



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI - Tébessa -**  
**Faculté des Science Exactes et Sciences de la Nature et de le Vie**  
**Département de sciences de la terre et de l'univers**

## **MEMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER**  
**Domaine : Sciences de la terre et de l'univers**  
**Filière : Géologie**  
**Spécialité : Hydrogéologie**

## **Thème**

**APPLICATION DES METHODES STATISTIQUES MULTIVARIÉES  
POUR L'EVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES  
DE LA NAPPE ALLUVIALE TÉBESSA-BEKKARIA-EL HAMMAMET**

**Présenté par : Sid'El Moustaph Cheikhne Cheikh El Mehdi**

**Devant le jury :**

Président : GOUAIDIA.L	Pr	Université de Tébessa
Rapporteur : SEGHIR.K	MCA	Université de Tébessa
Co-Rapporteur : ALI HADJELA	MCA	Université de Tébessa
Examineur : GUEFAIFIA.O	MCA	Université de Tébessa

Session : 2023/2024

## Dédicace

Je dédie cette thèse à :

*À mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et des moyens pour me voir réussir dans mes études.*

*À toute ma famille*

*Et tous mes amies*

*À tous les gens qui me connaissent et que je connais*

*Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent pas devant les obstacles de la vie.*

## **Remerciement**

*Après de longues années de travail et avec l'aide d'Allah, le Tout-Puissant, qui mène toujours à bien, j'ai enfin réussi à mettre en forme le manuscrit que vous tenez entre les mains.*

*Je souhaite tout d'abord m'adresser au **Dr. SEGHIR.K**, qui m'a honoré en dirigeant ce travail avec une grande responsabilité et une rigueur scientifique exemplaire. Je salue en lui sa compréhension et son indulgence et aussi pour mon Co-Promoteur **DR. ALI HADJELA**.*

*Je tiens à exprimer mes plus vives reconnaissances à tous les membres du jury de soutenance pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Un grand merci à l'ensemble du personnel du département de géologie et de la faculté des sciences de la terre et de l'université de Tébessa.*

*Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à mes collègues du département des sciences de la terre et de l'univers, l'université de Tébessa spécialement **MOHAMED LEMINE AHMED ZEROUGH, LAYADI MEHDI** et mon grand frère **BENDEKKOM MEHDI**.*

*Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans la contribution et le soutien de nombreuses personnes. C'est avec une grande reconnaissance que je leur adresse mes remerciements, bien que je sache pertinemment que, quels que soient les termes employés, je ne pourrais jamais leur rendre pleinement hommage ni exprimer toute ma gratitude.*

*Enfin, je voudrais saisir cette occasion pour rendre un hommage particulier à mes parents, qui ont toujours prié et persévéré pour mon aide et mon succès. Je n'oublierai jamais de remercier chaleureusement mes frères et sœurs pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements, ainsi que tous les miens.*

## **Résumé**

*Les diverses utilisations de l'eau, qu'elles soient agricoles, industrielles ou domestiques, peuvent avoir un impact significatif sur les nappes souterraines. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte ces influences anthropiques lors de la gestion et de l'exploitation des ressources en eau souterraine. La nappe alluviale du bassin d'effondrement Tébessa-Bekkaria-Hammamet est le principal réservoir d'eau sur lequel reposent toutes les politiques de gestion et les défis liés à l'eau.*

*Selon l'étude hydr-climatologique, la valeur moyenne de l'évapotranspiration réelle (E.T.R.) est atteinte 91.84 % des précipitations et avec un coefficient d'infiltration négative. Le bilan hydrique est toujours déficitaire et un déficit agricole très considérable a été enregistré. Les essais de pompage exécutés montrent de bonnes caractéristiques hydrodynamiques avec une transmissivités de l'ordre de  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .*

*La variabilité chimique de la qualité des eaux souterraines pose un problème dans les zones arides et semi-arides à cause des facteurs liés aux changements climatiques et aux conditions d'alimentations naturelles des nappes souterraines. Le système aquifère mio-plio-quaternaire de la plaine de Tébessa est logé dans des formations alluvionnaires et détritiques. Il est essentiellement alimenté par les précipitations et par des failles au niveau des bordures favorisant l'écoulement des eaux souterraines.*

*L'étude des paramètres physico-chimiques par l'analyse en composantes principales 'A.C.P' et les rapports caractéristiques ont permis de définir les principaux traits caractérisant la chimie des eaux souterraines (teneur, origine et évolution) et de mettre en évidence leurs faciès chimiques dominants.*

**Mots clés :** *A.C.P, Rapports caractéristiques- Eaux souterraines- Tébessa, Echange de base- Formations évaporitiques et carbonatées.*

## ***Abstract***

*The various uses of water, whether agricultural, industrial, or domestic, can have a significant impact on groundwater. Therefore, it is necessary to take these anthropogenic influences into account when managing and exploiting groundwater resources. The alluvial aquifer of the Tébessa-Bekkaria-Hammamet collapse basin is the main water reservoir on which all water management policies and challenges are based.*

*According to the hydro-climatological study, the average value of actual evapotranspiration (A.E.T.) reaches 91.84% of precipitation, and the infiltration coefficient is negative. The water balance is always deficient, and a significant agricultural deficit has been recorded. The pumping tests carried out show good hydrodynamic characteristics with a transmissivity of around  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .*

*The chemical variability of groundwater quality poses a problem in arid and semi-arid areas due to factors related to climate change and natural recharge conditions of aquifers. The Mio-Plio-Quaternary aquifer system of the Tébessa plain is housed in alluvial and detrital formations. It is mainly recharged by precipitation and by faults at the borders, favoring groundwater flow.*

*The study of physico-chemical parameters through principal component analysis (P.C.A.) and characteristic ratios has made it possible to define the main features characterizing the chemistry of groundwater (content, origin, and evolution) and to highlight their dominant chemical facies.*

*Keywords: P.C.A, Characteristic Ratios, Groundwater, Tébessa, Base Exchange, Evaporitic and Carbonate Formations.*

## ملخص

تؤثر الاستخدامات المختلفة للمياه، سواء كانت زراعية أو صناعية أو منزلية، بشكل كبير على المياه الجوفية. لذلك، من الضروري أخذ هذه التأثيرات البشرية في الاعتبار عند إدارة واستغلال موارد المياه الجوفية. يُعدّ الخزان الجوفي النهري لحوض الأنهار تَبَسَّة-بَغَارِيَّة-حَمَامَة هو المصدر الرئيسي للمياه الذي تعتمد عليه جميع سياسات إدارة المياه والتحديات المتعلقة بها.

وفقاً للدراسة الهيدرولوجية-المناخية، تصل القيمة المتوسطة للتبخّر الفعلي (E.T.R) إلى 91.84% من الهطولات المطرية، بينما معامل التسرب هو سلبي. دائماً ما يكون الميزان المائي عاجزاً، وتم تسجيل عجز زراعي كبير. تُظهر اختبارات الضخ المنفذة خصائص هيدروديناميكية جيدة مع نفاذية حوالي  $10^{-3}$  م<sup>2</sup>/ثانية.

تشكل التغيرات الكيميائية في جودة المياه الجوفية مشكلة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة بسبب العوامل المرتبطة بتغير المناخ وظروف التغذية الطبيعية للخزانات الجوفية. يقع نظام الخزان الجوفي الميو-بليو-رباعي في سهل تَبَسَّة في التكوينات الطميية والتأكلية. يتم تغذيته بشكل رئيسي من الهطولات المطرية ومن خلال الفوالق عند الحدود التي تسهل تدفق المياه الجوفية.

مكنت دراسة المعايير الفيزيائية والكيميائية من خلال تحليل المكونات الرئيسية (A.C.P) والنسب المميزة من تحديد السمات الرئيسية التي تميز كيمياء المياه الجوفية (المحتوى، الأصل والتطور) وإبراز الواجهات الكيميائية السائدة.

الكلمات المفتاحية A.C.P:، نسب مميزة، المياه الجوفية، تَبَسَّة، تبادل القاعدة، التكوينات التبخيرية والكربونية.

## Sommaire

Dédicace .....	2
<b>Remerciement</b> .....	3
<i>Résumé</i> .....	4
<i>Abstract</i> .....	5
ملخص.....	6
<b>Introduction générale :</b> .....	1
<b>Chapitre I : cadre général et milieu physique</b> .....	1
<b>I - Localisation de la zone d'étude :</b> .....	2
<b>I – 1 - Situation géographique :</b> .....	2
<b>I.2. Limites géomorphologiques :</b> .....	3
<b>II-Caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant</b> .....	4
<b>II-1- Caractéristiques de forme</b> .....	4
<b>II- 1- 1 La surface</b> .....	4
<b>II- 1- 2 - La forme du bassin</b> .....	4
<b>II-1 - 3 -Les dimensions du rectangle équivalent</b> .....	4
<b>II – 2 – Le relief :</b> .....	5
<b>II – 2 – 1 – La courbe hypsométrique :</b> .....	5
<b>II – 2 – 2 – Les altitudes caractéristiques</b> .....	7
<b>II – 2 – 3 – Les pentes :</b> .....	8
<b>II – 2 – 3 – 2 – Les Indices de pente :</b> .....	9
<b>II – 3 – Hydrographie :</b> .....	11
<b>II – 3 – 1 – Réseau hydrographique :</b> .....	11
<b>II – 3 – 2 – Le degré de développement du réseau :</b> .....	13
<b>II – 3 – 3 – Le temps de concentration :</b> .....	13
<b>Conclusion</b> .....	15

<b>Chapitre II : Caractéristiques géologiques de la région d'étude .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION :.....</b>	<b>17</b>
<b>I – Géomorphologie :.....</b>	<b>17</b>
<b>I – 1 – Les monts septentrionaux : .....</b>	<b>18</b>
<b>I – 2 – Les monts méridionaux : .....</b>	<b>18</b>
<b>II – Caractéristiques géologiques :.....</b>	<b>18</b>
<b>II – 1 – Le Trias : .....</b>	<b>18</b>
<b>II – 2 – Le Jurassique : .....</b>	<b>18</b>
<b>II – 3 – Le Barrémien : .....</b>	<b>18</b>
<b>II – 4 – L'Aptien : .....</b>	<b>19</b>
<b>II - 4 - 1 – L'Aptien marneux : .....</b>	<b>21</b>
<b>II – 4 – 2 – L'Aptien calcaire : .....</b>	<b>21</b>
<b>II – 4– 3 – Le Clansayésien : .....</b>	<b>22</b>
<b>II – 5 – L'Albien : .....</b>	<b>22</b>
<b>II – 6 – Le Vraconien : .....</b>	<b>22</b>
<b>II – 7– Le Cénomaniens : .....</b>	<b>22</b>
<b>II – 8 – Le Turonien : .....</b>	<b>22</b>
<b>II – 10 – Le Maestrichtien : .....</b>	<b>23</b>
<b>II – 11 – Le Paléocène : .....</b>	<b>23</b>
<b>II – 12 – L'Éocène : .....</b>	<b>23</b>
<b>II – 13 – Le Miocène : .....</b>	<b>23</b>
<b>II – 14 – Le Quaternaire : .....</b>	<b>24</b>
<b>II – 14 – 1 – Formations actuelles et récentes : .....</b>	<b>24</b>
<b>II – 14 – 2 – Formations anciennes : .....</b>	<b>24</b>
<b>II – 14 – 3 – Plio-Quaternaire (villafranchien) : .....</b>	<b>25</b>
<b>III – Tectonique de la région : .....</b>	<b>25</b>

<b>III – 1 – Les phases de l’orogénèse :</b> .....	25
<b>III – 2 – La formation du fossé d’effondrement de Tébessa :</b> .....	27
<b>Conclusion</b> .....	28
<b>Chapitre III : Caractéristiques hydroclimatologiques</b> .....	18
<b>Introduction :</b> .....	29
<b>II – Facteurs météorologiques déterminants :</b> .....	29
<b>II – 1 – Le régime des vents :</b> .....	30
<b>II – 2 – L’humidité relative de l’air :</b> .....	30
<b>II – 4 – La pluviométrie :</b> .....	31
<b>II – 4 – 1 – Les précipitations mensuelles :</b> .....	31
<b>II – 4 – 2 – Les précipitations annuelles et leur variabilité :</b> .....	32
<b>II – 5 – Les températures :</b> .....	34
<b>II – 5 – 1 – Variation des températures :</b> .....	34
<b>III – 1 – L’indice d’aridité de E. DE MARTONE :</b> .....	36
<b>III – 2 – L’indice d’aridité mensuel :</b> .....	37
<b>IV – Diagramme pluviothermique :</b> .....	38
<b>V – Le bilan hydrique :</b> .....	39
<b>V – 1 – Étude de l’évapotranspiration :</b> .....	39
<b>V – 1 – 1 – Estimation de l’évapotranspiration réelle (ETR) :</b> .....	39
<b>V – 1 – 2 – Estimation de l’évapotranspiration potentielle (ETP) :</b> .....	41
<b>V – 2 – Estimation de la réserve facilement utilisable :</b> .....	42
<b>V – 3 – Bilan d’eau par la méthode de C. W. Thornthwaite :</b> .....	43
<b>V – 4 – Répartition des précipitations :</b> .....	44
<b>V – 4 – 1 – Le ruissellement :</b> .....	44
<b>V – 4 – 2 – L’infiltration ;</b> .....	44
<b>Conclusion</b> .....	45

<b>Chapitre IV : Caractéristiques hydrogéologiques</b> .....	47
<b>Introduction :</b> .....	46
<b>I – Structure du système :</b> .....	46
<b>I – 1 – La nappe alluviale et le milieu poreux :</b> .....	46
<b>I – 2 – La nappe des calcaires et le milieu fissuré :</b> .....	47
<b>II – Potentialité de l’aquifère :</b> .....	47
<b>II – 1 – Les forages étatiques :</b> .....	47
<b>II – 2 – Les puits et les forages non étatiques :</b> .....	47
<b>III – L’étude de la piézométrie :</b> .....	48
<b>IV– Cartographie des paramètres hydrodynamiques :</b> .....	51
<b>IV-1– La carte de transmissivité :</b> .....	51
<b>IV-2 – La carte de perméabilité :</b> .....	52
<b>Conclusion</b> .....	53
<b>Chapitre V : étude de la qualité chimiques des eaux et application des méthodes statistiques multivariées</b> .....	54
<b>Introduction :</b> .....	54
<b>I-Cartographie des éléments physico-chimiques :</b> .....	55
<b>I-1-Les éléments physiques :</b> .....	55
<b>I – 1 - 1 -La température :</b> .....	55
<b>I -1 -2 – Le potentiel d’Hydrogène :</b> .....	55
<b>I – 1 – 3 - La conductivité électrique <i>CE</i> :</b> .....	56
<b>I -2 – Les éléments chimiques majeurs :</b> .....	58
<b>II- Représentations graphiques et identification des principaux faciès :</b> .....	65
<b>II-1- Représentation selon le diagramme de <i>Piper</i> :</b> .....	66
<b>II-2- Représentation selon le diagramme de <i>Schoeller-Berkaloff</i> :</b> .....	67
<b>II – 3 – Origine de la salinité :</b> .....	68

III – 4 -Relation inter éléments : .....	70
II – 5– La sodisation .....	73
<b>III- Résultats des analyses multivariées des données chimiques et interprétation : .....</b>	<b>75</b>
III – 1- Analyse de la variance (ANOVA) : .....	75
III- 2 - Analyse en Composantes Principales .....	78
III- 2 - 1 – But de la méthode : .....	78
III- 2 - 2 – Principe de la méthode : .....	78
III- 2- 3 – L’espace des variables : .....	78
III- 2 -4 – L’espace des unités statistiques : .....	79
III – 2 –5- Cercles de corrélation : .....	81
III – 2 – 6 – L’espace des individus : .....	83
<b>Conclusion .....</b>	<b>83</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>84</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>87</b>

## Liste des figures :

Fig. 1: Situation géographique de la région d'étude.....	2
Fig. 2: Limites administratives de la zone d'étude (Djebaassi Toufik 2021).....	3
Fig. 3: Limites naturelles de la zone d'étude.....	3
Fig. 4: Répartition des surfaces en fonction des altitudes. (Djebassi Toufik 2021).....	6
Fig. 5: Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques à travers le bassin de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021).....	7
Fig. 6: Carte des répartition des altitudes dans le bassin de Tébessa .....	8
Fig. 7: Carte de répartition des pentes dans le bassin de Tébessa .....	9
Fig. 8: Carte du réseau hydrographique du bassin de Tébessa.....	12
Fig. 9: Profil en long du Talweg principal du bassin de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021) ....	14
Fig. 10: Croquis géomorphologique de la région de Tébessa (in Djabri, 1987) .....	17
Fig. 11: Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa .....	20
Fig. 12: Carte géologique de la région de Tébessa.....	21
Fig. 13: Esquisse tectonique des environs de Tébessa, d'après W. M. Kowaleski et al. 2002.....	26
Fig. 14: Variation des vitesses maximales de vent. Station de Tébessa (1991-2016) (Djebassi Toufik 2021).....	30
Fig. 15: Répartition des jours de neige, période d'observation 1981/2019. Station de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021).....	31
Fig. 16: Répartition des précipitations moyennes mensuelles à Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020).....	32
Fig. 17: Répartition interannuelle des précipitations aux stations d'observations (1906-2019) (Djebassi Toufik 2021).....	33
Fig. 18: Répartition des années sèches et humides aux stations d'observation. (Djebassi Toufik 2021).....	34
Fig. 19: Variation des températures moyennes mensuelles. Bassin de Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020) .....	35
Fig. 20: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone, 1923. (Infoclima.fr 1991-2020).....	37
Fig. 21: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone, 1923. (Infoclima.fr 1991-2020).....	38

Fig. 22: Diagramme pluviométrique. Bassin de Tébessa. 1981/82-2018/19 (Djebaasi Toufik 2021).....	38
Fig. 23: Abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE. (Djebassi Toufik 2021) (Infoclima.fr 1991-2020) .....	41
Fig. 24: Coupe hydrogéologique à travers la plaine d'Aïn Chabro. In Rouabhia et al. 2009.	47
Fig. 25: Carte piézométrique (ANRH, Juin 1994. Plaine de Tébessa).....	48
Fig. 26: Carte piézométrique (Mai 2005) .....	49
Fig. 27: Carte Géologique et des conditions aux limites. Géologie d'après CGG 1970. ....	50
Fig. 28: carte de Transmissivité plaine de Tébessa Mai 2005.....	51
Fig. 29: carte de perméabilité plaine de Tébessa Mai 2005 .....	52
Fig. 30: Carte de la Température de plaine de Tébessa Mai 2005 .....	55
Fig. 31: Carte de PH de plaine de Tébessa Mai 2005 .....	56
Fig. 32: Carte de la CE de plaine de Tébessa Mai 2005.....	57
Fig. 33: Carte de Ca <sup>2+</sup> de plaine de Tébessa Mai 2005 .....	59
Fig. 34: Carte de Mg <sup>2+</sup> de plaine de Tébessa Mai 2005.....	60
Fig. 35: Carte de Na <sup>+</sup> plaine de Tébessa Mai 2005 .....	62
Fig. 36: Carte de Cl <sup>-</sup> plaine de Tébessa Mai 2005 .....	63
Fig. 37: Carte de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> plaine de Tébessa Mai 2005 .....	64
Fig. 38: Carte de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> plaine de Tébessa Mai 2005.....	65
Fig. 39: Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de piper plaine de Tébessa (Nov. et Mai 2005).....	67
Fig. 40: Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff. Plaine de Tébessa (novembre et mai 2005) .....	68
Fig. 41: Cl <sup>-</sup> conte Ca <sup>2+</sup> et Mg <sup>2+</sup> en mmol/l pour les échantillons d'eaux souterraines (D'après Uzuqumwa 1981) .....	68
Fig. 42: Relations entre les éléments ont unes mauvaises corrélations.....	70
Fig. 43: corrélation entre Na/Cl.....	71
Fig. 44: corrélation entre K <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup> .....	72
Fig. 45: Représentation des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox. Plaine de Tébessa (novembre et Mai 2005) .....	74
Fig. 46: Coefficients normalisés (Y) .....	76
Fig. 47: courbe Moyenne (Y)-conductivité.....	77
Fig. 48: Histogramme des valeurs propres et variabilité cumulées (mai et Nov 2005) .....	80

Fig. 49: Analyse en composante principale des eaux de la nappe alluviale. Plaine de Tébessa (Mai, Novembre 2005).....	82
Fig. 50: Distribution des variables en fonction des points d'observation (Mai, Nov.,2005) ..	83

## Liste des tableaux :

Tab. 1: Répartition des surfaces en fonction des tranches d'altitudes. (Djebaassi Toufik 2021).....	6
Tab. 2: Indice de pente de Roche. Bassin de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021).....	11
Tab. 3: Récapitulation des paramètres morphométriques. Bassin de Tébessa. ....	15
Tab. 4: Références des stations pluviométriques. Source ANRH. ....	29
Tab. 5: Mois humide et mois sec à Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020).....	31
Tab. 6: Écart à la normale des précipitations annuelles (1 906/07 -2 018/19). (Djebassi Toufik 2021).....	34
Tab. 7: Valeurs de la température moyenne mensuelle (min & max). Bassin de Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020).....	35
Tab. 8: Indice d'aridité de E. DE Martone et type de climat. (Infoclima.fr 1991-2020) .....	36
Tab. 9: Indice d'aridité mensuel. Bassin de Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020) .....	37
Tab. 10: Applicabilité de la formule de Coutagne. Bassin de Tébessa. (Djebaassi Toufik 2021).....	40
Tab. 11: Estimation de l'ETR selon la méthode de L. Turc annuelle. (Infoclima.fr 1991-2020).....	40
Tab. 12: Résultats de calcul de l'ETP selon la formule de C. W. Thornthwaite. (Infoclima.fr 1991-2020) .....	42
Tab. 13: Résultats de calcul de l'ETP selon la formule de C. W. Thornthwaite. (Infoclima.fr 1991-2020) .....	42
Tab. 14 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite, (Infoclima.fr 1991-2020)	43
Tab. 15: Estimation du ruissellement selon la méthode de Tixeront-Berkaloff. (Infoclima.fr 1991-2020) .....	44
Tab. 16: Estimation de l'infiltration dans le bassin de Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020).....	45
Tab. 17: Normes et classification des eaux selon leurs conductivités (OMS 1 994). Plaine de Tébessa. ....	57
Tab. 18: Classification des eaux par la méthode du SAR et leur état d'utilisation. ....	74
Tab. 19: Paramètres du modèle (Y).....	77
Tab. 20: Statistiques descriptives (mai 2005).....	79
Tab. 21: Différentes variables et axes (mai 2005).....	80
Tab. 22: Corrélations entre les variables et les facteurs (mai 2005) .....	80
Tab. 23: Matrice de corrélation entre les variables (mai 2005).....	81

## **Introduction générale :**

L'analyse des tendances actuelles montre bien que nous nous approchons d'une « crise de l'eau » dans plusieurs régions du monde, notamment au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Dans un proche avenir, ce sera plutôt l'eau qui sera le principal facteur limitant le développement agricole des pays arides et semi-arides du bassin méditerranéen.

Dans la plupart de ces pays avec une variation climatique très marquée par une pluviosité irrégulière continue dans le temps et dans l'espace, plusieurs formes d'utilisation économique de l'eau disponible, ont déjà été développées ou sont en train de l'être.

Il est certain donc que, sans un contrôle efficace et une gestion adéquate de l'eau, l'autosuffisance alimentaire et énergétique continuera à être un rêve pour la plupart de ces pays.

Actuellement, la disponibilité de l'eau est en relation directe avec les problèmes de quantité et de qualité, c'est-à-dire de ressources et de pollution. Du point de vue ressource, on distinguera d'un côté les eaux de surface qui ont un taux de renouvellement très rapide, et de l'autre part les eaux souterraines qui s'écoulent beaucoup plus lentement. La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau disponible. Ces derniers produisent une modification chimique de la qualité de l'eau et la rendront impropre aux destinations souhaitées.

L'hydrogéologie des zones arides et semi-aride de l'Algérie, est devenue un thème très complexe. La sécheresse chronique et le bilan hydroclimatique toujours négatif ne permettent pas de justifier l'existence de la recharge des nappes souterraines. Or cette recharge, même si elle est limitée, existe souvent dans ces régions arides où l'irrégularité du climat a provoqué durant ces dernières années des événements pluvieux exceptionnels (Inondation avec dégâts graves malheureusement)

A la lumière de toutes ces introductions, on est entraîné d'étudier le cas de la région de Tébessa. La région de Tébessa se situe dans les Hauts plateaux et ne caractérise pas des conditions climatiques satisfaisantes pour enrichir ses réserves en eau. La surexploitation et la mauvaise gestion des nappes souterraines ont rendu les nappes en eaux souterraines très vulnérables.

Pour identifier la qualité chimique des eaux souterraines de la région de Tébessa ainsi que leur variation dans le temps et dans l'espace, nous avons proposé ce thème. En se basant sur des études antérieures et des données chimiques disponibles, nous avons pu analyser l'état des ressources en eau et préparer ce mémoire.

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

## I - Localisation 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. Elle est située à une distance d'environ 240 km au sud de la mer Méditerranée. La région étudiée fait partie du domaine de l'Atlas saharien oriental, à la frontière entre l'Algérie et la Tunisie, précisément dans les monts de Tébessa, qui constituent la partie orientale des monts de Nemamcha. Ses limites administratives sont les suivantes (Fig.1,2) :

- Au nord, elle est limitée 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, par la Daïra de BirMokadem ;
- Au sud-est, par la Daïra d'El Ma El Abiod et El Houidjbet ;
- À l'est, par les frontières tunisiennes.

#### Situation du terrain d'étude

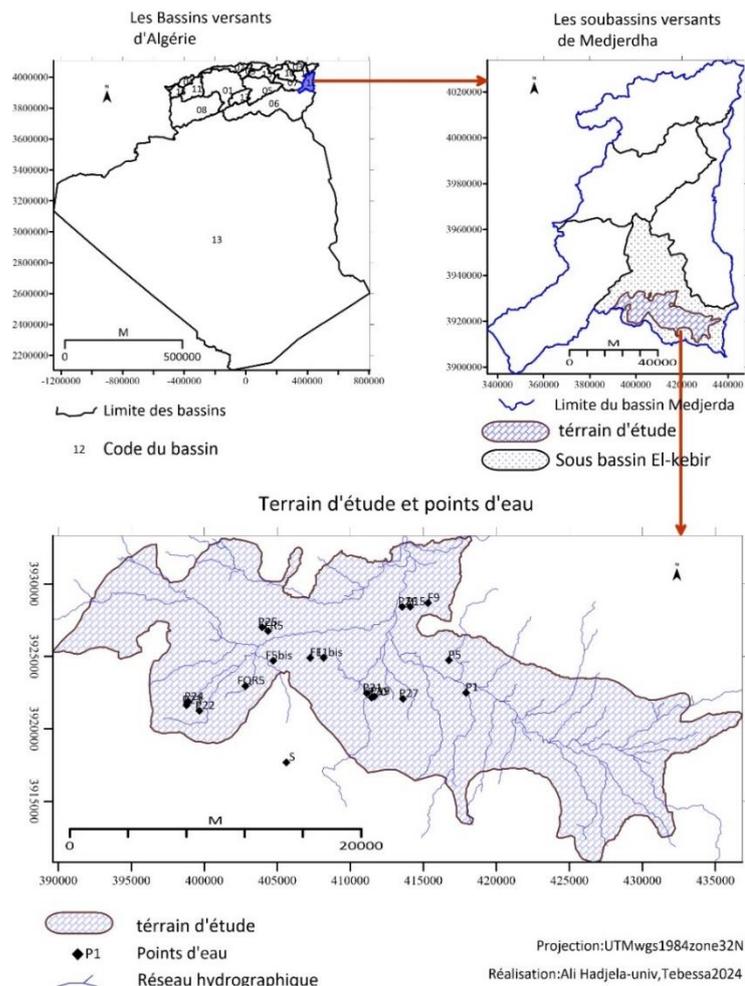


Fig. 1: Situation géographique de la région d'étude

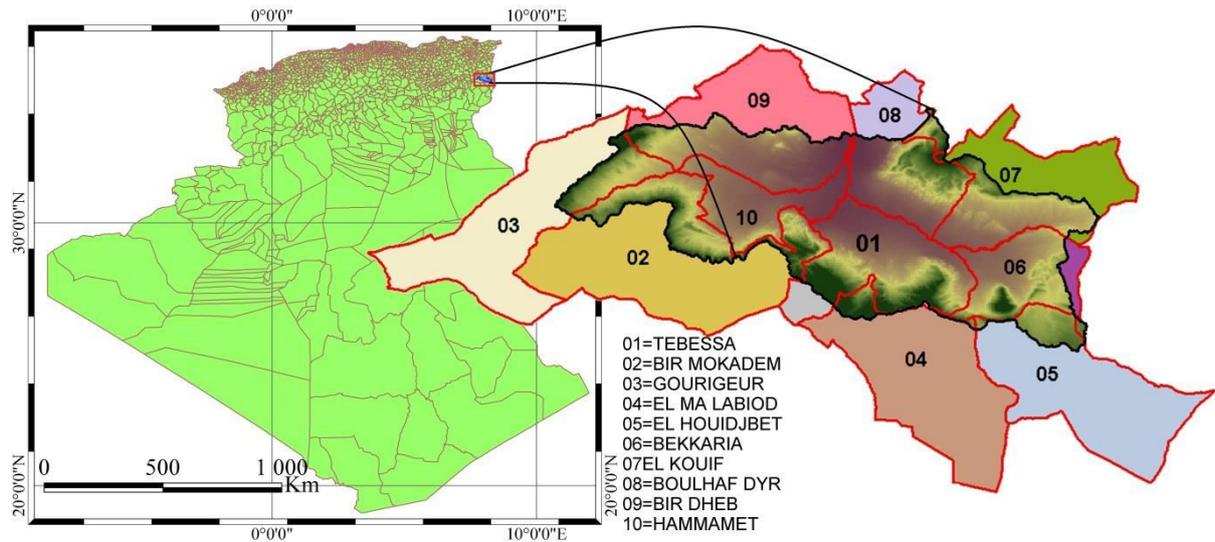


Fig. 2: Limites administratives de la zone d'étude (Djebaassi Toufik 2021)

### I.2. Limites géomorphologiques :

En ce qui concerne les limites géomorphologiques, les monts de Dyr, Belkefif et El Kouif constituent la limite Nord. Les monts de Djebissa et El Mouhad forment la limite Est, tandis qu'au Sud, ce sont les monts de Bouroumane, Doukkane et Es'Sen. À l'Ouest, ce sont les monts de Serdiess et Kecherid (Fig.3)

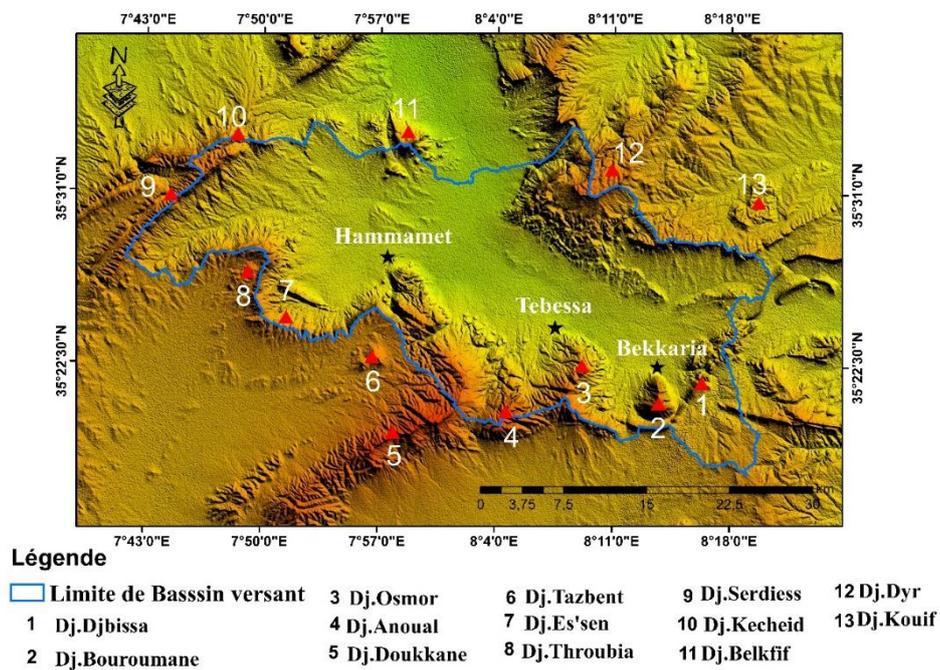


Fig. 3: Limites naturelles de la zone d'étude.

