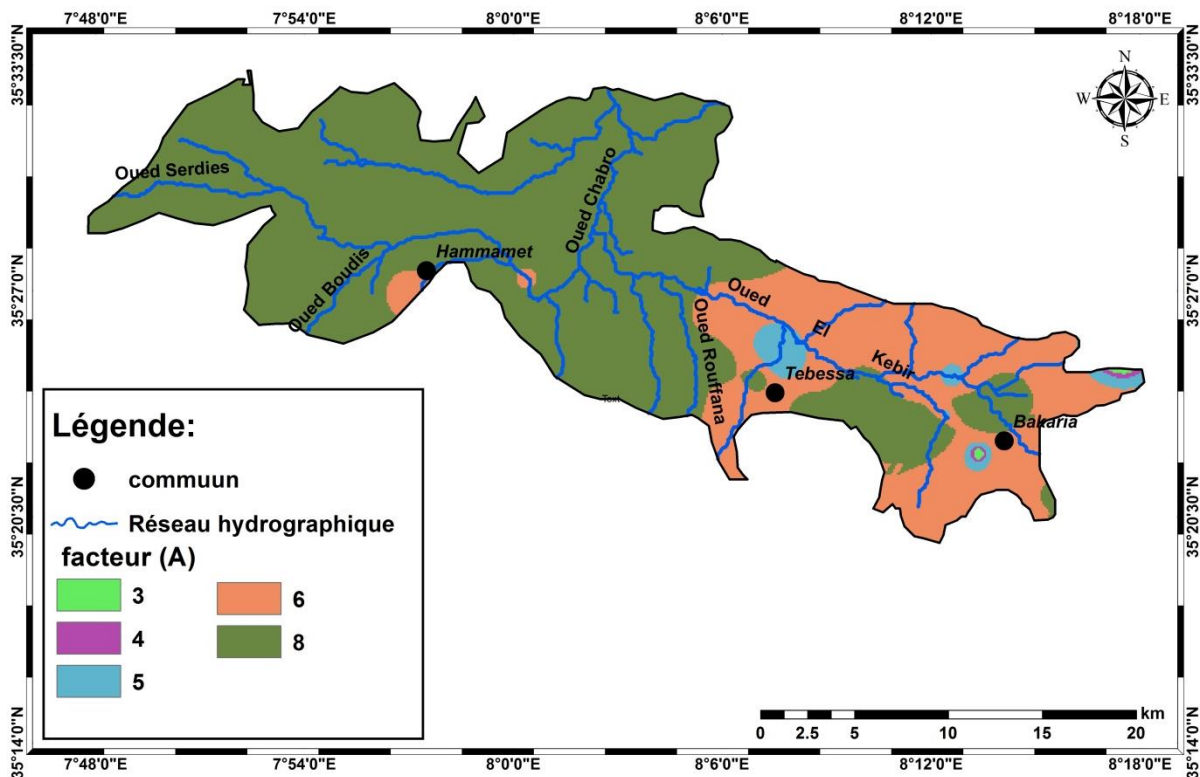


Fig. 83 : Carte de la nature de la zone saturée de la zone d'étude.

Du point de vue lithologique, le complexe aquifère est constitué essentiellement de Graviers, de Galets avec peu de Gravier, de Grès, d'Argiles plus des Sables fins et des marno-calcaires et des Calcaires.

Les côtes qui correspondent à chaque type lithologique ont été reportées en cinq classes.

Tableau N° 37 : Cotation de la nature de la zone saturée de la zone d'étude.

<i>Impact de la zone vadose (I)</i>				
<i>Classe</i>	<i>Ic</i>	<i>Ip</i>	<i>Ic*Ip</i>	<i>Superficie %</i>
Graviers, Cailloutis de Calcaire, sable	8	3	24	72.61
Calcaire, Grès, Sable	6	3	18	25.17
Gravier et Sable	5	3	15	1.95
Marno- calcaire	4	3	12	0.15
Argile noir avec Galet de calcaire	3	3	9	0.09

I – 2 – 4 – Type de sol (S)

L'impact de la nature du sol est irréfutable quant à la contamination des nappes, notamment celles phréatiques, par un quelconque polluant provenant de la surface.

Elle peut réduire, retarder voire accélérer le processus de propagation d'un polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et donc meilleure soit la protection des eaux souterraines.

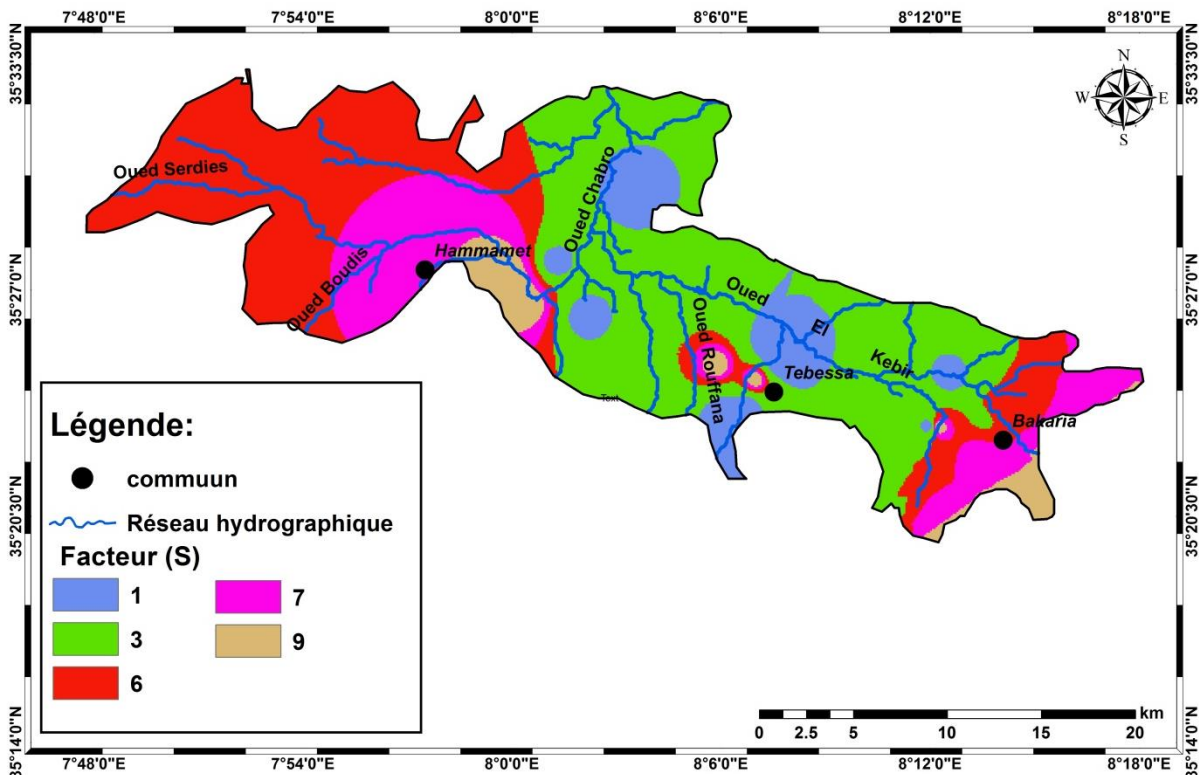


Fig. 84 : Carte représentative des valeurs de l'indice du type de sol.

La description lithologique des logs stratigraphiques de forages réalisés à travers le système aquifère de Tébessa permet, selon les informations ainsi déduites, de retenir cinq principales textures de sol à savoir, des sables, des cailloutis de calcaire, des argiles brunes, des limons argileux et des sables argileux. Ces deux derniers représentent 70% du sol de notre système aquifère. (voir tab.38).

Tableau N° 38 : Cotation du type de sol.

Type du sol (S)				
Classe	Dc	Dp	Dc*Dp	Superficie %
sable, gravier et cailloutis calcaire	9	2	18	04.14
sol argileuse avec galet de calcaire	7	2	14	15.00
Sable argileux	6	2	12	31.15
limon argileux	3	2	6	39.70
Argile brune	1	2	2	09.40

I – 2 – 5 – La pente (T)

Le paramètre topographie est représenté par les valeurs de la pente en degrés. Il traduit la capacité des eaux superficielles à introduire des agents polluants vers la nappe, en influençant les taux d'infiltration et de ruissellement.

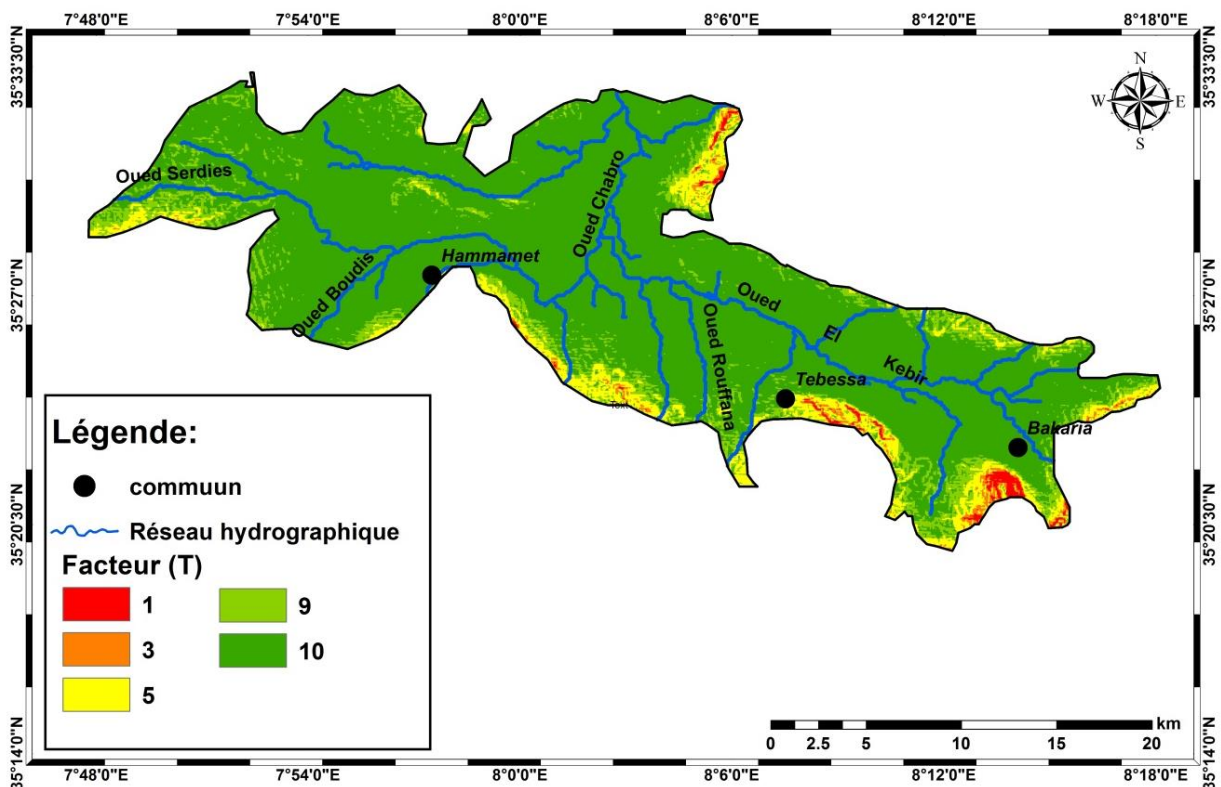


Fig. 85 : Carte de répartition des indices de pente du terrain.

La carte obtenue à partir du modèle numérique d'élévation (MNT), couvrant la zone d'étude à l'aide des outils d'analyse spatiale dont l'Arc GIS, montre que la quasi-totalité de la région est caractérisée par une pente très faible, inférieure à 2° (82.57%).

Tableau N° 39 : Cotation de la pente du terrain.

La pente (T)				
Classe	Tc	Tp	Tc*Tp	Superficie %
0 – 2	10	1	10	82.57
2 – 6	9	1	9	9.68
10 – 12	5	1	5	6.02
12 – 18	3	1	3	1.05
> à 18	3	1	1	0.66

### I – 2 – 6 – Impact de la zone vadose (I)

L'impact de la zone Vadose (zone non saturée) est scruté comme étant un élément très important par la méthode DRASTIC, avec un poids de 5, car la nature et l'épaisseur de la partie comprise entre la surface du sol et l'aquifère contrôlent, dans une certaine mesure, la vulnérabilité à la pollution des réservoirs.

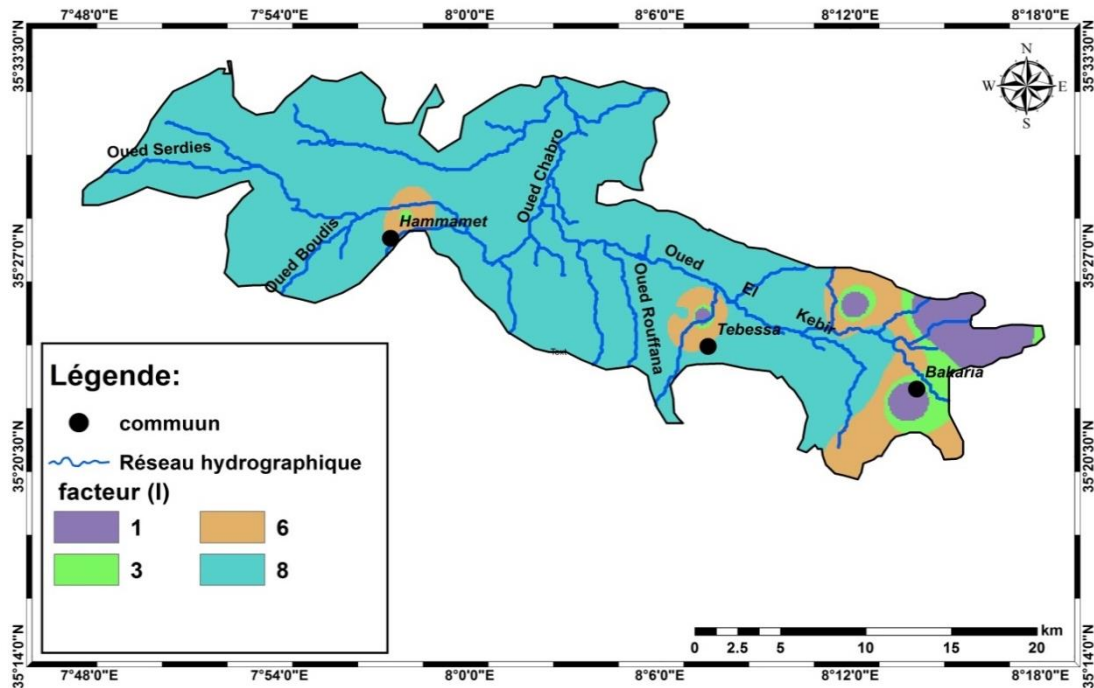


Fig. 86 : Carte de répartition des valeurs de l'indice de la nature de la zone vadose.

La carte de la zone vadose (Fig. 86) montre un pourcentage important (83%) des alluvions (graviers, cailloutis) qui se répartit presque sur toute la surface de la zone d'étude.

Ces formations ont une bonne perméabilité.



Les marnes sableuses occupent 09% de la surface totale de la plaine notamment la zone de Bekkaria à l'Est. Le tableau N° 40 montre les indices correspondant.

Tableau N° 40 : Cotation de la zone vadose.

<i>Impact de la zone vadose (I)</i>				
<i>Classe</i>	<i>Ic</i>	<i>Ip</i>	<i>Ic*Ip</i>	<i>Superficie %</i>
Graviers, cailloutis	8	5	40	83.18
Marnes sableuses	6	5	30	9.03
Shales	3	5	25	2.90
Argiles	1	5	20	4.87

### I – 2 – 7 – Conductivité hydraulique (C)

La conductivité hydraulique de la couche aquifère nous informe sur la vitesse de déplacement des polluants et leur désagréments dans la nappe du point d'injection, à la surface, jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs concentrations dans la nappe aquifère. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide.

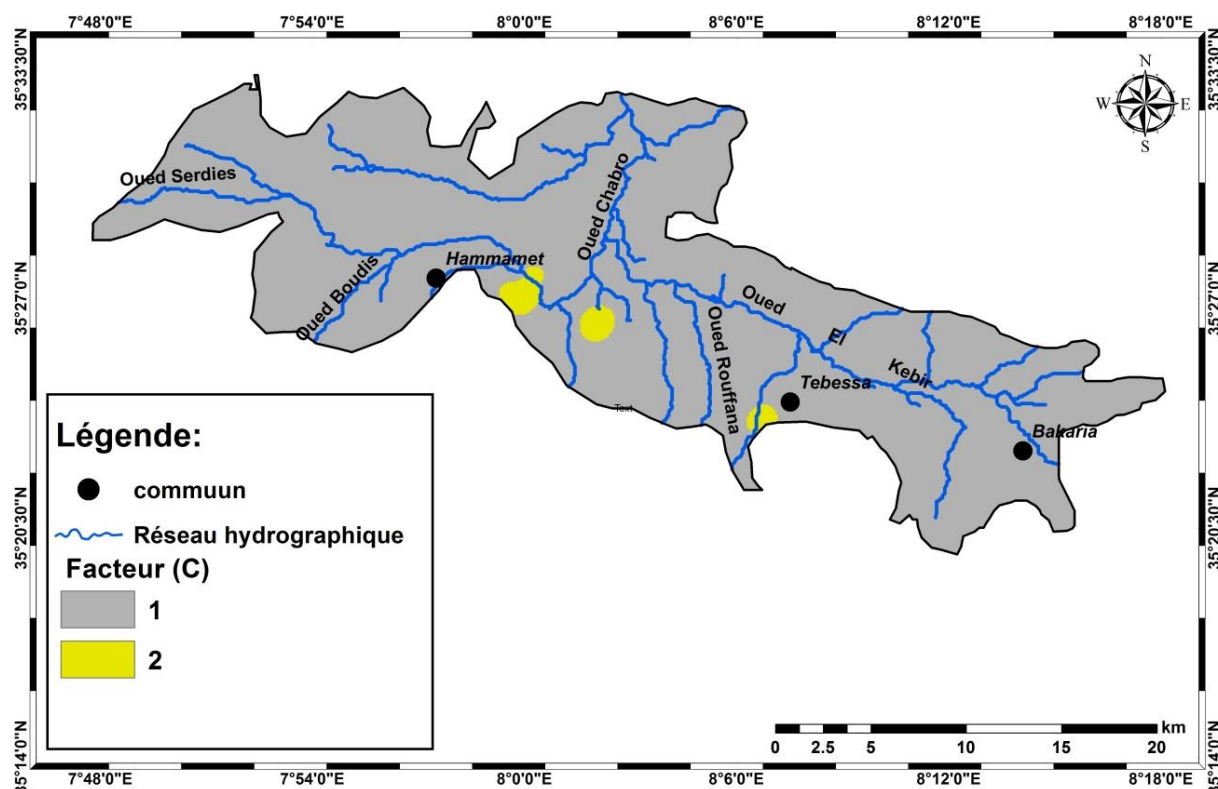


Fig. 87: Carte de la conductivité hydraulique de la nappe de Tébessa.

Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour calculer les degrés de vulnérabilité, sont obtenues à partir des essais de pompage des forages réalisés dans la zone d'étude, disponible sous forme de valeurs de transmissivités.

Il s'avère que les valeurs obtenues sont faibles et ce, sur l'ensemble de la plaine et l'interpolation de ces données ponctuelles nous a permis d'établir la carte du paramètre (C). (Voir carte N° 87) précédente.

Tableau N° 41 : Cotation de la conductivité hydraulique de la nappe de Tébessa.

Conductivité hydraulique (C)				
Classe	Cc	Cp	Cc*Cp	Superficie %
0 – 2	10	1	10	82.57
2 – 6	9	1	9	9.68
10 – 12	5	1	5	6.02
12 – 18	3	1	3	1.05
> à 18	3	1	1	0.66

### I – 2 – 8 – La carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC nous a permis de calculer les indices de vulnérabilité. Les valeurs de ces derniers représentent une évaluation du niveau de risque de contamination.

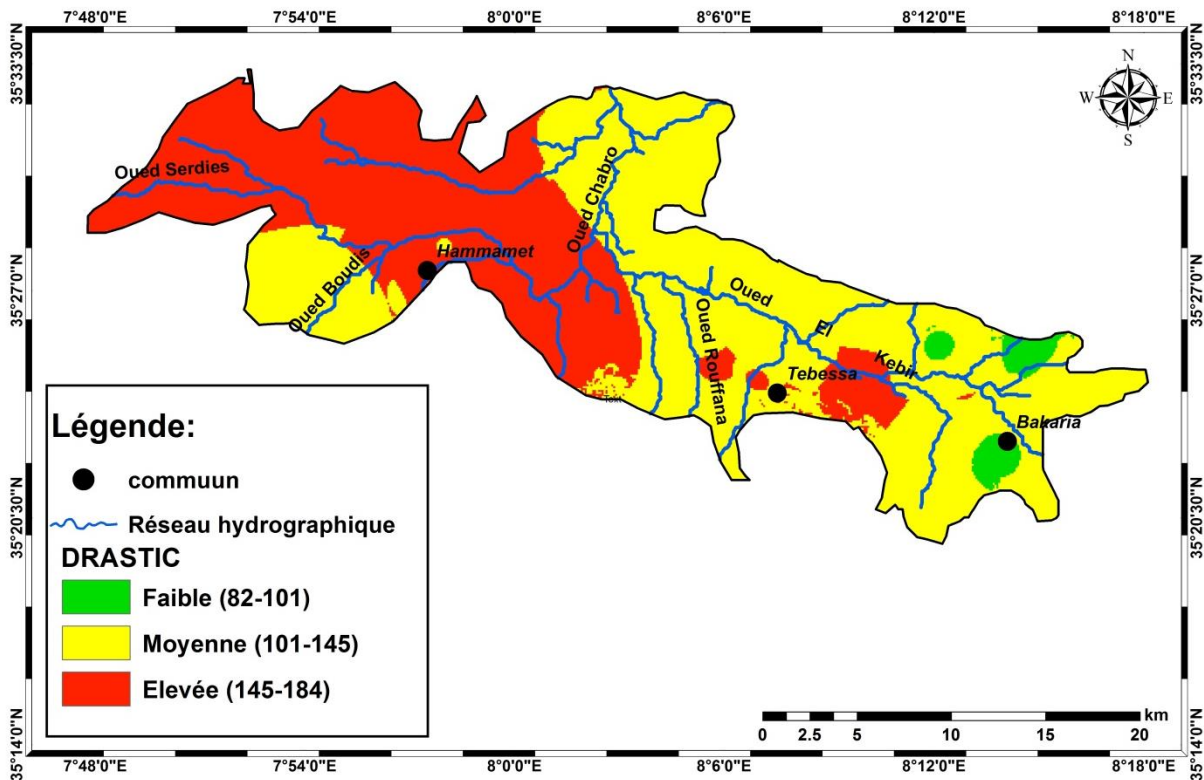


Fig. 88 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Tébessa, selon la méthode DRASTIC.

La répartition spatiale de valeurs de ces indices a été faite grâce au système d'information géographique (SIG) ce qui a permis d'établir une carte de vulnérabilité à la pollution.

L'intérêt de cette carte réside dans le fait qu'elle étend le champ de vision sur l'ensemble du bassin de Tébessa et la prise de mesures de protection des eaux souterraines. Le calcul des pourcentages de vulnérabilité nous a permis d'obtenir trois (03) classes de vulnérabilité au niveau de ce bassin. (Fig.88).

L'analyse de cette carte montre une dominance des aires à vulnérabilité moyenne et élevée :

- ✓ Une classe à vulnérabilité faible, occupant 2.37% de la zone d'étude, qui peut être expliqué par la faible perméabilité et la faible recharge de la nappe ;
- ✓ Une classe à vulnérabilité moyenne, occupant 55.90% de la zone d'étude ;
- ✓ Une classe à vulnérabilité élevée est située à l'Ouest du bassin et se prolonge jusqu'au centre de la plaine (Aïn Chabro) ainsi qu'une partie de l'Oust de la zone de Bekkaria. Cette classe représente 41.73% de la surface totale. Ce degré de vulnérabilité peut s'expliquer par une faible épaisseur de la zone vadose (0 à 6m) conjuguée à une faible pente de terrain. Ces conditions favorisent l'infiltration de tout agent contaminant présent à la surface du sol. Ces zones nécessitent une réflexion particulière concernant les visions et les perspectives futures d'occupation des terres. (Tableau 42).

**Tableau N° 42 : Classes de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin de Tébessa**

<i>Valeur de l'indice DRASTIC</i>	<i>Degré de vulnérabilité</i>	<i>Superficie (%)</i>
< à 101	Faible	2.37
101 à 140	Moyen	55.90
140 à 200	Élevé	41.73

## II – Description de la méthode GOD

La méthode GOD est l'un des procédés paramétriques développés par Foster en 1987. C'est une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée (Murat et al., 2003).

La spécificité de cette méthode c'est qu'elle étudie la vulnérabilité de l'aquifère face au transfert vertical de contaminants à travers la zone vadose et ne tient pas compte des migrations latérales. Trois critères sont considérés dans cette méthode (Foster, 1987 ; Murat et al., 2003) :

- ✓ L'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (*Groundwater hydraulic confinement*) ;

- ✓ Les caractéristiques des couches qui surmontent la zone saturée de l'aquifère (telles que la lithologie, le degré de consolidation, la porosité et la perméabilité) ;
- ✓ La profondeur à la nappe d'eau (cas d'aquifères libres) ou la profondeur du toit de l'aquifère (cas de nappe captive) ;
- ✓ Les paramètres sont évalués par des cotes allant de 0 à 1 avec des valeurs qui évoluent dans le même sens de la vulnérabilité relative du facteur correspondant. L'application de GOD aboutit à la réalisation des cartes thématiques et de la carte synthèse selon la même procédure suivit par DRASTIC.

L'indice GOD est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Indice}_{GOD} = C_G * C_O * C_D \dots\dots\dots (3).$$

Avec :

C : Cote du paramètre correspondant.

**Tableau N° 43 : Cotation des différents paramètres de la méthode GOD (Foster et al., 2002).**

<b>G : Type d'aquifère</b>	<b>Notation</b>	<b>O : Profondeur à la nappe</b>	<b>Notation</b>
Aucun aquifère	0	Au-delà de 100	0.4
Artésien	0.1	50 à 100	0.5
Captif	0.2	20 à 50	0.6
Semi-captif	0.3	10 à 20	0.7
Libre avec couverture	0.4 à 0.6	5 à 10	0.8
Libre	0.7 à 1	2 à 5	0.9
		0 à 2	1
<b>D : Lithologie de la zone vadose</b>			<b>Notation</b>
Sol résiduel			0.4
Limon alluvial, loess, shale, calcaire fin			0.5
Sable éolien, siltite, tuf, roches ignées ou métamorphiques fracturées			0.6
Sable et gravier, grès, tuf			0.7
Gravier (colluvion)			0.8
Calcaire			0.9
Calcaire fracturé ou karstique			1

## II-1 – Type d'aquifère

Le paramètre (G) de cette méthode désigne le type d'aquifère. Il sert à déterminer si l'aquifère est libre, semi-captif ou captif.

La méthode sépare aussi, la catégorie (aquifère libre), en fonction de l'existence ou l'absence de la couverture (en tenant en compte la nature et l'épaisseur de celle-ci).

L'évaluation de la vulnérabilité relative à ce paramètre a permis de dégager un seul type d'aquifère, portant une cotation de 0.4, désignant où la nappe aquifère est libre étant couverte par des formations lithologiques susceptibles de ralentir l'infiltration du contaminant de la surface vers la zone saturée. Elle occupe toute la zone d'étude (fig. 89).

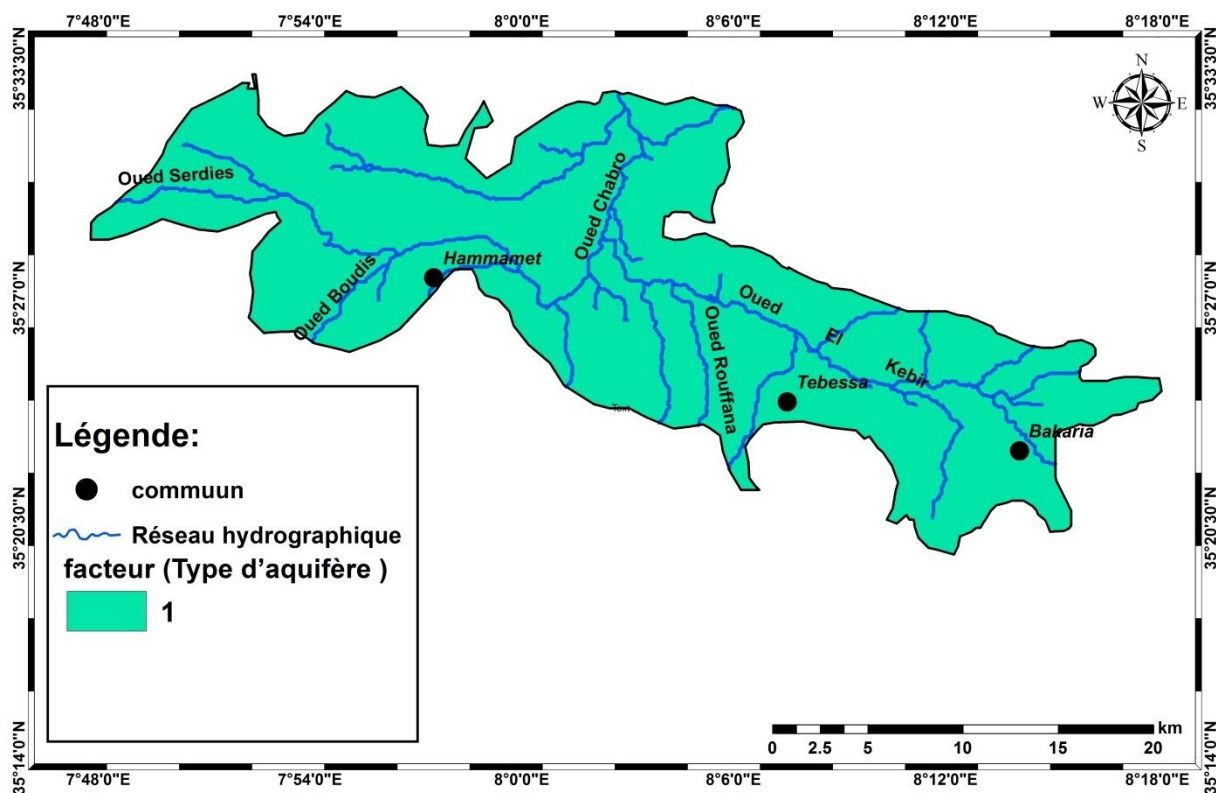


Fig. 89 : Carte de type d'aquifère de la région de Tébessa selon la méthode GOD.

## II – 2 – La lithologie de la zone vadose

Ce paramètre se réfère à la nature lithologique de la zone non saturée. L'estimation de la vulnérabilité relative à ce paramètre a permis de distinguer quatre classes, calcaire, sable et argile avec gravier, gravier et cailloutis. Cette dernière couvre 58% de la surface totale de la zone d'étude (voir tableau N° 44).

Tableau N° 44 : Cotation de la zone vadose selon la méthode GOD.

Classe	Notation	Superficie %
Graviers, cailloutis	0.9	58.03
Calcaires	0.8	14.38
Sable	0.7	23.00
Argile + gravier	0.6	04.57

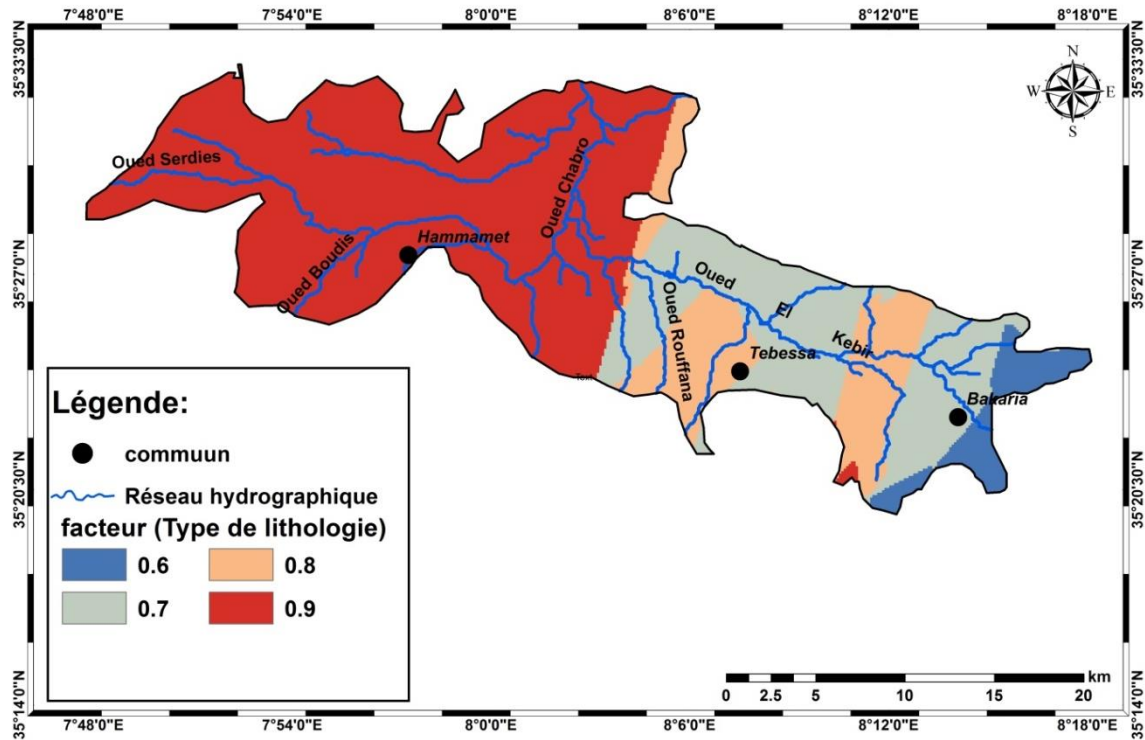


Fig. 90 : Carte de type de lithologie de la zone vadose selon la méthode GOD.

### II – 3 – La profondeur de la nappe

L'évaluation de la profondeur de la nappe de Tébesa par la méthode de GOD présente la zonalité suivante : (voir carte N° 90).

- ✓ Une zone de faible profondeur où le niveau d'eau varie entre 0 et 5m, se localise au centre et au Nord-ouest de la région d'étude et qui occupe 21.74% de la surface totale ;
- ✓ Une zone où la profondeur varie de 5 à 10m, représentant 64.41% de la surface de la nappe, se répartit sur toute la région ;
- ✓ La zone profonde où le niveau d'eau se trouve à plus de 20m de profondeur avec 12.73% de la surface totale, notamment la région d'El Hammamet et Aïn Chabro.

Tableau N° 45 : Cotation du paramètre profondeur de l'eau selon la méthode GOD.

Classe	Notation	Superficie %
00 à 02	1	12.73
02 à 05	0.9	08.74
05 à 10	0.8	30.75
10 à 20	0.7	33.76
20 à 50	0.5	14.00

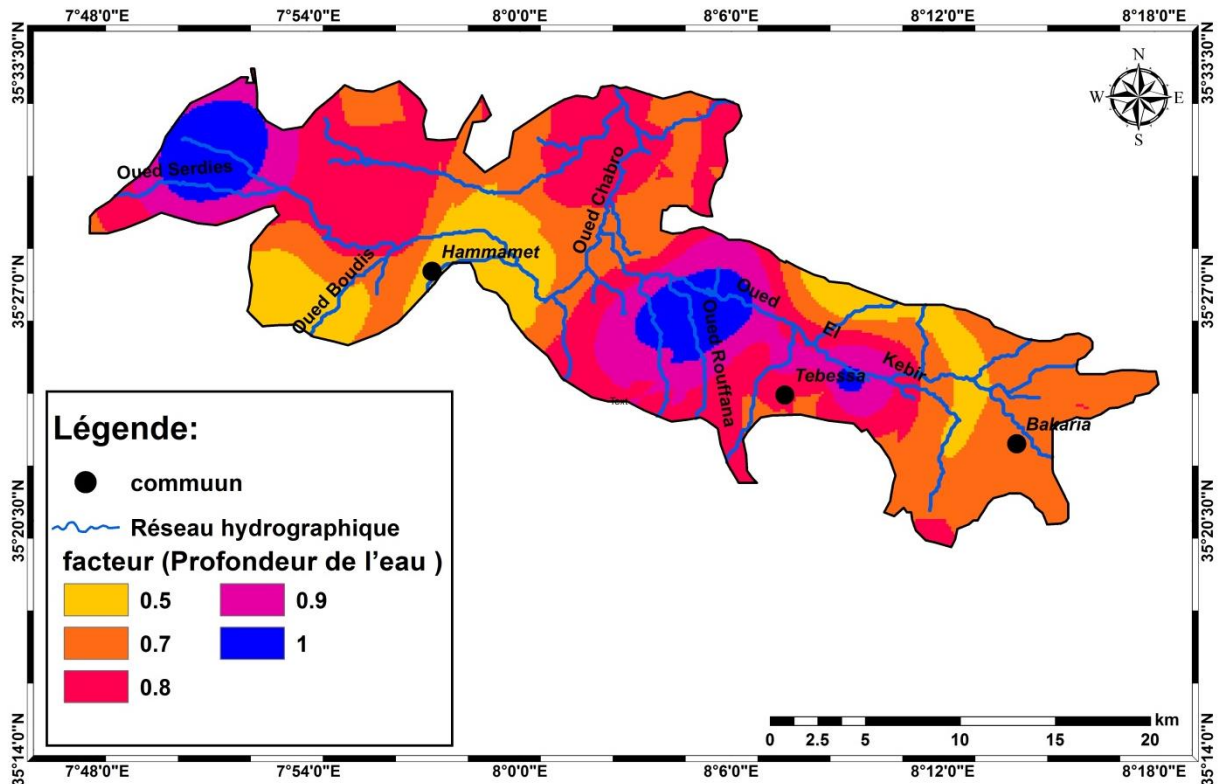


Fig. 91 : Épaisseur de la zone non saturée.

#### II – 4 – La carte de vulnérabilité selon la méthode GOD

Sur cette carte trois classes de vulnérabilité ont pu être mises en évidence. Il s'agit de :

- ✓ La classe (Modérée) représente 31.35% de la zone d'étude et traduit une vulnérabilité modérée à la pollution. Elle se répand, en grande partie, à l'Est et au Sud-ouest. L'indice modéré de vulnérabilité peut s'expliquer par la grande profondeur de la nappe (supérieure à 15 m) ;
- ✓ La classe (Forte), ayant un pourcentage de 49.89% de l'aire étudiée, est caractérisée par une vulnérabilité forte à la pollution. Elle couvre la majeure partie de la région. L'indice fort de vulnérabilité peut être imputé aux profondeurs moyennes des nappes (9 à 15 m), et des pentes oscillant entre 2 et 6% ;
- ✓ La classe (Très forte) représente une vulnérabilité élevée à la pollution avec un pourcentage faible (14.75%). Elle se répartit au centre et à l'Ouest de notre terrain. L'indice très fort de vulnérabilité peut être lié à la faible épaisseur de la zone vadose (0 à 5m).

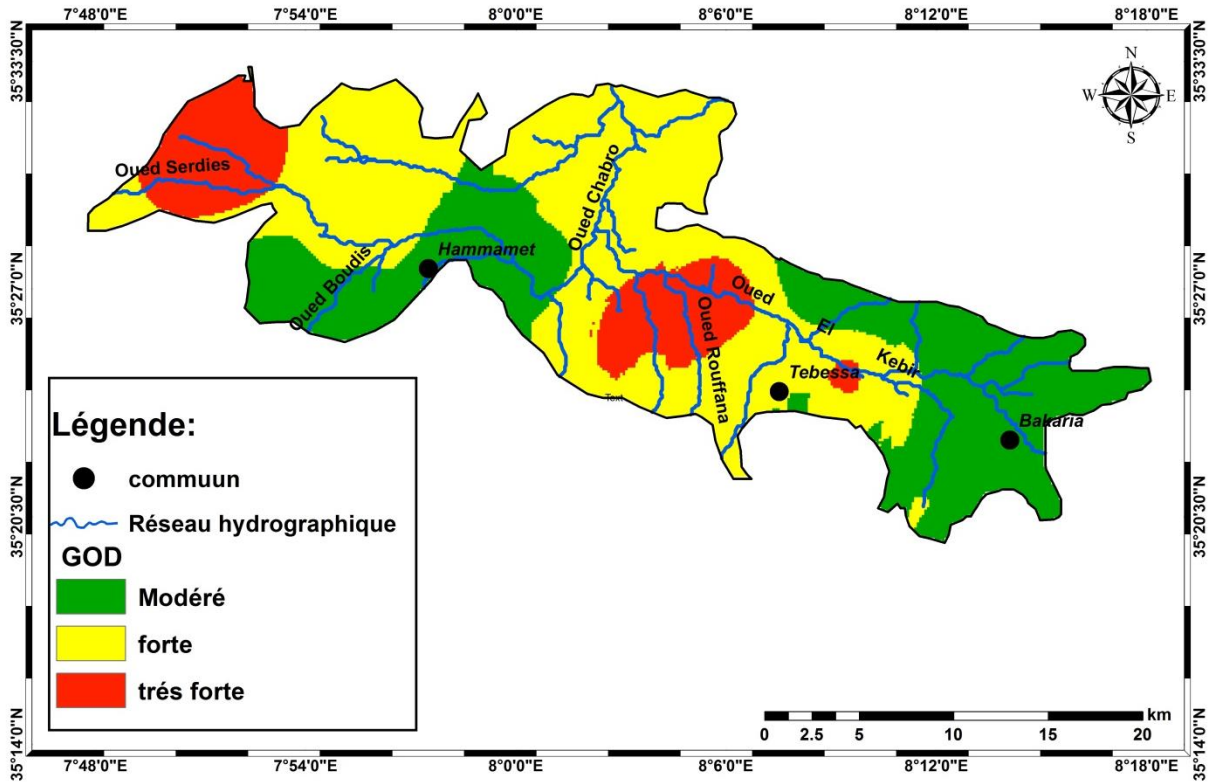


Fig. 92 : Carte de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin de Tébessa (méthode GOD).

Tableau N° 46 : Classes de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin de Tébessa. (méthode GOD).

Valeur de l'indice de GOD	Degré de vulnérabilité	Superficie %
0.3 – 0.5	Modéré	35.35
0.5 – 0.8	Forte	49.89
> 0.8	Très forte	14.75

### III – Description de la méthode SI

La méthode d'indice de susceptibilité (SI) est un procédé de vulnérabilité verticale spécifique qui a été développée au Portugal par RIBEIRO (2000). Elle prend en compte les polluants d'origine agricole notamment les nitrates et les pesticides.

Elle se base sur cinq paramètres dont les quatre premiers sont comparables voire identiques à ceux utilisés par la méthode DRASTIC en multipliant les cotes par 10.

D : profondeur de la nappe.

R : la Recharge efficace de l'aquifère.

A : lithologie.

T : pente topographique.

Le cinquième nouveau paramètre introduit est celui de l'occupation du sol (OS).



À une cote variant de 0 à 100 (cf tableau N° 47), allant du moins au plus vulnérable, est attribuée à chaque classe d'occupation de sols.

Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité.

Tableau N° 47 : Classification de l'occupation du sol, Corine land Cover (1993) et poids des paramètres (SI).

Classes d'occupation des sols		Valeur du facteur (LU)			
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines		100			
Périmètres irrigués, rizières, cultures annuelles irriguées et non irriguée		90			
Carrière, chantier naval		80			
Zones artificielles couvertes, zones vertes, zones urbaines continues		75			
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)		70			
Zones urbaines discontinues		70			
Pâturages et zones agro-forestières		50			
Milieux aquatiques (marais, salines, etc.)		50			
Forêts et zones semi-naturelles		0			
<b>Paramètres</b>	<b>D</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>T</b>	<b>OS</b>
<b>Poids</b>	<b>0,186</b>	<b>0,212</b>	<b>0,259</b>	<b>0,121</b>	<b>0,222</b>

L'indice de vulnérabilité SI est calculé en faisant la somme des produits des côtes par les poids des paramètres correspondants :

$$ISI = Dc \times Dp + Rc \times Rp + Ac \times Ap + Tc \times Tp + OSc \times OSp \dots\dots\dots(4).$$

Tableau N° 48 : Indices SI et degré de vulnérabilité (Jourda et .al, 2007).

Indice SI	Degré de vulnérabilité	Superficie %
0 – 30%	Très faible	/
30 – 45%	Faible	4.78
45 – 60%	Moyenne	29.84
60 – 75%	Élevée	8.30
75 – 100%	Très élevée	57.06

### III – 1 – Occupation du sol

Du moment qu'il y a nuance entre les deux notions utilisation et occupation des sols, nous estimons qu'il est judicieux de définir d'abord les deux termes.

#### III – 1 – 1 – Définitions

Le terme occupation du sol qui signifie en terminologie anglo-saxonne (Land Cover) veut dire ce qui couvre le sol. C'est donc une description physique de l'espace qui est définie comme la couverture physique ou plutôt bio – physique de la surface des terres émergées (FAO, 1980). Plusieurs catégories biophysiques peuvent alors être distinguées :

- La végétation (arbres, surface en friche, buissons, champs, pelouses...etc.) ;
- Les sols nus (même s'il s'agit d'un manque de couverture) ;
- Les surfaces dures (roches, maisons, bâtiments) ;
- Les surfaces humides et les plans d'eaux intérieures.

L'utilisation du sol quant à elle, caractérise les arrangements, les activités et les intrants introduits par l'homme sur un sol quelconque occupé, visant soit à l'exploiter ou en tirer des produits et/ou des bénéfices. Il est donc question d'une description des surfaces terrestres selon leurs finalités socio-économiques (superficielles à vocation résidentielle, industrielle, commerciale ou agricole).

### III –1 – 2 – Carte d'occupation du sol

Comme signalé plus haut, l'occupation du sol désigne l'ensemble des activités pratiquées à la surface d'un sol donné. Elle renferme les sources potentielles de pollution des retenues d'eau. En effet, ces sources qui constituent de potentielles menaces, concernent les rejets des activités anthropiques susceptibles d'engendrer des polluants.

Ce paramètre a été obtenu à partir d'une image Landsat TM ortho rectifiée et mosaïquée à partir des scènes 195-056 et 196-056 datant de l'an 2020. L'acquisition de la carte de la couverture du sol de la zone d'étude à partir de cette imagerie satellitaire a été possible grâce à la classification supervisée sous le logiciel ENVI 4.3.

Aussi, la fiabilité de cette classification est-elle donnée par le calcul du coefficient Kappa qui (dont la valeur permet d'apprécier la classification faite).

**Tableau N° 49 : Répartition de l'occupation du sol à travers la plaine de Tébessa 2019.**

<i>Type d'occupation</i>	<i>Poids</i>	<i>Surface (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Surface (%)</i>
Urbaine	75	20.52	8.30
Agricole	90	128.03	57.07
sol nus & points d'eau	50	35.62	29.85
forêt	00	244.80	4.78

Dans le cas présent, la valeur est de 0,97. Donc cela montre une fiabilité entre la classification réalisée et la réalité du terrain. En effet, plus la valeur est proche de l'unité (1) plus la classification est considérée comme bien faite, et lorsqu'elle est proche de (0), elle est considérée comme mal faite.

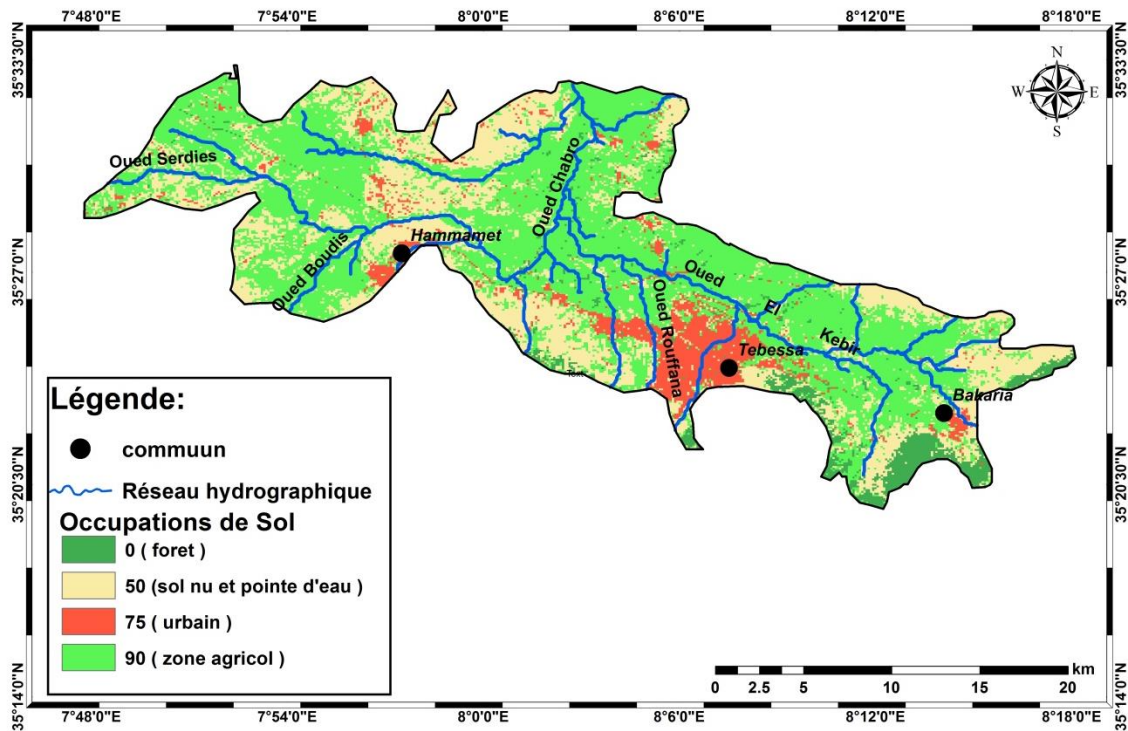


Fig. 93 : Carte d'occupation du sol de la région de Tébessa 2019.

L'observation de cette représentation cartographique laisse déceler la zonalité suivante :

- ✓ La zone agricole, d'après le pourcentage déterminé (57,07%), occupe la majeure partie de la plaine ;
- ✓ La zone de sol nu, en seconde position (selon son pourcentage 29.85%), aux bordures Est, Sud et Nord ;
- ✓ La zone urbaine, à un degré moindre avec un pourcentage de 8,30%, Bekkaria, Tébessa et Hammamet ;
- ✓ La zone forestière (en dernier) avec un pourcentage de 4,78%, aux monts de la région.

### III – 1 – 3 – La carte de vulnérabilité selon la méthode SI

La lecture de la carte de vulnérabilité, élaborée selon la méthode des indices de sensibilité (SI), permet de retenir quatre classes de vulnérabilité à la pollution réparties comme suit :

- ✓ La première, dite très élevée, avec un pourcentage de 57,54, localisée en majeure partie à l'extrême Est et se prolonge jusqu'au centre ;
- ✓ La seconde, qualifiée d'élevée, représentant 37,66%, se répandant surtout aux bordures ;
- ✓ La troisième, à moyen degré de vulnérabilité et à faible pourcentage (3,65%) ;
- ✓ La quatrième, à faible degré de vulnérabilité (1,13%), à l'extrême Sud – est.

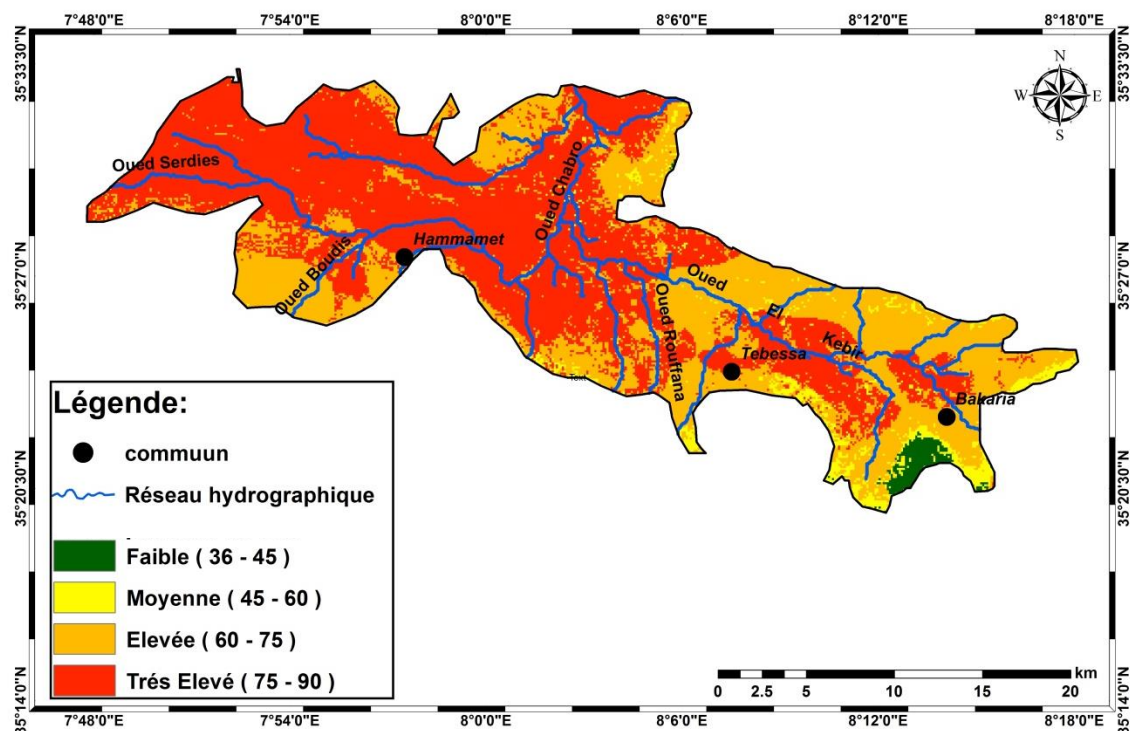


Fig. 94 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine de la région de Tébessa selon méthode DRASTIC.

#### IV – Description de la méthode PIG

##### IV – 1 – Échantillonnage et analyse

La méthode PIG est basée essentiellement sur les résultats des analyses chimiques des prélèvements des eaux souterraines (pH, total des solides dissous (TDS), Calcium ( $Ca^{++}$ ), Magnésium ( $Mg^{++}$ ), Sodium ( $Na^+$ ), Potassium ( $K^+$ ), Bicarbonate ( $HCO_3^+$ ), Chlorure ( $Cl^-$ ), Sulfate ( $SO_4^-$ ), Nitrate ( $NO_3$ ), qui sont déterminés conformément au protocole standard de la qualité de l’eau (voir tableau N° 50).

Tableau N° 50 : Composition chimique des eaux souterraines de la nappe de Tébessa.

paramètres	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH		6,140	8,220	7,186	0,300
TDS	mg/l	6,070	11550,000	3345,357	2619,367
RS	mg/l	420,000	18501,000	2511,847	2670,277
Ca	mg/l	39,360	793,280	258,251	169,925
Mg	mg/l	13,520	243,870	86,878	57,135
Na	mg/l	28,000	1560,000	375,441	395,859
K	mg/l	1,000	38,000	4,271	5,382
Cl	mg/l	40,000	2025,000	448,475	451,330
SO4	mg/l	22,000	3820,000	851,966	806,846
NO3	mg/l	0,000	275,000	47,746	54,847
HCO3	mg/l	30,500	939,400	298,475	128,108

L'indice de pollution des eaux souterraines est une échelle numérique, quantifiant l'étendue de la contamination. Il reflète une influence composite des mesures individuelles de la qualité de l'eau sur la qualité globale des eaux de l'aquifère.