## II-Caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant

### II-1- Caractéristiques de forme

#### II- 1- 1 La surface

Pour déterminer ces caractéristiques, nous avons d'abord procédé à la délimitation du bassin versant et au choix d'un exutoire (l'Oued Chabro). Sur une carte topographique à l'échelle 1/200 000, nous avons ensuite déterminé sa surface, qui peut être mesurée de plusieurs façons : par superposition d'une grille dessinée sur du papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre, ou encore mieux, par des techniques de digitalisation. La valeur du périmètre a été quant à elle déterminée à l'aide d'une application du Système d'Informations Géographiques (SIG) tel que ArcGIS. Ainsi, avec un périmètre d'environ 208.94 km, ce bassin couvre une superficie de 960.044 km<sup>2</sup>.

#### II- 1- 2 - La forme du bassin

Une caractéristique importante du bassin versant peut-être exprimée par la détermination d'un paramètre communément appelé indice de compacité de Gravius (Kc). Il est bien connu que la forme du bassin a une influence significative sur l'écoulement superficiel global, ainsi que sur la forme de l'hydrogramme en réponse à une pluie donnée.

Plus cet indice se rapproche de l'unité, plus le bassin versant est de forme quasiment circulaire (compacte), ce qui signifie que le temps de concentration (tc) des eaux de ruissellement sera court. En revanche, dans le cas d'un bassin de forme allongée, la réaction sera différente.

Cet indice se définit comme le rapport entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle ayant la même surface. Il peut être calculé facilement selon l'expression suivante :

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

A : aire du bassin (Km<sup>2</sup>).      P : son périmètre (Km).

A N : P = 208.94km et A = 960.044km<sup>2</sup>d'où      Kc = 1,88.

La valeur ainsi obtenue (Kc = 1,88) traduit une forme allongée, du bassin étudié.

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

Le concept du rectangle équivalent, ou rectangle de Gravius, introduit par (L. Roche en 1963), facilite la comparaison des bassins versants en ce qui concerne leur influence principalement sur l'écoulement. Cette approche consiste à transformer géométriquement le bassin réel en un rectangle. Au cours de cette transformation, le périmètre et la surface du bassin sont maintenus inchangés (et donc le même indice de compacité est conservé), ce qui garantit également la même répartition hypsométrique. Les lignes de niveau deviennent des parallèles aux petits côtés du rectangle. Notons par L et l respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent ; son périmètre et son surface s'expriment respectivement par les relations suivantes :

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

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

La combinaison de ces trois lois donne :

$$AN : L = 93,78Km \text{ et } l = 10,23Km.$$

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

## **II – 2 – Le relief :**

Comprendre l'incidence du relief sur l'écoulement est assez simple, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques tels que les précipitations, les températures, etc., varient en fonction de l'altitude et de la morphologie du bassin. De plus, la vitesse d'écoulement est influencée par la pente. Le relief est généralement représenté sur les cartes topographiques par des courbes de niveau et se caractérise également par les éléments suivants :

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

Elle offre une perspective synthétique de la pente du bassin, reflétant ainsi le relief. Cette représentation graphique montre la distribution de la surface (ou le pourcentage de la surface, sur l'axe des abscisses) du bassin en fonction de son altitude (sur l'axe des ordonnées). Une telle analyse met en lumière le profil caractéristique du bassin et de ses pentes, un facteur déterminant pour l'écoulement.

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

La quantification des surfaces par intervalle d'altitude (c'est-à-dire la superficie entre deux courbes principales adjacentes) nous a conduites à retenir les valeurs synthétisées dans le tableau suivant (Tableau 1).

Tab. 1: Répartition des surfaces en fonction des tranches d'altitudes. (Djebaassi Toufik 2021)

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

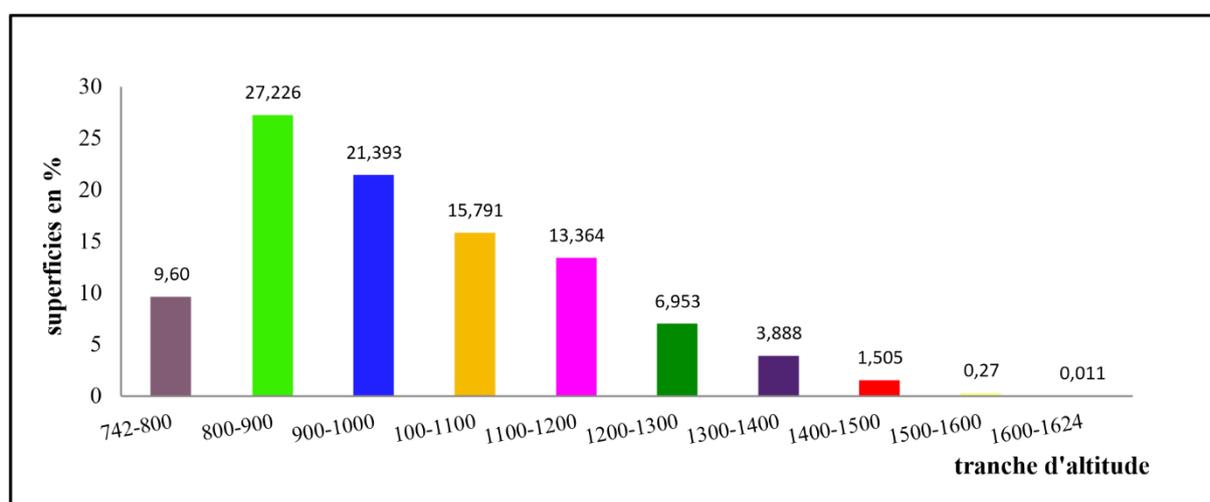


Fig. 4: Répartition des surfaces en fonction des altitudes. (Djebassi Toufik 2021)

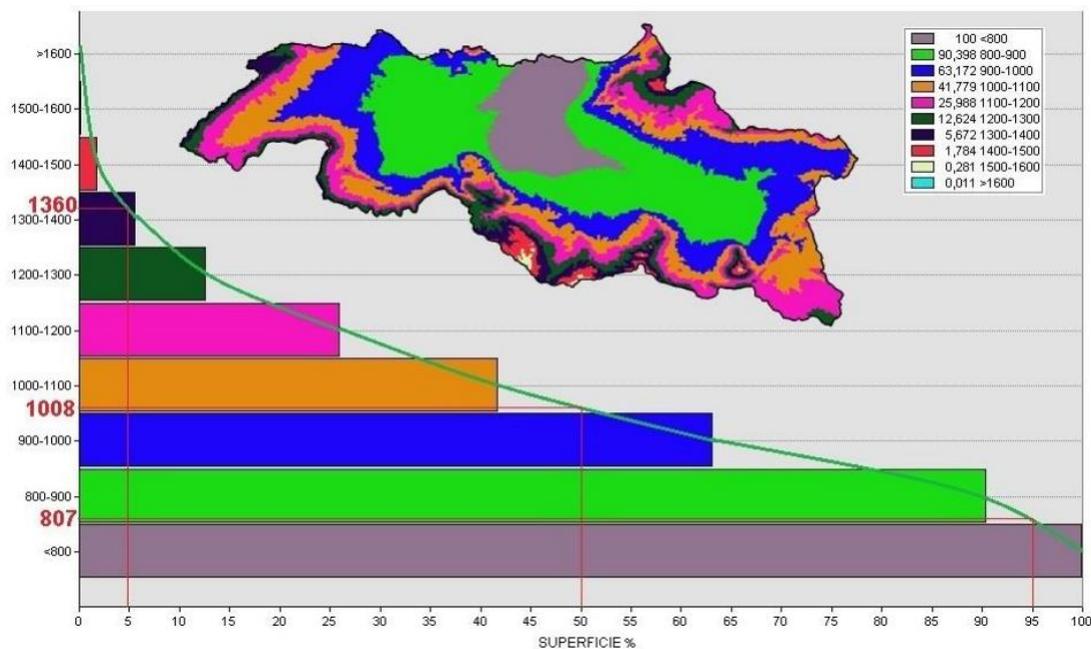


Fig. 5: Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques à travers le bassin de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021)

À partir des données ainsi recueillies, le tracé de la courbe hypsométrique représentative sera facile à réaliser. Veuillez consulter la Figure 5 pour plus de détails.

L'analyse de ce graphique révèle que la zone située entre les altitudes de 742 et 10 00 mètres constitue une plaine, représentant 58.21% de la surface totale.

La tranche d'altitude de 1000 à 1300 mètres correspond à 36.10% de la superficie, formant des montagnes qui entourent la plaine : au Nord (Dj. Belkif), à l'Est (Dj. Dyr) et à l'Ouest (Dj. Serdies). Les 5.69% restants représentent les zones d'altitude dépassant 1600 mètres, caractérisées par les monts qui délimitent la plaine au Sud (Dj. Bouroumane, Dj. Doukkane).

## II – 2 – 2 – Les altitudes caractéristiques

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

Ces valeurs sont directement extraites de la carte topographique. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin, tandis que l'altitude minimale désigne l'endroit le plus bas, généralement à l'exutoire. Elles définissent l'amplitude altimétrique du bassin versant et sont également utilisées dans le calcul de la pente.

Dans le bassin de Tébessa, ces deux données varient de 750 mètres à 1 626 mètres, ce qui représente une différence d'environ 882 mètres entre le point culminant et l'exutoire.

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

$H_{moy}$ : 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 fournit des informations sur l'importance de l'altitude, qui, bien qu'elle semble modérée par rapport à l'ensemble du bassin versant, n'en demeure pas moins significative et ne doit pas être sous-estimée.

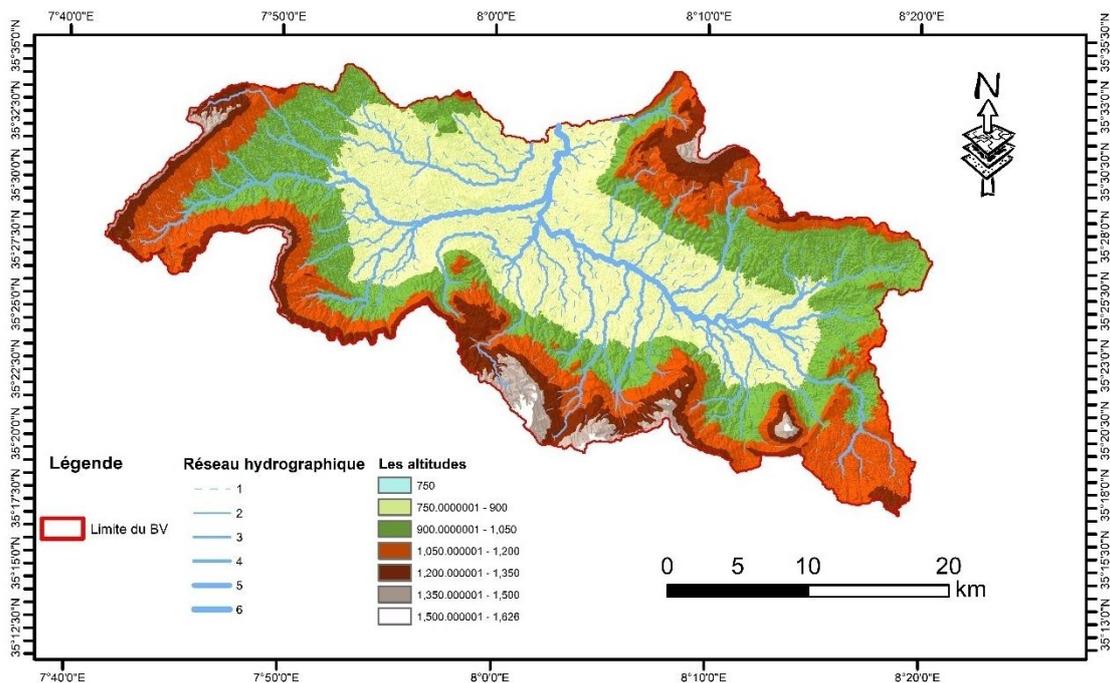


Fig. 6: Carte des répartition des altitudes dans le bassin de Tébessa

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

Cette valeur correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin ( $H_{50\%}$ ) sur la courbe hypsométrique. Si cette courbe présente une pente régulière, cette mesure sera similaire à l'altitude moyenne. Dans le cas du bassin de Tébessa, la valeur correspondante est d'environ 1008 mètres. Elle n'est pas très éloignée de l'altitude moyenne, ce qui confirme la régularité de la pente de la courbe.

### II – 2 – 3 – Les pentes :

D'un point de vue hydrologique, l'importance du relief est incontestable, car l'une des caractéristiques déterminantes de la topographie est la pente, qui joue un rôle crucial dans le

ruissellement des eaux. La caractérisation du relief peut être réalisée à l'aide d'au moins deux indices.

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

En tant que variable indépendante, la pente offre une indication précieuse sur le temps nécessaire pour le ruissellement direct, et donc sur le temps de concentration ( $t_c$ ), ce qui influence directement le débit maximal pendant une averse. En calculant la moyenne pondérée des pentes, selon (Carlier et Leclerc 1964), pour toutes les surfaces élémentaires délimitées entre deux altitudes données, la relation suivante fournit une estimation de cette caractéristique :

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

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

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

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

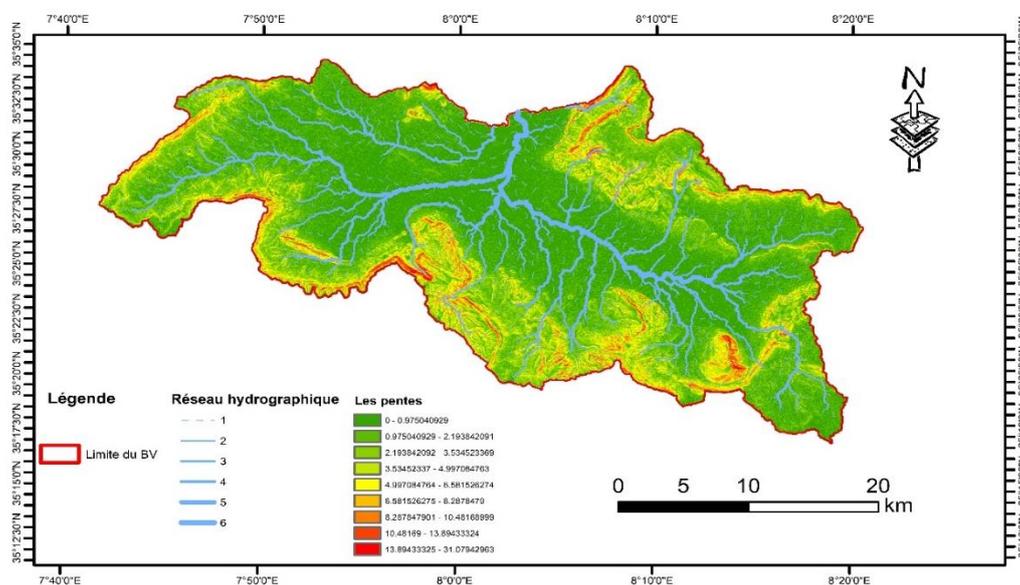
$A$  : surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

Le développement de cette formule donne :

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

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

$$I_m = \frac{1360-807}{10.23} \quad \text{d'où} \quad I_m = 54.056$$



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

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

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

Les points sélectionnés sur la courbe hypsométrique sont tels que l'aire, supérieure ou inférieure, soit égale à 5% de la surface totale. À partir de cela, nous obtenons les altitudes H5% et H95%, entre lesquelles se situe 90% de la superficie du bassin, ainsi que le dénivelé utile (D).

Cet indice est alors défini par le rapport entre le dénivelé utile (D) et la longueur du rectangle équivalent (L), dont la relation s'exprime ainsi :

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

L : Longueur du rectangle équivalent (Km).

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

$$A N : H_{5\%} = 1\,360m \text{ et } H_{95\%} = 807 \text{ d'où } D = 553m \text{ et } L = 93.78Km.$$

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{553}{93.78} \text{ donc } I_g = 5.89m/km \text{ autrement dit } I_g = 0.589\%$$

Cette valeur permet de caractériser le relief du bassin de Tébessa comme étant assez faible ( $I_g > 0.5$ ), selon la classification établie par les services de l'Institut de Recherches en Développement (IRD), anciennement l'Office de Recherches Scientifiques et Technologiques d'Outre-Mer (ORSTOM). Il convient de noter que cet indice peut être utilisé pour comparer les bassins versants et les classer, mais il n'est significatif que pour ceux d'une superficie d'environ 25 km<sup>2</sup>. De plus, il présente l'inconvénient de diminuer lorsque la surface augmente. Par conséquent, il semble plus approprié de recourir à une mesure qui exprime de manière plus évidente cette caractéristique.

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

Cette valeur bénéficie de son origine dans l'expression de l'indice global de pente ( $I_g$ ), également connu sous le nom de pente globale. Il est admis que cette valeur est inversement proportionnelle à la racine carrée de la surface, une fois ajustée pour tenir compte de son effet.

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

Il semble que la dénivelée spécifique ne soit influencée que par l'hypsométrie ( $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ ) et la forme du bassin ( $l/L$ ), ce qui conduit à une seconde classification, établie par le même service de l'IRD, mais sans considération de la surface.

$$D_s = 553 \sqrt{\frac{10.23}{93.78}} \text{ d'où } : D_s = 182.645m$$

Cette valeur qualifie le relief du bassin de Tébessa comme étant assez marqué ( $D_s > 100$ ). En effet, cette caractéristique conditionne la réponse du bassin aux précipitations.

## 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  $d_i \cdot \sqrt{a_i d_i}$ .

Tab. 2: Indice de pente de Roche. Bassin de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021)

Tranche d'altitude $H_i$ (m)	Surface partielle $a_i$ (%)	Différence de côte $d_i$	$a_i \cdot d_i$	$\sqrt{a_i d_i}$
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 :  $L=93.78\text{km}$  et  $\sum \sqrt{a_i d_i} = 262.356$  D'où :  $I_p = 27.091$

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 :

Il s'agit d'un réseau de cours d'eau, qu'ils soient naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui servent à drainer les eaux de ruissellement ou de restitution des nappes, que ce soit par le biais de sources ou le long des lits d'oueds. Ce réseau est influencé par quatre facteurs principaux : la géologie (notamment la sensibilité à l'érosion et la présence de structures qui affectent le sens du courant), le climat (par exemple, un réseau dense dans les régions montagneuses et humides), la topographie du terrain (qui peut déterminer si le réseau est en phase érosive ou sédimentaire), et l'impact humain (comme les modifications du tracé

original du réseau par le drainage, les endiguements, la construction de barrages, etc.). Il est souvent caractérisé par sa hiérarchisation, son profil en long et son développement, qui inclut le nombre de cours d'eau et leurs longueurs.

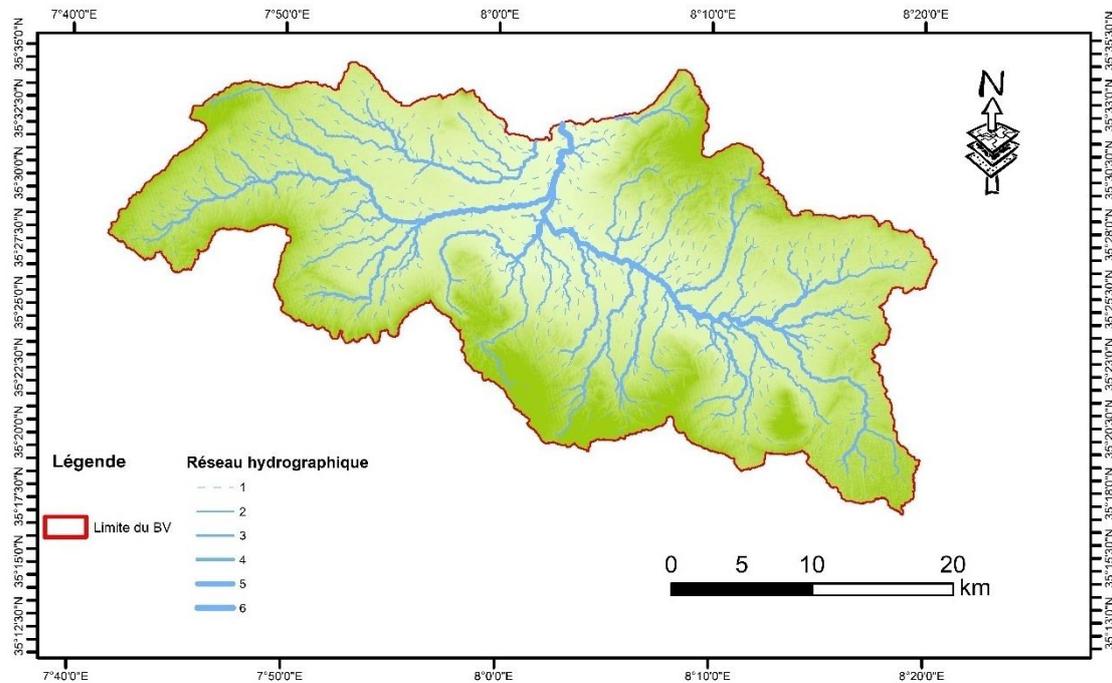


Fig. 8: Carte du réseau hydrographique du bassin de Tébessa

La transposition de ce qui a été mentionné précédemment sur le bassin étudié révèle que, malgré sa situation dans une région semi-aride, le nombre de cours d'eau y est limité.

Cependant, le réseau reste dense, caractérisé par de nombreux affluents secondaires, des tracés sinueux, une intermittence et des pentes modérées. Les principaux cours d'eau qui collectent les eaux de ruissellement et les dirigent vers l'exutoire sont les suivants :

- **Oued El Kebir**, prenant sa source à l'Est et suivant une direction Est-Ouest sur environ 32,22 km jusqu'à sa confluence avec l'Oued Chabro. Il est alimenté par les affluents Oued Djebissa et Oued Hemadja, et reçoit l'Oued Raffana juste avant de rencontrer l'Oued Chabro.
- **Oued Serdies**, dont la source se trouve à l'Ouest (Dj. Serdies) et qui parcourt environ 24,92 km avant de recevoir l'Oued Boudiss et de longer la partie occidentale de la plaine. Il collecte les eaux de ruissellement de l'Ouest et du Sud-ouest du secteur.
- **Oued Chabro**, formé par la rencontre de ces cours d'eau et devenant le principal cours d'eau du bassin, situé approximativement au centre de la plaine.

Le flux de ce système d'interconnexion se dirige principalement vers le centre à partir de l'Est, du Sud et de l'Ouest, puis vers le Nord.

Les crues ne sont pas liées à une saison particulière mais sont principalement déclenchées par les orages 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 est influencée par la géologie (structure et lithologie), les caractéristiques topographiques du bassin versant, ainsi que, dans une moindre mesure, par les conditions climatiques et anthropiques. D'un point de vue physique, elle représente la superficie du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un réseau hydrographique unitaire (une section du réseau). On peut l'exprimer de manière inverse sous la forme de

$C = 1/D_d$  (selon Schumm), où  $C$  représente la constante de stabilité du cours d'eau.

La densité de drainage, introduite par Horton, se définit comme la longueur totale des cours d'eau rapportée à la surface du bassin. C'est un paramètre qui indique le degré de densité ou de dispersion du réseau hydrographique.

Une expression appropriée pour lui donner une mesure est la suivante :

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

$D_d$ : Densité de drainage.

$L_i$  : Longueur de cours d'eau (Km),  $A$  : Aire du bassin (Km<sup>2</sup>).

$$AN: A = 960.044 \text{ Km}^2, \sum L_i = 4659 \text{ km}. \quad \text{D'où: } D_d = 4.853 \text{ km/km}^2.$$

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

Il s'agit du temps nécessaire pour qu'une particule d'eau, ou une goutte d'eau, parcoure depuis le point hydrologiquement le plus éloigné en amont du bassin jusqu'à l'exutoire considéré. Ce temps est influencé par plusieurs facteurs, tels que l'intensité des précipitations, la pente, la lithologie et la couverture végétale, qui peuvent agir individuellement ou en combinaison pour entraver ou favoriser l'écoulement.

Ce paramètre peut être estimé à l'aide de différentes formules, dont celle de (Giandotti), dont l'expression est la suivante :

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

$t_c$  : Temps de concentration (h).

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

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

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

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

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

Le réseau hydrographique est formé suite à l'interaction de nombreux facteurs tels que le climat, le relief, la lithologie, etc. Cette densité semble relativement élevée compte tenu de la

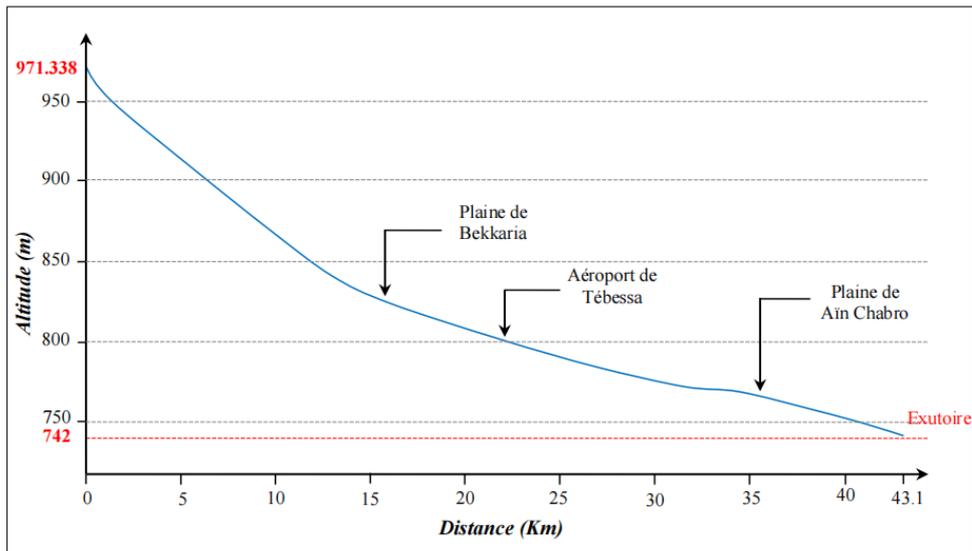


Fig. 9: Profil en long du Talweg principal du bassin de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021)

surface du bassin, ainsi que de la densité et de la ramification du réseau. Cette situation découle probablement des caractéristiques physiques particulières de ce dernier.

Tab. 3: Récapitulation des paramètres morphométriques. Bassin de Tébessa.

Paramètre(symbole)	Unité	Formule / Moyen de détermination	Résultat
Altitude maximale (Hmax)	m	Déduite de la courbe hypsométrique	1626
Altitude médiane (Hm ou H50%)	m	Lue sur carte topographique	1008
Indice de compacité (Kc)	/	$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1.88
Dénivelée spécifique (Ds)	m	$D_s = D \sqrt{\frac{l}{L}}$	185.28
Altitude moyenne (Hmoy)	m	$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{A}$	993.77
Largeur du rectangle équivalent (l)	km	$l = \frac{P - 2L}{2}$	10.23
Longueur du rectangle équivalent (L)	km	$L = \frac{P - 2l}{2}$	93.78
Indice de pente global (Ig)	m/km	$I_g = \frac{D}{L}$	5.89
Indice de pente moyenne (Im)	%	$I_m = \frac{D}{l}$	54.056
Indice de pente de Roche (Ip)	%	$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i \cdot d_i}$	27.091
Périmètre (P)	Km	Curvimètre sur carte topographique	208.94
Surface (A ou St)	Km <sup>2</sup>	Planimétrie sur carte topographique	960.044
Classe de relief (R)		Déduit de la Ds	Assez faible
Altitude minimale (Hmin)	m	Lue sur carte topographique	750
Temps de concentration (tc)	h	$t_c = \frac{4 \sqrt{A + 1,5 \cdot L_p}}{0,8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$	10.16

## Conclusion

La zone étudiée fait partie du vaste bassin versant de la Medjerdah, situé dans les hautes plaines orientales de l'Atlas saharien. La topographie de la région est diversifiée, avec une plaine

d'altitude moyenne oscillant entre 742 et 1000 mètres, entourée par une série de montagnes atteignant jusqu'à 1400 voire 1600 mètres d'altitude.