L'algorithme de calcul du PIG est donné comme suit :

#### IV – 1 – 1 – Le poids relatif

Le poids relatif ( $R_w$ ) est attribué à chaque mesure de la qualité de l'eau, en tenant compte de son impact sur la santé humaine. La plage de magnitude numérique de  $R_w$  est comprise entre 1 et 5. Par exemple, la valeur de 5 de  $R_w$  est attribuée au pH, TDS,  $SO_4^{--}$  et  $NO_3$  (tableau N° 51).

**Tableau N° 51 : Système de pondération pour la norme de qualité de l'eau potable par rapport aux mesures de la qualité de l'eau**

paramètres	Unité	Poids relatif ( $R_w$ )	Paramètre de poids ( $W_p$ )	Norme de qualité de l'eau potable ( $D_s$ ) <sup>*</sup>
pH		5	0.139	7.5
TDS	mg/l	5	0.139	500
Ca	mg/l	2	0.056	75
Mg	mg/l	2	0.056	30
Na	mg/l	4	0.111	200
K	mg/l	1	0.028	10
Cl	mg/l	4	0.111	250
SO <sub>4</sub>	mg/l	5	0.139	150
NO <sub>3</sub>	mg/l	5	0.139	45
HCO <sub>3</sub>	mg/l	3	0.083	300
Sum $\Sigma$		36	1.000	

#### IV – 1 – 2 – Le paramètre de poids ( $W_p$ )

Le paramètre de poids ( $W_p$ ) de chaque mesure de la qualité de l'eau peut être calculé en utilisant la formule suivante et ce, pour arriver à la mesure relative de la qualité de l'eau de chaque élément dans l'ensemble.

$$W_p = R_w / \Sigma R$$

#### IV – 1 – 3 – État de concentration ( $Sc$ )

L'état de concentration ( $Sc$ ) de la mesure de la qualité de l'eau de chaque échantillon, par rapport à sa norme de celle de l'eau potable ( $D_s$ ). Le  $Sc$  est calculé en rapportant la concentration ( $C$ ) de chaque mesure de la qualité de l'eau de chaque échantillon par sa norme de qualité de l'eau potable.

$$Sc = C / D_s$$

#### IV – 1 – 4 – Qualité globale de l'eau (Ow)

La qualité globale de l'eau est calculée en prenant le produit de chaque mesure de la qualité de l'eau avec son état de concentration correspondant. La grandeur (Ow) reflète la qualité globale de l'eau et permet également de comprendre la nature du paramètre de poids par rapport à la concentration de chaque mesure de la qualité de l'eau. Elle peut (Ow) être calculée par l'expression suivante :

$$Ow = Wp * Sc$$

#### IV – 1 – 5 – L'indice de pollution des eaux souterraines (PIG)

Cet indice est calculé en additionnant toutes les valeurs de (Ow) fournies par toutes les mesures de la qualité de l'eau de chaque échantillon.

$$PIG = \sum Ow$$

#### IV – 2 – Classification des PIG

Cette classification est basée sur la norme de qualité de l'eau destinée à des fins de consommation. Elle pourrait également être utilisée dans l'évaluation de la contamination des eaux souterraines. Lorsque les valeurs de qualité d'un échantillon d'eau particulier et celle de concentration de mesure de la qualité de l'eau sont identiques, leur impact sur la santé peut être insignifiant.

En tenant compte de cela, lorsque la valeur du PIG est inférieure à 1.0, elle pourrait être considérée comme un indice de non-pollution. Par contre, lorsqu'elle dépasse les 1.0, elle peut être prise en compte comme contribution de concentrations supplémentaires de mesures de la qualité de l'eau dans les eaux souterraines en favorisant l'intrusion de matières étrangères dans un aquifère en raison de la pollution.

**Tableau N° 52 : Classification des indices de pollution par la méthode de PIG.**

<i>Degré de Pollution</i>	<i>Indice de PIG</i>
Pollution insignifiante	PIG < 1.0
Pollution faible	1.0 < PIG < 1.5
Pollution modérée	1.5 < PIG < 2.0
Pollution élevée	2.0 < PIG < 2.5
Pollution plus élevée	PIG > 2.5

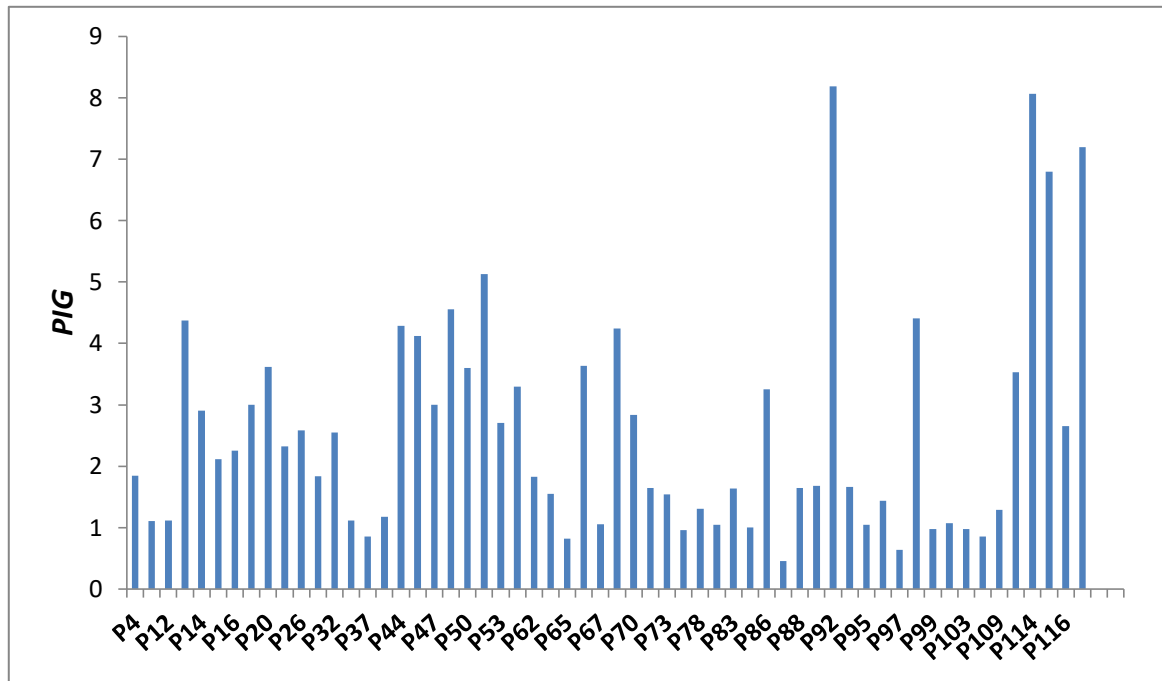


Fig. 95 : Valeurs des PIG des échantillons d'eau dans la plaine de Tébessa.

Les valeurs calculées de PIG dans la zone d'étude varient entre 0,457 et 8,190 (figure 95), ce qui représente 22,41% du total des échantillons d'eau souterraine comme zone de pollution modérée à élevée et environ 43,10% comme zone de pollution très élevée.

La contribution relative de la concentration de la mesure de la qualité de l'eau de chaque échantillon d'eau est prise en considération, si  $O_w$  est supérieur à 0,1 (ce qui correspond à 10% de la valeur de 1,0 de PIG). Ce qui donne une image claire de l'impact de la pollution sur le système des eaux souterraines.

#### IV – 3 – Carte de vulnérabilité selon la méthode PIG

La carte de répartition spatiale des zones de PIG a été établie à l'aide du SIG (Fig. 96), qui présente une zone de faible pollution observée tout au long de l'extrême Sud, avec une prédominance dans la partie centrale, où la topographie est élevée.

La zone de pollution modérée se répand surtout à l'Est, à l'Ouest et au Nord. Une zone de forte pollution est enregistrée au Nord et à l'Ouest et une autre, de très forte pollution, est observée à l'extrême Nord, où la topographie est faible.

Ainsi, la répartition spatiale des zones de PIG augmente progressivement de l'amont vers l'aval. Cela induit une augmentation progressive de la pollution de son niveau insignifiant à un niveau notable, par une combinaison de valeurs d' $O_w$  de diverses concentrations de mesures de la qualité de l'eau.

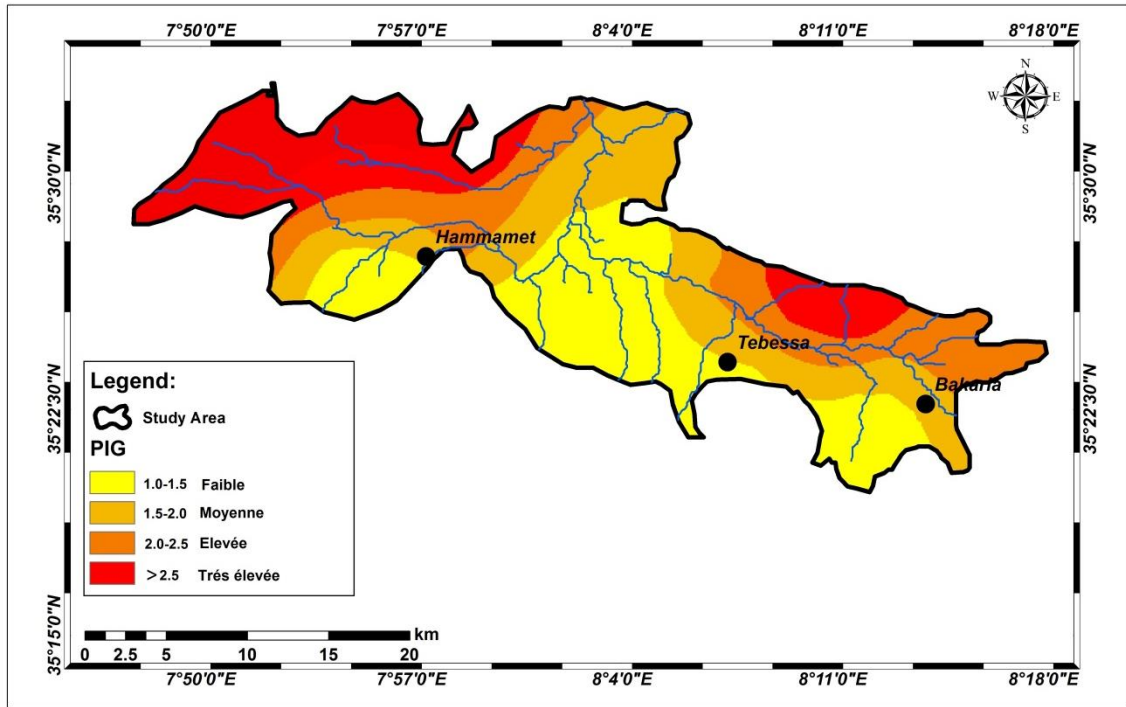


Fig. 96 : Répartition spatiale des zones de pollution des eaux souterraines de la plaine de Tébessa basé sur la méthode PIG.

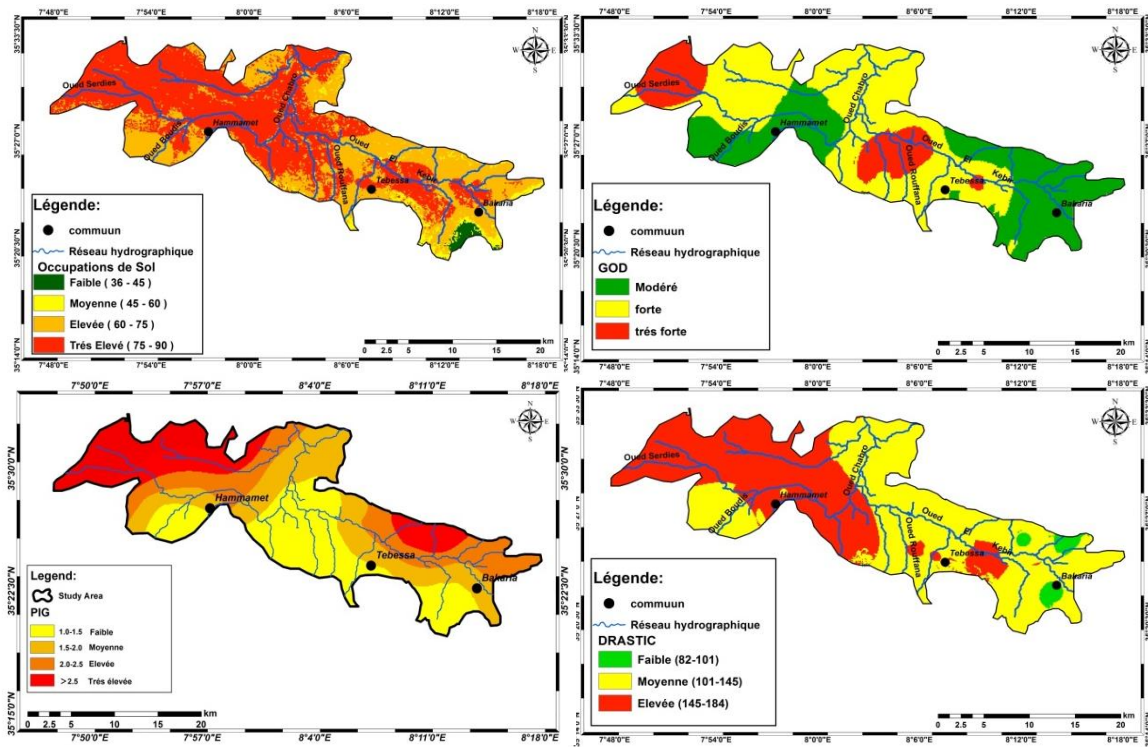


Fig. 97 : Représentation cartographique des quatre méthodes de vulnérabilités (DRASTIC, GOD, SI ET PIG).



## Conclusion

Nul ne peut ignorer les conséquences et les effets néfastes d'une pollution, qu'elle soit ponctuelle, atmosphérique ou diffuse. La question de sa localisation ainsi que l'estimation du degré de danger qu'elle représente reste un sujet épineux et constitue l'un des défis à relever.

Depuis l'apparition des premiers foyers de pollution, les spécialistes concentrent leurs efforts et mettent à notre disposition de nouvelles théories et techniques pour faire face à ce fléau, telle que la méthode DRASTIC, GOD, SI, PIG ...etc.

Dans le présent travail, et dans une tentative de déceler la présence de danger et de cerner les zones à haut risque et donc vulnérables à la pollution, en fonction de leurs degré (faible, modérée, moyennement modérée, forte...), il nous était préférable d'avoir recours à ces différentes méthodes.

L'utilisation des diverses données nécessaires ainsi que les résultats des différents traitements ont permis d'aboutir à une représentation cartographique propre à chacune des techniques dont la lecture et l'analyse permettent d'identifier cette vulnérabilité ainsi que sa répartition à l'échelle de notre bassin.

Le centre et surtout le côté Nord – ouest de la plaine ainsi que le chef-lieu de la wilaya, se démarquent par une vulnérabilité élevée, voire très élevée (sur toutes les cartes).

La région de Bekkaria ainsi que le Sud – est du bassin, se distinguent par une vulnérabilité faible à modérée.

La localisation de ces zones vulnérables est un indicateur à prendre en considération lors de la mise en place de programme de gestion intégrée et de mobilisation de la ressource en eau, pour les divers secteurs utilisateurs (AEP, AEI, AEA).

***GESTION INTÉGRÉE DE LA RESSOURCE  
EN EAU – BASSIN DE TÉBESSA –***

## Introduction

Après la localisation des différentes zones vulnérables à la pollution, dont le but était de protéger les ressources en eau souterraines, qui connaissent un rabattement considérable, suite à la conjugaison de plusieurs facteurs ; tels que la demande progressive et croissante en cet élément vital d'une part, le changement climatique d'autre part, ...etc.

À cet effet, une politique rationnelle, devient une nécessité, passant inévitablement par une gestion intégrée des ressources en eau du bassin, afin de satisfaire, au mieux, l'ensemble des catégories d'utilisateurs, sans pour autant nuire à la pérennité des écosystèmes vitaux.

### I – Description de la méthodologie

Notre démarche de travail dans cette étude s'appuie sur l'utilisation du logiciel *WEAP* (Water Evaluation And Planning), qui a été développé par le « Stockholm Environment Institute » [SEI 2008]. *WEAP* est l'un des outils numériques de planification intégrée des ressources en eau. C'est une plate-forme de modélisation qui permet l'évaluation intégrée du climat d'un bassin versant, l'hydrologie, l'utilisation des terres, les infrastructures et les priorités de gestion de l'eau [YATES D. and al.2005]. Son fonctionnement se base sur le principe de la comptabilité de l'équilibre de l'eau. L'utilisateur représente le système des sources d'approvisionnement (rivières, aquifères, réservoirs...), le retrait, la demande en eau et les exigences de l'écosystème [HERVE L. and al. 2003].

La gestion de l'eau doit être adaptée, afin de maintenir les moyens de subsistance des populations. Le logiciel du système d'évaluation et de planification de l'eau (*WEAP*) a été largement utilisé pour examiner des systèmes d'eau complexes dans le secteur de la planification des ressources en eau dans le monde entier [IRENE M. JOHANNSEN. 2016].

En Algérie, *WEAP* a été utilisé dans différentes régions. Un modèle a été appliqué sur les bassins versants de l'Ouest du pays, pour évaluer et analyser l'équilibre actuel et prévoir des scénarios futurs de gestion des ressources en eau, en prenant en compte les différentes politiques et les facteurs opérationnels qui peuvent affecter la demande jusqu'en 2030 [HAMLATA and al 2012].

### II – 1 – Analyse et traitement des données nécessaires

Dans cette partie, il s'agit de créer une cartographie de la zone d'étude. On peut utiliser des cartes traitées avec des logiciels de traitement cartographique (*SIG*), en particulier Arc View.

Cette carte va servir comme fond des dessins des éléments nécessaires pour pouvoir faire la simulation tels que : les emplacements urbains, les rivières, les sources d'eaux souterraines, les réservoirs, les barrages, les industries, les sites d'agriculture et les autres types d'emplacement selon l'étude.