Selon l'indice de compacité ( $k_c = 188$ ) et les dimensions du rectangle équivalent, le bassin de Tébessa a une forme allongée, avec un relief qualifié de relativement faible ( $D_s = 185,28$  m). Les montagnes couvrent 41,79% de la superficie, tandis que la plaine occupe le reste (58,21%).

Toutes ces caractéristiques morphométriques influent sur l'écoulement des eaux que l'impluvium est susceptible de recevoir. Le temps de concentration nécessaire pour que les eaux parviennent à l'exutoire est estimé à 10 heures, 09 minutes et 36 secondes, avec une densité de drainage de  $D_d = 4,853$  km/km<sup>2</sup>.

La combinaison de ces facteurs avec la nature lithologique du terrain entrave une infiltration satisfaisante, qui constitue la principale source d'alimentation des systèmes aquifères, favorisant ainsi la perte d'importantes quantités d'eau qui s'écoulent vers l'extérieur.

**Chapitre II : Caractéristiques géologiques de la région d'étude**

## INTRODUCTION :

Une étude géologique, à la fois lithologique et structurale, se révèle d'une importance capitale pour identifier les formations qui pourraient constituer des gisements d'eau souterraine et pour suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps.

## I – Géomorphologie :

La plaine de Tébessa correspond à un vaste fossé d'effondrement qui traverse orthogonalement des plis anticlinaux et synclinaux orientés NE-SW. Les principaux accidents géologiques qui ont fracturé ces structures ont façonné la physionomie actuelle de la région. La plaine est bordée de chaque côté par deux vastes ensembles d'affleurements calcaires, séparés par des dépressions (voir Fig. 10).

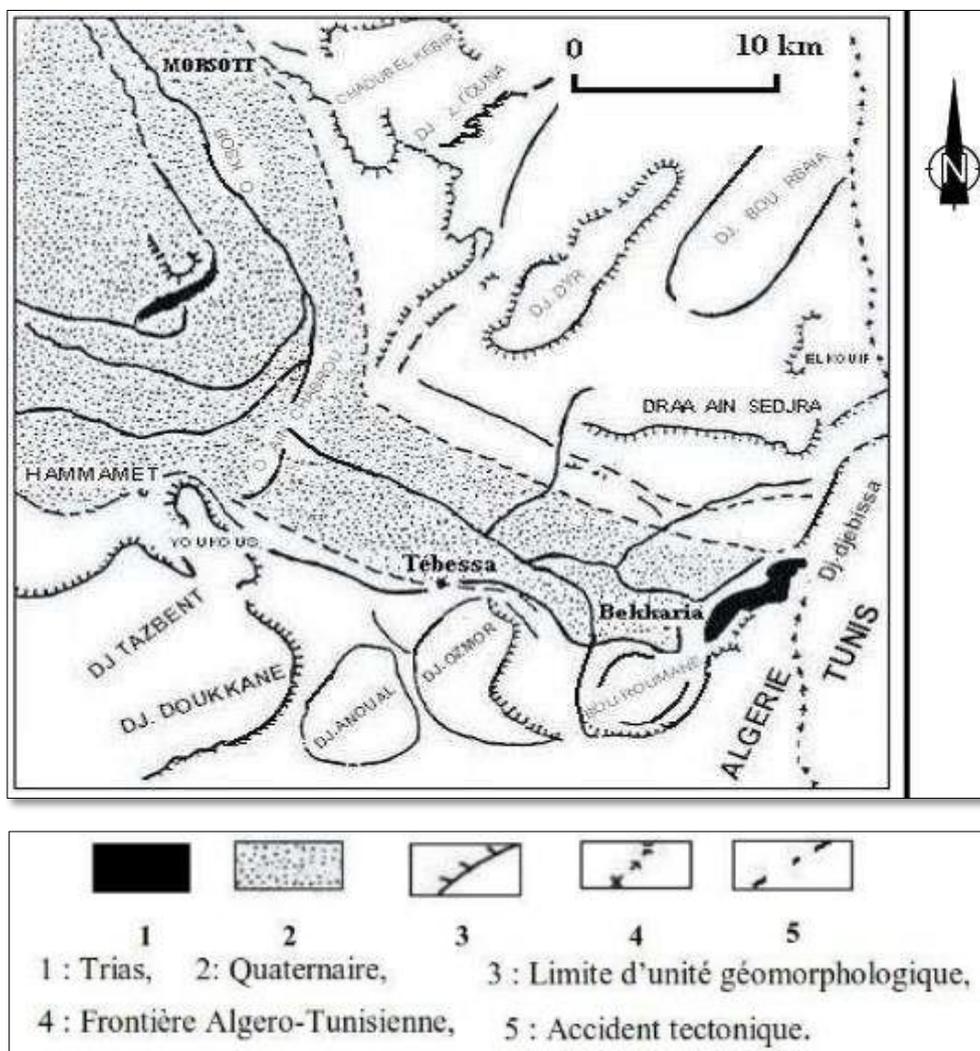


Fig. 10: Croquis géomorphologique de la région de Tébessa (in Djabri, 1987)

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

La transition des hautes plaines de Mellègue aux monts de Tébessa se caractérise par le rétrécissement des plaines et par l'accentuation des unités géomorphologiques telles que le val perché de Dyr et celui de Bou Rbaia.

### **I – 2 – Les monts méridionaux :**

Au sud, le fossé d'Ain Chabro coupe à travers les monts de Nememcha, rompant ainsi la symétrie des formes du relief qui existait précédemment. À l'est de Djebel Doukkane, le relief devient de plus en plus complexe ; la barrière orientée est-ouest s'incline vers le nord-est où elle ferme la plaine de Tébessa. Cette barrière se présente sous forme de petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmor, Djebel Bouroumane et Djebissa.

## **II – Caractéristiques géologiques :**

### **II – 1 – Le Trias :**

Le Trias affleure en de nombreux endroits grâce à des pointements diapiriques, qui auraient été observés 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. Belkfif, près du Dj. Hameimet Nord, et enfin au nord de Morsott, où l'affleurement s'étend largement en direction d'El Aouinet et de Souk Ahras.

Il est caractérisé par de grandes masses de gypse gris bleuté et parfois rougeâtre, ainsi que par des argiles vertes et bariolées. Ce faciès indique l'existence d'importantes lagunes où ont été déposées de grandes quantités de marne, de gypse et probablement de sel (F. Morel, 1955 ; Buisson, 1974).

### **II – 2 – Le Jurassique :**

Il a été noté l'absence de dépôts jurassiques dans la région (Dubourdiou, 1956 ; Chevenine et al., 1989), cependant certains forages pétroliers les ont rencontrés en dehors des zones diapiriques.

### **II – 3 – Le Barrémien :**

Les seules formations barrémiennes qui affleurent se trouvent au petit anticlinal de Sidi Embark, au nord-est de Dj. Ouenza, sur le flanc sud-ouest de l'anticlinal de Mesloulou, le long de l'Oued Batma et au nord-ouest de DeharMesloulou (Dubourdiou, 1956). Ailleurs, les mouvements d'effondrement (Boukhadra-Hameimat) et la poussée triasique, comme à Ouenza et Boujaber (Dubourdiou, 1956), empêchent l'observation des sédiments antérieurs à l'Aptien. Les formations barrémiennes se composent principalement de marnes grises ou jaunes assez argileuses, contenant des ammonites pyriteuses. Vers le sommet, ces marnes sont intercalées de minces couches de calcaires noduleux gris clair avec une patine ocre (Dubourdiou, 1956). Ces formations n'excèdent pas 250 mètres d'épaisseur. Elles se sont déposées sur un haut fond relativement proche de la surface (Dubourdiou, 1956), témoignant des conditions de sédimentation en mer peu profonde qui ont perduré jusqu'au début de l'Aptien.

## **II – 4 – L'Aptien :**

Sur de vastes étendues, l'Aptien revêt une grande importance dans "la zone des diapirs" de la région de Tébessa en raison de la nature de ses dépôts et de leur développement substantiel (300 à 600 mètres d'épaisseur) (voir Fig. 11). Il est caractérisé par des roches carbonatées néritiques qui se sont formées dans des eaux chaudes peu profondes. Ces conditions ont favorisé le développement de processus organogènes de la sédimentation, conduisant à la formation de diverses structures. À l'Aptien, la mer était plus étendue qu'au Barrémien. Le phénomène le plus remarquable de cette période est la formation de récifs sur des rides allongées (Dubourdiou, 1956).

Au cours de l'Aptien supérieur, la région de Tébessa a vu l'émergence de nombreuses plates-formes isolées dont l'architecture est influencée par les remontées diapiriques (Dubourdiou, 1956). Ce complexe fait partie du domaine des hauts-fonds qui séparait, pendant l'Aptien, un domaine profond (le sillon de Sellaoua) d'un autre très subsident (le sillon atlasique oriental). Ces faciès aptiens annoncent une régression à la fin de l'Aptien.

La formation aptienne commence par un Aptien principalement marneux, caractérisé par une alternance de marnes, d'argiles, de grès et de calcaires à gastéropodes, mollusques et échinodermes. Cet Aptien marneux est surmonté par un Aptien calcaire, constitué de puissants blocs calcaires à ciment dolomitique, bioclastiques avec des orbitolines, des rudistes et qualifiés de récifaux (Dubourdiou, 1956).

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

Étage	Sous étage		Lithologie	Épaisseur (m)	Description lithologique		
CÉNOZOÏQUE	Quaternaire			⑥ 10 - 30	Dépôts clastiques d'origine continentale.		
	Néogène	Miocène		⑤ 10 - 150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaires sableux avec intercalations d'argilites.		
		Paléogène	Éocène		200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.	
MÉSOZOÏQUE	C R É T A C É	É	U	Maest		250 - 300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
			E	Compan		500 - 600	Marnes argileuses et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
		P	U	Turo-Con-Sant		④ 500 - 600	Marnes argileuses et grises bleuâtres.
			S	Cénomane		180 - 250	Calcaires en banc, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
		A	R	Vracon		② 500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalation de calcaires argileux et argilites.
			U	Albien		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noire dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
		R	E	Clan		100 - 200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations
			I	Aptien		① 300 - 600	1- faciès clastiques, marnes argileuses avec intercalations des marnes sableuses et grès calcaires. 2- faciès carbonaté, calcaires organo- détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.
		C	F	Barrémien		< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès de Mesloula).
			JURASSIQUE			< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins dolomies et calcaires marno- dolimitique.
	Trias			< 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.

Fig. 11: Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa

## II - 4 - 1 – L'Aptien marneux :

Il est caractérisé par de gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques contenant des orbitolines et des mollusques. Parfois, on trouve des intercalations de quelques niveaux de marnes feuilletées de couleur rouge violacée ou verte. On observe la présence de quelques lamellibranches et des moules internes de gastéropodes au niveau de Djebel Bouroumane. Cette formation peut atteindre une épaisseur de 450 mètres.

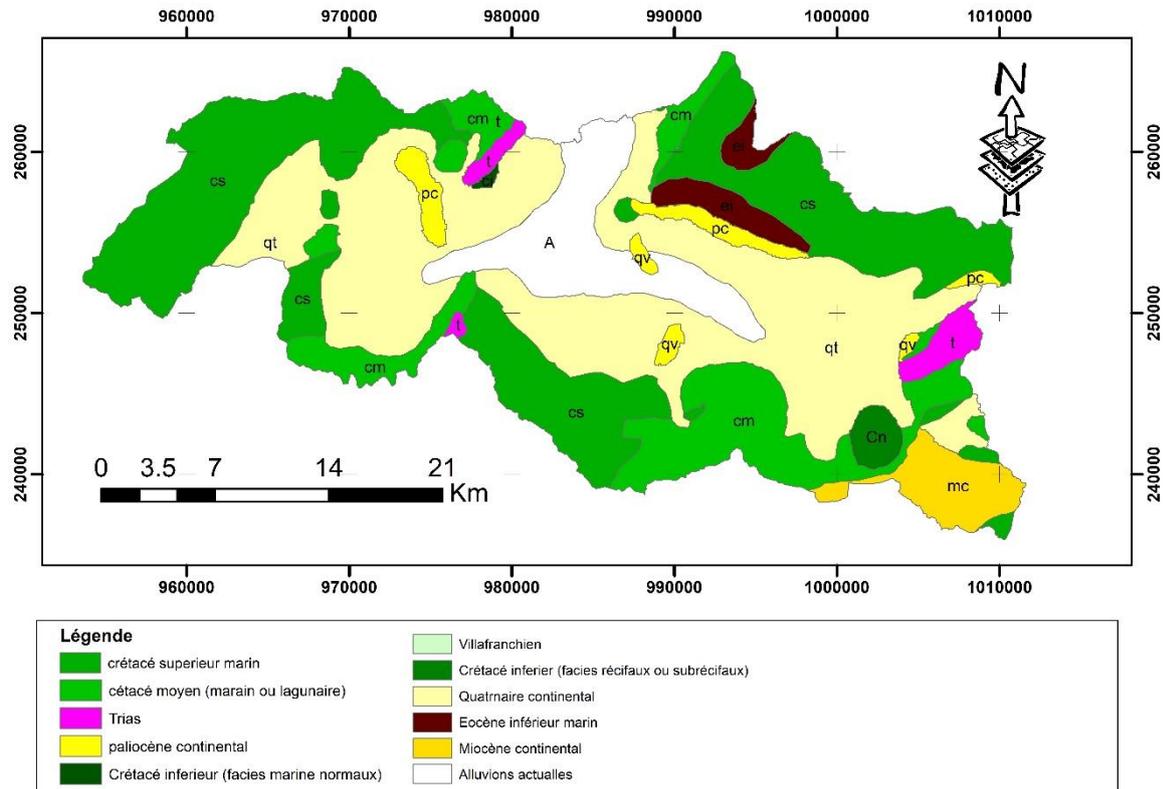


Fig. 12: Carte géologique de la région de Tébessa.

## II - 4 - 2 – L'Aptien calcaire :

Il surmonte l'Aptien marneux et contient généralement des miliolles, des rudistes et des lamellibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980), ainsi qu'une abondance de quartz automorphe. Son épaisseur varie généralement entre 100 et 170 mètres. Ces calcaires sont considérés comme un métallotecte lithologique car ils hébergent la majeure partie de la minéralisation ferrifère et/ou polymétallique (Dubourdieu, 1956 ; Bouzenoune, 1993).

### **II – 4– 3 – Le Clansayésien :**

Il affleure dans divers anticlinaux de la région étudiée, il s'agit de marnes grises, jaunes à ammonites, accompagnées de calcaires gréseux (Dubourdiou, 1956). La formation aptienne présente une épaisseur totale d'environ 700 mètres en moyenne.

### **II – 5 – L'Albien :**

Généralement, la formation albienne commence par un faciès carbonaté qualifié de « récifal » dans sa partie inférieure, puis devient marneux et marno-calcaire dans sa partie moyenne à supérieure. Dans la région de Tébessa, elle est caractérisée par une faune benthique dans des zones peu profondes. À l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est interrompue par le Trias, ce qui entraîne le redressement des couches et la complexification des structures (plis évases, plis en champignon, etc.) généralement scellées par le Vraconien (Bouzenoune, 1993 ; Othmanine, 1987 ; Nedjari-Belhocène et Nedjari, 1984).

Il convient de signaler une série monotone de marnes à argiles de couleur gris foncé, avec des intercalations de calcaires à marnes noires. Son épaisseur varie de 20 à 150 mètres.

### **II – 6 – Le Vraconien :**

Il est généralement composé de marnes avec des intercalations de calcaires argileux et d'argilites d'une épaisseur de 500 à 600 mètres (Dubourdiou, 1956). Dans certaines régions, il présente généralement une transgression 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 exerce un contrôle principal sur la minéralisation polymétallique.

### **II – 7– Le Cénomaniens :**

Dans la région de Tébessa, une série monotone de marnes argileuses verdâtres se met en place au Cénomaniens inférieur. Au Cénomaniens moyen, ces marnes présentent diverses intercalations calcaires peu développées, avec une faune plus ou moins abondante et des veinules de calcite fibreuse.

Au Cénomaniens supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation cénomaniens est estimée entre 750 et 1100 mètres. La sédimentation cénomaniens s'est déposée dans des conditions abyssales (profondes). Cette période est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement NE-SW (Othmanine, 1987). À l'approche du Turonien, la sédimentation change rapidement tandis que les fossiles disparaissent. Les marnes argileuses sont remplacées par des couches riches en carbonate de chaux (Dubourdiou, 1956). La limite supérieure du Cénomaniens est difficilement distinguable (Dubourdiou, 1956).

### **II – 8 – Le Turonien :**

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

L'analyse lithologique réalisée par Salmi-Laouar (2004) révèle que la partie inférieure du Turonien dans le massif d'Essouabaa, épaisse d'environ 200 mètres, est constituée d'une série d'alternances stratocroissantes de marnes, de calcaires marneux et de calcaires. Les marnes, parfois argileuses et de couleur grisâtre, varient de l'ordre métrique au plurimétrique en épaisseur. Les bancs de calcaires marneux et les calcaires fins micritiques ont également des épaisseurs de l'ordre métrique au plurimétrique. L'étude de la microfaune a révélé la présence de sections du genre *Weithenella* et du genre *Hedbergella*. Étant donné que ces genres sont très abondants à la limite Cénomaniens-Turonien ainsi que dans le Turonien inférieur, l'âge du Turonien inférieur pour ces niveaux est confirmé.

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

#### **II – 9 – Le Campanien-Santonien :**

Ces périodes ne sont pas subdivisées en raison du manque d'éléments de datation. Elles se caractérisent par des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris contenant des plaquettes de calcite fibreuse, avec des intercalations de marnes à lumachelles. Leur épaisseur varie de 200 à 600 mètres.

#### **II – 10 – Le Maestrichtien :**

Cette période est marquée par des calcaires blancs bien lités, d'environ 60 mètres d'épaisseur, surmontés par une forte accumulation de marnes argileuses grises à noires (150 mètres). Ces dernières présentent à leur base quelques intercalations de calcaires (Dubourdiou, 1956). Le régime sédimentaire du Campanien supérieur et du Maestrichtien indique toujours la persistance des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et une mer chaude, avec une prédominance de calcaires crayeux rarement récifaux (Chevenine et al., 1989).

#### **II – 11 – Le Paléocène :**

Sa base est constituée de marnes similaires à celles du Maestrichtien supérieur, intercalées avec des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs.

#### **II – 12 – L'Éocène :**

L'Éocène inférieur et moyen est caractérisé par des calcaires à silex et d'autres contenant des Nummulites, notamment près des limites de la région de Tébessa. Leur épaisseur est d'environ 200 mètres.

#### **II – 13 – Le Miocène :**

Les dépôts du Miocène inférieur et moyen reposent de manière transgressive sur les formations anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias). Ils consistent en une accumulation importante de marnes et de grès, pouvant atteindre une épaisseur de 1000 mètres dans le bassin de Oulad Soukiès (au nord-ouest de l'Ouenza) (Dubourdiou, 1956 ; Kowalski et Hamimed, 2000). À leur base, on trouve des conglomérats contenant divers éléments calcaires, du silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité

diapirique (Bouzenoune, 1993). Le remaniement de silex, considéré comme étant de l'âge Yprésien à la base du Miocène, indique l'existence d'une mer éocène où s'est déposée une sédimentation marine durant l'Éocène et le Miocène inférieur à moyen. La sédimentation à la fin du Miocène marque le début d'une phase de régression. La puissance moyenne du Miocène dans la région d'étude est d'environ 150 mètres (Dubourdiou, 1956).

## **II – 14 – Le Quaternaire :**

Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et se trouvent dans les parties basses des reliefs ainsi que sur de vastes surfaces telles que les plaines et les vallées actuelles. Ils se composent de croûtes calcaires, de limons éboulis, de cailloutis et de poudingues. L'épaisseur du Quaternaire varie entre 10 et 30 mètres (Dubourdiou, 1956). Les formations lithologiques pouvant être distinguées sont les formations actuelles, les formations anciennes et le Plio-Quaternaire.

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

- **Les Éboulis actuels** : ils sont présents au pied de tous les grands reliefs calcaires, mais ils se confondent souvent avec les éboulis anciens.
- **Les Travertins** : ils se forment le long des sources, principalement à Tébessa et à Tenoukla.
- **Les Alluvions actuelles** : elles sont rares car les oueds, en général, traversent les formations sur lesquelles ils s'écoulent. Sur les bordures de la plaine, elles prennent l'apparence de dépôts torrentiels.
- **Les Limons récents** : ils sont principalement développés dans la grande vallée de l'Oued Kébir. Dans la Merdja de Tébessa, des dépôts de gypse alluvionnaire sont exploités localement.
- **Les Croûtes calcaires** : ces dépôts superficiels résultent de l'évaporation d'eau chargée de calcaire, et se développent surtout sur les alluvions caillouteuses anciennes.

### **II – 14 – 2 – Formations anciennes :**

- **Les Alluvions anciennes** : elles forment les basses terrasses des oueds et se connectent généralement à des formations anciennes occupant des surfaces plus vastes, avec des niveaux localement discernables (comme dans le cours amont de l'Oued Oglat el Rbaïb).
- **Les Alluvions anciennes de piedmont** : ces formations constituent les bordures de la plaine de Tébessa, soit argileuses soit caillouteuses. Dans le premier cas, elles proviennent des marnes sénoniennes à l'ouest et au nord-est de Tébessa, des formations danomontiennes au nord-ouest, des formations cénomaniennes au sud-est ; dans le second cas, elles sont issues des calcaires maestrichtiens à l'ouest et au nord-est, des formations éocènes au nord, des formations turoniennes à l'est, et enfin d'éléments très divers sur les flancs du Djebel Djebissa. Elles sont souvent des cônes de déjection.
- **- Le matériel d'épandage ancien en terrasse** : constitué de cailloutis et d'argiles, généralement peu épais en général (sauf à l'ouest de Tébessa dans la région de Chabet el Hallouf), reposant 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 (Djebel Mestiri, Chabet el Hmara, Ksar Tebnet). 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 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. OglatRbaïb, O. Kébir, Kt el Kramassa, O. Serdiess) ;

b. Conglomérats (contreforts, Est du Dj. Djebissa).

À Kt Sefra et dans l'Oued Naguess (près 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 :**

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°E. Elle se manifeste par des plis d'orientation atlasique N 50°-60°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 Télidjène, Vila., 1995).

#### **b. La phase distensive du Miocène Inférieur :**

Elle est responsable de la formation et du 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.

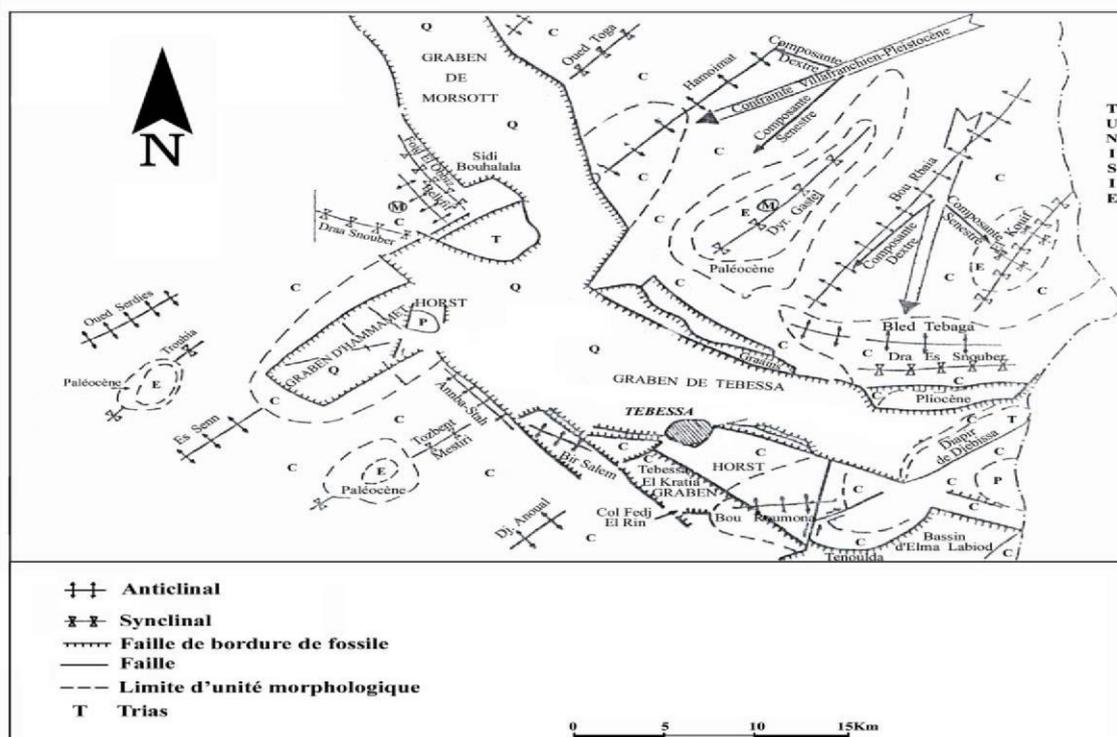


Fig. 13: Esquisse tectonique des environs de Tébessa, d'après W. M. Kowaleski et al. 2002.

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°-20°E responsable de la formation des plis orientés N90°-110°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°-20°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. À cette phase appartiennent l'anticlinal de Djebel Belkfif, le synclinal Faïd Al Lobba (Morel 1957) et l'anticlinal d'Oued Anmba-Djebel Stah.

Ces plis, orientés N 160°-170° E, sont formés par la contrainte maximale N 80° 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 à l'effondrement et au basculement d'une partie des structures plissatives 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 Belkfif, avec sa couverture turonienne, et de la zone de Sidi Bouhalala.

Ce soulèvement diapirique a déformé le fossé de Morsott et parallèlement, s'est produite 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 Belkfif. 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. Le substratum de ce fossé basculé est constitué d'un système de horsts et de 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 finilutétienne 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 2 km. L'ampleur de l'effondrement a provoqué

l'érosion partielle des sédiments de Q2 et le dépôt des galets de la série Q3 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 plioquaternaire.

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-quaternaire 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.

## **Chapitre III : Caractéristiques hydroclimatologiques**

## Introduction :

Pour garantir la fiabilité de toute étude hydrogéologique, il est crucial de comprendre la variation spatio-temporelle du climat et les caractéristiques hydroclimatologiques du milieu naturel. Cela nécessite une analyse détaillée des variations des températures, des précipitations et du régime des vents, car ces paramètres jouent un rôle déterminant dans la régulation des cours d'eau. Ils influent directement sur la fluctuation et le renouvellement des réserves en eau souterraine ainsi que sur leur qualité. De plus, ces éléments sont essentiels pour estimer des processus hydrologiques clés tels que l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration, qui sont nécessaires pour établir un bilan hydrique complet. Une compréhension approfondie de ces facteurs est donc essentielle pour évaluer l'impact sur le comportement des systèmes aquifères et le fonctionnement global du système hydrologique naturel.

La région dispose de trois stations météorologiques : Tébessa, Hammamet et Aïn Kissa. Cependant, pour ce qui est des températures et pour des raisons de praticité, seule la station de Tébessa a été retenue. Vous trouverez leurs références dans le tableau suivant (Tableau N° 4).

Tab. 4: 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

## II – Facteurs météorologiques déterminants :

Pour mener à bien ce travail, nous avons dû recueillir un grand nombre de données, faisant appel aux services de divers organismes tels que l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Constantine et de Tébessa, ainsi qu'à la station aéroportuaire de Tébessa. Nous tenons également à souligner l'importance des cartes pluviométriques et climatiques de l'Algérie, réalisées respectivement par C. Paquin, M. Chaumont (1913-1963) et P. Seltzer (1913-1938), qui nous ont été extrêmement utiles.

## II – 1 – Le régime des vents :

Selon les données fournies par les services météorologiques, la région de Tébessa est soumise à des vents caractérisés par leur vitesse et leur intensité. Les directions dominantes sont soit le nord-ouest soit le sud-est. Les effets du sirocco peuvent se produire à n'importe quelle saison, mais ils sont particulièrement fréquents en été, entraînant parfois des augmentations soudaines et significatives des températures.



Fig. 14: Variation des vitesses maximales de vent. Station de Tébessa (1991-2016) (Djebassi Toufik 2021)

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

Il s'agit de comparer la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante, toutes deux relevées à la même température. Les séries d'observations révèlent que le mois de juillet est le plus sec, avec un taux d'humidité d'environ 40 %, tandis qu'avril est le mois le plus humide, affichant un taux d'humidité d'environ 70 %.

## II – 3 – La neige :

Selon P. Seltzer, la région étudiée est classée dans la zone d'enneigement moyen au sol, ce qui correspond à une moyenne de cinq à dix jours par an. La quantité de neige tombée est généralement de quelques centimètres, voire moins, surtout au cours des dernières décennies. En effet, les massifs de bordure, notamment le versant sud-ouest des reliefs comprenant les monts de Djebel Es'Sen (1193m) et Djebel Tazbent (1427m), ainsi que le versant sud-est où les sommets sont alignés en ligne droite d'est en ouest, depuis le Djebel Bouroumane (1545m) jusqu'au Djebel M'teguinaro (1712m), et le versant nord-est comprenant des monts comme le Djebel Dyr (1472m) et le Draa Aïn Sedjra (1255m), sont tous concernés.