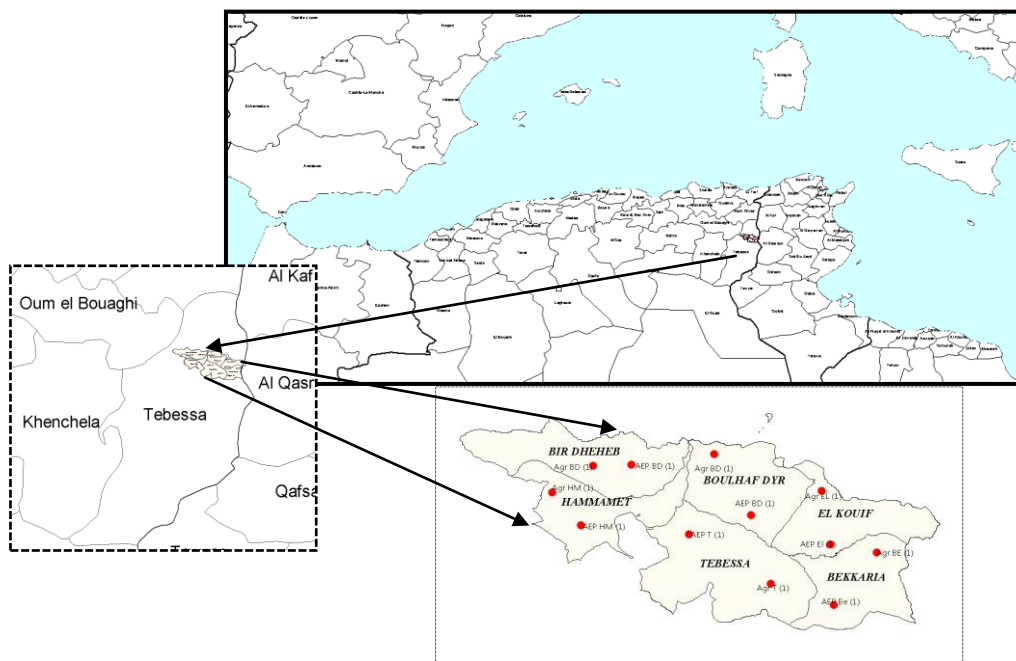


Fig. 98 : Carte de la zone d'étude avec le logiciel WEAP.

La méthodologie adoptée repose sur ce qui suit, tel que :

– En premier lieu, sur la construction d'une base de données (BD) cartographique (2 couches) :

- **Couche (1)** : zones urbaines (communes), surfaces agricoles irriguées.

Un site de demande est mieux défini comme un ensemble d'utilisateurs d'eau qui partagent un système de distribution physique, qui se trouvent tous dans une région définie ou qui partagent un point d'approvisionnement de prélèvement important. Le niveau d'agrégation est généralement déterminé par le niveau de détail des données disponibles sur l'utilisation de l'eau. Les données sur la demande peuvent ne pas être disponibles pour des sites individuels, mais peuvent être disponibles uniquement pour une unité plus grande telle qu'une ville ou une circonscription.

Lors de la définition des sites de demande, il est utile d'inventorier l'infrastructure physique réelle, comme les stations de pompage, les installations de prélèvement, les usines de traitement des eaux usées et les champs de puits, le niveau d'activité annuelle qui détermine la demande telle que le nombre d'utilisateurs de l'eau pour des motifs domestiques ou agricole, le niveau de consommation d'eau par unité d'activités.

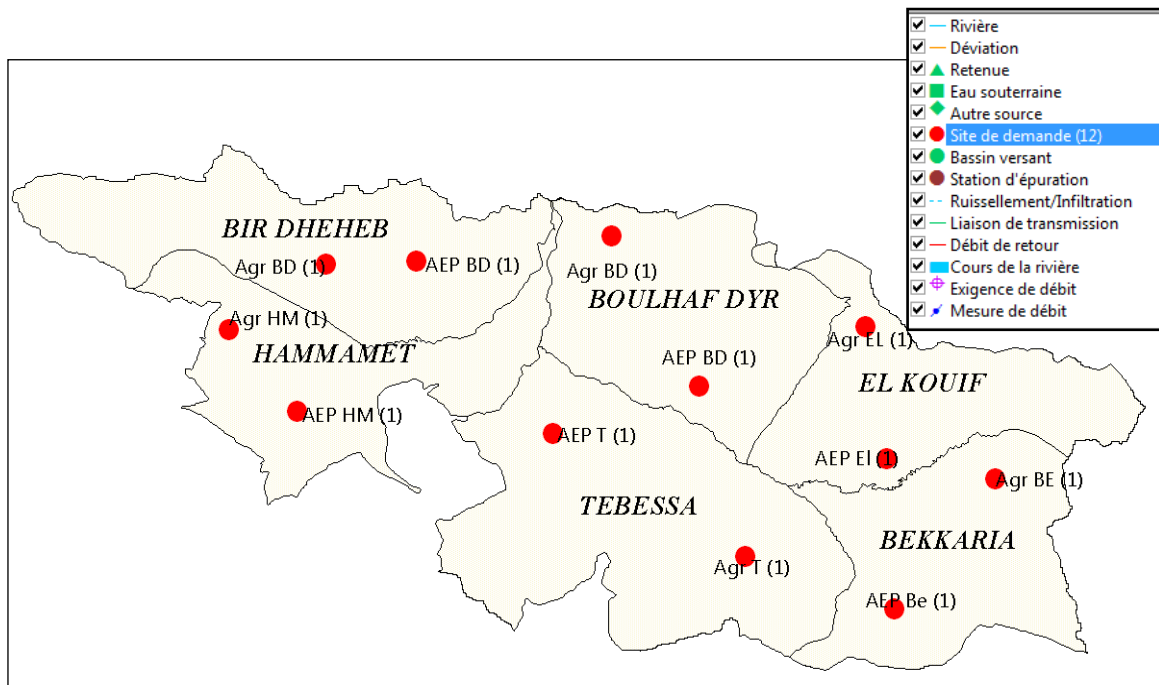


Fig. 99 : Répartition des sites de demande. Bassin de Tébessa.

Donc, la demande annuelle représente la quantité d'eau exigée par chaque demande. Les pertes, la réutilisation, et l'efficacité sont estimées séparément. La consommation en eau est calculée en multipliant le niveau de l'activité annuel par un taux d'usage de l'eau. Les niveaux de l'activité sont utilisés dans l'analyse de la demande en eau de WEAP comme une mesure d'activité sociale et économique.

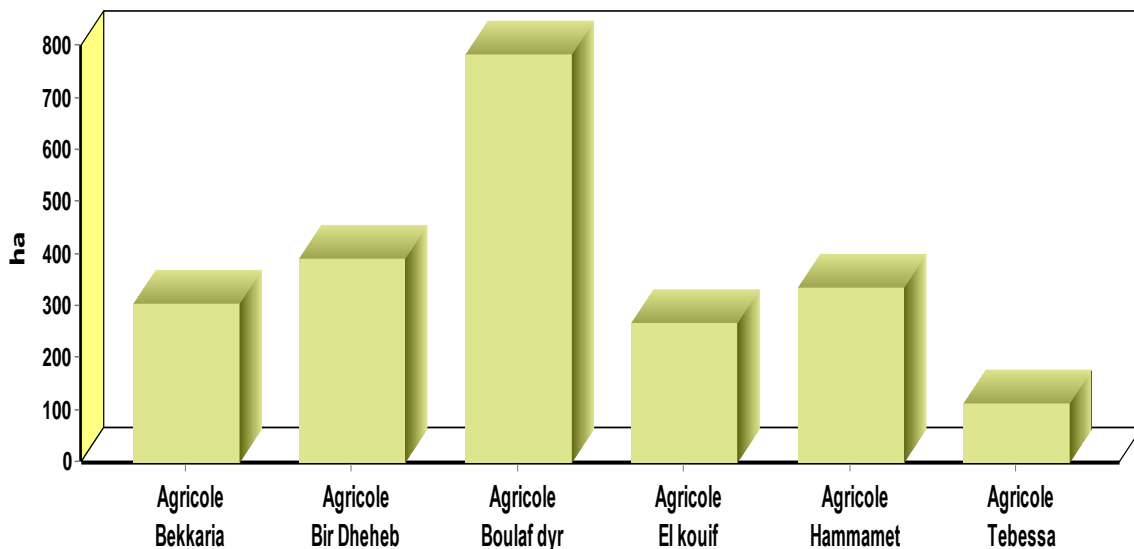


Fig. 100: surface agricole de chaque site de demande (niveau d'activité annuelle par Hab).

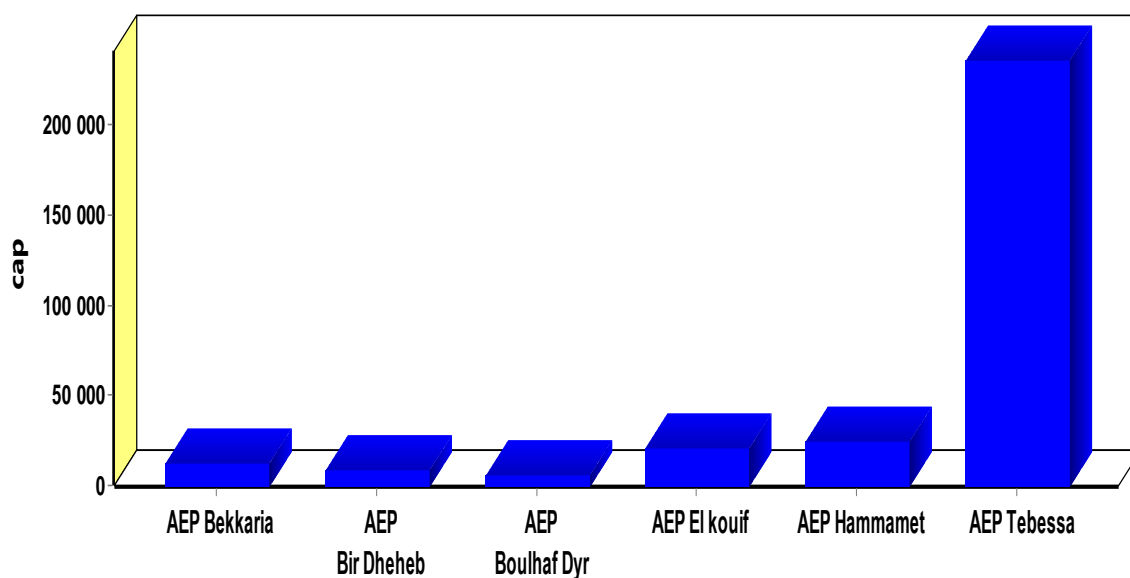


Fig. 101 : population de chaque site de demande (niveau d'activité annuelle par personne).

- **Couche 2** : champs de captage des forages, qui regroupe le nombre de forages déclarés et exploités dans notre région d'étude (tableau N° 53).

Tableau N° 53 : la production des forages à travers les communes du bassin de Tébessa.

commune	Nombre de forages Déclarés			Débits (l/s)	
	En service	À l'arrêt	Total	Mobilisé	Exploité
<i>EL-Kouif</i>	9	2	11	133	49
<i>Boulhaf Dyr</i>	3	0	3	78	31
<i>Bekkaria</i>	7	1	8	137	101
<i>TEBESSA</i>	26	1	27	524	306
<i>Hammamet</i>	18	0	18	359	192
<i>Bir D'heb</i>	3	0	3	12	8,5
<i>Boukkhadra</i>	1	1	2	60	3
<b>Total</b>	<b>67</b>	<b>5</b>	<b>72</b>	<b>1303</b>	<b>690</b>

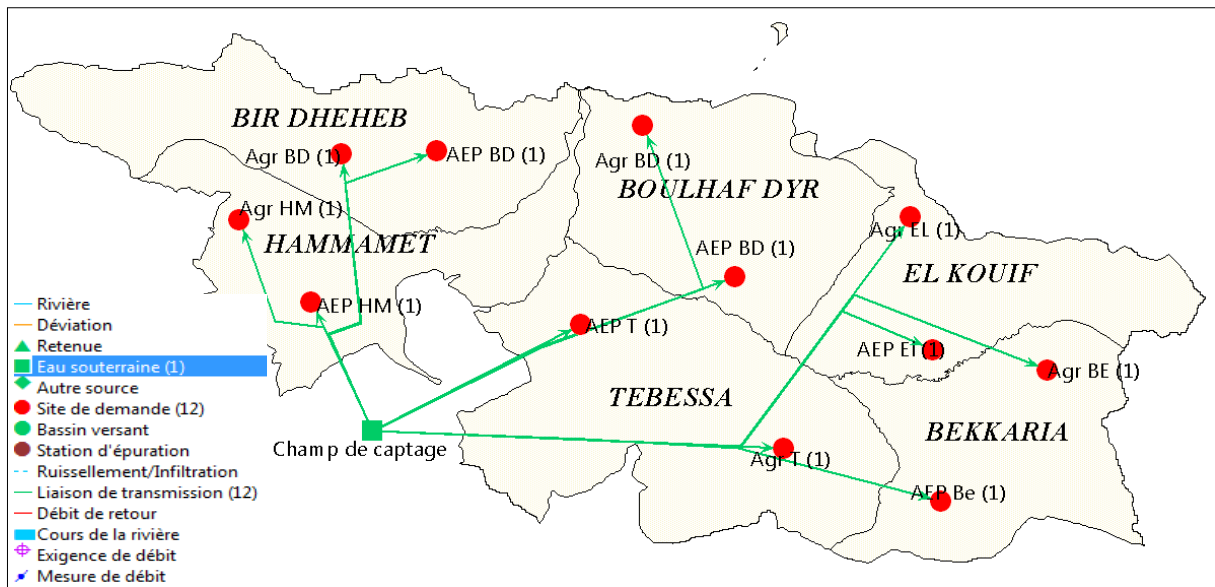


Fig. 102 : Champs de captage d’approvisionnement. Bassin de Tébessa.

- En second lieu, élaboration d’un modèle conceptuel du système de mobilisation des eaux de surface via le logiciel Water Evaluation And Planning (*WEAP*).
- En troisième lieu, consiste en l’établissement des relations entre les nœuds du modèle conceptuel avec la base de données. Ce travail fait aboutir à la construction d’un outil de modélisation des besoins en eau des six (06) sites urbains ainsi que six (06) sites agricoles. Chaque site de demande a besoin d’une liaison de transmission depuis sa source et, le cas échéant, d’une liaison de retour soit directement vers une rivière, une station d’épuration ou un autre emplacement.

## II – 2 – Liens de transmission

Les liaisons de transport fournissent de l’eau de surface (nœuds de réservoir et nœuds de prélèvement), des eaux souterraines et d’autres approvisionnements pour satisfaire la demande finale sur les sites de demande.

En outre, les liaisons de transport peuvent fournir des sorties des eaux usées des sites de demande et des usines de traitement des eaux usées vers d’autres sites de demande pour réutilisation. *WEAP* utilise deux systèmes définis par l’utilisateur pour déterminer l’allocation de l’eau le long de chaque liaison de transport chaque mois, comme décrit dans priorités d’allocation de l’eau.

## II – 3 – Liens de retour

L'eau qui n'est pas consommée sur un site de demande peut être dirigée vers un ou plusieurs autres sites de demande, des usines de traitement des eaux usées, des nœuds d'eaux de surface ou souterraines. Les flux de retour sont spécifiés en pourcentage du débit sortant.

Le flux de retour de l'usine de traitement des eaux usées peut être dirigé vers un ou plusieurs sites de demande, nœuds fluviaux ou sources d'approvisionnement locales. Tout comme les flux de retour des sites de demande, ils sont spécifiés en pourcentage du flux sortant.

## II – 4 – Réglage des paramètres

Dans cette partie, les paramètres temps devraient être réglés. Créer une année de comptes courants pour le projet. Dans cette étude, nous nous limitons entre 2015-2050, en ce qui est informations sur le système (sites de demandes, données d'approvisionnement, etc.). Les informations économiques, démographiques, agricoles et d'utilisation de l'eau sont utilisées pour construire des scénarios alternatifs qui examinent la façon dont la consommation totale et désagrégée de l'eau évolue au fil du temps.

Ces scénarios de demande sont calculés dans le *WEAP* et appliqués de façon déterministe à un algorithme d'affectation basé sur un programme linéaire. L'analyse de la demande est le point de départ pour conduire une analyse intégrée de la planification de l'eau, étant donné que tous les calculs d'approvisionnement et de ressource dans le *WEAP* sont menés par la routine d'optimisation qui détermine la livraison finale à chaque nœud de demande, selon les priorités spécifiées par l'utilisateur.

De nombreuses variantes peuvent être créées et simulées par l'introduction des modifications sur le compte actuel pour évaluer les effets dus aux changements des règles et technologies de gestion.

### II – 4 – 1 – Développement des scénarios

Un scénario de référence est établi à partir du compte actuel, dans lequel toutes les données de base sont introduites, pour simuler la même évolution du système sans intervention. Le scénario de référence couvre la période 2015-2050, et traduit une projection des tendances courantes sans changements majeurs.

Il sert comme point de comparaison pour les autres scénarios dans lesquels des changements de données du système peuvent être apportés.



- Les dotations journalières introduites pour ce Scénario sont celles utilisées par les institutions officielles des services hydrauliques de la wilaya de Tébessa (120 l/j/hab).
- Les projections des tendances de la population sont modifiées avec le taux d'accroissement actuel, qui est de l'ordre de 2,3 selon *RGPH 2008* (pendant la période de projection).
- Les consommations annuelles en eau sont les mêmes que celles du compte actuel et les pertes dues aux fuites d'eau sont estimées à plus de 40%.
- Les projections des tendances des surfaces agricoles sont de l'ordre de 1%. Ce taux peut servir à exploiter toutes les surfaces agricoles à long terme.
- Les besoins en eau d'irrigation nets, à l'échelle annuel, pour notre région sont analogues à ceux estimés dans la zone de *Sedrata* et *Zouabi* et qui ont été évalués à  $6970 \text{ m}^3 / \text{ha}$ , selon une étude menée en 2011, (*Gasmallah Nadjette 2011*), cette similarité résulte du fait que *Sedrata* et *Zouabi* ont le même type de climat que celui de la région de Tébessa.

Ensuite, nous avons proposé quatre (04) scénarios où les informations économiques, démographiques, physiques et d'utilisation de l'eau sont utilisées pour construire des scénarios alternatifs qui examinent la façon dont la consommation totale et désagrégée de l'eau évolue au fil du temps (*Fig.102*).

Ces scénarios sont élaborés par l'introduction d'expressions mathématiques sous formes d'hypothèses clés traduisant les différents cas de figures à examiner. Dans notre cas nous avons proposé cinq (05) hypothèses clés basées essentiellement sur le taux d'accroissement de la population, accroissement des surfaces agricoles, amélioration des réseaux de distributions et des dotations théoriques.