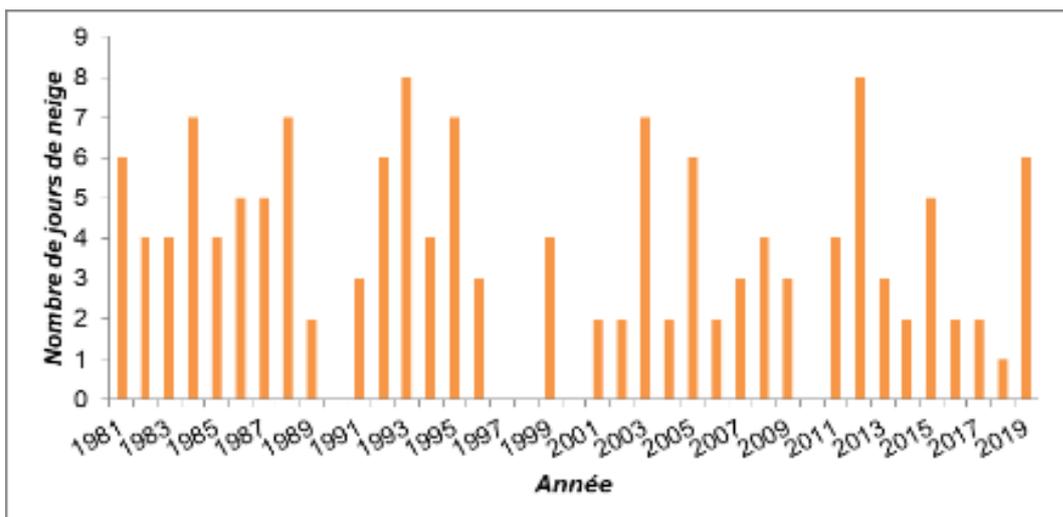


Fig. 15: Répartition des jours de neige, période d'observation 1981/2019. Station de Tébessa. (Djebassi Toufik 2021)

La zone de surface du bassin qui peut être enneigée est considérable, ce qui revêt une importance significative, étant donné qu'elle est située aux piedmonts des monts calcaires. Ces accumulations de neige contribuent au processus d'infiltration, se produisant après une fonte plus ou moins progressive.

#### II – 4 – La pluviométrie :

Considérée comme le principal élément du cycle de l'eau, la pluviométrie joue un rôle crucial dans les mécanismes et le comportement du bassin hydrographique. Le suivi et l'enregistrement de ce paramètre visent à estimer la quantité d'eau précipitée et son impact sur la forme et le régime des écoulements. La variabilité de la pluviométrie conditionne également les apports aux nappes d'eau souterraine. À l'échelle de notre région, la pluviométrie se caractérise par son irrégularité spatio-temporelle.

##### II – 4 – 1 – Les précipitations mensuelles :

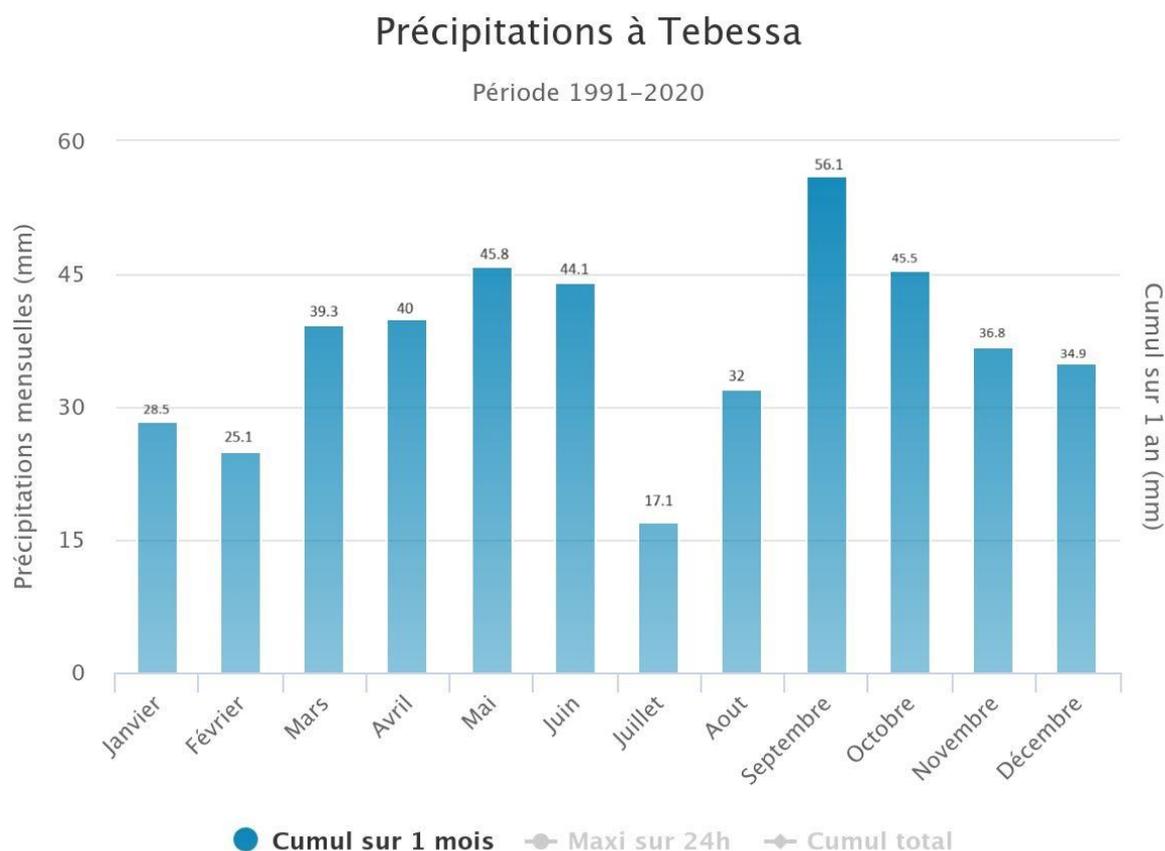
La distribution des précipitations a un impact direct sur les régimes hydrologiques, y compris les écoulements et l'infiltration, ce qui affecte directement les réserves en eau. Il est donc essentiel de surveiller et d'estimer quantitativement les précipitations afin d'avoir une vision claire de l'état actuel des stocks en eau.

Tab. 5: Mois humide et mois sec à Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020)

<i>Mois humide</i>	<i>Mois sec</i>
Septembre : 56.1mm	Juillet : 17.1mm

L'analyse des valeurs enregistrées de ce paramètre confirme effectivement leur variabilité. Les valeurs extrêmes ont été récapitulées dans le tableau précédent (cf. Tab 5). Il est remarquable

que le mois de juillet soit le plus sec, tandis que septembre soit le plus humide. Cette variation est illustrée par l'histogramme ci-dessous (Fig.16).



infoclimat.fr

Fig. 16: Répartition des précipitations moyennes mensuelle à Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020)

#### II – 4 – 2 – Les précipitations annuelles et leur variabilité :

L'analyse des données de précipitations enregistrées dans les trois stations de contrôle du bassin sur une période de cent douze ans (1906/07 à 2018/19) a révélé une variation marquée au fil du temps. Un écart significatif a été observé entre l'année la plus pluvieuse (597,8 mm/an pour la station de Hammamet en 1917/18, 634,7 mm/an à Tébessa en 1972/73, et 581,7 mm/an à Aïn Kissa en 1917/18) et l'année la plus sèche (154,1 mm/an à Tébessa en 1937/38, 155,9 mm/an à Hammamet en 1937/38, et 64,4 mm/an à Aïn Kissa en 1937/38).

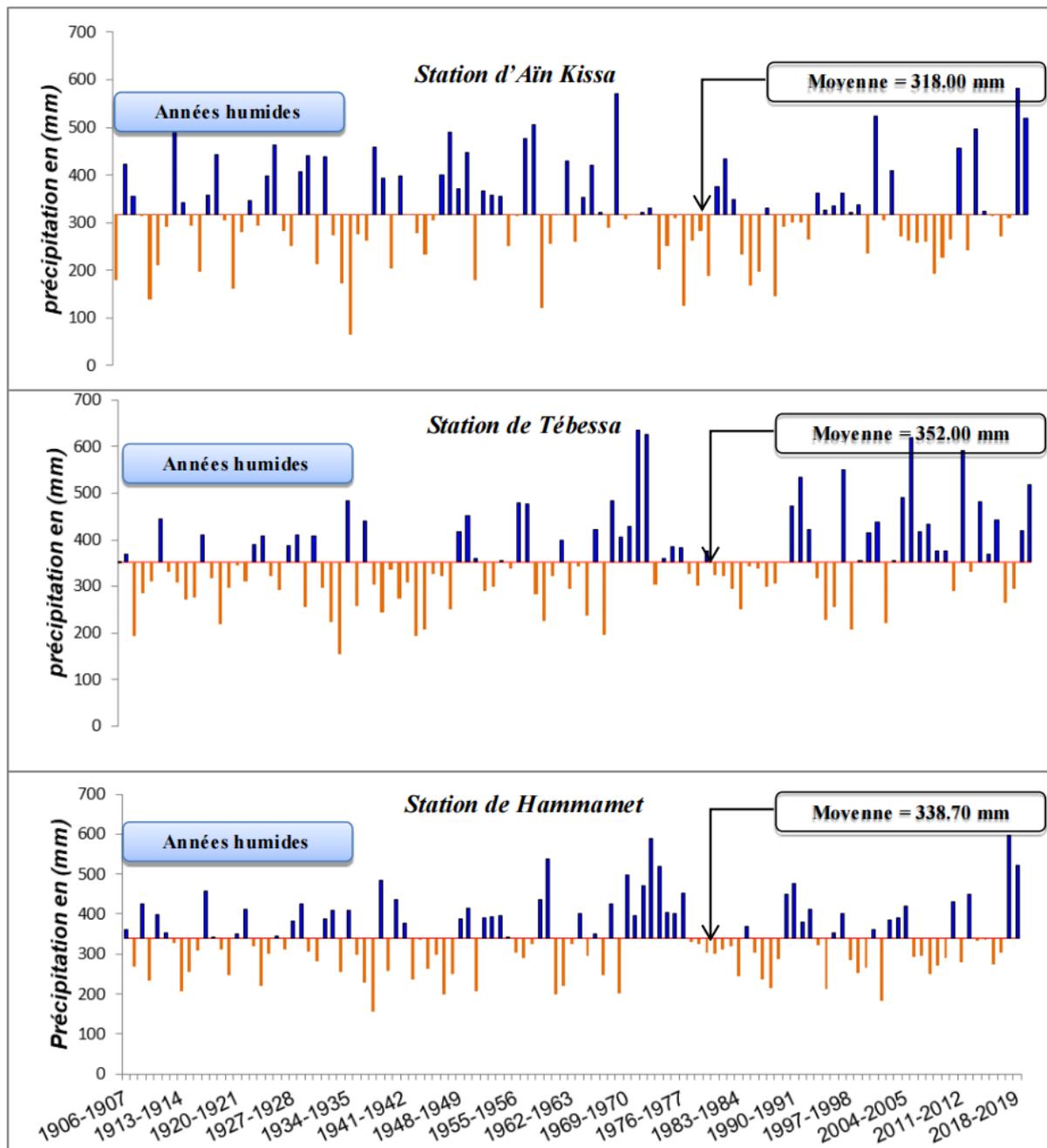


Fig. 17: Répartition interannuelle des précipitations aux stations d'observations (1906-2019) (Djebassi Toufik 2021)

Nous observons que les moyennes annuelles enregistrées aux trois stations (318,00 mm à Aïn Kissa, 338,70 mm à Hammamet et 352,01 mm à Tébessa) sont presque similaires, avec seulement quelques millimètres de différence. Ces écarts entre les années humides et sèches indiquent un excédent ou un déficit de précipitations par rapport à la moyenne annuelle pour l'année considérée. Ils sont calculés selon l'expression suivante :

$$e_i = \frac{P_i - P_n}{P_n} \cdot 100.$$

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).

Tab. 6: Écart à la normale des précipitations annuelles (1 906/07 -2 018/19). (Djebassi Toufik 2021)

Station / Paramètre	$P_i$ (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 76.50
Hammamet	155.9	1937/38	588.8	2012/13	- 53.97	80.31
Tébessa	154.1	1937/38	634.7	2012/13	- 56.22	

Au cours de la série d'observations sur une période de 112 ans, on observe une prédominance, bien qu'irrégulière, des années sèches, représentant 51,85 % à Aïn Kissa, 55 % à Hammamet et 55,5 % à Tébessa. Les années humides ne représentent que 48,15 % à Aïn Kissa, 38,89 % à Hammamet et 44,5 % à Tébessa de cette période.

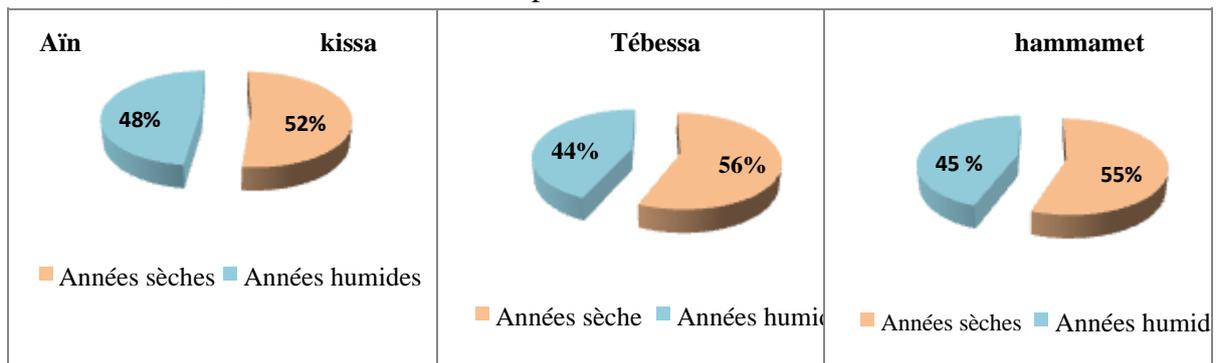


Fig. 18: Répartition des années sèches et humides aux stations d'observation. (Djebassi Toufik 2021)

## II – 5 – Les températures :

La température est l'un des paramètres les plus significatifs pour caractériser le climat. Son importance se manifeste dans les tentatives d'évaluer le taux d'évaporation, l'évapotranspiration, le déficit d'écoulement, entre autres, qui sont tous des éléments essentiels pour estimer le bilan hydrologique.

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

L'analyse des séries de valeurs de température révèle qu'en moyenne annuelle, ce paramètre s'élève à environ 16.5°C. Janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de 7.2°C, tandis que juillet est le mois le plus chaud avec une moyenne de 27.2°C (cf. Tableau N°7).

Tab. 7: Valeurs de la température moyenne mensuelle (min & max). Bassin de Tébessa.  
(Infoclima.fr 1991-2020)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
<b>Tmax</b>	29.3	23.5	17.6	13.4	12.4	13.5	17.1	21.0	26.4	31.9	35.7	34.8
<b>Tmoy</b>	22.5	18	12.1	8.2	7.2	7.9	11.0	14.2	19.0	23.8	27.2	26.7
<b>Tmin</b>	15.6	11.3	6.6	3.2	2.0	2.4	4.8	7.5	11.6	15.9	18.7	18.7

Il est important de noter que, en effet, les températures sont plus fraîches en hiver, tandis qu'elles augmentent en été, en particulier dans notre région, en raison de l'effet du vent du Sud. Pour mieux illustrer cette variabilité, nous avons réalisé la représentation graphique suivante (cf. Fig.19).

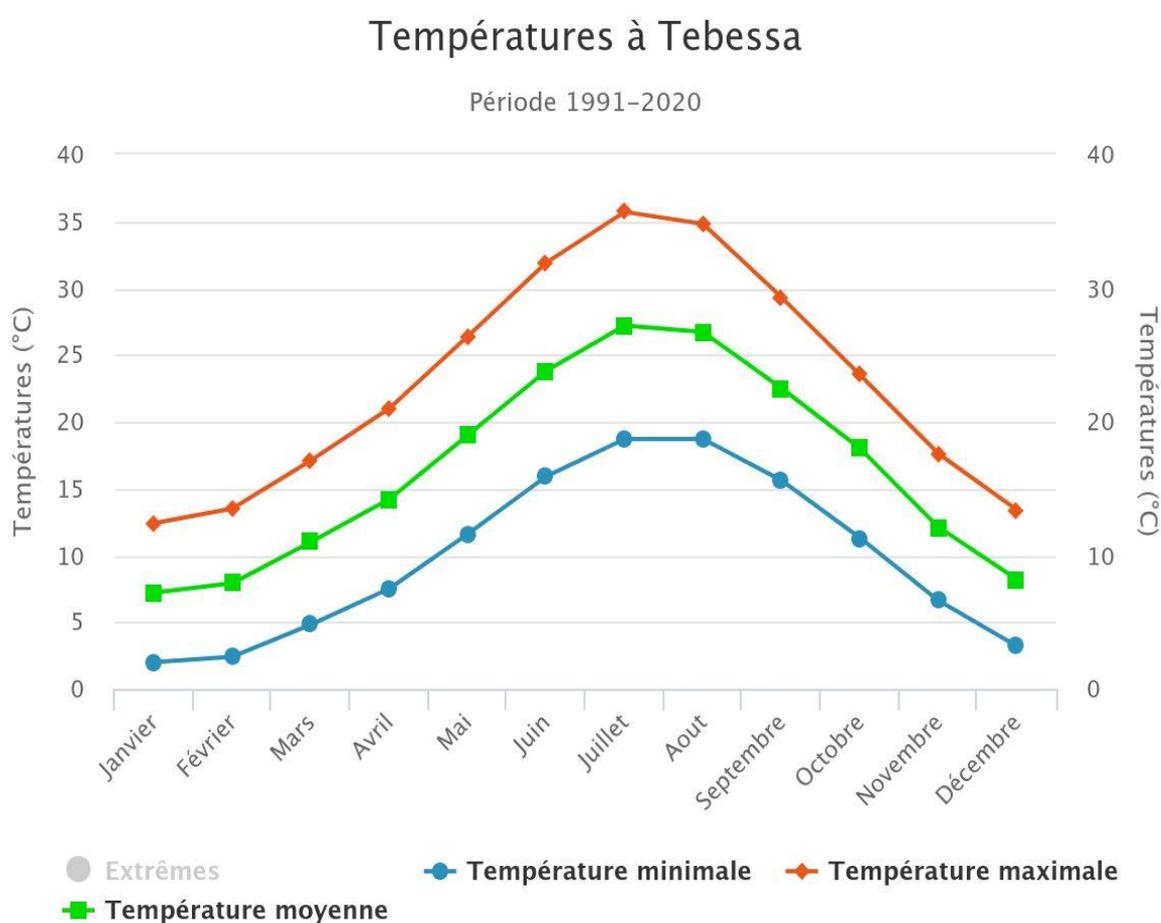


Fig. 19: Variation des températures moyennes mensuelles. Bassin de Tébessa. (Infoclima.fr .1991-2020)

### III – Les indices climatiques :

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

En 1923, De Martonne a développé un indice basé sur les températures et les précipitations (voir figure 33), qui peut être aisément calculé à l'aide de la formule 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.

Tab. 8: Indice d'aridité de E. DE Martone et type de climat. (Infoclima.fr 1991-2020)

<i>Paramètre</i>	<i>Précipitation</i> <i>(mm)</i>	<i>Température</i> <i>(°C)</i>	<i>Indice d'aridité</i>	<i>Observation</i>
<i>Bassin</i>				
<i>Tébessa</i>	<i>445.3</i>	<i>16.50</i>	<i>16.80</i>	<i>Climat Semi-aride</i>

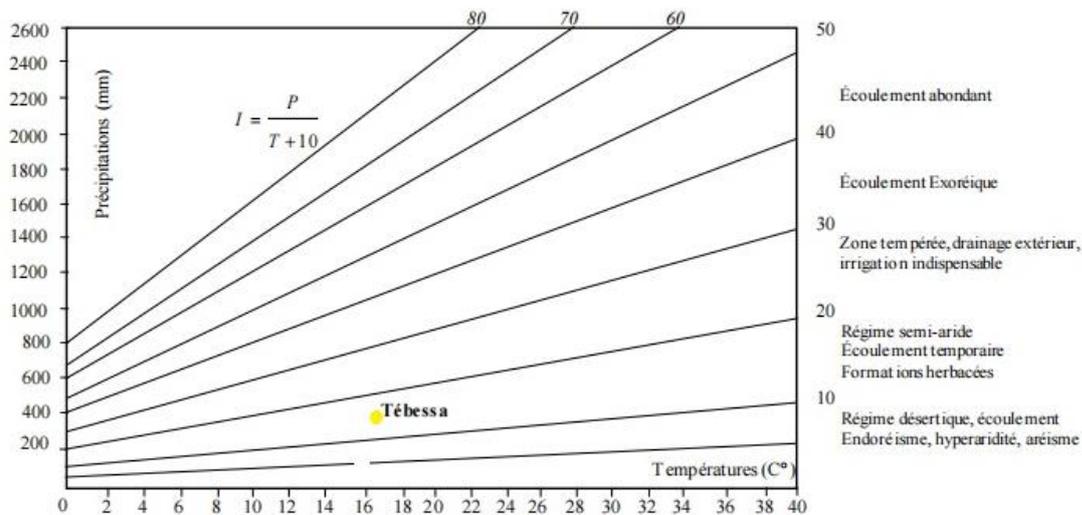


Fig. 20: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone, 1923. (Infoclima.fr 1991-2020)

D'après la valeur de ( $I$ ) (à *Tébessa*), 16.80, ce graphique confirme que le climat annuel est semi-aride.

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

Pour déterminer cet indice, on utilise les moyennes mensuelles des températures et des précipitations, selon l'équation suivante :

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

$P$  : Moyenne mensuelle des précipitations ( $mm$ ) ;

$T$  : Moyenne mensuelle des températures ( $^{\circ}C$ ).

Tab. 9: Indice d'aridité mensuel. Bassin de Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020)

Mois Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
<i>Tébessa</i>	19.88	16.82	22.45	19.83	18.95	15.65	5.51	10.46	20.71	19.5	19.98	23.01

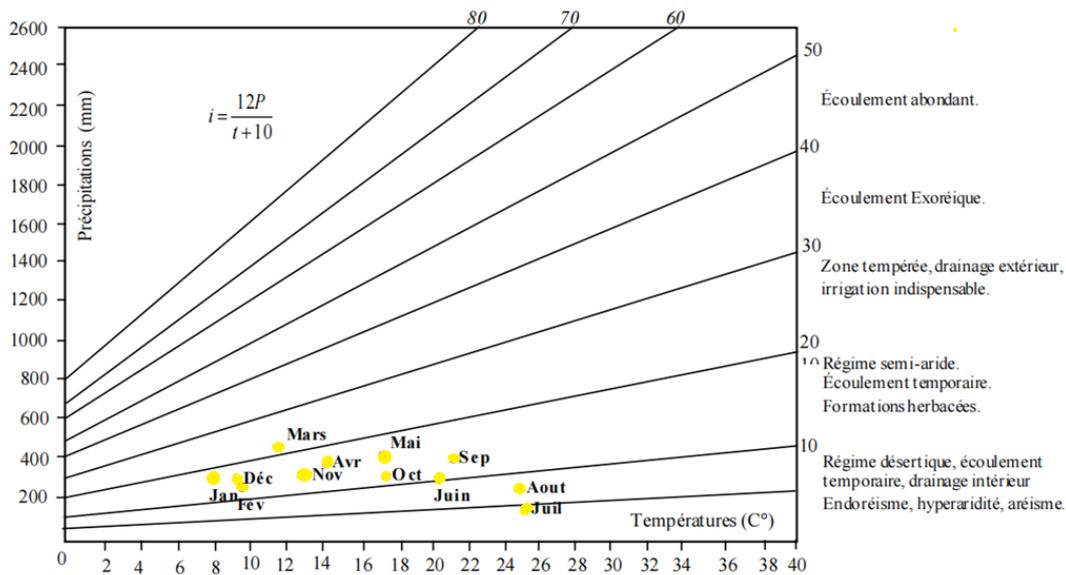


Fig. 21: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone, 1923. (Infoclima.fr 1991-2020)

#### IV – Diagramme pluviothermique :

D'après F. Bagnouls et Goussen, un mois est considéré comme sec lorsque le total moyen des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne ( $P \leq 2T$ ). Pour illustrer cette relation, le diagramme pluviothermique est construit en plaçant les températures sur l'axe des ordonnées, à une échelle deux fois plus grande que celle des précipitations. Les mois agricoles sont ensuite disposés sur l'axe des abscisses pour fournir une référence temporelle.

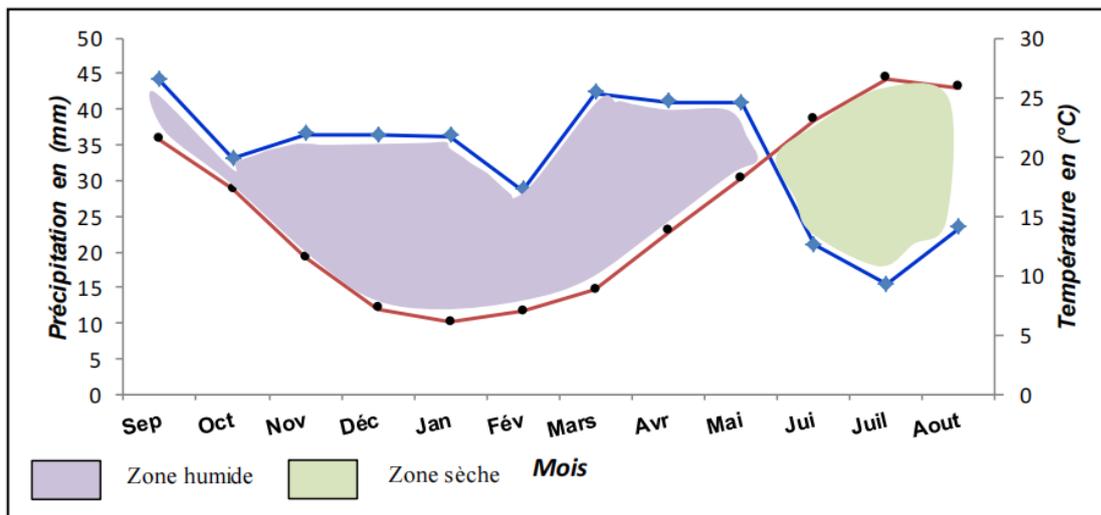


Fig. 22: Diagramme pluviométrique. Bassin de Tébessa. 1981/82-2018/19 (Djebaasi Toufik 2021)

Si la courbe des précipitations sur le graphique dépasse celle des températures, la saison est considérée comme humide. Dans le cas contraire, elle est jugée sèche. Les données de

températures et de précipitations utilisées pour ce diagramme ont été collectées sur une période homogène de 38 ans, de 1981/82 à 2018/19. En se référant au diagramme (Fig. 22), il est observé que la saison humide débute en septembre et se poursuit jusqu'à la fin de mai.

### **V – Le bilan hydrique :**

Il représente les différentes étapes du cycle hydrique, y compris les diverses formes de précipitations telles que la pluie, la neige et la grêle, lorsqu'elles atteignent le sol avant de retourner dans l'atmosphère. Pour estimer le bilan hydrologique, on peut utiliser 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 facteur essentiel du cycle de l'eau. Il représente la quantité totale d'eau (mesurée en millimètres) évaporée de la surface du sol, combinant à la fois les effets de l'évaporation et de la transpiration des plantes. Sa mesure est complexe car elle dépend de plusieurs facteurs interdépendants tels que l'humidité, la température, l'insolation et la couverture végétale.

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

C'est une partie de l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui varie en fonction de la quantité d'eau stockée dans le sol. Si les pertes en eau d'un sol sont égales ou dépassent la quantité d'eau facilement disponible dans le sol, elles atteignent l'ETP. Dans le cas d'une disponibilité insuffisante, ces pertes sont limitées à un montant inférieur, connu sous le nom d'évapotranspiration réelle (G. Castany). Son estimation peut être effectuée en utilisant soit la formule de L. Turc, soit celle de Coutagne.

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

Le déficit d'écoulement, déterminé à partir de cette formule qui prend également en compte la température et les précipitations, peut être comparé à l'évapotranspiration réelle (ETR).

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

Cette formule n'est applicable que lorsque

$$0,125\lambda < P < 0,5\lambda \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{1}{0,4T + 0,8}$$

Où :

$D$  : Déficit d'écoulement ( $m/an$ ) ;  $P$  : Précipitation annuelle  
 ( $m$ ),  $T$ : Température moyenne annuelle ( $^{\circ}C$ ).

Tab. 10: Applicabilité de la formule de Coutagne. Bassin de Tébessa. (Djebaasi Toufik 2021)

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 formule permet de calculer directement l'évapotranspiration réelle (ETR) annuelle d'un bassin versant à partir de la hauteur annuelle de précipitations 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 ( $L = 0.05T^3 + 25T + 300$ ).

Tab. 11: Estimation de l'ETR selon la méthode de L. Turc annuelle. (Infoclima.fr 1991-2020)

Paramètre Bassin	Précipitation (mm)	Température ( $^{\circ}C$ )	$L$	ETR (mm)
<i>Tébessa</i>	445.2.	16.5	937.1	419.6

### V – 1 – 1 – 3 – Méthode de Wundt :

La valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) ou du déficit d'écoulement (De) est obtenue à partir d'un graphique (Fig. 23), qui prend en compte la température et les précipitations annuelles. En reportant les données (température, précipitation) du bassin de Tébessa sur ce graphique, l'ETR déduite est d'environ 419.6 mm, ce qui correspond à presque 100% des précipitations, voire plus. Le coefficient d'écoulement ne dépasse pas 10%.

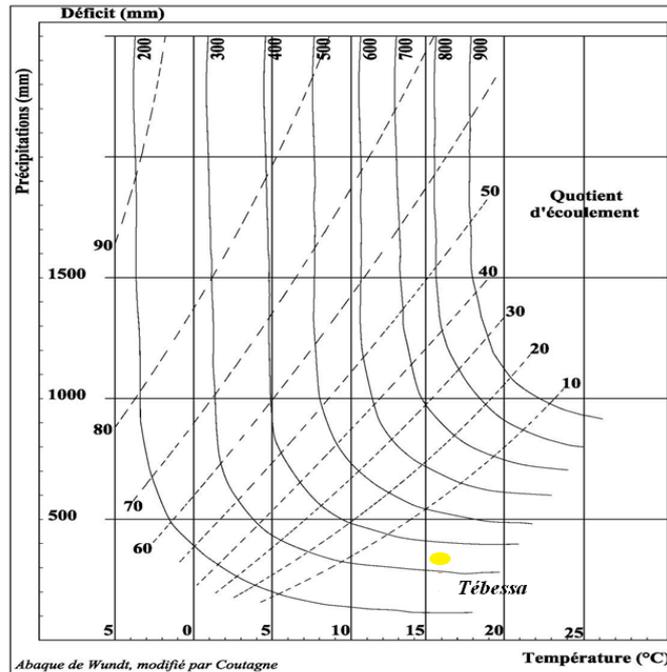


Fig. 23: Abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE. (Djebassi Toufik 2021)  
(Infoclima.fr 1991-2020)

### 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 peut être réalisée en utilisant la formule de C.W. Thornthwaite, qui prend en considération les températures moyennes mensuelles et l'indice thermique. Elle est exprimée par :

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

L'exposant (a) est déterminé à partir de l'expression de Serra, simplifiée à partir de la longue

$$a = \frac{1.6}{100} \cdot I + 0.5 \quad \text{Où :}$$

formule de C.W. Thornthwaite :

ETP : évapotranspiration potentielle du mois considéré (mm).

i : indice thermique mensuel.