À la fin, des scénarios (Quoi si) peuvent être créés pour changer le scénario (Référence) et évaluer les effets des changements de politiques ou de technologies.

Pour notre cas, les principales hypothèses sont :

- ✓ **Hypothèse (01)** : Taux d'accroissement de la population : fort 2 %.
- ✓ **Hypothèse (02)** : Dotation réel selon la direction de l'hydraulique de Tébessa DRE : 120L/hab/j).
- ✓ **Hypothèse (03)** : Augmentation de la dotation : 150 L/hab/j.
- ✓ **Hypothèse (04)** : Irrigation par les méthodes moderne (réduction des besoins à 50%).
- ✓ **Hypothèse (05)** : Réduction des pertes de 20%.

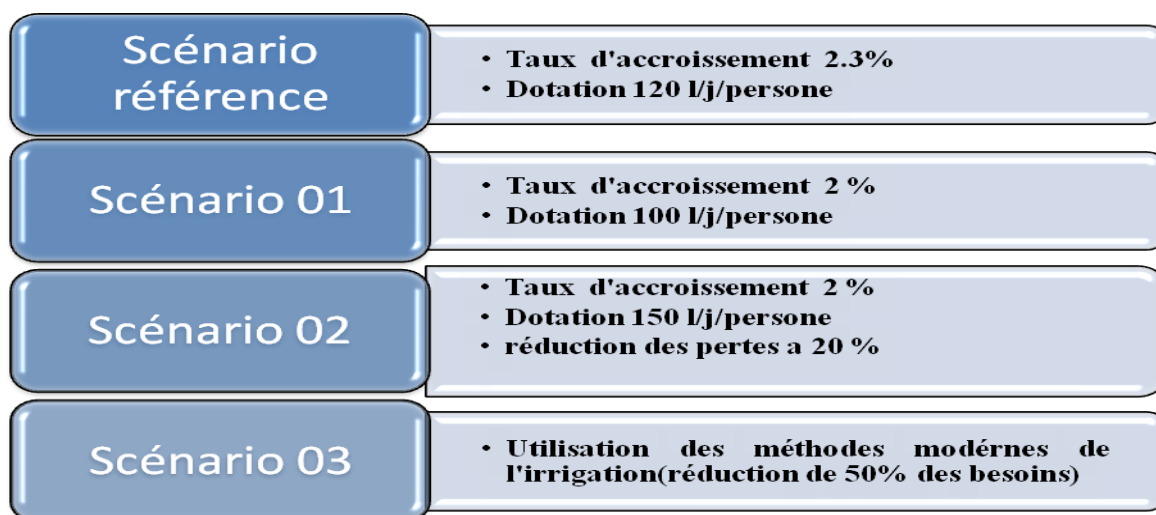


Fig. 103 : Organigramme de la création des scénarios.

### III – La demande en eau potable

Les sites de demande sont représentés par le nombre d’habitant actuel, calculé par le logiciel WEAP en utilisant le nombre de population et le taux d’accroissement (année de base 2015).

#### III – 1 – Scénario de référence

Face à la croissance de la population des agglomérations, la demande en eau potable pour le scénario de référence augmente régulièrement entre 2015 et 2050 ; elle a augmenté de 14 Mm<sup>3</sup> en 2016, pour atteindre en 2030 environ 19 Mm<sup>3</sup> et elle s’élèvera au total en 2050 à environ 30 Mm<sup>3</sup>.

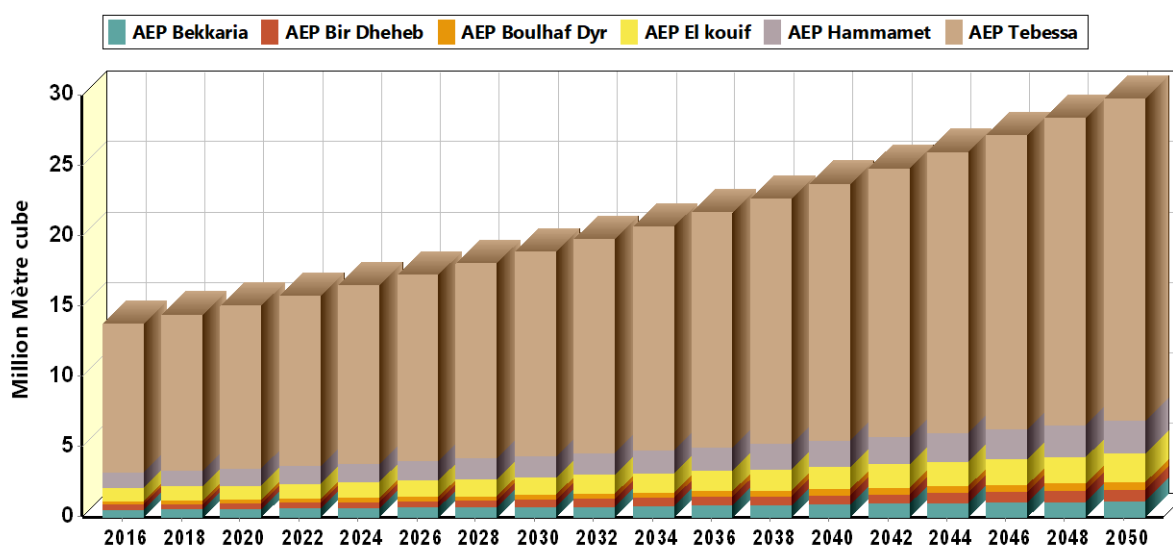


Fig. 104 : Évolution de la demande en eau potable – Scénario de référence -

Le graphique ci-dessus (fig.104) montre que la ville de Tébessa est les plus consommatrice en eau domestique, ceci se traduit par le nombre élevé de la population et le mode de vie citadin.

### III – 2 – Scénario 01

Le scénario 01 : montre le schéma avec une croissance de de 2 % de la population et une dotation de 100l/jour. Avec l'analyse visuelle on constate une augmentation significative dans la demande en eau potable, entre 2016 et 2050. Elle a augmenté de 11 Mm<sup>3</sup> en 2016, pour atteindre les 15 Mm<sup>3</sup>, environ, en 2030 environ et elle s'élèvera à environ 22 Mm<sup>3</sup>, au total, en 2050.

Le graphique ci-dessous (fig. 105) montre aussi que les villes de Tébessa, Hammamet et El kouif sont les plus consommatrices en eau domestique, alors que l'on retrouve que le reste des circonscriptions sont les moins consommatrices. On constate également une baisse significative de la demande en eau potable par rapport au scénario de référence.

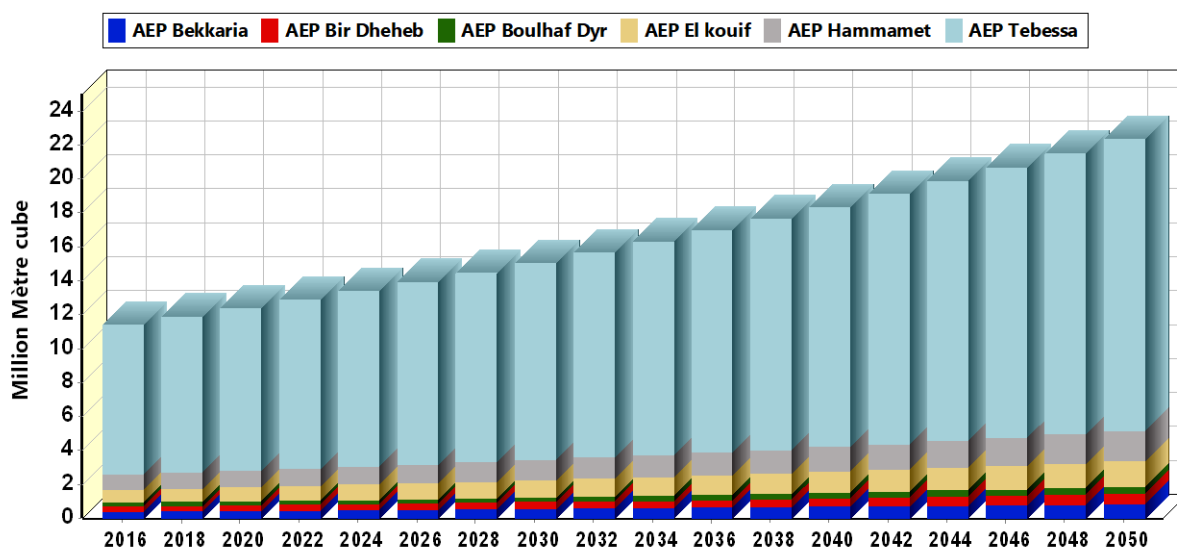


Fig. 105 : Évolution de la demande en eau - Scénario 01.

### III – 3 – Scénario 02

Ce scénario montre le modèle avec une croissance de population de 2% et une dotation de 150 l/jour. Avec l'analyse visuelle, on constate une augmentation aussi significative dans la demande en eau potable, entre 2016 et 2050. Elle a augmenté de 16 Mm<sup>3</sup> en 2016, pour atteindre environ de 25 Mm<sup>3</sup>, en 2035 et elle s'élèvera à environ 34 Mm<sup>3</sup> au total, en 2050.

III – 4 – Demande non satisfaite (DNS)

Les résultats de la demande non satisfaite montrent le déficit en eau potable pour tous les Scénarios. Ce déficit est bien visible dans les scénarios de référence, (1) et (3) où la demande est non satisfaite durant toute la période de simulation, avec des valeurs importantes de l'ordre de  $2M m^3$  en Janvier 2016 et  $4.5 M m^3$  en Octobre 2050. La demande est satisfaite pour le scénario offre améliorée ? car on a proposé une évolution continue de l'offre.

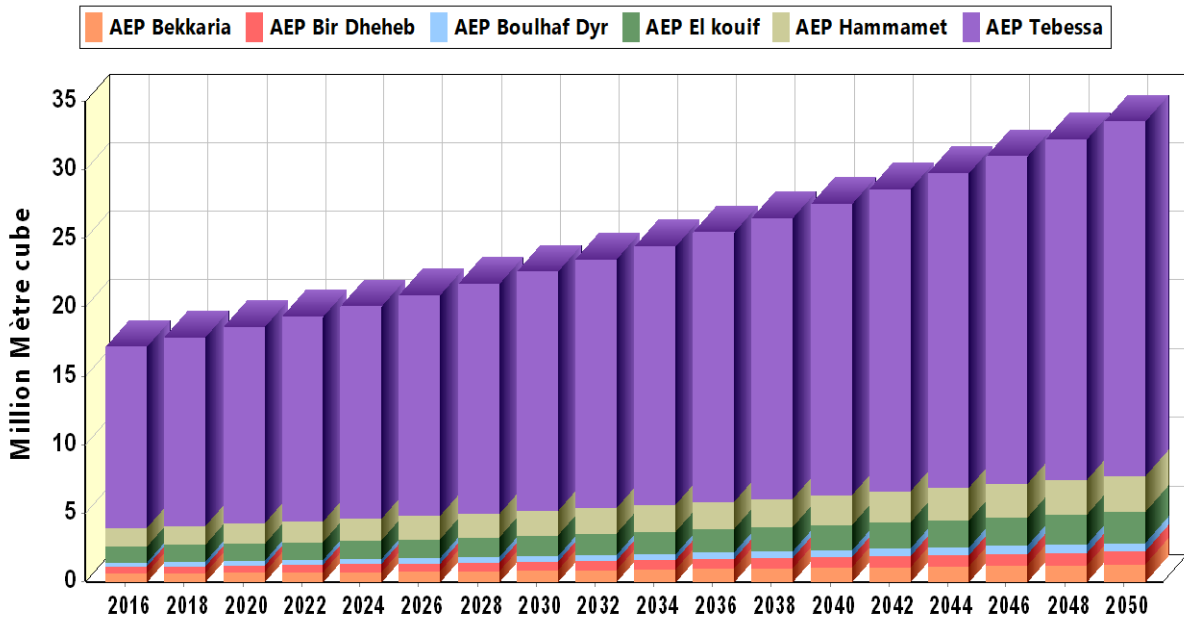


Fig. 106 : Évolution de la demande en eau - Scénario 02.

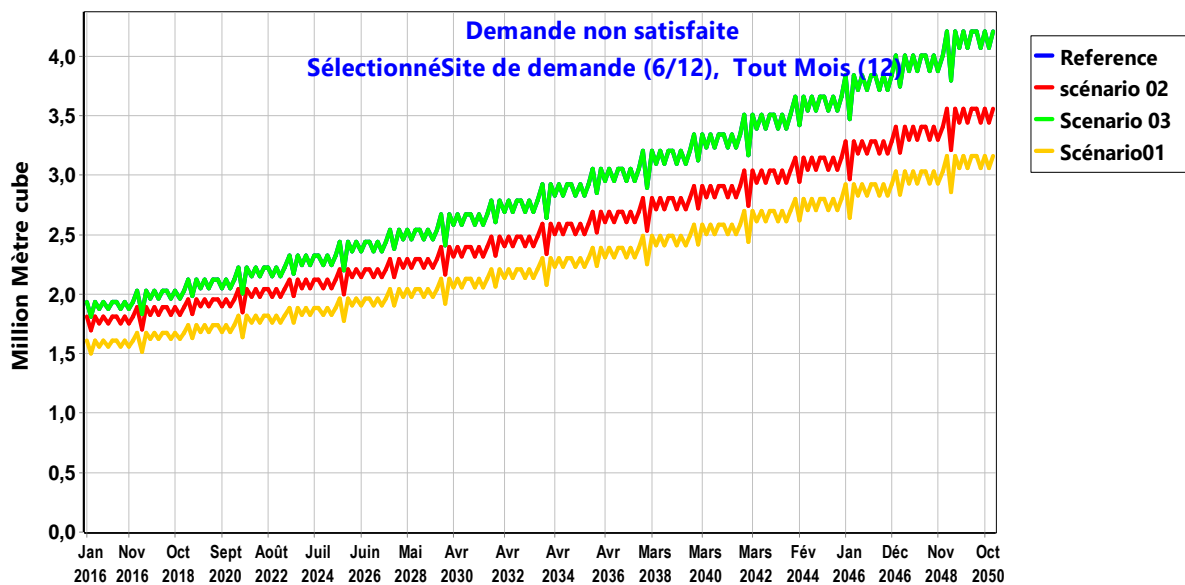


Fig. 107 : Demande non satisfaite mensuel en eau potable pour tous les scénarios.

#### IV – Demande en eau agricole

L'étude de l'évolution de la consommation en eau en agriculture vise à chercher une relation entre l'évolution des superficies irriguées et l'évolution des prélèvements d'eau.

La demande en eau est très élevée pour les scénarios de référence et le scénario (3) ; elle varie en moyenne entre  $15 \text{ Mm}^3$  en 2016 et  $18 \text{ Mm}^3$  en 2032, et dépasse  $21 \text{ Mm}^3$  en 2050 pour le scénario de référence (Fig.108).

Vu leur dotation et l'utilisation des techniques modernes en irrigation, le scénario (3) montre que la demande en eau est très faible par rapport aux scénarios de référence avec des valeurs allant de  $7.5 \text{ Mm}^3$  en 2016 à  $11 \text{ Mm}^3$  en 2050 (Fig.109).

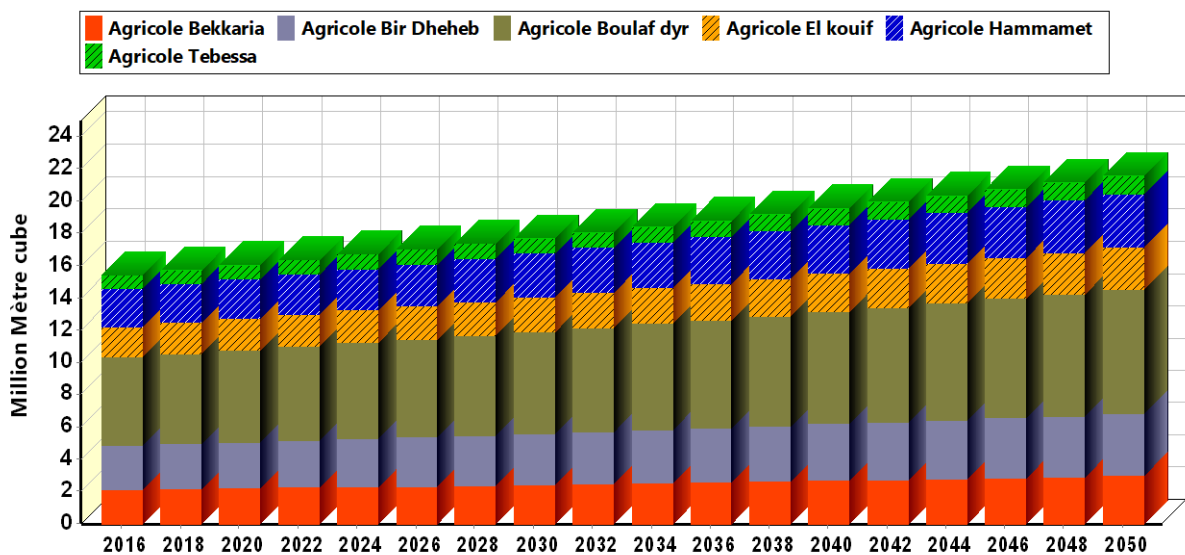


Fig. 108 : Évolution de la demande en eau agricole – Scénario de référence –

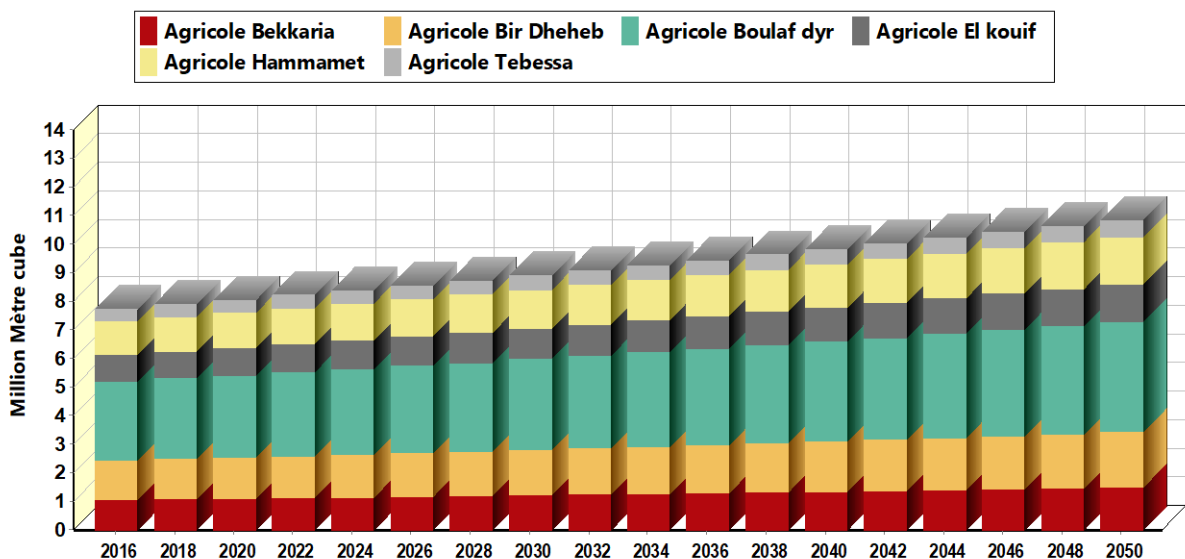


Fig. 109 : Évolution de la demande en eau agricole – Scénario 3 –

La demande en eau globale, pour les différents secteurs de notre région d'étude, augmente au même rythme, de 2016 à 2050 pour tous les scénarios. Cette augmentation est due à l'évolution de la population et des surfaces agricole irriguées.