T : température moyenne mensuelle du mois considéré (°C),

I : indice thermique annuel.

L'évapotranspiration potentielle corrigée peut être calculée en utilisant un coefficient correctif (k) qui varie en fonction de la latitude, comme le décrit l'expression suivante :

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

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

Les résultats de calcul sont synthétisés dans les tableaux suivants (Tab 12).

Tab. 12: Résultats de calcul de l'ETP selon la formule de C. W. Thornthwaite. (Infoclima.fr 1991-2020)

MoisParamètre	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
<i>I</i>	9.75	6.95	3.81	2.11	1.73	1.99	3.3	4.85	7.54	10.61	12.99	12.63
<i>ETPnc</i>	101.56	68.73	34.3	17.36	13.82	16.26	29.03	45.38	75.55	112.05	141.55	137.03
<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>	104.6	66.66	29.49	14.06	12.02	13.82	29.9	49.91	91.41	136.7	175.52	158.95

Pour notre bassin, nous avons obtenu une valeur totale de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 883.04mm/an.

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

L'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) à l'aide de différentes méthodes révèle des valeurs proches. Cependant, pour l'évapotranspiration potentielle (ETP), une divergence significative est observée entre les valeurs, possiblement attribuable à des paramètres spécifiques à la méthode de calcul.

Tab. 13: Résultats de calcul de l'ETP selon la formule de C. W. Thornthwaite. (Infoclima.fr 1991-2020)

Paramètre	Méthode de détermination	Tébessa
<i>ETP (mm)</i>	<i>C. W. Thornthwaite</i>	883.03
<i>ETR (mm)</i>	<i>L. Turc</i>	419.6
	<i>Wunndt</i>	419.6
	<i>Coutagne</i>	Non applicable.

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

La réserve facilement utilisable (RFU) est la quantité d'eau stockée dans le sol, son degré de saturation étant influencé par plusieurs facteurs :

- La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle du sol ;
- La profondeur du niveau piézométrique de la nappe phréatique ;
- La couverture végétale ;
- Le climat régional.

En prenant en compte tous ces paramètres, J. Richard a estimé la RFU dans la plaine de Tébéssa entre 25 et 26 mm lors d'une étude. Une autre étude agropédologique réalisée par le cabinet Le Petit en 1966/67 dans la région, considère que la RFU varie entre 23 mm et 35 mm.

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

Pour établir le bilan mensuel selon la méthode de C.W. Thornthwaite, on prend en compte l'évapotranspiration moyenne (réelle et potentielle).

Ce bilan repose sur les hypothèses suivantes :

- La satisfaction de l'évapotranspiration réelle (ETR) est prioritaire par rapport à l'écoulement.
- Le calcul de l'ETR peut être réalisé selon deux scénarios :

- 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 ( $^\circ C$ ).

$Pr$  : 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 vérification, on utilise l'une des expressions suivantes :

$$P = \sum ETR + \sum Exc \equiv mm \quad \text{A.N : } P = 408.89 + 36.31 = 445.2$$

$$ETP = \sum ETR + \sum Def \equiv mm \quad \text{A.N : } ETP = 408.89 + 474.15 = 883.04$$

Tab. 14 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite, (Infoclima.fr 1991-2020)

Paramètre/ NT	NT	i	K	ETP <sub>c</sub>	P	BH	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	22.5	9.75	1.03	104.6	56.1	-48.5	0	56.1	48.5	0
Oct	18	6.95	0.97	66.66	45.5	-21.16	0	45.5	21.16	0
Nov	12.1	3.81	0.86	29.49	36.8	7.31	7.31	29.49	0	0
Dec	8.2	2.11	0.81	14.06	34.9	20.84	28.15	14.06	0	0
Jan	7.2	1.73	0.87	12.02	28.5	16.48	29	12.02	0	15.63
Fev	7.9	1.99	0.85	13.82	25.1	11.28	29	13.82	0	11.28
Mars	11	3.3	1.03	29.9	39.3	9.4	29	29.9	0	9.4
Avr	14.2	4.85	1.1	49.91	40	-9.91	19.09	49.91	0	0
Mai	19	7.54	1.21	91.41	45.8	-45.61	0	64.89	26.52	0
Juin	23.8	10.61	1.22	136.7	44.1	-92.6	0	44.1	92.6	0
Juill	27.2	12.99	1.24	175.52	17.1	-158.42	0	17.1	158.42	0
Aout	26.7	12.63	1.16	158.95	32	-126.95	0	32	126.95	0
Annuel	16.5	78.26		883.04	445.2	-437.74		408.89	474.15	36.31

## V – 4– Répartition des précipitations :

### V – 4– 1 – Le ruissellement :

La formule empirique de Tixeront-Berkaloff, qui s'applique généralement aux bassins hydrologiques en climat semi-aride à aride, est basée sur la théorie suivante :

- Lorsque les précipitations augmentent, le ruissellement tend à une grandeur similaire (avec déduction de l'évapotranspiration réelle plafonnée à la valeur de l'évapotranspiration potentielle).
- Si les précipitations diminuent, le ruissellement diminue également et le rapport ruissellement/précipitations tend vers zéro.

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

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

Cette expression est modifiée par Romantchok (1974).

$R$  : 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.

Tab. 15: Estimation du ruissellement selon la méthode de Tixeront-Berkaloff.  
(Infoclima.fr 1991-2020)

<i>Paramètre</i> <i>Bassin</i>	<i>Précipitation (mm)</i>	<i>ETP (mm)</i>	<i>R (mm)</i>
<i>Tébessa</i>	445.2	883.04	37.72

Il est nécessaire d'estimer une moyenne de 37.72 mm de ruissellement à travers le bassin versant.

### V – 4 – 2 – L'infiltration ;

Nous devons utiliser l'équation générale du bilan, car elle permet d'obtenir des estimations admissibles du paramètre, étant donné que tous les composants de l'équation sont connus.

$P = ETR + R + I$ . D'où  $I = P - ETR - R$ . Avec :

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

$P$  : précipitation moyenne annuelle ( $mm$ ).

$ETR$  : évapotranspiration réelle annuelle ( $mm$ ).

$R$  : ruissellement annuel ( $mm$ ).

Tab. 16: Estimation de l'infiltration dans le bassin de Tébessa. (Infoclima.fr 1991-2020)

<i>Paramètre</i>  <i>Bassin</i>	<i>Précipitation</i>		<i>Évapotranspiration</i>		<i>Ruissellement</i>		<i>Infiltration</i>	
	<i>P</i> <i>(mm)</i>	<i>P %</i>	<i>ETR</i> <i>(mm)</i>	<i>ETR %</i>	<i>R</i> <i>(mm)</i>	<i>R %</i>	<i>I</i> <i>(mm)</i>	<i>I %</i>
<i>Tébessa</i>	445.2	100	408.89	91.84	37.72	8.47	<i>Négative</i>	

En se basant sur les résultats, il est clair que l'infiltration est négative. Cet état peut certainement avoir un impact négatif sur la recharge des réserves et l'alimentation du système aquifère.

### **Conclusion**

À travers cette étude, nous pouvons constater que notre région se caractérise par un climat semi-aride typique des hautes plaines, qui se caractérisent généralement par des étés chauds et des hivers très froids. Les effets du sirocco sont possibles à tout moment de l'année, mais ils sont particulièrement fréquents en été. De plus, l'impact du gel est souvent sévère. La pluviométrie, bien que non uniformément répartie dans l'espace et dans le temps, est souvent marquée par son caractère violent. Les moyennes annuelles des précipitations sont d'environ 445.2 mm/an, tandis que celles des températures avoisinent les 16.5°C.

Dans l'ensemble, le bilan hydrique est déficitaire ; l'évapotranspiration réelle moyenne est d'environ 408.89 mm/an, ce qui représente près de 91.84% des précipitations annuelles. Le ruissellement est faible, correspondant à environ 8.47% du total des précipitations. Mais l'infiltration est négative, suggérant que l'alimentation du système aquifère ne dépend pas uniquement de l'infiltration, mais provient principalement des bordures calcaires.

## **Chapitre IV : Caractéristiques hydrogéologiques**

**Introduction :**

Pour comprendre le comportement hydrodynamique de ces systèmes, plusieurs moyens et méthodes sont nécessaires. Parmi ceux-ci, on trouve l'étude des conditions aux limites, de la perméabilité, de la transmissivité, du sens d'écoulement, ainsi que des relations complexes entre ces paramètres. De plus, il est important de considérer la fonction capacitive du réservoir, la répartition spatiale des charges et des potentialités hydrauliques.

**I – Structure du système :**

L'analyse de la structure géologique et hydrogéologique a révélé une complexité dans le système aquifère de la région. Nous avons identifié deux horizons significatifs : l'un dans les formations calcaires, principalement le long des bordures, et l'autre dans les formations alluviales, telles que les argiles remaniées, les cailloutis et les sables :

**I – 1 – La nappe alluviale et le milieu poreux :**

Le bassin d'effondrement Tébessa-Morsott, principalement constitué de matériaux de remplissage du moi – plio – quaternaire, couvre presque entièrement la plaine et crée ainsi un environnement propice à la capture et au stockage des eaux, qu'elles proviennent de l'infiltration directe ou des systèmes aquifères adjacents.

Les travaux que nous avons entrepris révèlent une variabilité de la résistivité dans la région étudiée. Cette résistivité augmente graduellement du centre, où elle ne dépasse pas les 20  $\Omega$ m en raison de la salinité relativement élevée et de la finesse des sédiments, vers les bordures, où elle oscille entre 20 et 100  $\Omega$ m, parfois atteignant même 200  $\Omega$ m.

La série détritique de cette région présente une hydrogéologie complexe due aux plusieurs facteurs tels que :

- Variation latérale de la granulométrie des sédiments ;
- Prédominance de certains types de matériaux de remplissage ;
- Différentes formations géologiques qui bordent les fossés (calcaires éocènes, maestrichtiens, turoniens ou triasiques) ;
- Grande variation de la profondeur du substratum.

Malgré cette complexité, les autorités ont choisi et favorisé cette région pour implanter un grand nombre d'ouvrages de captage, en raison de l'importance de son réservoir en eau.

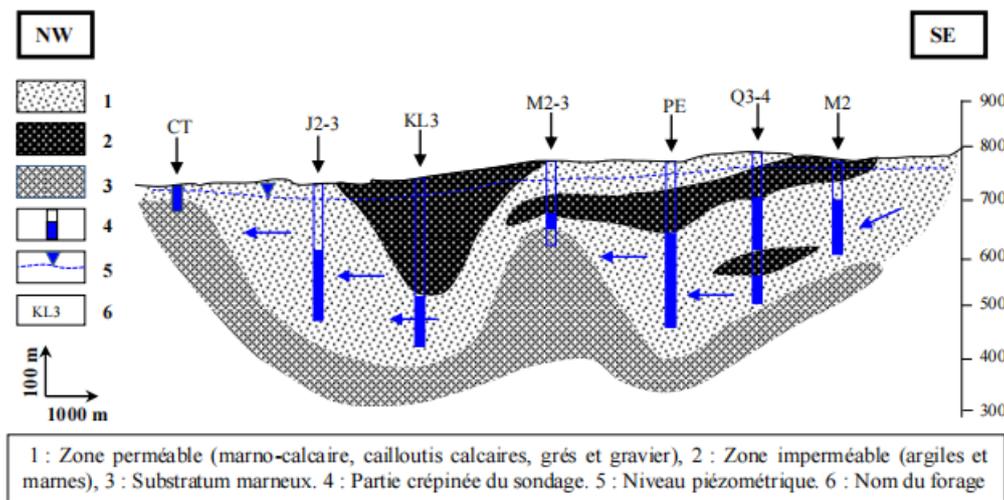


Fig. 24: Coupe hydrogéologique à travers la plaine d'Aïn Chabro. In Rouabhia et al. 2009.

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

Le milieu fissuré est principalement composé de formations calcaires, comprenant celles du Turonien, du Maestrichtien et de l'Éocène. Les calcaires de l'Éocène sont souvent situés à des profondeurs relativement faibles, en particulier le long des bordures de la région. En revanche, au centre, ces calcaires sont rarement atteints par les forages en raison de leur profondeur, estimée entre 500 mètres et 2000 mètres selon M. Zerdazi.

Ce milieu présente un potentiel hydraulique significatif, manifesté par plusieurs sources émergeant le long de ces formations, telles que celles d'Aïn Kissa (au nord-est), de Bouakous (au sud-ouest) et de Gaâga à l'ouest.

L'ouvrage F9, l'un des deux forages implantés à Boulhef, exploite les calcaires du Maestrichtien du Dyr. Selon une étude géophysique réalisée par le défunt Professeur Kachi S., ces forages atteignent une profondeur de 150 mètres et ont fourni un débit de 60 litres par seconde lors des essais à l'air lift, entraînant un rabattement de 0,4 mètre. Par la suite, le niveau d'eau s'est stabilisé à 26 mètres.

## II – Potentialité de l'aquifère :

### II – 1 – Les forages étatiques :

La batterie de forage comprend un total de cent onze (111) ouvrages répartis comme suit : dix-sept (17) à Bekkaria, trente et un (31) à Tébessa et vingt-trois (23) à Hammamet. Les débits pompés varient entre 4l/s et 45l/s, avec une fréquence de pompage de 30 jours par mois et une durée de fonctionnement de 8 à 24 heures par jour.

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

Les services de la Direction des Ressources en Eau (DRE, anciennement DHW), en collaboration avec la Direction des Services Agricoles (DSA), ont délivré plusieurs permis de réalisation de forages aux agriculteurs de la région depuis l'adoption du programme du Plan

National de Développement Agricole (PNDA). Environ quatre cent soixante-dix (470) de ces forages sont répartis dans toute la plaine.

### III – L'étude de la piézométrie :

L'étude et la cartographie piézométrique revêtent une grande importance dans la compréhension des systèmes aquifères, en fournissant des informations cruciales sur leur morphologie, leur comportement hydraulique, hydrodynamique et leurs conditions limites. Ces outils permettent d'identifier le sens d'écoulement des eaux souterraines, de comprendre l'origine de l'alimentation des nappes d'eau, de détecter d'éventuels liens entre différentes unités hydrogéologiques, ainsi que de suivre l'évolution temporelle de la surface piézométrique. En résumé, la cartographie piézométrique est un outil indispensable pour la gestion et la préservation des ressources en eau souterraine, en fournissant des données essentielles pour une prise de décision éclairée en matière de gestion des aquifères.

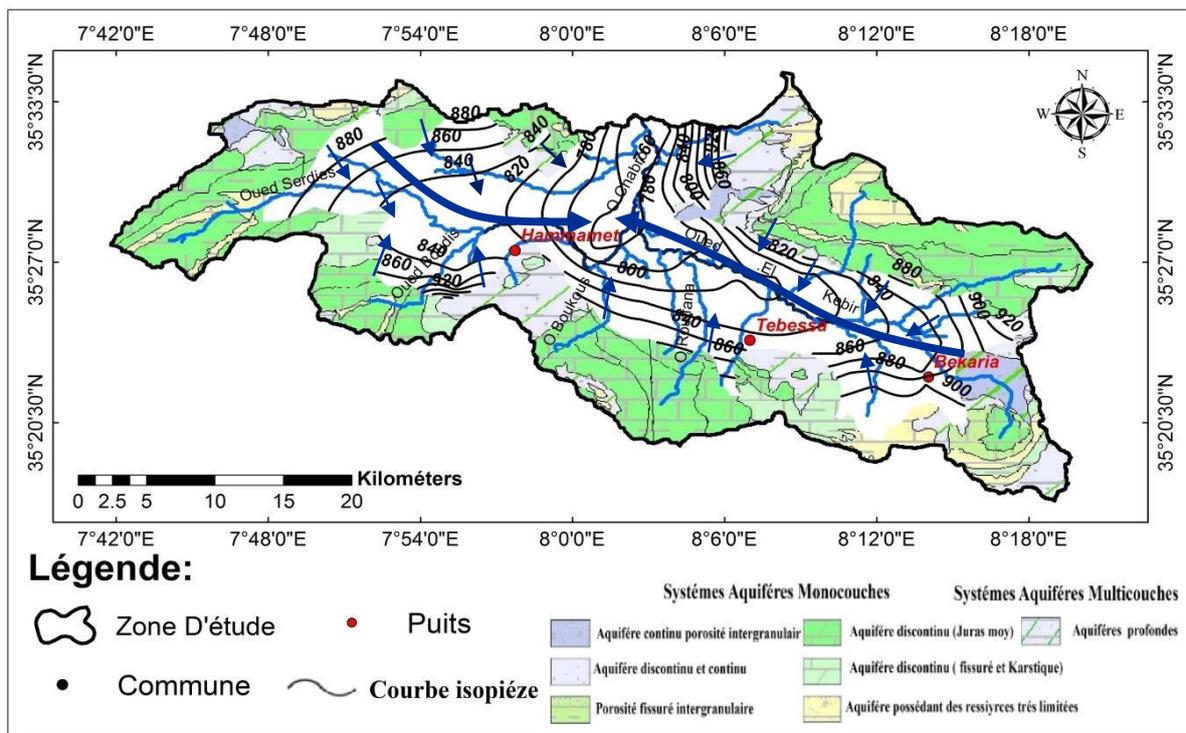


Fig. 25: Carte piézométrique (ANRH, Juin 1994. Plaine de Tébessa).

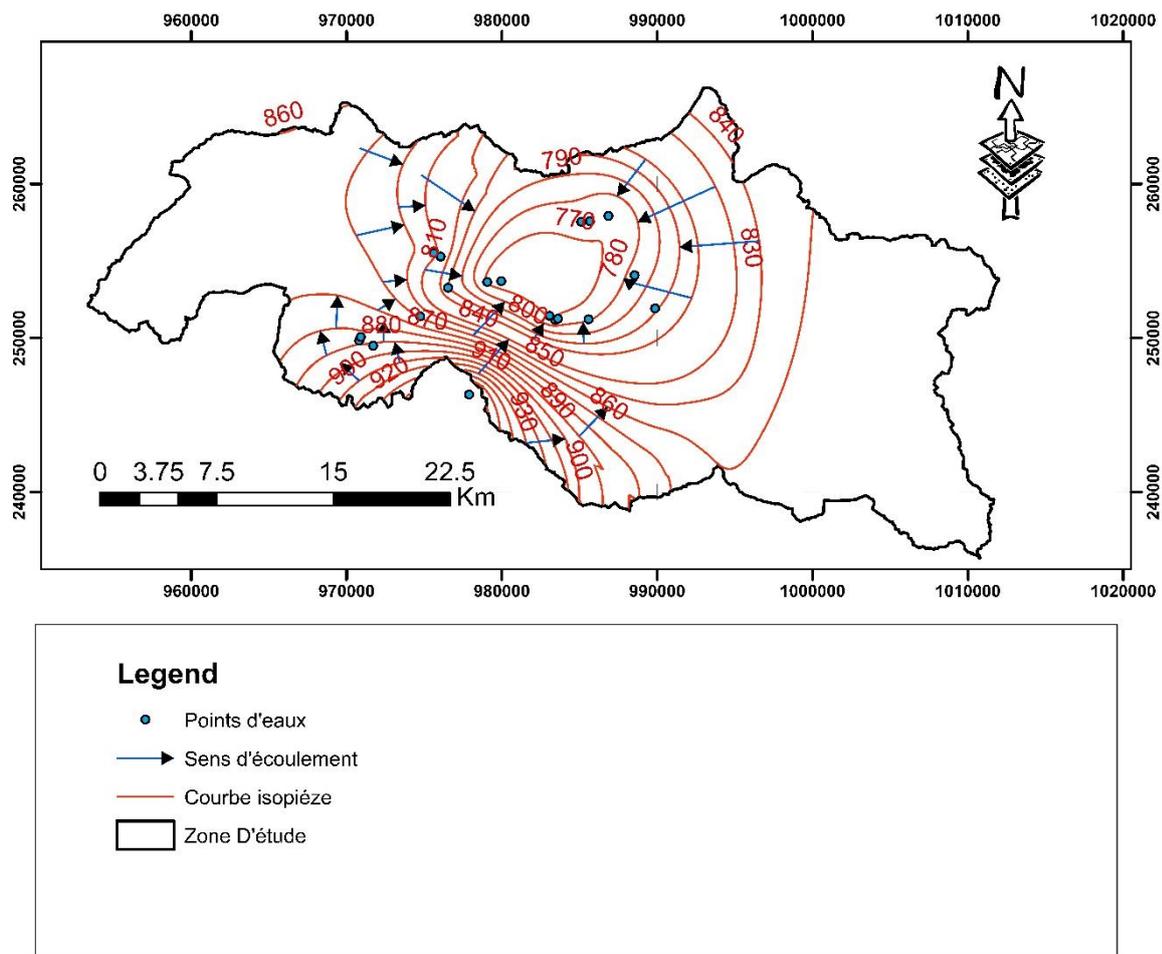


Fig. 26: Carte piézométrique (Mai 2005)

L'observation des représentations cartographiques de la surface piézométrique pour les années 1994 et 2005 a révélé un changement significatif dans la morphologie de la nappe phréatique au cours de ces deux décennies.

- Les eaux souterraines en provenance de la région de Bekkaria (nord-est, est et sud-est) suivent une direction dominante est-ouest, convergeant vers le centre de la plaine. En revanche, les eaux de la région de Hammamet prennent une direction opposée, d'ouest en est. Ces différentes masses d'eau se rencontrent au centre de la plaine, à Aïn Chabro. En 1994, ces eaux continuaient leur trajectoire vers le nord, mais actuellement, elles restent concentrées dans la zone d'Aïn Chabro. Cette dernière ne fonctionne plus comme une zone de convergence, mais plutôt comme une zone dépressionnaire, en raison des exploitations excessives.



résulte des jeux de failles qui, par endroits, ont provoqué une discontinuité du niveau fissuré et l'apparition de marnes, mettant 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.

#### IV– Cartographie des paramètres hydrodynamiques :

##### IV-1– La carte de transmissivité :

La morphologie de l'aquifère varie en raison de l'hétérogénéité du système aquifère, révélant trois secteurs distincts :

- À l'Ouest (secteur de Aïn Chabro) : La transmissivité y est élevée. Cette caractéristique est due à la présence de gros graviers (cailloutis de calcaire) qui constituent l'aquifère.
- Secteur de Tébessa : Ce paramètre diminue de manière significative. Au centre de la plaine, les valeurs sont faibles, en raison des formations argileuses et marneuses. Cependant, sur les bordures méridionales calcaires, les valeurs augmentent.
- Secteur de Bekkaria : La transmissivité devient sensiblement élevée, en raison de la présence de formations sableuses.

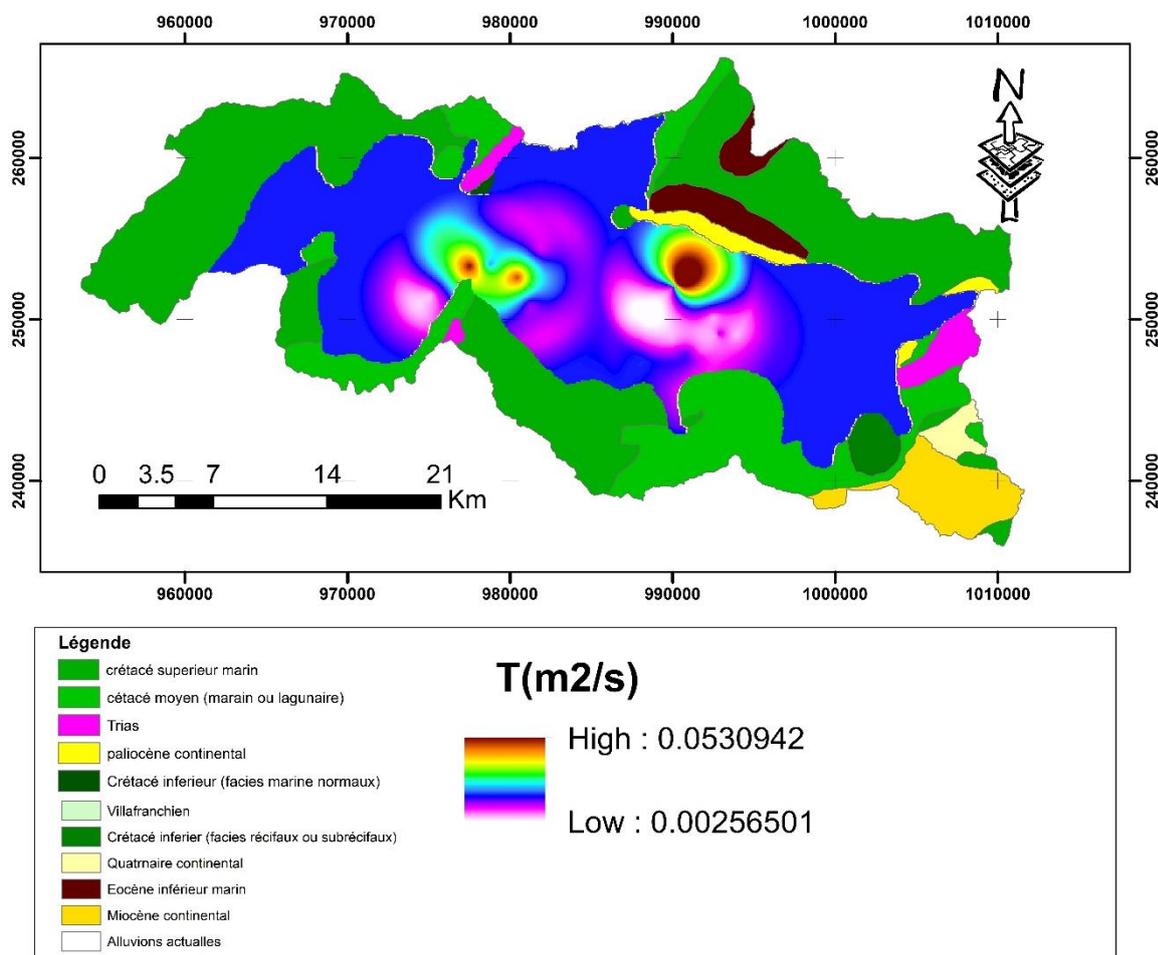


Fig. 28: carte de Transmissivité plaine de Tébessa Mai 2005

#### IV-2 – La carte de perméabilité :

- Secteur d'Aïn Chabro : Caractérisé par des valeurs élevées de perméabilité.
- Secteur de Tébéssa : Les valeurs de perméabilité deviennent faibles au centre de la plaine, à cause de la présence de formations imperméables (argile et marne).
- Bordure méridionale : Caractérisée par des valeurs élevées, en raison de l'influence des calcaires de bordure qui alimentent la nappe latéralement. Cette variation est due à l'hétérogénéité géologique de ce secteur.
- Secteur de Bekkaria : Les valeurs de perméabilité sont relativement importantes.

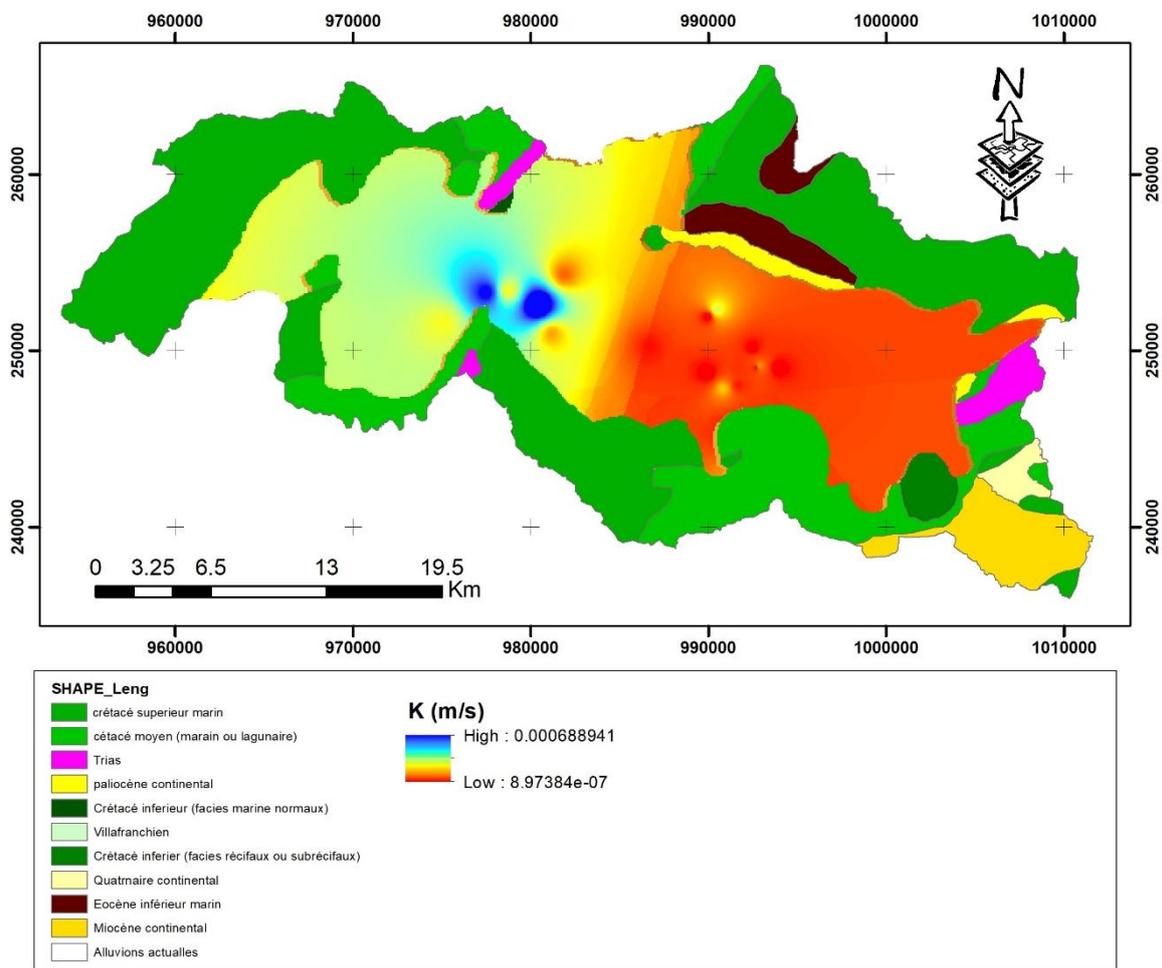


Fig. 29: carte de perméabilité plaine de Tébéssa Mai 2005

## **Conclusion**

L'étude piézométrique révèle deux directions préférentielles pour l'écoulement des eaux souterraines :

- Région de Bekkaria : Les eaux se dirigent du nord, du sud et de l'est vers l'axe de la plaine, puis se déplacent vers l'ouest.
- Région de Tébessa : Les eaux suivent une direction sud-nord pour rejoindre celles venant de l'est, convergeant ainsi vers le même axe central.
- Région de Hammamet : Les eaux prennent une direction ouest-est pour converger vers le centre.

Ces écoulements se rencontrent vers Aïn Chabro et changent de direction vers le nord, via l'exutoire du bassin.

Les données de forages disponibles permettent de classer les zones selon leurs caractéristiques hydrodynamiques :

1. Zone d'Aïn Chabro
2. Zone de Bekkaria
3. Zone de Tébessa

***Chapitre V : étude de la qualité chimiques des eaux et application des  
méthodes statistiques multivariées***

## **Introduction :**

La qualité de l'eau revêt une importance particulière, car elle constitue un enjeu environnemental crucial et un facteur déterminant dans divers domaines d'utilisation. Le processus de chimisme des eaux est étroitement lié à certains paramètres, tels que la nature géologique du milieu récepteur et le temps de séjour ou la vitesse de circulation des eaux. Ces facteurs peuvent agir conjointement ou séparément.

Le chimisme est régulé par des équilibres calco-carboniques ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), associés à l'impact d'éléments d'origine biologique ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) ou naturelle ( $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ). De telles interactions influencent la teneur de l'eau en éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ). Plusieurs facteurs conditionnent les concentrations de ces éléments naturels, comme les paramètres climatiques, l'activité anthropique et les échanges entre l'eau et la roche.

Dans le cadre de notre étude, pour étudier la qualité chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de la région de Tébesa, étudier sa variabilité dans le temps et dans l'espace, ainsi que les différentes corrélations inter-éléments entre les paramètres physico-chimiques et pour obtenir les objectifs scientifiques tracés, nous avons utilisés les données physico-chimiques disponible de deux campagnes d'échantillonnage réalisés durant l'année 2005 [SEGHIR, K. 2008]

**Méthodes statistiques multivariées utilisées :** en utilisant le logiciel XLSTAT, nous avons essayé de faire les analyses statistiques sur les données disponibles et interpréter les principaux résultats obtenus.

## I-Cartographie des éléments physico-chimiques :

### I-1-Les éléments physiques :

#### I – 1 - 1 -La température :

C'est un paramètre qui régit la solubilité des sels et des gaz et permet de distinguer les eaux de surface des eaux souterraines. Il dépend soit du climat et donc de la température de l'air (pour les eaux de surface), soit de la profondeur (gradient géothermique, réactions chimiques pour les eaux profondes). La mesure de ce paramètre a été réalisée in situ à l'aide d'un thermomètre à mercure. Les valeurs obtenues montrent que les eaux de la plaine ont une température comprise entre 10 et 13°C.

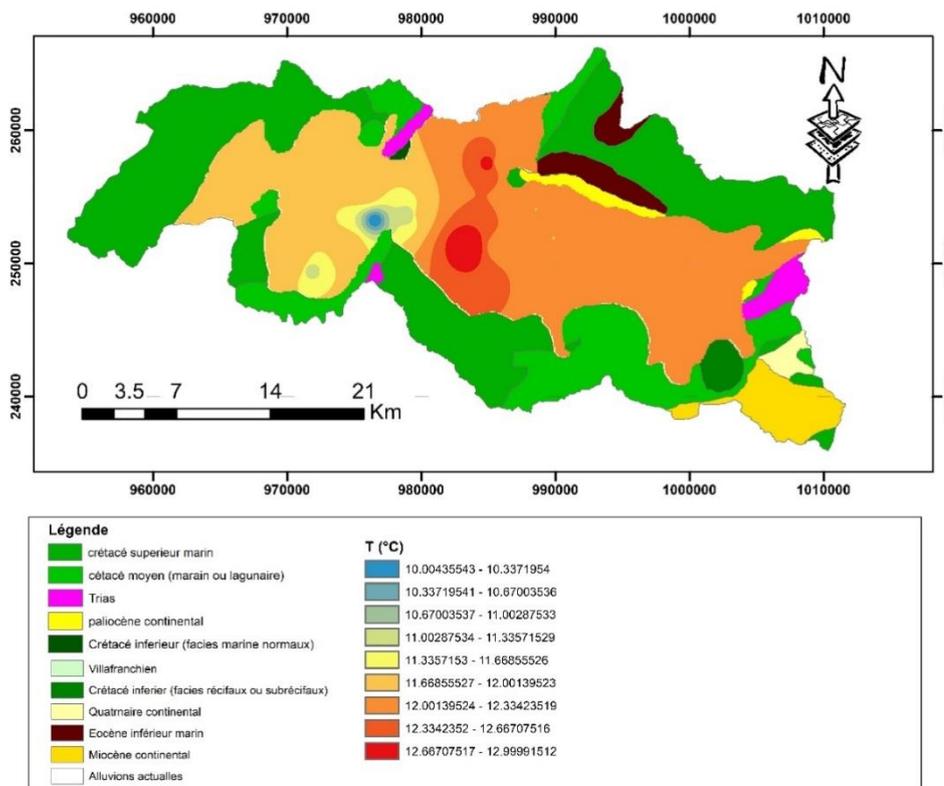


Fig. 30: Carte de la Température de plaine de Tébessa Mai 2005

#### I-1-2 – Le potentiel d'Hydrogène :

La valeur du pH détermine la potabilité de l'eau. Les échelles de classification en fonction du pH sont les suivantes :

- Une solution de pH = 7 est dite neutre.
- Une solution de pH < 7 est dite acide.
- Une solution de pH > 7 est dite basique ou alcaline.

Dans le détail de la classification, les classes suivantes peuvent être distinguées :

- pH de 1 à 3 : acides forts et potentiellement très dangereux.
- pH de 4 à 5 : acides faibles.
- pH de 6 à 7 : acides neutres (eau potable).

Pour les solutions basiques :

- pH de 7 à 8 : bases neutres (eau potable).

- pH de 8 à 9 : bases faibles.
- pH de 10 à 14 : bases fortes.

Les valeurs moyennes de pH enregistrées durant les deux campagnes d'échantillonnage varient entre 7,54 et 8,44. Cependant, on note la présence de quelques points d'eau avec un pH supérieur ou égal à 8,44. Cette variation n'affecte pas significativement le pH global des eaux de la région, indiquant que ces eaux ont un pH proche de la neutralité.

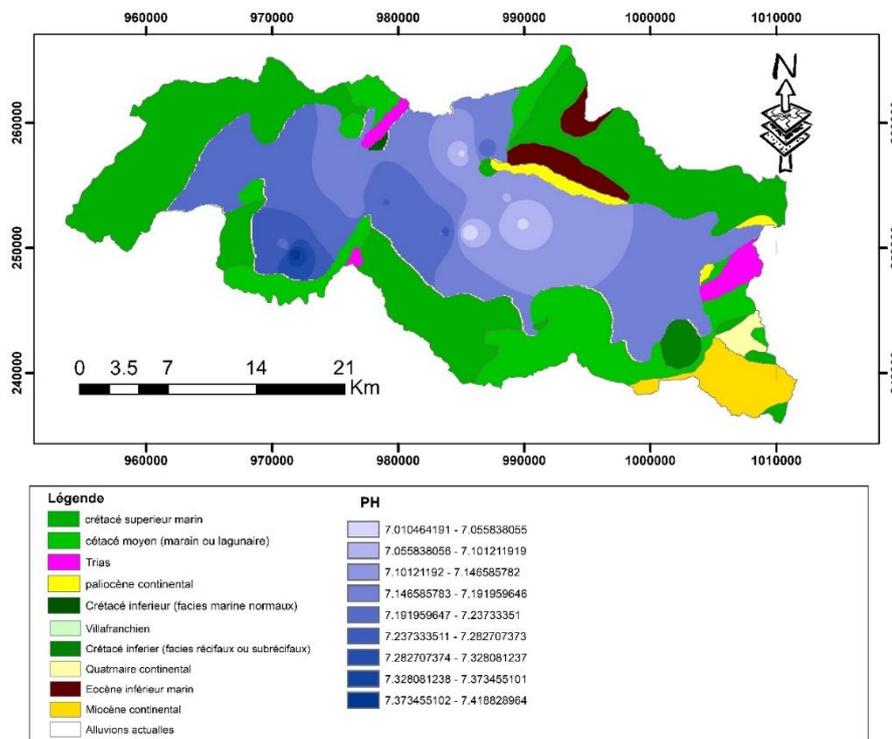


Fig. 31: Carte de PH de plaine de Tébessa Mai 2005

### I – 1 – 3 - La conductivité électrique *CE*

La conductivité électrique est un indicateur de la minéralisation des eaux. Elle peut être mesurée soit sur le terrain soit en laboratoire. La mesure de la conductivité électrique d'une eau est effectuée à l'aide d'un conductimètre, ou elle peut être réalisée à l'aide d'un multi-paramètre qui inclut la température, le pH et la conductivité. Les valeurs de conductivité électrique sont exprimées en microsiemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ou en millisiemens par centimètre ( $\text{mS}/\text{cm}$ ), et elles sont toujours ramenées à la température standard de  $25^\circ\text{C}$ . et exprimées en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , selon la relation suivante :

$$CE_{25} = CE_{Tmes} * \frac{1}{(1 - 0.022)(25 - Tmes)}$$

Avec :

$Tmes$  : température de mesure ( $^\circ\text{C}$ ).  $CE$  : conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) corrigée à  $25^\circ\text{C}$ .  
L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a recommandé une classification des eaux basée sur les plages de valeurs de ce paramètre. Selon cette classification, nous avons élaboré le tableau suivant (Tab.17), qui récapitule l'ensemble des données relatives à la région d'étude.

Tab. 17: 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	P5, P15, P20, P19, P21 P22, P23, P24, FAC1bis F1, FYS4-5bis, FQR5, FR5, F9, S, Oam, FA, FAC1	P26,	P26, P32.		P1

Nous constatons que la plus forte valeur de conductivité électrique est enregistrée du côté de Bekkaria (6750 $\mu\text{s/cm}$ ) et du côté de Dj. Belkefif (3430 $\mu\text{s/cm}$ ). Cela est probablement dû aux effets des formations évaporitiques de Dj. Djebissa à l'Est de la plaine et de Dj. Belkefif au Nord.

En revanche, le centre de la plaine, en particulier la zone d'Aïn Chabro, se caractérise par des valeurs de conductivité électrique plus faibles (cf. fig.32).

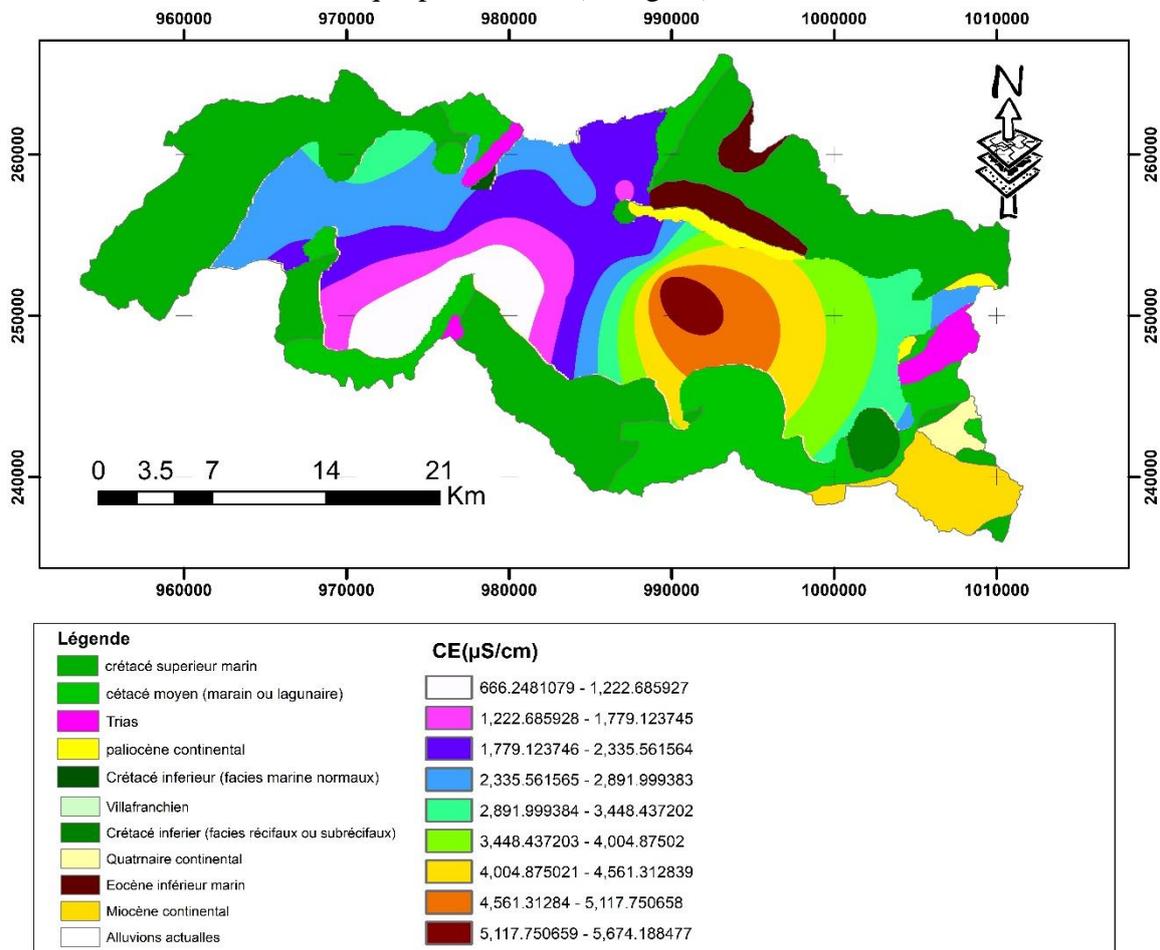


Fig. 32: Carte de la CE de plaine de Tébessa Mai 2005

## **I -2 – Les éléments chimiques majeurs :**

Les différentes méthodes d'analyse employées visent principalement à détecter les éléments chimiques majeurs suivants :

- Cations: Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>
- Anions: Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>--</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

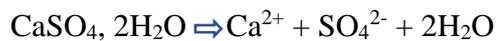
L'objectif de ces analyses est de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale.

### **I – 2 -1- Les cations :**

#### **a – Le calcium (Ca<sup>++</sup>)**

La présence des ions Ca<sup>2+</sup> dans l'eau est principalement liée à deux origines naturelles :

1. La dissolution des formations carbonatées (CaCO<sub>3</sub>) :
2. La dissolution des formations gypseuses (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) :



Ces processus de dissolution contribuent à la présence des ions calcium (Ca<sup>2+</sup>) dans l'eau.

La concentration moyenne en calcium dans cette région atteint 258 mg/l. Les teneurs en calcium augmentent progressivement du centre de la plaine, où elles se situent entre 190 et 260 mg/l, vers les bordures de la plaine, où elles varient entre 459 et 793 mg/l.

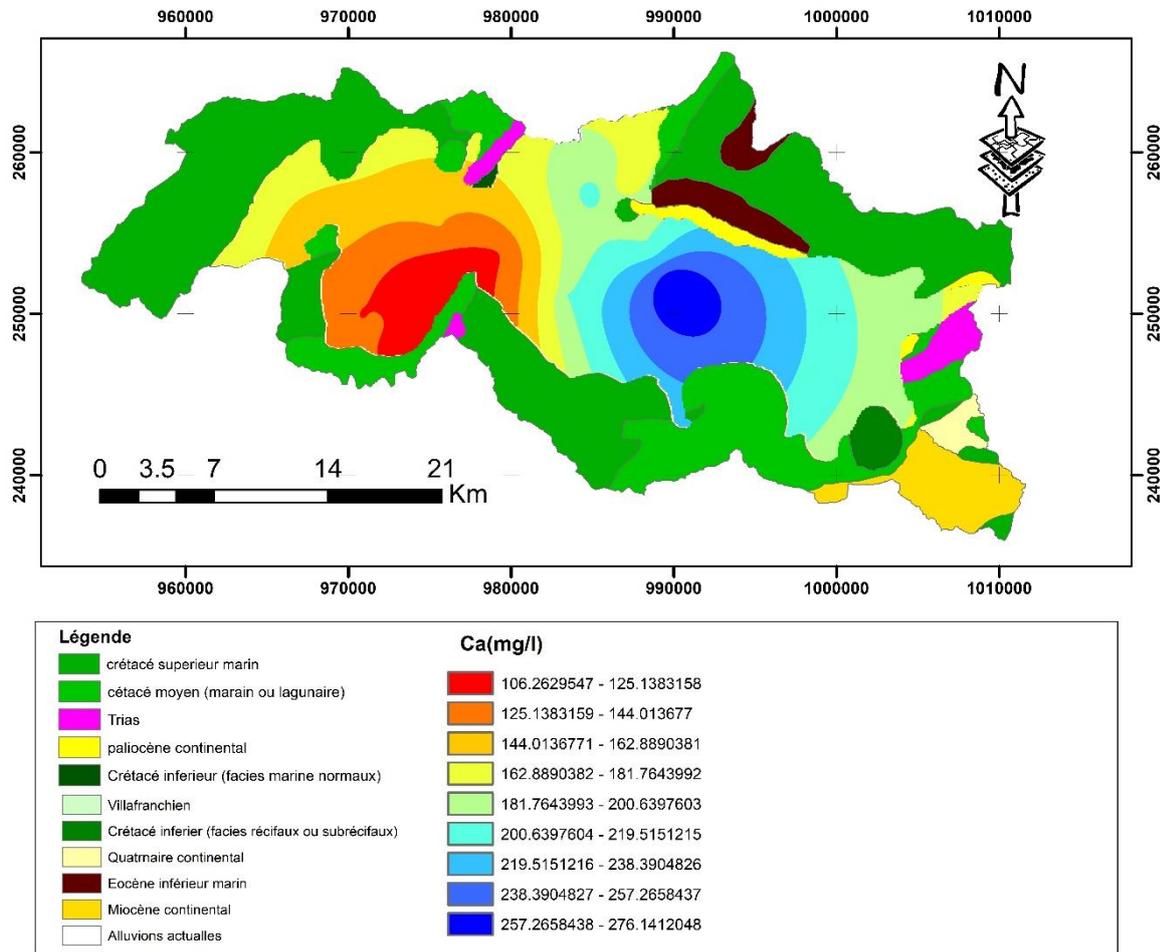
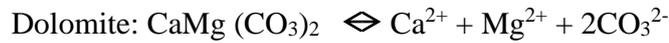
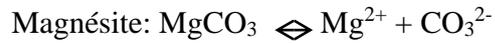


Fig. 33: Carte de Ca<sup>2+</sup> de plaine de Tébessa Mai 2005

L'écart important entre les valeurs extrêmes témoigne d'une grande variation des teneurs en ion Ca<sup>++</sup>, qui proviennent de deux origines naturelles distinctes : la dissolution des formations carbonatées et des formations gypsifères. Cette diversité géologique dans la région contribue à la variabilité observée dans les concentrations en calcium dans les eaux souterraines.

## b – Le magnésium $Mg^{++}$

Ses origines sont comparables à celles du calcium, car le magnésium provient de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium, telles que la magnésite et la dolomite, selon les relations suivantes :



Ces processus de dissolution libèrent des ions magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans l'eau, de manière similaire aux processus qui libèrent les ions calcium.

Le magnésium provient de la dissolution des formations dolomitiques (formations carbonatées riches en magnésium) et accompagne souvent le calcium. La concentration moyenne en  $Mg^{++}$  est d'environ 86 mg/l, ce qui indique que plus de 77 % des eaux de puits dépassent la norme recommandée de 50 mg/l.

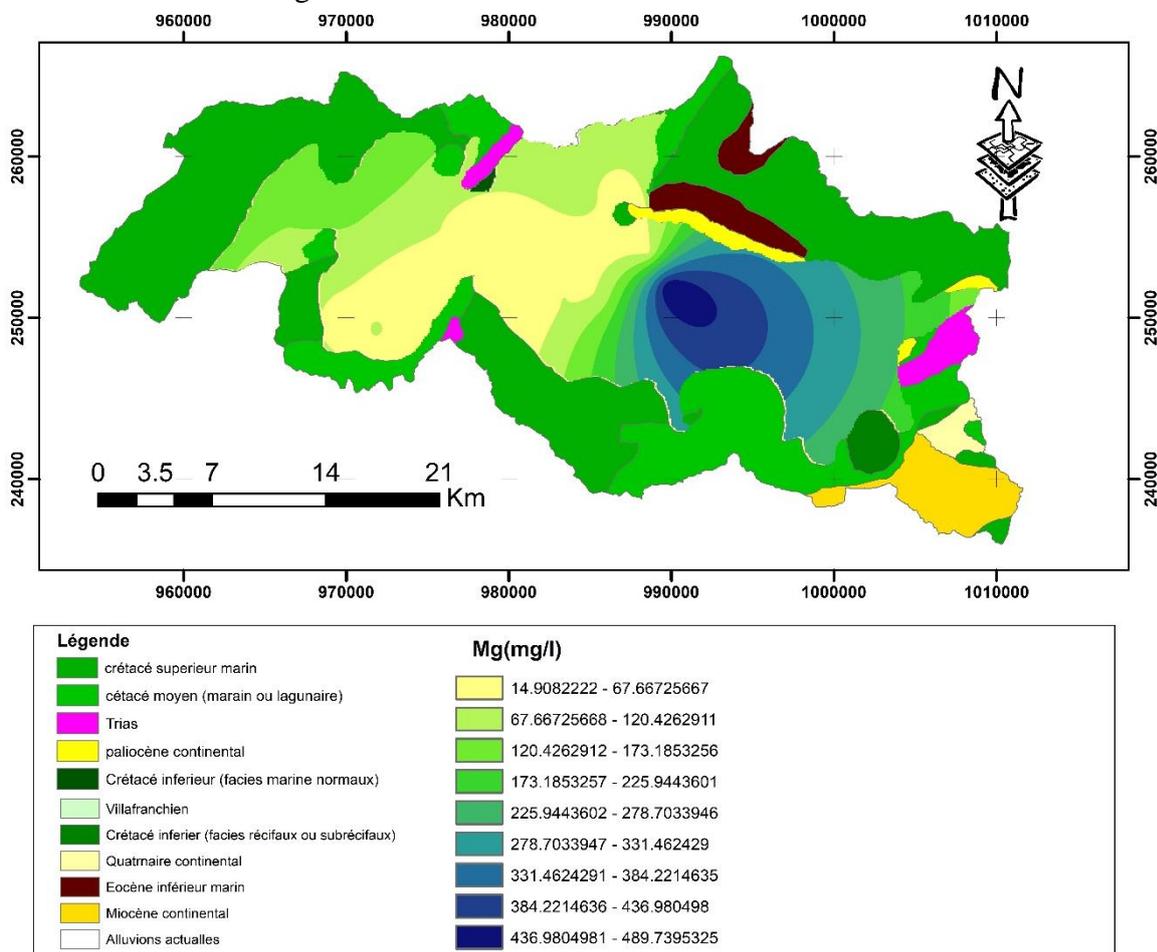
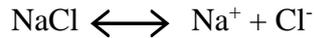


Fig. 34: Carte de  $Mg^{2+}$  de plaine de Tébessa Mai 2005

Les concentrations les plus élevées sont surtout observées en bordure de la plaine, avec des valeurs allant de 180 à 240 mg/l, en raison de la dissolution des calcaires dolomitiques. En revanche, au cœur de la plaine, notamment à Bekkaria, Tébessa et Hammamet, les teneurs en magnésium sont plus faibles et restent en dessous des normes recommandées, avec des valeurs comprises entre 15 et 40 mg/l.

### **c Le sodium $Na^+$**

L'origine de cet élément est principalement liée à la dissolution des formations salifères et aux échanges entre la nappe et la mer. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Le sodium se trouve toujours associé à d'autres éléments chimiques, tels que les chlorures et les sulfates, et il est donc rare qu'il soit isolé. Il provient de diverses sources, notamment :

- Les eaux marines (obtenu par l'évaporation progressive des marais salants)
- Le sel gemme (chlorure de sodium)
- Les formations marneuses et gypsifères (par la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium)
- Les usages industriels

La concentration moyenne en sodium est d'environ 373 mg/l, ce qui fait que 60 % des eaux de puits dépassent la norme recommandée de 150 mg/l. Les concentrations les plus élevées se trouvent dans les puits situés :

- À l'extrême Est, à Bekkaria, avec des valeurs de 500 à 600 mg/l, en raison des formations triasiques de Dj. Djebissa.
- Au Nord-est, avec des valeurs de 400 à 700 mg/l, probablement à cause des lentilles d'argile et de marne.
- Au Nord, avec des valeurs importantes, en lien avec les formations évaporitiques de Dj. Belkefif.
- Au Nord-ouest, avec des valeurs aussi importantes, en raison de la présence de marnes cénomaniennes.

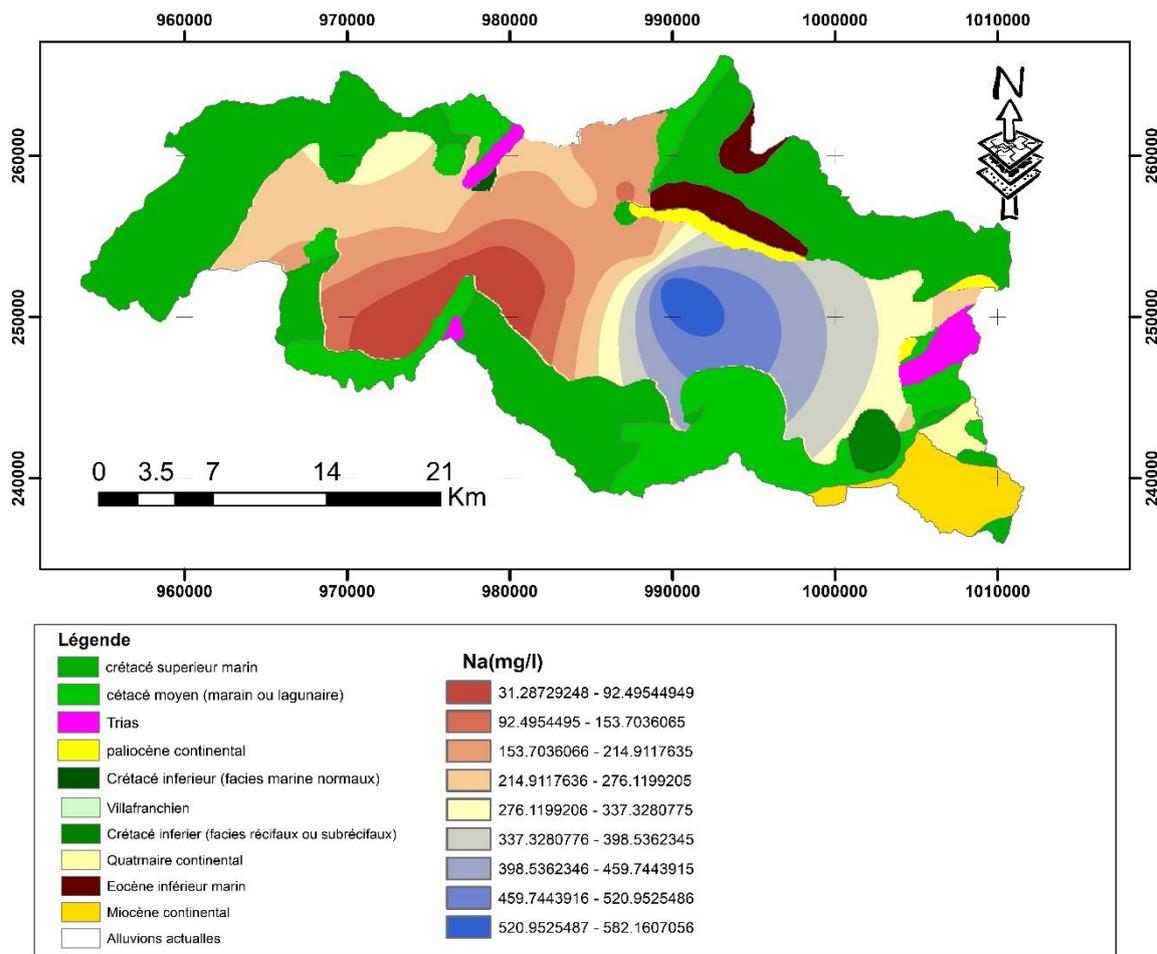


Fig. 35: Carte de Na<sup>+</sup> plaine de Tébessa Mai 2005

## I – 2 – 1 – 2 - Les anions :

### a – Les chlorures Cl<sup>-</sup>

Les chlorures peuvent provenir de diverses sources : l'intrusion des eaux marines, la contamination par des eaux usées, ou la dissolution des sels par le lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels est très facile, ce qui explique leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversé des formations argilo-sableuses ou argileuses.