Dans la figure (N° 110), sont représentées les tendances qui se dégagent par scénario. Les résultats obtenus sont, selon le scénario de référence et le scénario (3), de 1.3 à 0.65 Mm<sup>3</sup> En Janvier 2016 et de 0.95 à 1.8 Mm<sup>3</sup> en Décembre 2050. La diminution remarquable de la demande en eau pour ce le scénario (3) provient de la dotation moyenne adaptée à l'application de nouvelles techniques d'irrigation.

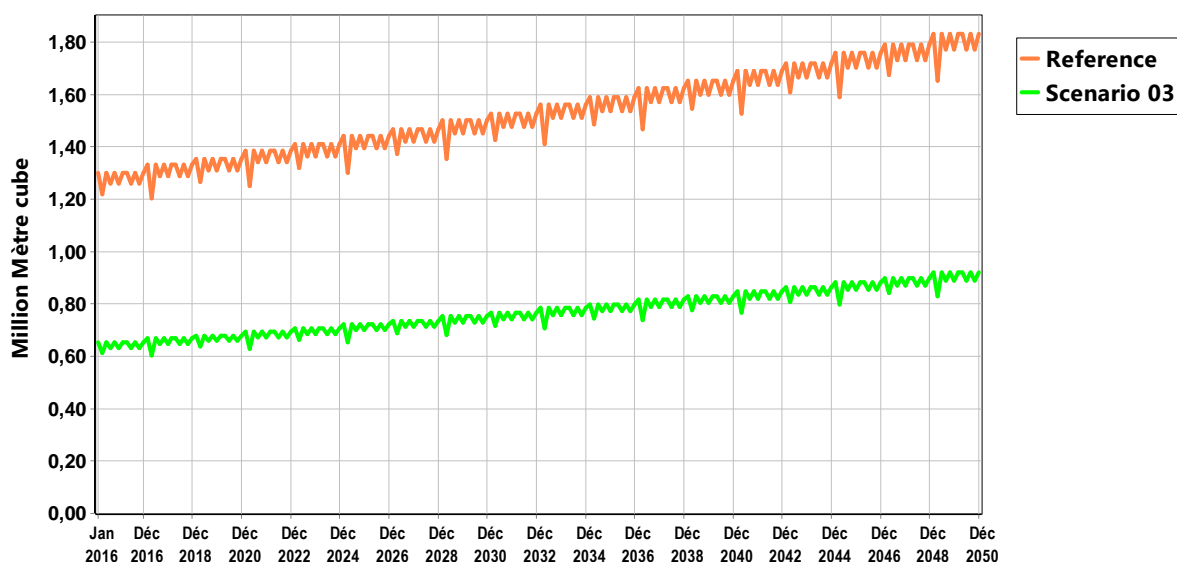


Fig. 110 : Évolution de la demande en eau agricole – Scénario 03 et scénario de référence –

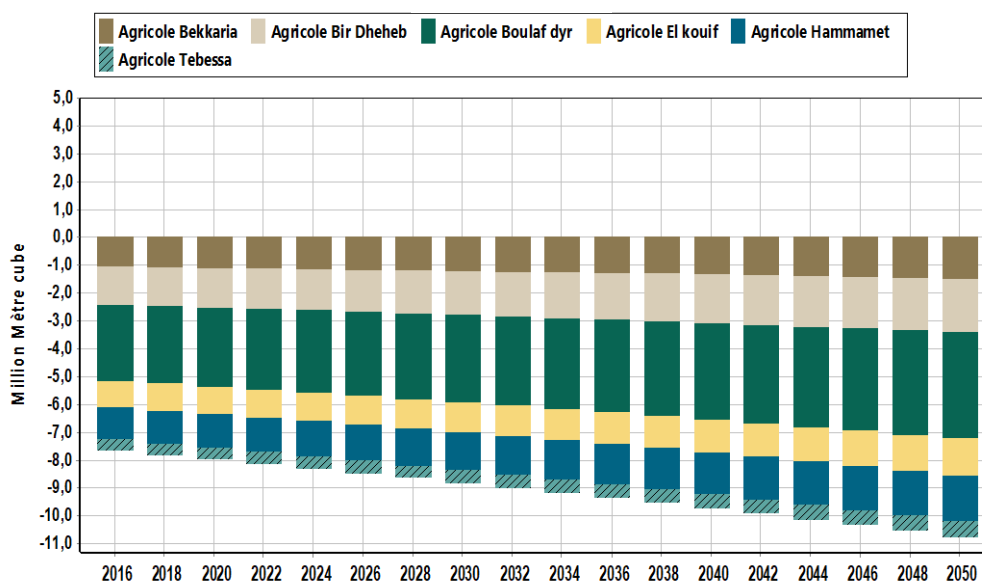


Fig. 111 : Comparaison entre la demande en eau pour le Scénario 3 par rapport à celui de référence.

## Conclusion

La ressource en eau à l'échelle de notre région est soumise à une double menace. Il est clair que le développement, à plusieurs échelles, économique, sociale, industrielle ..., que connaît la région a eu son impact.

La demande en eau a doublé voire triplé pour les divers secteurs utilisateurs de l'eau (*AEP, AEI, AEA*).

L'*AEP* est le premier secteur consommateur d'eau, avec une population d'environ 251 284 habitant (en 2016) avec un besoin de l'ordre de 16Mm<sup>3</sup>/an. Ce volume sera revu à la hausse d'ici 2050, et devrait toucher les 34Mm<sup>3</sup>/an.

L'agriculture consomme une moyenne de 15 Mm<sup>3</sup> en 2016 et 18 millions Mm<sup>3</sup> en 2032, et dépassera les 21 millions Mm<sup>3</sup> en 2050.

L'industrie reste en dernière position, avec un volume faible, vu que le tissu industriel n'est pas à son apogée.

La masse d'eau mobilisée en 2020 est de 41Mm<sup>3</sup>, uniquement issue de la réserve souterraine et ce, pour les différents besoins.

La ressource renouvelable est estimée à 25Mm<sup>3</sup>/ans.

Nous remarquons qu'il y'a un déséquilibre entre les apports et les sorties. Ce déficit s'accumule depuis plusieurs années. Cet état a engendré un rabattement du niveau piézométrique et par conséquent la réserve totale s'épuise d'une manière inquiétante.

*CONCLUSION GÉNÉRALE*  
*&*  
*RECOMMANDATIONS*



## *CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS*

---

Le présent travail, a été mené dans le bassin de *Tébessa* ; au *Nord-est* Algérien et faisant partie du grand bassin versant de la *Medjerdah*, couvre une superficie de  $974.4\text{km}^2$  et se distingue par ce qui a été retenu à travers cette étude :

Il est caractérisé par une forme (rectangulaire) allongée ( $k_c = 1,90$ ), avec un relief assez faible, la dominance de la classe d'altitude, constituant la plaine, comprise entre 742 et 1 000m (58.21%), l'altitude moyenne est de 993.73m, une densité de drainage ( $D_d = 4,87\text{km}/\text{km}^2$ ) et un temps de concentration de ( $t_c = 10\text{ heures}, 09\text{ min et }36\text{secondes}$ ).

L'étude géologique du secteur, permet d'identifier les diverses formations qui constituent le terrain notamment, celles reconnues par leur perméabilité en grand, dont les calcaires Maestrichtiens, Turoniens et Éocènes qui bordent la plaine, du Nord comme du Sud.

Les formations alluvionnaires, composées de sédiments de la série plio-quaternaire et caractérisées par leur perméabilité en petit, se répandent à l'intérieur de la plaine. Elles sont d'un granoclassement de la bordure (où on rencontre de gros cailloutis voire des galets calcaires) vers le centre de la plaine (pays des limons récents, à faible perméabilité).

À *Djebel Djebissa*, et selon les notes qui s'y rapportent, c'est en grande partie des formations argilo-gréso-calcaires à grés très abondant, d'âge triasique, en contact tectonique avec celles carbonatées essentiellement dolomitiques, de l'Aptien-Albien non différencié.

L'abondance de ce matériel évaporitique, témoigne d'une activité triasique intense et d'une importante ascension.

Les travaux de géophysique, dont la zone d'étude était sujette, ont permis de mettre en évidence des formations aquifères diverses ; où l'affleurement de matériel alluvionnaire du Quaternaire, d'une porosité d'interstice et d'une résistivité oscillant de 20 à  $100\Omega.m$ , qui fait le remplissage du bassin.

Le premier niveau supposé se comporter comme aquifère, correspondant à la nappe phréatique, composé de matériel à porosité d'interstice se déposant avec quelques discontinuités et des épaisseurs variables.

Les valeurs de résistivité diminuent des bordures de la plaine ( $100\Omega.m$ ) vers le centre ( $5\Omega.m$ ), et varient donc en fonction de la nature et de la répartition du matériel de remplissage qu'on qualifie par conséquent d'hétérogènes.

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS***

---

Dans la région de *Tébessa*, et selon l'étude climatique, règne un climat semi-aride de type continental, caractérisé par un été chaud et un hiver froid, avec des valeurs de pluviométrie inférieures à *350 mm/an*.

L'examen de l'historique des relevés des précipitations, sur *112*ans, révèle la dominance des années sèches, ce qui peut avoir un effet négatif sur la recharge de la nappe et le soutien des réserves.

Le traitement des données piézométriques fait ressortir un écoulement dominant convergeant d'Est en Ouest, ainsi que la mise en évidence d'apports latéraux, issus des formations calcaires et des échanges hydrauliques, marqués par une relation mixte ; Oued Kebir – nappe.

L'examen de l'historique de la piézométrie, montre une baisse du niveau piézométrique entre *1974* et *2020*. Ceci est le résultat de l'exploitation intense.

Selon les données de paramètres issues de forages, il nous était possible d'aboutir au classement des zones de *Bekkaria*, *Tébessa* et *Aïn Chabro*, en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Du point de vue hydrochimique, et suite aux différents résultats obtenus, il paraît que les variables qui ont le plus d'impact sur la qualité des eaux de la région, sont de nature géologique.

De l'analyse en composantes principales, il apparaît que :

Les chlorures, les sulfates et le sodium sont présents en grandes concentrations, ce qui confère aux eaux des puits, notamment de l'*Est* de la plaine, une certaine salinité, et à un degré moindre, ceux du centre, caractère qu'on peut traduire par la conjugaison de deux phénomènes ; l'évapotranspiration, en périodes de basses eaux et le lessivage des sels, en hautes eaux.

L'utilisation des diverses techniques ainsi que les résultats des différents traitements ont permis de déceler la présence de danger et de cerner les zones à haut risque et donc vulnérables à la pollution, en fonction de leurs degré (faible, modérée, moyennement modérée, forte...), et d'établir une représentation cartographique propre à chacune des techniques.

## *CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS*

---

Le centre et surtout le côté *Nord – ouest* de la plaine ainsi que le chef-lieu de la wilaya, se démarquent par une vulnérabilité élevée, voire très élevée (sur toutes les cartes).

La région de *Bekkaria* ainsi que le *Sud – est* du bassin, se distinguent par une vulnérabilité faible à modérée.

La localisation de ces zones vulnérables est un indicateur à prendre en considération lors de la mise en place de programme de gestion intégrée et de mobilisation de la ressource en eau, pour les divers secteurs utilisateurs (*AEP, AEI, AEA*).

L'*AEP* est le premier secteur consommateur d'eau, avec une population d'environ 251 284 habitant (*en 2015*) avec un besoin de l'ordre de 14Mm<sup>3</sup>/an. Ce volume sera revu à la hausse d'ici 2050, et devrait toucher les 30Mm<sup>3</sup>/an.

L'agriculture consomme presque 4Mm<sup>3</sup>/an et l'industrie reste en dernière position avec un volume faible vu que le tissu industriel n'est pas à son apogée.

La masse d'eau mobilisée en 2020 est de 32.4Mm<sup>3</sup>, uniquement issue de la réserve souterraine et ce, pour les différents besoins.

La ressource renouvelable est estimée à 25Mm<sup>3</sup>, toujours pour l'année 2020.

Nous remarquons qu'il y'a un déséquilibre entre les apports et les sorties. Ce déficit s'accumule depuis plusieurs années. Cet état a engendré un rabattement du niveau piézométrique et par conséquent une baisse de la réserve totale. Ce qui laisse dire que la ressource en eau est sujet aux aléas et au changement climatique conjugué à un phénomène de surexploitation.

C'est un argument suffisant pour revoir la politique de l'eau, qui devra désormais se baser sur la gestion de la demande et non pas par l'offre, tout en accordant un intérêt particulier à sa préservation (qualité et quantité). Ce qui permettra d'aboutir à une meilleure protection, et aussi durable que possible, des écosystèmes arides et steppiques.

Une nouvelle stratégie est alors pertinente ; amélioration de la gouvernance de l'économie de l'eau, rationalisation de l'approvisionnement, maîtrise des instruments de régulation, information, sensibilisation et éducation de la population, sur l'ensemble du bassin.

## *CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS*

---

Ceci dit, l'appui des incitations et sensibilisations à caractère religieux est incontestable, sans lesquelles, toute tentative de redressement et de salut s'est vue limitée et sans aucune efficacité.

Les investigations ont montré qu'il est encore possible d'infléchir la situation et de l'améliorer progressivement grâce à l'intersectorialité et l'intégration des capacités existantes et nouvelles.

L'objectif déterminant recherché est l'identification de véritables actions thématiques prioritaires qui représentent une large sélection d'opérations concrètes et matérielles à effectuer dans un avenir proche, conçues en termes d'aménagements et de réalisations.

Les actions fonctionnelles prioritaires, qui elles, relèvent de la mise en œuvre du processus d'aménagement et de gestion intégrée des secteurs interdépendants, et portent sur plusieurs registres touchant au domaine législatif et réglementaire.

Comme l'avenir ne se prévoit pas, il se prépare, on est donc appelé à s'attaquer aux priorités d'abord, pour se prémunir d'éventuelles pénuries et économiser donc d'importantes quantités d'eau.

Il nous est alors recommandé de mettre l'accent sur les points suivants :

- La réalisation d'infrastructures de stockage d'eau (barrages, retenues collinaires...), de nouveaux forages (avec la reprise de ceux abandonnés si possible).
- Élaboration de politiques d'ensemble à laquelle il faut associer tous les acteurs et partenaires, et encourager les initiatives individuelles en matière d'aménagement, à condition qu'elles répondent à l'intérêt général et obéissent à la législation en vigueur.
- Amélioration des services collectifs (*AEP, AEA, AEI, Assainissement...*) par la rénovation du réseau vétuste, limiter les fuites, et assurer une prestation de qualité et en permanence des usagers, qu'il faut impliquer dans les nouvelles orientations et les modalités de gestion.
- Remise à l'état et l'amélioration du réseau d'observation météorologique et hydrométrique avec un personnel dûment formé et un matériel équipé de technologies modernes, celui piézométrique, pour suivre les fluctuations du niveau dans les divers horizons et l'intensification des campagnes de contrôle de la qualité des eaux du bassin.

## *CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS*

---

- Lutter contre toute forme de pollution ; par la mise en place de stations de traitement ou d'épuration et réduire les rejets dans la nature ou dans les affluents d'Oueds, sans subir de prétraitements.

Les connaissances acquises de l'application du concept de développement durable et en particulier la gestion de l'eau, révèlent la nécessité d'une association institutionnelle de la société civile et que son implication est inéluctable dans les différentes actions et décisions en la matière. Et ce pour réduire le gaspillage, réussir des économies en eau, limiter la pollution et protéger les écosystèmes.

Cependant, le succès de cette approche suppose la formation des utilisateurs et leur inculquer une culture d'eau partagée et protégée à travers une sensibilisation accrue par l'éducation officielle (les établissements scolaires) et non officielle (mosquée, école coranique, associations...).

Des colloques, des ateliers et des communications pourraient profiter aux étudiants et à d'autres groupes. Les rapports, les articles de journaux, la publicité à la télévision, les affiches et d'autres outils de médias de masse sont également très efficaces pour toucher l'ensemble des citoyens.

*RÉFÉRENCES*  
*BIBLIOGRAPHIQUES*

Références bibliographiques

**Alvarez E., Fernandez Marcos, M.L., Vaamonde, C. et Fernandez-Sanjurjo, M.J., 2003.** Heavy metals in the dump of an abandoned mine in Galicia (NW Spain) and in the spontaneously occurring vegetation. *Science of The Total Environment*, 313(1-3): 185-197.

**Andione J., 1994.** Variation du bilan hydrique au Sénégal oriental (1961-1990). Publications de l'association internationale de climatologie, volume 12, 1994.

**Aoudjehane M., Bouzenoune A, Rouvier H. et Thibiéroz J. (1992):** Halocinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). *Géol. Médit.*, Marseille, XIX, 273-287.

**Aoun Sebaiti b., Hani a., Djabri l., Chaffai h., Aichouri i., Boughrira n. 2013.** Simulation of water supply and water demand in the valley of Seybouse (East Algeria). *Desalination and Water Treatment*. Vol. 52 p. 2114–2119. DOI 10.1080/19443994.2013.855662.

**Azzaz H., 2001.** Impact du climat sur les ressources en eau superficielles et souterraines dans les bassins versants de la haute et la moyenne Tafna. Mémoire de magister, C.U.Mascara, novembre 2001.

**Banks, D., Holden W., Aguilar E., Mendez C. et Koller D., 2002a.** Contaminant source characterization of the San Jose Mine, Oruro, Bolivia. In: L. Younger Paul et N.S. Robins (Eds.), *Mine water hydrogeology and geochemistry*. Geological Society of London., London.