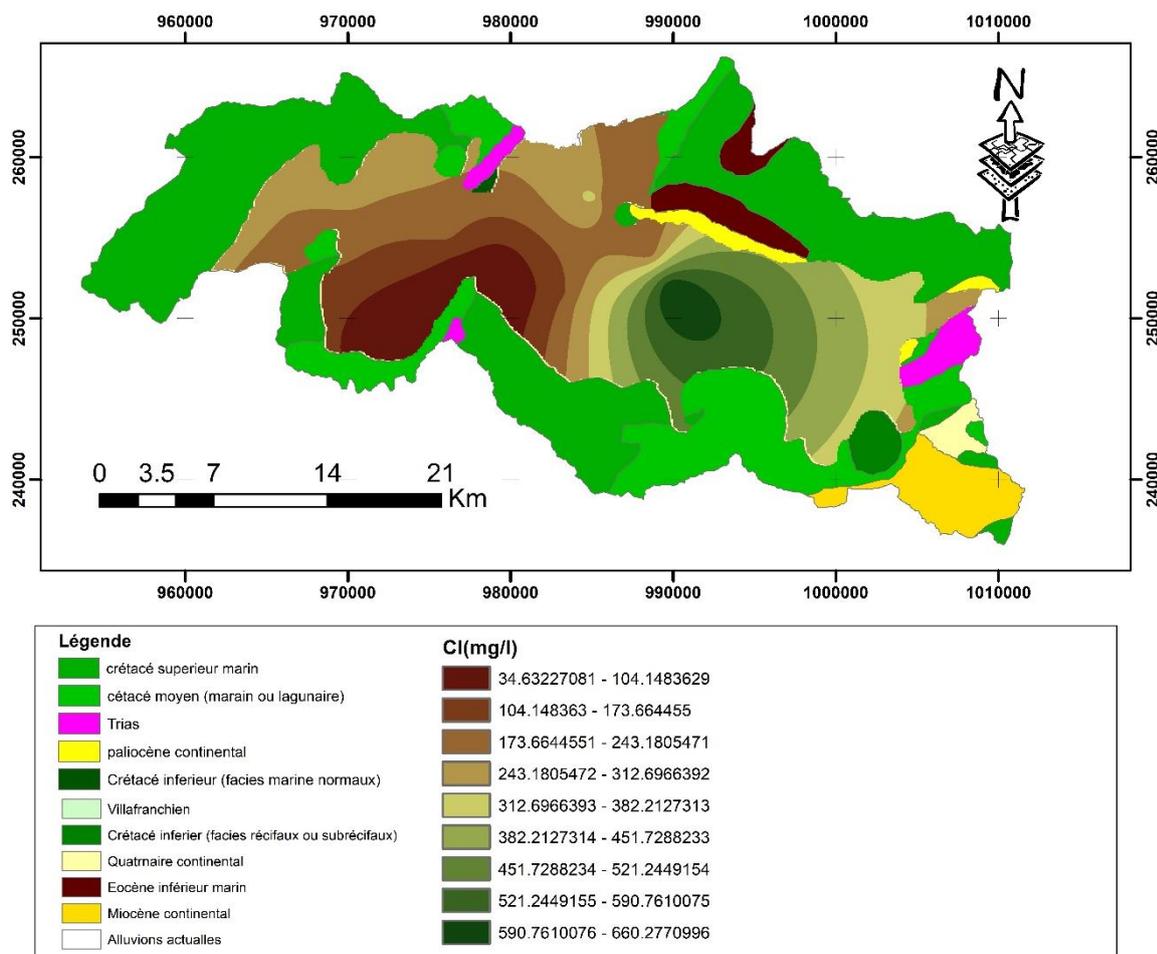


Fig. 36: Carte de Cl- plaine de Tébessa Mai 2005

De nombreux puits plus de (50 % des puits) présentent des teneurs en Cl<sup>-</sup> qui dépassent la norme fixée par l'OMS, établie à 250 mg/l.

### b – Les sulfates $SO_4^{2-}$

Les sulfates présents dans l'eau peuvent provenir de la dissolution des formations gypseuses, comme l'indique la réaction chimique suivante :



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

Au Nord-Est également, des concentrations importantes sont enregistrées, en raison de la présence d'argiles et de marnes. Ces concentrations augmentent notamment du côté de

Dj.Belkefif, en raison de la présence de gypses, ainsi qu'au Nord-Ouest, avec des concentrations élevées.

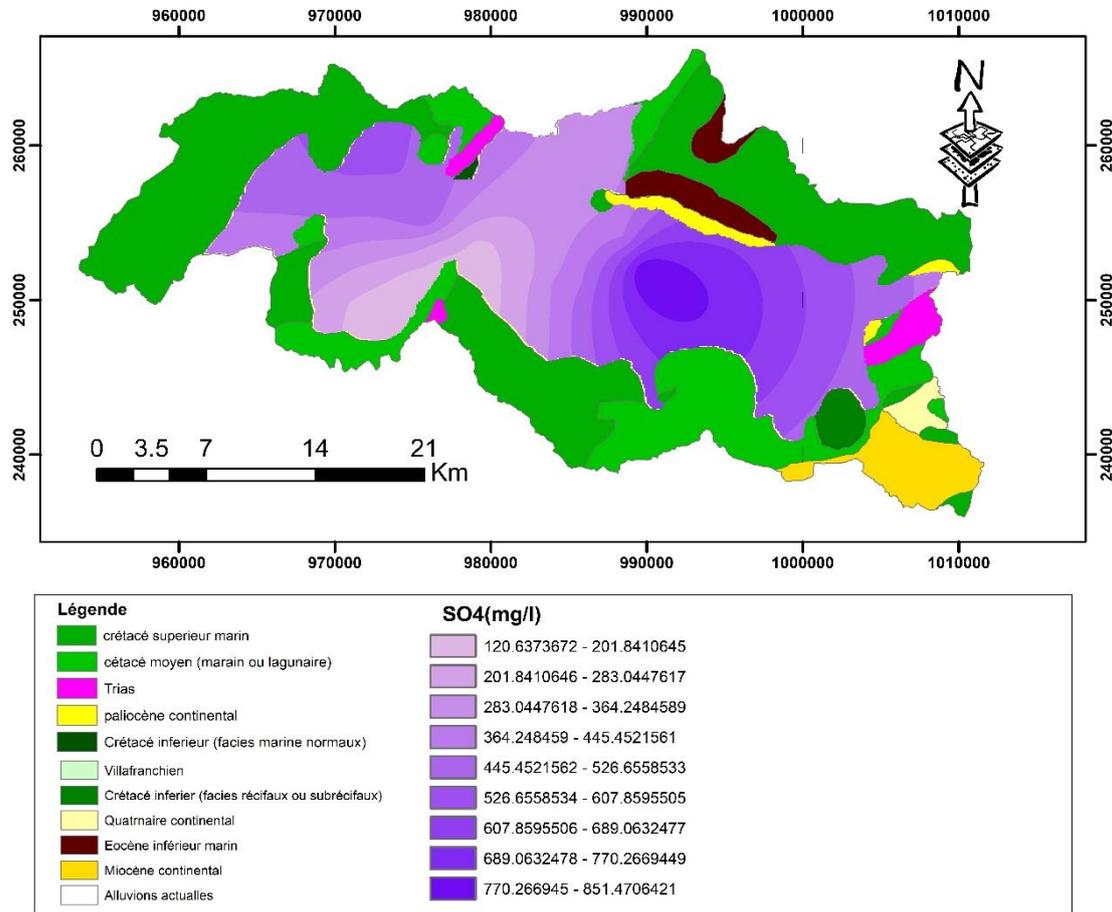


Fig. 37: Carte de SO42- plaine de Tébessa Mai 2005

### e – Les bicarbonates $HCO_3^-$

Les bicarbonates proviennent de la dissolution des roches carbonatées et gypsifères. Cette dissolution s'effectue selon l'équation suivante :



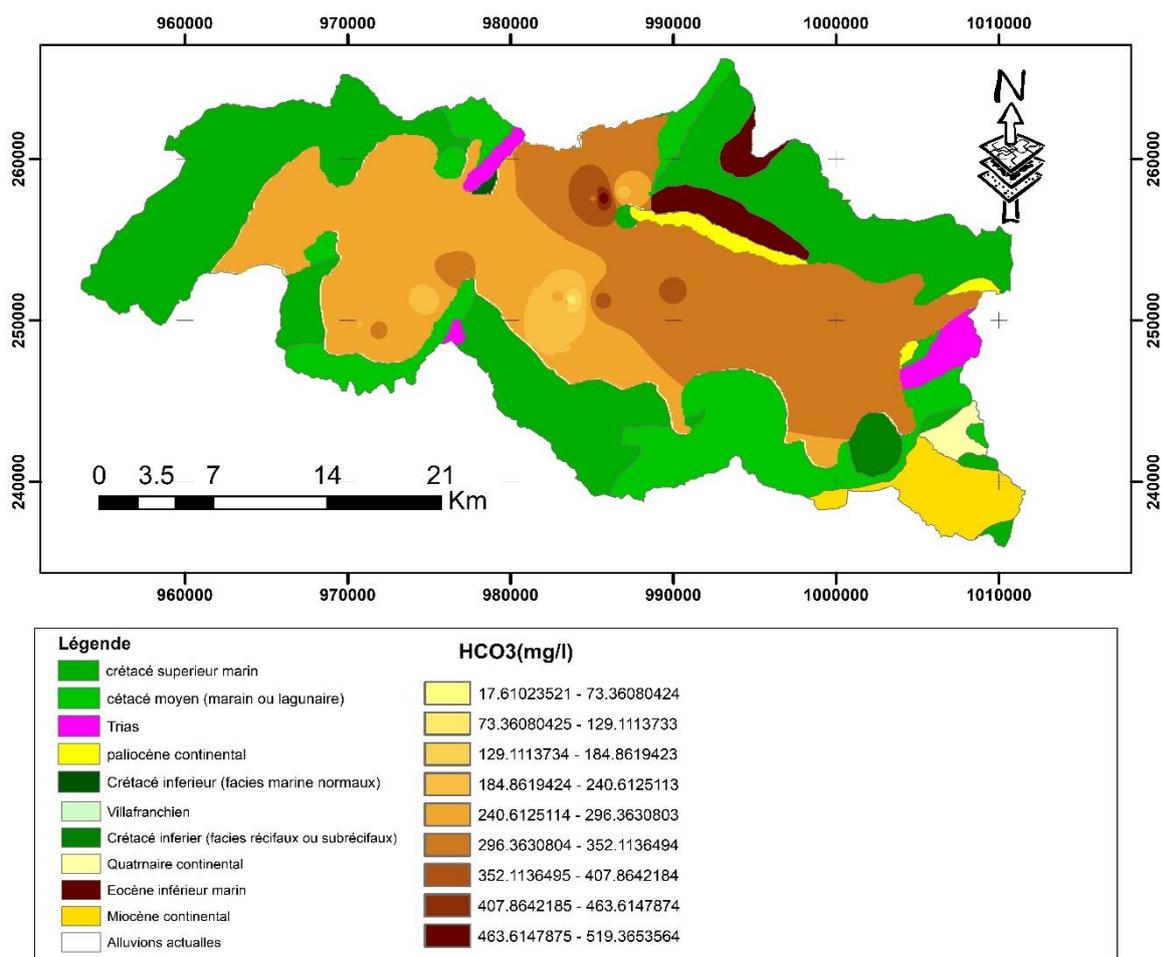


Fig. 38: Carte de HCO<sub>3</sub>-plaine de Tébessa Mai 2005

La concentration en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans plus de 60% des puits de la plaine dépassent la norme de 250 mg/l, bien qu'elle soit légèrement supérieure dans la plupart d'entre eux.

## II- Représentations graphiques et identification des principaux faciès :

Les faciès hydrochimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour mieux comprendre l'aspect qualitatif des eaux naturelles, leur évolution spatio-temporelle, et pour décrire sommairement leur composition (Jaekli, 1970).

À cette fin, il est recommandé d'utiliser certaines méthodes plus commodes, telles que les représentations graphiques en diagrammes (Schoeller-Berkaloff, Piper, Wilcox, etc.), afin de mettre en relief les particularités de ces eaux.

### **II-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), permettant 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.

À partir des 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).

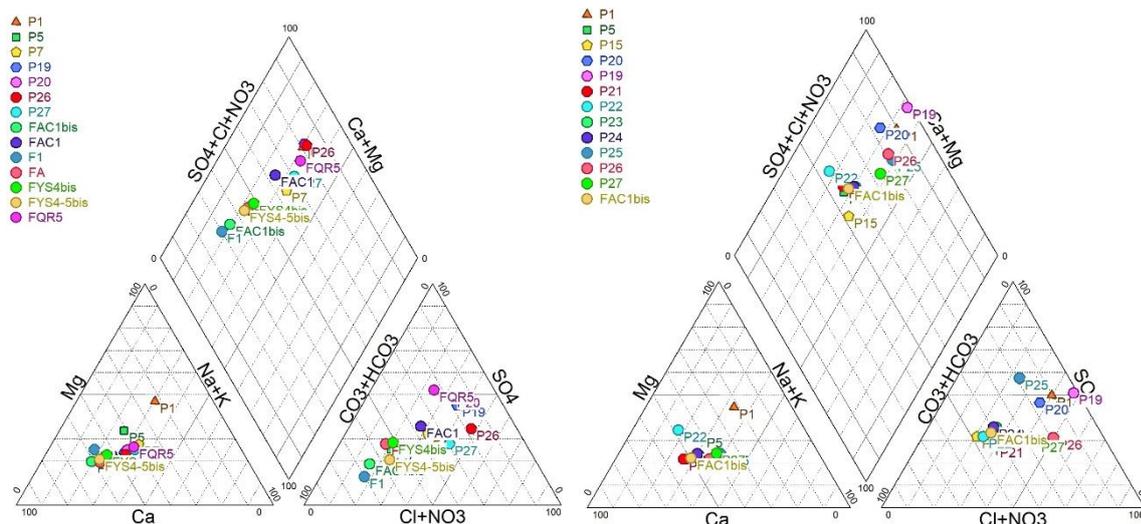


Fig. 39: Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de piper plane de Tébesa (Nov. et Mai 2005)

## II-2- Représentation selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Ce type de représentation, établi par Schoeller et repris par Berkallof, utilise du papier semi-logarithmique pour porter les quantités en réactions des anions et des cations sur l'axe des ordonnées et les éléments chimiques sur les abscisses, à intervalles réguliers, pour chaque point d'eau de prélèvement. Plusieurs analyses chimiques peuvent être représentées simultanément sur ce type de diagramme, chaque échantillon étant 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 représentant les différents éléments chimiques. Un groupe d'eau de minéralisation variable, mais dont les proportions des éléments dissous sont les mêmes, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, cela indique un changement de faciès chimique.

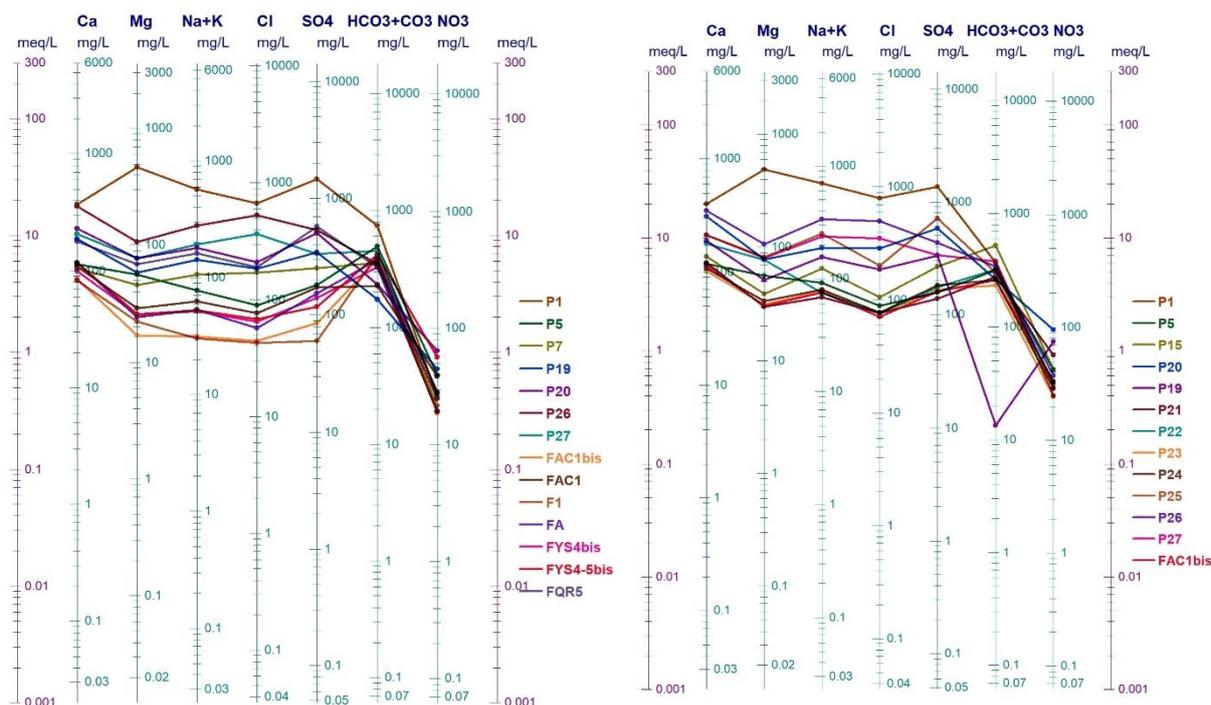


Fig. 40: Représentation des analyses chimiques des eaux de puits selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff. Plaine de Tébessa (novembre et mai 2005)

### II – 3 – Origine de la salinité :

Les échantillons d'eau souterraine ont été représentés sur un diagramme Cl- par rapport à Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> pour montrer les différents types d'eau dans la zone d'étude, comme la montre la Fig 47. Par ailleurs, les différents échantillons d'eau ont été classés en fonction de leur composition chimique à l'aide du diagramme de Piper (Piper, 1944).

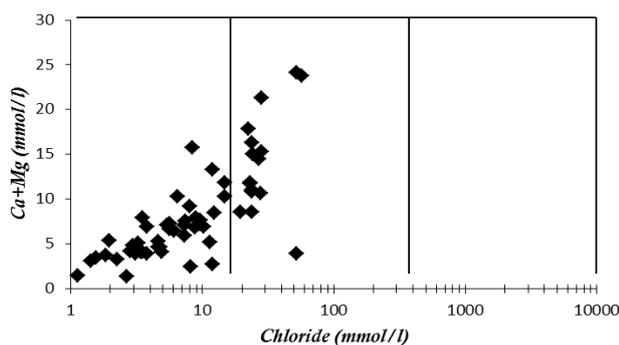


Fig. 41: Cl- conte Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> en mmol/l pour les échantillons d'eaux souterraines (D'après Uzuqumwa 1981)

Cette classification est basée sur la concentration des quatre principaux anions (bicarbonate, sulfate, chlorure et nitrate) et des quatre principaux cations (sodium, potassium, calcium et

magnésium). Elle permet de déterminer les différents types de faciès chimiques, tels que le faciès sulfaté-calcique (qui prédomine dans tout le bassin), le faciès sulfaté-sodique (présent principalement à l'Est - Bekkaria - et au Nord-Ouest - Belkefif et extrême Nord de Hammamet - où les formations évaporitiques sont prédominantes).

Le résultat se manifeste 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. Une concentration élevée en sodium indique généralement le processus d'échange de cations, tandis que le faciès bicarbonaté-calcique (présent à proximité des formations carbonatées - Dj. Bourommane à l'Est et Dj. Es'Sen au Sud-Ouest) se caractérise par une faible concentration en salinité.

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, les éléments majeurs ont été représentés en fonction des chlorures (voir Figure 75). Ce dernier est un élément conservé, ne participant pas aux interactions eau-roche, ce qui le rend utile pour caractériser l'origine de la salinité des eaux et servir de traceur de mélange.

La disposition des différents points d'eau analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée (eau de pluie-eau de mer) peut être très utile pour identifier d'autres phénomènes associés au processus de mélange.

### III – 4 -Relation inter éléments :

Les courbes suivantes montrent les relations possibles entre les éléments chimiques. Nous pouvons dire que les bonnes corrélations s'établissent entre les sulfates, sodium, magnésium et chlorures, ce qui montre bien l'influence de ces éléments sur la qualité chimique des eaux de la nappe de Tébessa-Bekkaria-Hammamet.

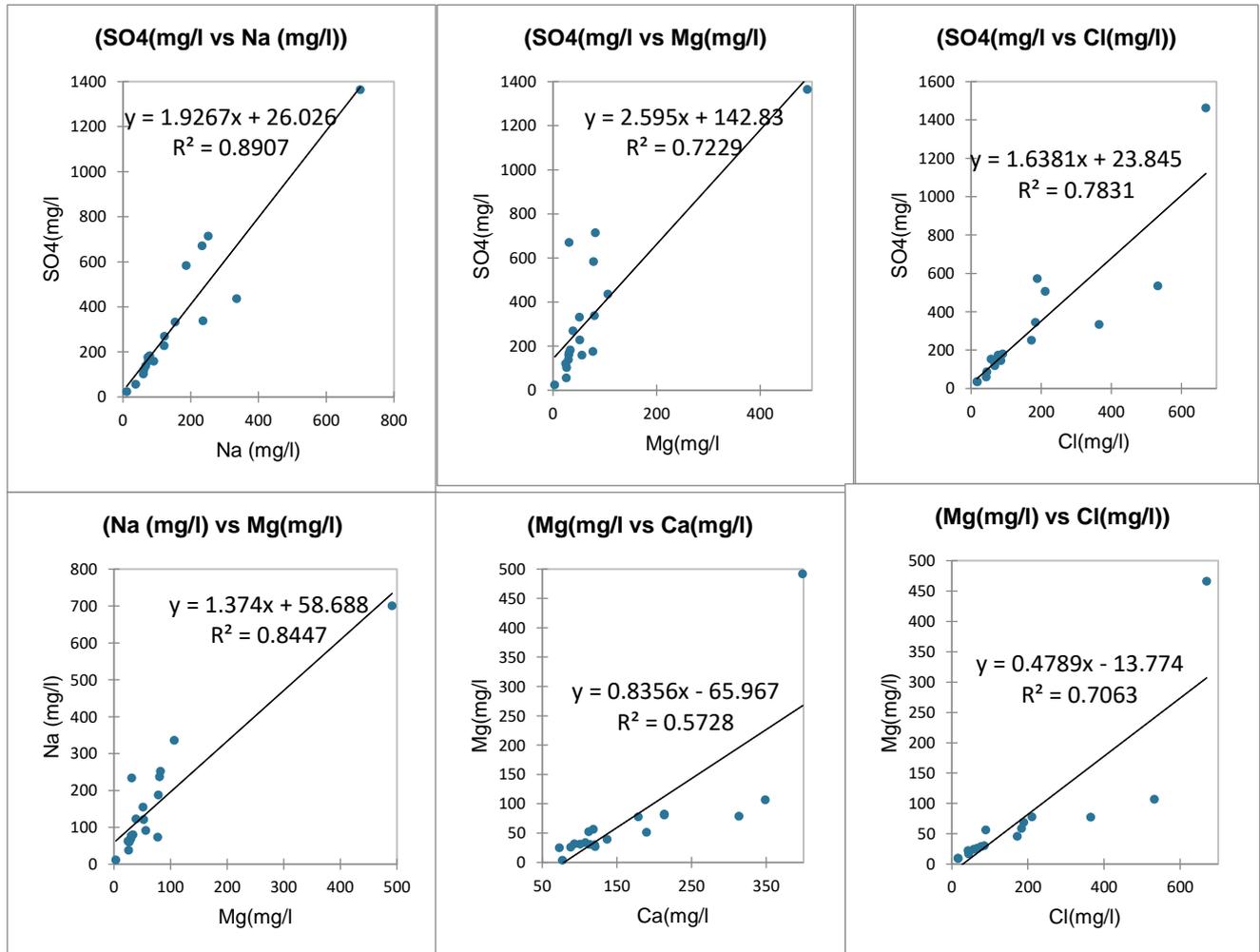


Fig. 42: Relations entre les éléments ont une mauvaise corrélation

Les échantillons d'eaux souterraines prélevés à différents points montrent généralement un enrichissement en Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ainsi qu'un appauvrissement en Mg<sup>2+</sup>.

Les réactions majeures reconnues comme responsables de l'enrichissement ou de l'appauvrissement des éléments dans les eaux souterraines sont l'échange Ca<sup>2+</sup>– Mg<sup>2+</sup> (dû à l'interaction eau-roches carbonatées) et l'échange de base entre les éléments suivants (Na<sup>+</sup> – Ca<sup>2+</sup> ou Na<sup>+</sup> – Mg<sup>2+</sup> (résultant de la réduction ou de la dissolution des sulfates).

Dans un environnement carbonaté, l'enrichissement simultané en  $\text{Ca}^{2+}$  et l'appauvrissement en  $\text{Mg}^{2+}$  sont principalement expliqués par des phénomènes d'interaction eau-roche tels que la dolomitisation, la dissolution et la précipitation.

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

La réaction des sulfates favorise la dissolution des minéraux carbonatés, ce qui pourrait modifier davantage le rapport  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ . Un faible pourcentage d'argile dans les roches carbonatées peut conduire à des changements significatifs dans les concentrations de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  dans les eaux salées par échange de base.

L'enrichissement en sulfates est lié à la présence d'évaporites sur les limites et/ou à une contamination d'origine agricole. L'infiltration des eaux d'irrigation et pluviométriques chargées en sels et fertilisants, facilitée par la faible profondeur de la nappe et la bonne perméabilité des terrains aquifères, peut contribuer à cet enrichissement.

Le graphe  $\text{Cl}^-$  contre  $\text{Na}^+$  montre que la majorité des points se trouvent en dessous de la droite de mélange, ce qui peut s'expliquer par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère, entraînant une adsorption de  $\text{Na}^+$  et une libération de  $\text{Ca}^{2+}$ .

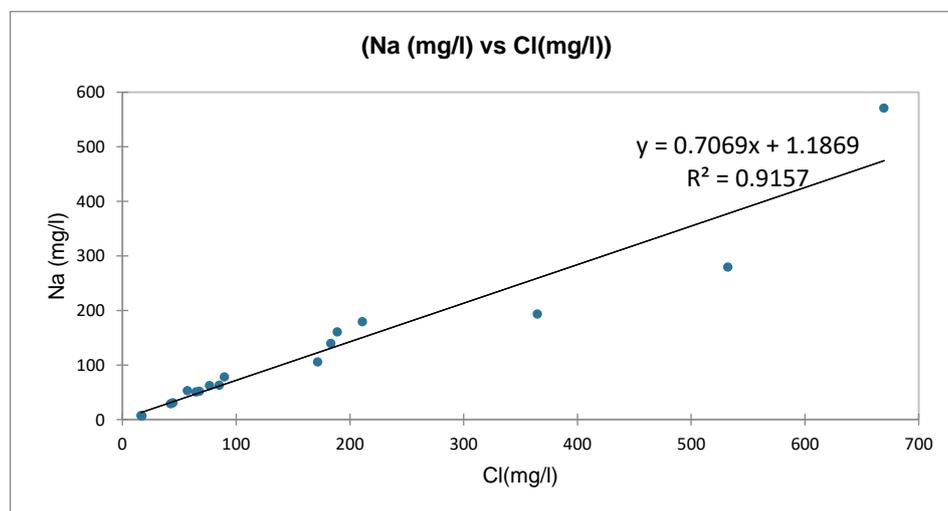


Fig. 43: corrélation entre Na/Cl

La relation entre  $K^+$  et  $Cl^-$  indique généralement un appauvrissement en  $K^+$ , avec la majorité des points situés en dessous de la droite de mélange.

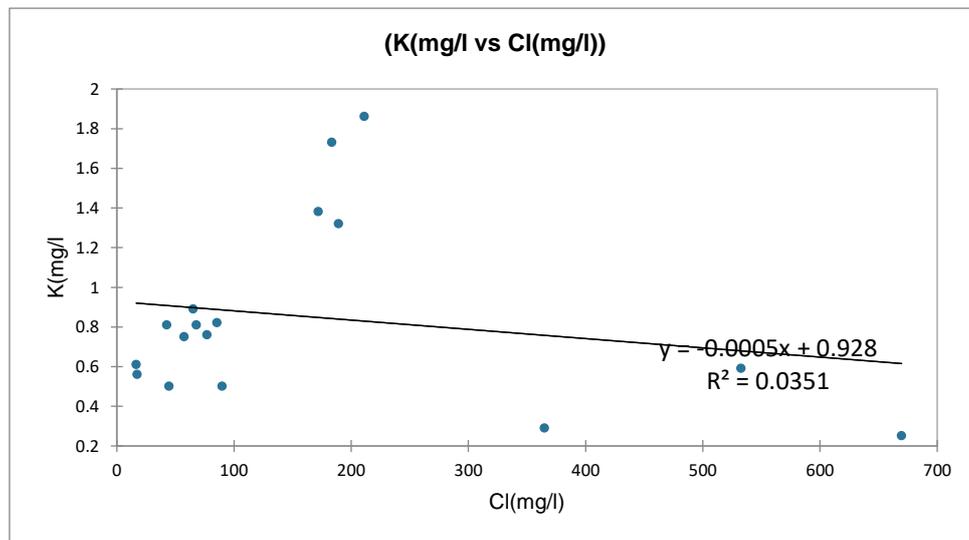


Fig. 44: corrélation entre  $K^+$  /  $Cl^-$

## II – 5– 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, ce qui conditionne la productivité des terres irriguées. Un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux dans le complexe adsorbant provoque une défloculation des argiles, entraînant une destruction du sol et une réduction de sa perméabilité et de sa porosité. En conséquence, l'eau d'irrigation stagne à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines, ce qui affaiblit la végétation et rend le sol compact et asphyxiant.

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 est 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 (voir Fig, diagramme de Wilcox).

### **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 recherchée, quant à l'usage agricole de l'eau en question, dans les diverses pratiques culturales. Pour cette fin, nous utilisons le diagramme de Wilcox.