**Banks D., Holden W., Aguilar E., Mendez C., Koller D., Andia Z., Rodriguez J., Saether O.M., Torrico A., Veneros R. et Flores J., 2002b.** Contaminant source characterization of the San Jose Mine, Oruro, Bolivia. *Geological Society of London*, 198(1): 215-239.

**Berredjem A-F, Azzedine Hani. 2017.** Modelling current and future supply and water demand in the northern region of the Seybouse Valley. *JOURNAL OF WATER AND LAND DEVELOPMENT*. 2017, No. 33 (IV–VI): 31–38.

**Blés J. L. (1969):** Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (SE Constantinois – Algérie). Les microfracturations et leurs relations avec les failles et les plis. Publications du Service Géologique de l'Algérie, (Série N° 11), Bulletin N° 39, pp. 7-17.

**Blés J. L. et Fleury (1970):** Carte géologique 1/50 000 Morsott et notice explicative. Publ. Serv. Geol. Algérie.

**Bowell, R.J. et Bruce I., (1995).** Geochemistry of iron ochres and mine waters from Levant Mine, Cornwall. *Applied Geochemistry*, 10(2): 237-250.

**Braddock, R.D., Kremmer, M.L. and Sanzogni, L. 1997,** Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. *Proceedings international congress on modelling and simulation (Modsim)*. The modelling and simulation society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp. 1653-1658.

**Burden, F.R. Brereton, R.G. and Walsh, P.T. 1997.** Cross- validation selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. *Analy.* 122 (10), 1015-1022.

**Beghoul M. (1974):** Étude géologique de la région des Hamimat (SE Constantinois). Application à la recherche pétrolière des confins algéro-tunisiens. Thèse Doct. Ing., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, France. 140p. (inédit).

**Bouchagoura et al. (1996) :** Synthèse hydrogéologique du système alluvial Hammamet-Tébessa- Bekkaria, Mémoire d'Ing. Univers. Annaba, 84p.

**Bouklia-hassane R., Djilali Y., El-bari Tidjania A., 2014:** Prospects for a larger integration of the water resources system using WEAP model: a case study of Oran province, Desalination and Water Treatment, Volume 57, Issue 13, March 2016, pages 5971-5980.

**Boukouss.Z (2000) :** Vulnérabilité de la nappe alluviale Tébessa- Morsott par la méthode drastic Mémoire d'Ing. (C.U Tébessa).

**Bouzenoune A. (1993):** Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie Orientale). Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 209 p.

**Bouznad I E.,Zouini D., Nouiri I.,Khelfaoui .,2016 :** Essay of Modelling water resources management of the Oued Righ watershed (Algeria) using the WEAP decision support system. *Rev. Sci. Technol., Synthèse 33: 56 - 71 (2016).*

**Burrollet P. F. (1973):** Importance des facteurs salifères dans la tectonique tunisienne. Ann. Min. Géol. Tunis, n°26, pp. 111-120.

**Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999).** River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research 35 : 1191-1197.*

**Carlsson E., Thunberg J., Ohlander B. et Holmstrom H., (2002).** Sequential extraction of sulfide-rich tailings remediated by the application of till cover, Kristineberg mine, northern Sweden. *Science of The Total Environment, 299(1-3): 207-226.*

**Castany G. (1963).** *Traité pratique des eaux souterraines.* Dunod Edit. Paris, 641p.

**Castany G., 1982.** *Principes et méthodes de l'hydrogéologie,* Ed. DUMOND, Paris.

Chikhi-Aouimeur F. (1980) : Les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger, 114 p.

**Chevenine A., Popov Y., Douha Dj. et Benzeroual M. (1989):** Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50.000. Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M. Algérie (Rapport inédit).

David L. (1956) : Étude géologique des monts de la haute Medjerda. Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, N.S. Bull, n°11, 304p.

**Debieche T.H. (2002):** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle: Application à la basse plaine de la Seybouse, N.E. algérien. Thèse de Doc. De l'Univ. De Franche-Comté, 200 p.

**Diday E. ; Lemaire J. ; Pouget J. ; Testu M., 1982.** *Éléments d'analyse de données.* Ed. BORDAS. 463p.



**Djabri L. (1987):** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa - Essai de modélisation - Thèse de Doc. Ing. de l'Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté - Besançon - 176 pages.

**Djabri L. (1996):** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse - Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines - Doctorat ès-Sciences de l'Université de Annaba - 280 pages.

**Djabri L., Hani A., Mani A. J. & Mudry J. (2001):** Mise en évidence du processus de salinité des eaux superficielles - Vérification par les ACP dans le secteur Annaba-Boucheouf-Guelma. Tribune de l'Eau - Vol. 54 - N°610 - pp. 29-43.

**Djebari H (2011).** Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin d'El Ma Labiod W. de Tébessa. Nord – Est Algérien. Mémoire de Magistère. (C.U B.M Annaba).

**Djenane. A, Messai. L (1997).** Synthèse hydrochimique et vulnérabilité à la pollution (région de Khenchela). Mémoire d'Ing. (C.U Tébessa).

**Dold B. et Fontbote L., (2001).** Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. Journal of Geochemical Exploration, 74(1-3): 3-55.

**Douaoui A., 1993.** Variabilité spatiale de quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Chéouli, incidences cartographiques. Mém de Magist., INA Alger. PP 22 97

**Drias .T (2013).** Hydrogéologie du Bassin versant de l'oued ksob. Vulnérabilité et protection de la ressource Thèse de Doctorat (U.S.T B.H.M Alger).

**Durozoy G. (1956):** Carte géologique de Tébessa. Feuille 206.

**Dubourdiou G. (1956):** Étude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.

**Fortin, V., Ouarda, T., Rasmussen, T.P. et Bobée, B., (1997).** Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. Revue des Sciences de l'Eau, 4 : pp. 461-487.

**Gäbler H.E., (1997).** Mobility of heavy metals as a function of pH of samples from an overbank sediment profile contaminated by mining activities. Journal of Geochemical Exploration, 58: 185-194.

**GASMALLAH, Nadjetta 2011.** Efficacité du périmètre d'irrigation de Sedrata et de Zouabi dans le développement de l'agriculture wilaya de Souk-Ahras. Mémoire de Magister, université d'Annaba.

**Gaudin G., 1982.** Mathématique et informatique, analyse en composantes principales. INA

PG. 43P.

**Ghrieb.L (2011).** Impact des formations triasiques sur la qualité des eaux d'une nappe en zone semi aride cas de la plaine de Tébessa-Bekkaria extrême Nord-est Algérien. Mémoire de magister Université de Annaba.

**Ghrieb.L (2007).** Impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité de l'eau et du sol en zone semi-aride : cas de la plaine bekkaria-tébessa (extrême nord-est algérien). Thèse de Doctorat. (C.U B.M Annaba).

**Goulard M. ; Voltz M. ; Monestitez P., 1987.** Comparaison d'approches multivariées pour l'étude de la variabilité spatiale des sols. *Agronomie*, 7 (9).

**Hamlat A.,ERRIH. M., GUIDOUM. A .,2012.** Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. *Arabian Journal of Geosciences*, Volume 6, Issue 7, pp 2225-2236.AOUN SEBAITI B.,

**Hani. a., Djabri. l., Chaffai. h., Aichouri. i., Boughrira. n. 2013.** Simulation of water supply and water demand in the valley of Seybouse (East Algeria). *Desalination and Water Treatment*. Vol. 52 p. 2114–2119.

**Hecht-Nielsen, R., (1990).** *Neuro-computing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.

**Herve l., hilmy s., julien c., 2003.** Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 28, Issues 20–27, Pages 779–786.

**Hudson-Edwards K.A., Schell C. et Macklin M.G., (1999).** Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, southwest Spain. *Applied Geochemistry*, 14(8): 1015-1030.

**Hsissou Y. et al. (1995) :** Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires  $Sr^{2+}/Ca^{2+}$ . *Journal of Hydrology* 183. Pages 445-451.

**Hsissou Y. (1997):** Dynamique et salinité de la nappe côtière d'agadir (Maroc): Influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. *Hydrochemistry*, IAHS Publ., N° 244.

**Ian r. calder., 1999.** *The blue revolution : land use and integrated water resources management*. Earthscan Publications, London.p355.

IRENE M. JOHANNSEN, JENNIFER C. HENGST, ALEXANDER GOLL, BRITTA HÖLLERMANN AND BERND DIEKKRÜGER \*.2016. Future of Water Supply and Demand in the Middle Drâa Valley, Morocco, under Climate and Land Use Change. *Water* 2016, 8, 313; doi:10.3390/w8080313.

**Jalala, S. and Mania, J. : 2004,** Artificial neural networks for defining the water quality determinants of groundwater abstraction in the Middle East. *Wat. Policy*.( submitted).

**Kerrouche M., 1998.** Changements climatiques et prévision climatique casde l'Algérie. mémoire d'ingénieur, I.H.F.R , 1998.

Kowalski W.M. et Hamimed M. (2000) : Diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien? Dilemme du matériel triasique des confins algéro-tunisiens. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*. Vol.11, n°1 pp.29-60, 12 fig.,2000.

**Laborde, J.P., (1982).** Éléments d'hydrologie de surface. Tome 2 : Critique et analyse statistique des données hydrologiques. *Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/ Inst. Nat. Polytech. De Lorraine*, 95 p.

**Lachtermacher, G., & Fuller, J.D., (1994).** Backpropagation in hydrological time series forecasting. In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Vol. 3, Time series analysis in hydrology and environmental engineering : 229-242.

**Lallehem, S. & Mania, J., (2002).** A linear and non-linear rainfall-runoff model using neural network technique: Example in fractured porous media. Journal of Mathematical and Computer Modelling. N°1, Vol. 55, N° 615.

**Lippmann, R.P., (1987).** An Introduction to Computing with Neural Nets. IEEE ASSP Magazine, April 1987, 4 (2), 4-22. Données hydrologiques. Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/ Inst. Nat. Polytech. De Lorraine, 95 p.

**Liu J., Savenije H.H.G. and Xu J. : 2003,** Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. Phys. and chemist. of the Earth **28**, 219-224.

**Madre M. (1969):** Contribution à la l'étude géologique et métallogénique du djebel Ouenza (Est Algérien). Thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle, Université de Paris, 90 p.

**Materon G., (1965).** Les variables régionalisées et leurs estimations. Ed Masson, Paris. 305 P.

**Mahtali. C et al (1997).** Approche hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de tébessa. Essai de bilan Mémoire d'Ing. (C.U Tébessa).

**Masse J. P. et Chikhi-Aouimeur F. (1982):** La plate forme carbonatée de l'Ouenza (Sud constantinois, Algérie). Organisation et dynamique durant l'Aptien supérieur. Géol. Méditer., Marseille, vol.IX, n°3, pp. 259-267.

**Matari a., Kerrouche M., Bousid H., Douguedroit A., 1999.** Sécheresse dans l'ouest algérien. Publications de l'association internationale de climatologie, volume 12, 199.

**Mc Culloch, W.S. and Pitts, W., (1943):** A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: pp. 115-133.

**Meddi m., Meddi h., 2002.** Sécheresse météorologique et agricole dans le Nord-Ouest de l'Algérie, colloque méditerranéen, eau et environnement. Alger le 7-9 octobre 2002.

**Meddi m., hubert J., 2000.** Variabilité pluviométrique dans l'ouest Algérien durant les cinq dernières décennies. 13<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de climatologie. 6 au septembre 2000 Nice, France.

**Meddi m., Hubert P., Bendjoudi H., 2002.** Impact du changement du régime pluviométrique sur les ressources en eau dans le Nord-Ouest de l'Algérie. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides, 1-4 avril 2002, Montpellier, France.

**Mokssit A., 1996.** La sécheresse dans le climat marocain. Atelier sur la prévention et la gestion des situations de sécheresse dans les pays du Maghreb, Juin 1996, pages 107-124.

**Mokkadem. A (2000) :** Qualité physico-chimique des eaux de l'oued cherf et leur aptitude à l'irrigation. Mémoire d'ing. (C.U Tébessa).

**Moran R., E. et Wentz D.A., (1974).** Trace element content of a stream affected by metal mine drainage, Bonanza, Colorado, International symposium on water-rock interaction, Prague, pp. 22.

**Najjar, Y and Ali, H., (1998a):** On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems, Attoh-Okine (Editor): pp. 55-63.

**Najjar, Y. and Ali, H., (1998b):** CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No.75, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1) : pp. 542-553.

**Najjar, Y. and Zhang, X., (2000):** Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors): pp. 43-57.

**Nedjari-Belachène S. et Nedjari A. (1984):** Le Boukhadra: esquisse paléogéographique aptienne. 5<sup>ème</sup> séminaire Nationale des Sciences de la Terre, Alger, pp. 102.

**O.R.G.M (1976) :** Rapport sur les résultats des travaux de recherche et d'estimation sur la fluorine de la fluorine dans les confins algéro-tunisiens Rapport. Inéd. (Jakentaieva).

**O.R.G.M (1992) :** Rapport informatif sur les derniers résultats des travaux réalisés sur les minéralisations périadiapiriques de l'Est algérien. Rapport. Inéd. (Makoudi- Mankov).

**O.R.G.M (1996) :** Rapport sur les résultats des travaux de prospections des polymétaux dans les confins algéro-tunisiens (El Ouasta, El Khanga, Dj. Ladjbel, Elma Labiod et Selsoul El Agab). Rapport. Inédit. (Bounames, A.).

**ORGM (2002):** Projet de prospection des polymétaux dans le secteur de Dj. Harraba, Méridéf, Dj. Def, et Es Souabaa (Région de Ouenza-El Aouinet). Rapport annuel 2002 (**D. Bessekri et M. Benzeroual**).

**Othmanine A. (1987):** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.

**Paktunc A.D., (1999).** Characterization of Mine Wastes for Prediction of Acid Mine Drainage. In: A.J. M. (Ed.), Environmental Impacts of Mining Activities, Emphasis on Mitigation and Remedial Measures. Springer-Verlag, New York, pp. 19-38.

**Paul van hofwegen, frank g.w. jaspers (1999)** Analytical Framework for Integrated Water Resources Management: IHE monographs 2. hardbound edition. Reference – 116 Pages ISBN 9789054104735.

**Perthuisot V., (1994):** Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie. N°6., pp.153-159, 5 fig., 1994.

**Philipeau G., 1992.** Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes Principales ? Collection STA-ITCF. 93P.

**Pohl W., Amouri M., Kolli O., Scheffer R. et Zachmann D. (1986):** A new genetic model for the North african metasomatic siderite deposits. Mineral Deposita, pp.228-233.

**Prieto G., (1998).** Geochemistry of heavy metals derived from gold-bearing sulphide minerals in the Marmato District (Colombia). Journal of Geochemical Exploration, 64(1-3): 215-222.

**Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2003).** Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants de du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). Revue de Sécheresse. (sous press).

**Riad, S., 2003 :** Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc thèse de doctorat es sciences université des sciences et technologie de Lille.

**Rodier J. (1978) :** Analyse de l'eau. Dunod Edition 430 pages.

**Rouabhia. A. (2006) :** Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocène de la plaine d'El MA EL ABIODE Nord-Est Algerien . thèse de doctorat es- science université de Annaba .197 pages.

**Rouvier H., Pertuisot V. et Mansouri A. (1985) :** Pb-Zn Deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. Economic Geology, 80, pp. 666-687.

Salmi-Laouar S., Laouar R., Boyce A.J., Zerdazi A. et Arrouche Y. (2004) : Rapport isotopique du soufre de l'oxygène et du carbone dans le massif de Boujaber, NE algérien: Origine des minéralisations à Pb-Zn-Ba et source des fluides. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie Vol. 15, n°1, pp.3-25.

**Sarra mansouri, lahbassi ouerdachi, mohamed remaoun.2016.** Inter-region planning and analysis of water resources by using WEAP model Seybouse (Annaba) and Coastal East of Constantine (El-Taref). JOURNAL OF WATER AND LAND DEVELOPMENT. 2017, No. 33 (IV–VI): 115–122.

**SEI,2008. WEAP (Water Evaluation and Planning):** User Guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute, Boston USA. Available from <[www.seib.org/weap/](http://www.seib.org/weap/)>.

SENHADJI F. AND SENOUCI M., 2003. les changements climatiques dans les pays Maghreb in MED Energie « Revue méditerranéenne de l'énergie ».

**Schoeller H.(1962) :** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie. Editions, 642 pages.

**Sheppard S.M.F., Charef A. et Bouhlel S. (1996):** Diapirs and Zn-Pb mineralisation: A general model based on tunisian (N. Africa) and Gulf Coast (U.S.A.) deposits. Soc. of Geol. Special Publication, n°4, pp. 230-243.

**Tayeb E., 1996.** Impact de la sécheresse sur laproduction Agricole et implications agronomiques. Atelier sur la prévention et la gestion des situations de sécheresse dans les pays du Maghreb. juin 1996, pages 97-106.

**Tesco-Visiterv, 1982 :** Régularisation de l'oued Kebir Ouest (etude hydrologique). 35 pages

**Thibiéroz J. et Madre M. (1976):** Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord, 67, 3-4, pp.

**Vila J. M. et Charrière A. (1993):** Découverte d'Albien calcaire et du Trias resédimenté au Dj. Boujaber (partie ouest Algérie); corrélation avec les forages et conséquences sur l'organisation du Crétacé inférieur des confins algéro-tunisiens. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t.316, Série II, pp. 243-249.

**Vila, J.M. (1993)** : Livret-guide Trias'93. Société Alg. Sci. Géol. Centre de Recherche et Développement, Boumerdès (11-12 septembre 1993). 26.

**Vila J. M. (1994)**: Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens: Trias allochtone « glacier de sel » sous marins et vrais diapirs. Mémoire du Service Géologique de l'Algérie, N° 6, pp. 105-152.

**Voltz M., 1986** : Variabilité spatiale des propriétés physique en milieu alluvial : essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. Thèse Doc. Ing ENSAM. 198P.

**Walter C., 2002** : Cours de géostatistique. ENSA – INRA Rennes. 20 P.

**Webster R., 1985**: Quantitative spatial analysis of soil in the field in advecens. Soil Science. Vol3, sparinger-verlag New York inc. 56 P.

**Younger P.L., (2000)**. Nature and practical implications of heterogeneities in the geochemistry of zinc-rich, alkaline mine waters in an underground F-Pb mine in the UK. Applied Geochemistry, 15(9): 1383-1397.

**Zerdazi A. 1990**. Étude gravimétrique du môle d'Ain M'lila et de l'Atlas saharien septentrional. Thèse de Doctorat des Sciences, Faculté des Sciences, Université de Lausanne, 227p, inédit.

**Zerouki H. 2013**. aspects quantitatifs et qualitatifs de la source de bouakkous : impact sur le champ captant d'ain chabro (zone semi-aride Tébessa). Thèse de Doctorat(U. Annaba).