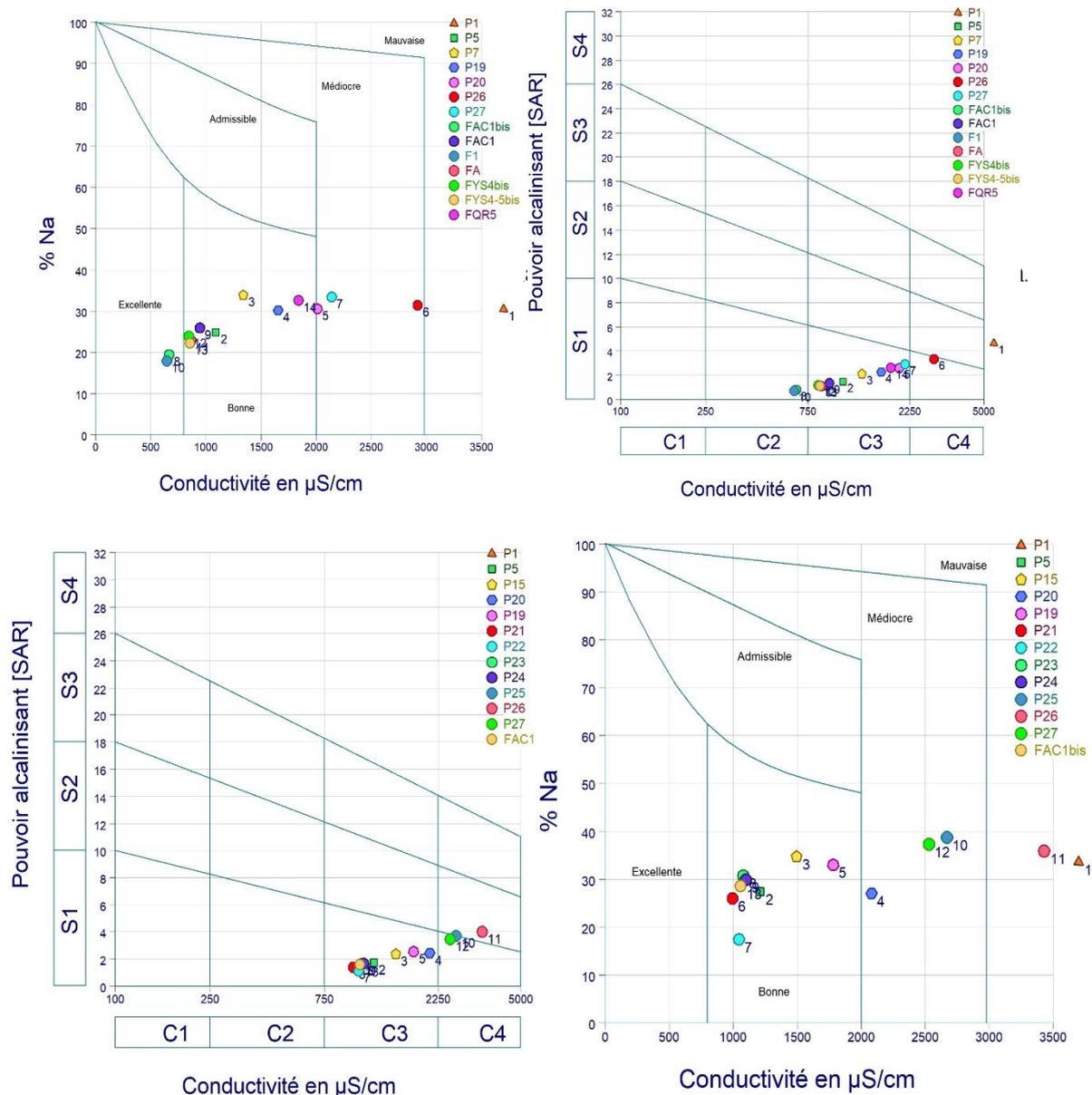


Fig. 45: Représentation des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox. Plaine de Tébessa (novembre et Mai 2005)

L'observation de ce diagramme (Fig.45) fait ressortir pour notre région les classes suivantes :

Conformément à cette classification, les eaux de la plaine de Tébessa sont admissibles pour l'irrigation, à condition de surveiller l'évolution de leur salinité et de maintenir un drainage continu des sols. Toutefois, elles deviennent fortement, voire excessivement, minéralisées, ce qui leur confère une qualité médiocre à très mauvaise. Elles peuvent néanmoins convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels, surtout dans les zones où 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.

Tab. 18 : Classification des eaux par la méthode du SAR et leur état d'utilisation.

<i>Qualité</i>	<i>Classe</i>	<i>Puits correspondants</i>
<i>Bonne</i>	<i>C2S1</i>	<i>FAC1bis, F1</i>
<i>Admissible</i>	<i>C3S1</i>	<i>P5, P7, P19, P20, P27, FAC1, FA, FYS4bis, FYS4-5bis, FAR5</i>
	<i>C3S2</i>	
<i>Médiocre</i>	<i>C3S3</i>	
	<i>C4S1</i>	<i>P26</i>
	<i>C4S2</i>	
<i>Mauvaise</i>	<i>C4S3</i>	

### III- Résultats des analyses multivariées des données chimiques et interprétation :

Nous avons traité nos données par (ANOVA et ACP) à l'aide du logiciel statistique (XLSTAT version 2021).

#### III – 1- Analyse de la variance (ANOVA) :

L'analyse de la variance (ANOVA) vérifie l'hypothèse selon laquelle les moyennes de deux populations ou plus sont égales. Les ANOVA évaluent l'importance d'un ou plusieurs facteurs en comparant les moyennes des variables de réponse pour les différents niveaux de facteurs. L'hypothèse nulle stipule que toutes les moyennes de la population (moyennes des niveaux de facteurs) sont égales, tandis que l'hypothèse alternative stipule qu'au moins l'une d'elles diffère. Cette analyse est appelée "analyse de variance" parce que sa procédure s'appuie sur les variances pour déterminer si les moyennes sont différentes. La procédure compare la variance entre les moyennes des groupes et la variance à l'intérieur des groupes afin de déterminer si les groupes font tous partie d'une population plus élargie ou de populations distinctes ayant des caractéristiques propres.

Pour les calculs ANOVA réalisés par XLSTAT, on a regardé la relation entre les éléments majeurs en fonction de la conductivité. Les résultats des calculs ont donné un coefficient de variance égale ( $R^2= 0,371$ ). Cette valeur indique que le type d'ouvrage joue à 37% de minéralisation est expliqué par le type d'ouvrage (un petit lien entre le type d'ouvrage et la minéralisation des eaux)

La figure suivante explique les variabilités des éléments majeurs en fonction de la conductivité. La relation entre conductivité et bicarbonates ( $\text{HCO}_3$ ) est différente par rapport aux autres éléments, d'un autre côté, on peut confirmer la relation directe entre la conductivité et les sulfates ( $\text{SO}_4$ ). Ces résultats peuvent certainement expliquer l'origine de la salinité des eaux souterraines de la région.

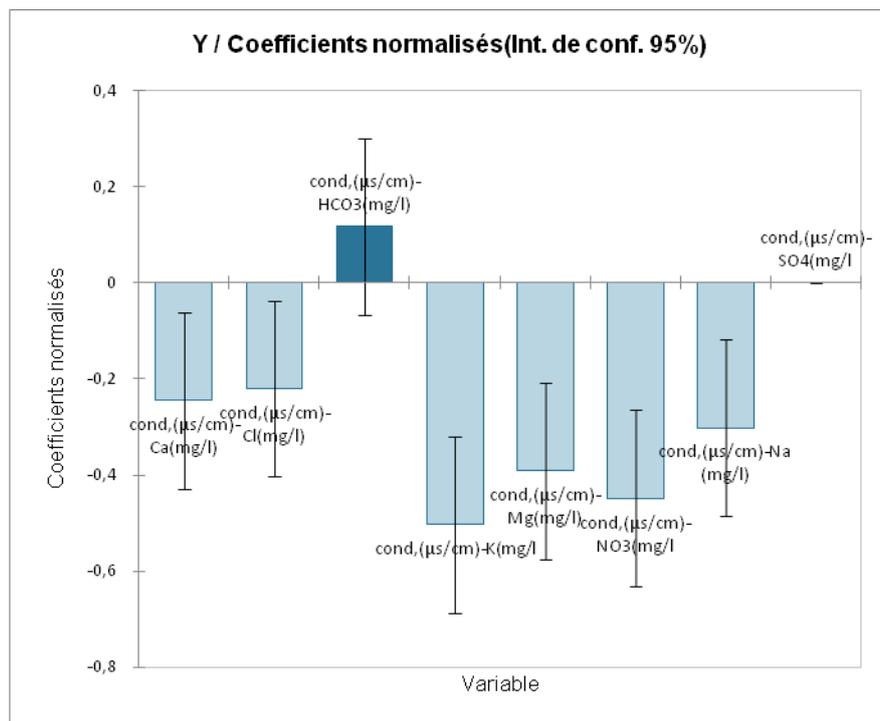


Fig. 46: Coefficients normalisés (Y)

Tab. 19: Paramètres du modèle (Y)

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr >  t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	301.983	39.259	7.692	<b>&lt;0.0001</b>	224.302	379.664
cond,(µs/cm)-	-146.994	55.521	-2.648	<b>0.009</b>	-256.851	-37.137
cond,(µs/cm)-	-132.193	55.521	-2.381	<b>0.019</b>	-242.050	-22.336
cond,(µs/cm)-	69.985	55.521	1.261	0.210	-39.872	179.842
cond,(µs/cm)-	-301.134	55.521	-5.424	<b>&lt;0.0001</b>	-410.991	-191.277
cond,(µs/cm)-	-234.439	55.521	-4.223	<b>&lt;0.0001</b>	-344.297	-124.582
cond,(µs/cm)-	-268.941	55.521	-4.844	<b>&lt;0.0001</b>	-378.798	-159.084
cond,(µs/cm)-	-180.775	55.521	-3.256	<b>0.001</b>	-290.632	-70.918
cond,(µs/cm)-	0.000	0.000				

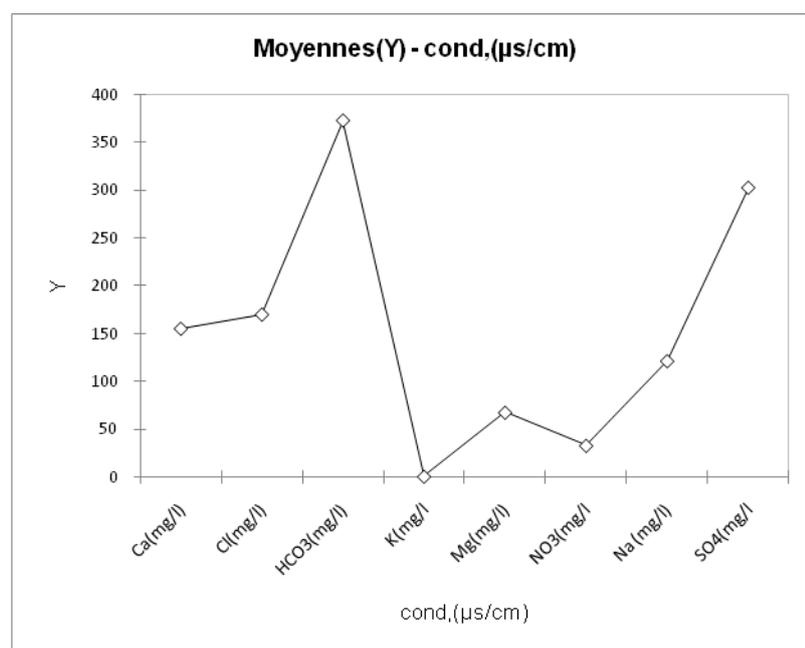


Fig. 47: courbe Moyenne (Y)-conductivité

Cette figure montre aussi que la minéralisation des eaux est très dépendante aux éléments (HC03 et SO4), la variabilité des moyennes de ces deux éléments est différente que celle des autres éléments.

### **III- 2 - Analyse en Composantes Principales**

#### **III- 2 - 1 – But de la méthode :**

L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est de faciliter la visualisation de données multidimensionnelles et l'analyse de la structure des variables. Cela permet de créer une représentation simplifiée des paramètres étudiés sur les différents points d'eau, sous forme d'un graphique en deux dimensions. L'interprétation de ce graphique est aisée :

- Chaque axe du graphique est une combinaison des (n) éléments analysés, fournissant ainsi les coordonnées (X) et (Y) de chaque point d'eau projeté.
- Les points représentant les échantillons proches les uns des autres sur le graphique indiquent des similitudes dans leurs caractéristiques physico-chimiques.

#### **III- 2 - 2 – Principe de la méthode :**

Les données se présentent sous forme d'un tableau à double entrée :

- Les variables chimiques,
- Les échantillons, qui représentent les unités statistiques.

Les valeurs des variables pour toutes les unités statistiques peuvent être visualisées par un nuage de points, que ce soit dans l'espace des variables ou celui des unités statistiques. L'analyse cherche à trouver des plans de projection qui minimisent l'erreur de projection. Ces plans sont définis par deux axes factoriels, calculés à partir des variances et covariances des variables.

Le premier axe factoriel (F1) maximise la variance, capturant ainsi le maximum d'inertie des nuages de points. Le second axe factoriel (F2), perpendiculaire au premier, capte la variance maximale non expliquée par F1. Le troisième axe (F3) est perpendiculaire aux deux premiers et capture la variance restante non expliquée par F1 et F2.

En général, on projette les unités statistiques jusqu'à ce qu'environ 90% de la variance totale soit expliquée. Chaque axe factoriel correspond à un facteur spécifique. Une fois les principaux facteurs identifiés, l'ACP permet de représenter graphiquement le nuage de points, soit dans l'espace des variables, soit dans celui des unités statistiques.

#### **III- 2- 3 – L'espace des variables :**

Les variables initiales sont projetées dans divers plans factoriels de manière à leur donner un poids égal. Elles se projettent dans un cercle de rayon 1, connu sous le nom de cercle de corrélation. La distance entre le centre du cercle et une variable est proportionnelle à sa corrélation avec le facteur qui génère l'espace. Ainsi, plus une variable est proche du cercle, mieux elle est représentée.

Dans le plan factoriel considéré, c'est à partir de cette représentation graphique que les différents facteurs responsables de la structure observée sont définis.

### III- 2 -4 – L'espace des unités statistiques :

Dans les différents plans factoriels, les unités statistiques sont dotées de deux nouvelles coordonnées, appelées composantes principales. Cette représentation permet de résumer leur position relative par rapport aux facteurs et donc aux variables. En plus des descriptions graphiques, l'analyse des résultats nécessite les éléments suivants :

- **La matrice des coefficients de corrélation** : elle indique les relations existantes entre chaque paire de variables.

- **Le tableau des valeurs propres des facteurs** (variance expliquée par chaque variable) : il permet d'évaluer l'importance de chaque axe factoriel par rapport aux autres, exprimée également en pourcentage.

- **Le tableau des vecteurs propres sur chaque axe** : ces coordonnées sont utilisées pour représenter les points du nuage dans l'espace des variables.

- **Le tableau des coefficients de corrélation carrés des variables avec chaque axe factoriel** : ces coefficients montrent l'importance de chaque variable dans la détermination de l'axe.

Graphiquement, l'importance d'une variable est exprimée par sa distance par rapport à l'origine sur l'axe factoriel considéré.

Tab. 20: Statistiques descriptives (mai 2005)

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
T°	19	0	19	10.000	13.000	12.053	0.780
PH	19	0	19	7.010	7.420	7.188	0.098
cond,(µs/cm)	19	0	19	480.000	6750.000	1804.368	1428.557
Ca(mg/l)	19	0	19	73.130	398.990	164.124	95.204
Mg(mg/l)	19	0	19	3.320	491.380	71.172	105.112
Na (mg/l)	19	0	19	10.800	700.500	156.481	157.141
K(mg/l)	19	0	19	0.290	2.260	1.149	0.531
SO4(mg/l)	19	0	19	24.270	1363.760	327.521	320.806
NO3(mg/l)	19	0	19	12.810	95.990	36.953	20.290
Cl(mg/l)	19	0	19	11.800	795.940	181.178	192.557
HCO3(mg/l)	19	0	19	13.420	520.940	284.709	97.960

Le plan factoriel 1-2 a permis d'extraire une part importante de la variance totale des échantillons.

Cette ACP a été appliquée aux données de dizaine points d'eau, afin d'expliquer la variation de neuf variables. Pour ce traitement, nous avons retenu huit axes qui expriment 100 % des informations pour la première campagne et 99,96% pour la deuxième (Tableau 21).

Tab. 21: Différentes variables et axes (mai 2005)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	6.026	2.075	1.060	0.872	0.462	0.265	0.172	0.053	0.011	0.004
Variabilité (%)	54.783	18.861	9.633	7.930	4.197	2.410	1.562	0.483	0.101	0.040
% cumulé	54.783	73.645	83.277	91.208	95.404	97.814	99.376	99.860	99.960	100.000

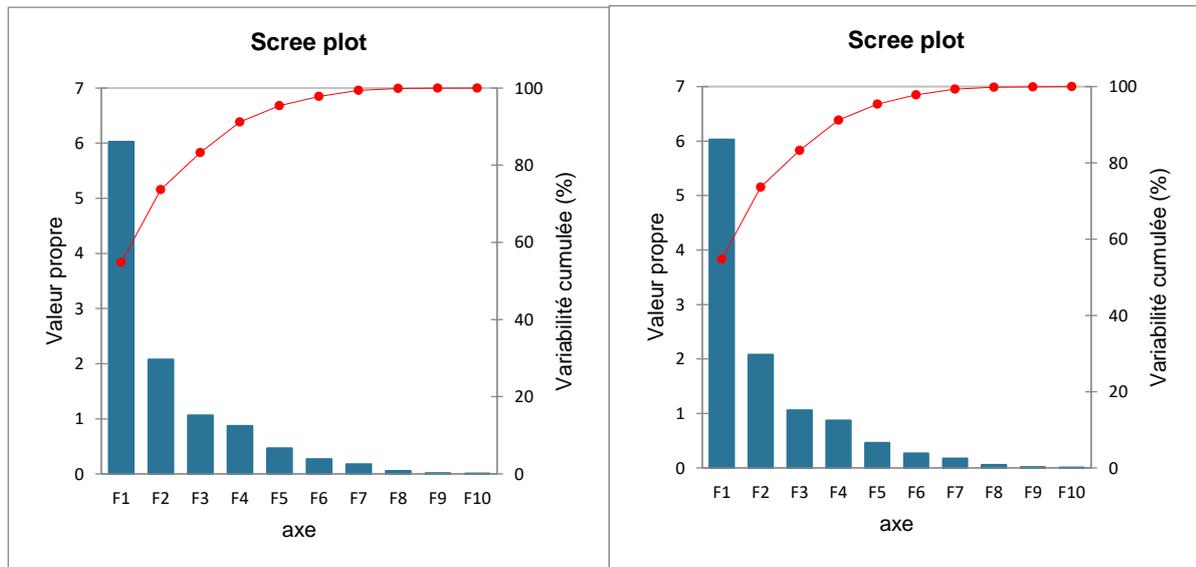


Fig. 48: Histogramme des valeurs propres et variabilité cumulées (mai et Nov 2005)

Tab. 22: Corrélations entre les variables et les facteurs (mai 2005)

	F1	F2	F3	F4	F5
T°	0.187	0.616	-0.478	-0.491	0.284
PH	-0.674	0.346	0.561	0.050	-0.030
cond,(µs/cm)	0.986	0.037	0.133	-0.055	0.005
Ca(mg/l)	0.870	0.315	-0.082	0.231	0.000
Mg(mg/l)	0.910	-0.031	0.274	0.000	-0.122
Na (mg/l)	0.986	0.037	0.133	-0.055	0.005
K(mg/l)	-0.344	0.730	0.289	0.326	0.363
SO4(mg/l)	0.909	0.181	0.229	0.036	0.094
NO3(mg/l)	0.022	0.695	-0.436	0.443	-0.339
Cl(mg/l)	0.981	0.079	0.013	-0.061	-0.030
HCO3(mg/l)	0.317	-0.647	-0.270	0.511	0.330

L'examen du tableau n° 23, relatif à la matrice de corrélation (mai 2005), montre que presque toutes les variables sont corrélées sauf le Bicarbonate, le Nitrate et le potassium qui n'ont pas des corrélations directes avec les autres éléments. On observe une forte corrélation entre la conductivité électrique et les sulfates, le sodium, le calcium, le Magnésium, ainsi que les chlorures. Ces éléments sont eux qui influencent la minéralisation des eaux souterraines de la région et donnent leur faciès chimique.

Tab. 23: Matrice de corrélation entre les variables (mai 2005)

Variables	T°	PH	cond,(µs/cm)	Ca(mg/l)	Mg(mg/l)	Na (mg/l)	K(mg/l)	SO4(mg/l)	NO3(mg/l)	Cl(mg/l)	HCO3(mg/l)
T°	1										
PH	-0.158	1									
cond,(µs/cm)	0.167	-0.585	1								
Ca(mg/l)	0.282	-0.487	0.836	1							
Mg(mg/l)	0.028	-0.414	0.919	0.757	1						
Na (mg/l)	0.167	-0.585	1.000	0.836	0.919	1					
K(mg/l)	0.162	0.599	-0.289	-0.023	-0.325	-0.289	1				
SO4(mg/l)	0.166	-0.463	0.944	0.764	0.850	0.944	-0.059	1			
NO3(mg/l)	0.337	0.022	-0.033	0.344	-0.069	-0.033	0.387	0.055	1		
Cl(mg/l)	0.238	-0.625	0.974	0.893	0.877	0.974	-0.305	0.876	0.040	1	
HCO3(mg/l)	-0.332	-0.513	0.224	0.210	0.234	0.224	-0.404	0.148	-0.198	0.209	1

La corrélation moins significative entre la conductivité électrique et les bicarbonates suggèrent que la salinité de l'eau est principalement attribuable à des formations salifères comme le gypse, l'anhydrite et le sel gemme, entre autres. La forte corrélation entre les sulfates et le calcium renforce cette observation.

### III – 2 –5- Cercles de corrélation :

Le cercle de corrélation de l'ACP est défini par les axes F1 et F2, qui représentent 76.64 % de l'information totale pour la campagne de Mai 2005 et 86,26% pour la campagne Nov.2005. L'axe F1 correspond généralement aux principaux éléments responsables de la minéralisation de l'eau, tels que les chlorures, le sodium, le calcium et le magnésium. L'axe F2, quant à lui, s'oppose principalement aux autres éléments, notamment les bicarbonates.

L'axe F2 montre généralement l'opposition des faciès chimiques de l'eau para rapport à l'axe F1. L'axe horizontal F1 explique 73.64 % de la variance de la campagne de Mai 2005. Il est influencé par des variables telles que Na<sup>+</sup>, CE, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, et Cl<sup>-</sup>, qui sont associées aux formations évaporitiques. L'axe F2, quant à lui, est déterminé par les bicarbonates de bordure, K<sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

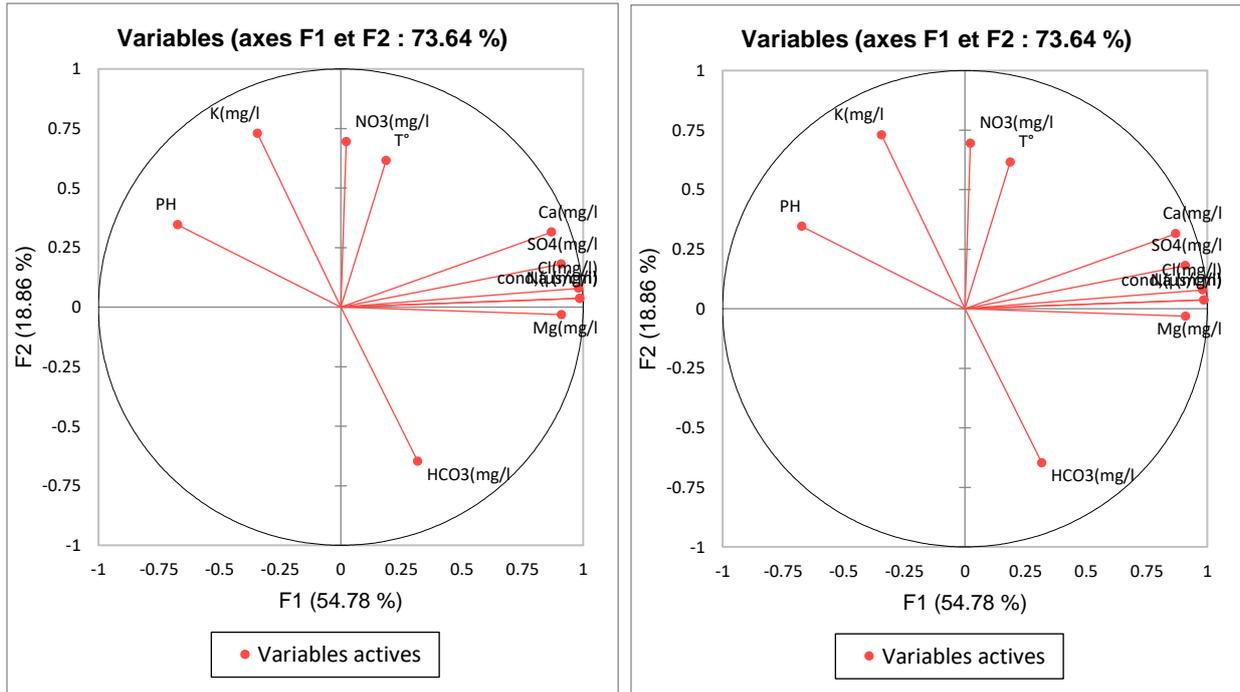


Fig. 49: Analyse en composante principale des eaux de la nappe alluviale. Plaine de Tébessa (Mai, Novembre 2005).

### III – 2 – 6 – L'espace des individus :

Le graphe de la figure suivante (Fig.50) met en évidence trois grandes familles d'eau opposées. L'axe F1 illustre cette opposition entre, d'une part, les eaux bicarbonatées et, d'autre part, les eaux riches en éléments salins et les eaux riche en Nitrate et le Potassium.

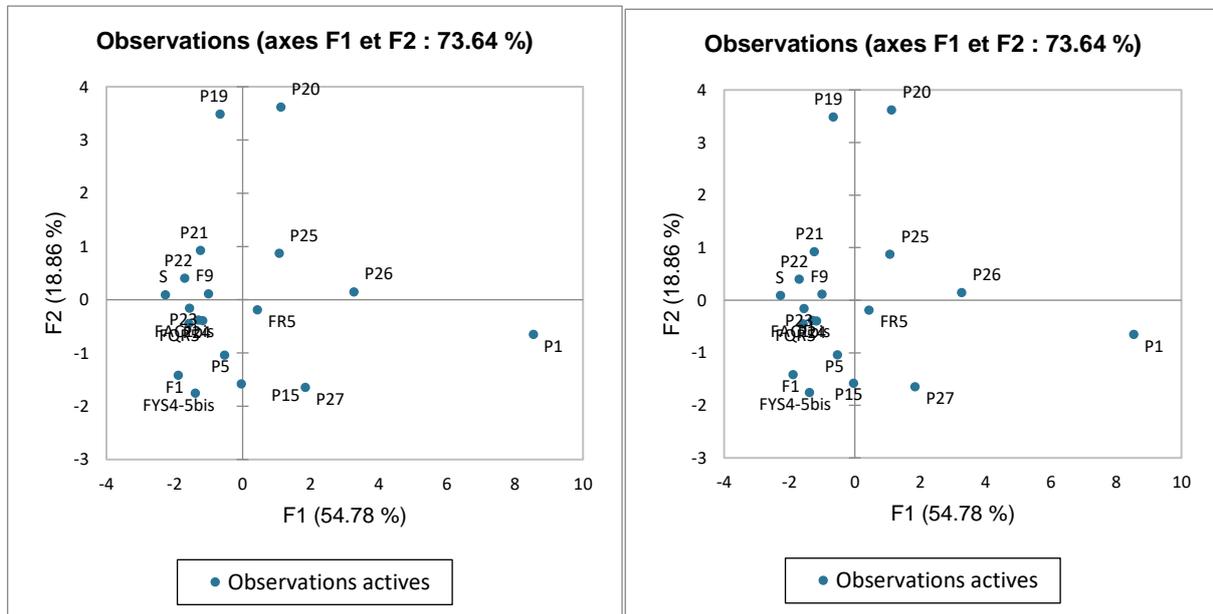


Fig. 50: Distribution des variables en fonction des points d'observation (Mai, Nov.,2005)

La composition chimique des eaux est étroitement liée à l'alimentation de l'aquifère, qui dépend des formations géologiques constituant l'aquifère ou formant ses limites.

### Conclusion

À la suite de cette étude, il a été observé que les eaux de la plaine de Tébessa présentent une variabilité significative en termes de caractéristiques physico-chimiques. Leur température varie de 10 à 13°C, leur pH se situe entre 7,01 et 7,42, et leur conductivité électrique oscille entre 480 et 6750  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

L'utilisation des méthodes statistiques multivariées nous a permis de confirmer cette variabilité en concentration et en faciès.

Leur faciès prédominant est généralement sulfaté-sodique ou sulfaté-calcique, et chloruré sodique, bien qu'il puisse parfois être bicarbonaté-calcique, en raison de leur étroite relation avec les formations géologiques environnantes.

Dans l'ensemble, ces eaux sont considérées acceptables pour une utilisation en irrigation, à condition de surveiller attentivement l'évolution de leur salinité.

## Conclusion générale

La zone étudiée fait partie du vaste bassin versant de la Medjerdah, situé dans les hautes plaines orientales de l'Atlas saharien. La topographie de la région est diversifiée, avec une plaine d'altitude moyenne oscillant entre 750 et 1000 mètres, entourée par une série de montagnes atteignant jusqu'à 1400 voire 1600 mètres d'altitude.

Selon l'indice de compacité ( $k_c = 1,88$ ) et les dimensions du rectangle équivalent, le bassin de Tébessa a une forme allongée, avec un relief qualifié de relativement faible ( $D_s = 185,28$  m). Les montagnes couvrent 41,79% de la superficie, tandis que la plaine occupe le reste (58,21%). Toutes ces caractéristiques morphométriques influent sur l'écoulement des eaux que l'impluvium est susceptible de recevoir. Le temps de concentration nécessaire pour que les eaux parviennent à l'exutoire est estimé à 10 heures, 09 minutes et 36 secondes, avec une densité de drainage de  $D_d = 4,853$  km/km<sup>2</sup>.

La combinaison de ces facteurs avec la nature lithologique du terrain entrave une infiltration satisfaisante, qui constitue la principale source d'alimentation des systèmes aquifères, favorisant ainsi la perte d'importantes quantités d'eau qui s'écoulent vers l'extérieur.

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-quaternaire 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.

L'étude climatologique a montré que notre région se caractérise par un climat semi-aride typique des hautes plaines, qui se caractérise généralement par des étés chauds et des hivers très froids. Les effets du sirocco sont possibles à tout moment de l'année, mais ils sont particulièrement fréquents en été. De plus, l'impact du gel est souvent sévère. La pluviométrie, bien que non uniformément répartie dans l'espace et dans le temps, est souvent marquée par

son caractère violent. Les moyennes annuelles des précipitations sont d'environ 445.2 mm/an, tandis que celles des températures avoisinent les 16.5°C.

Dans l'ensemble, le bilan hydrique est déficitaire ; l'évapotranspiration réelle moyenne est d'environ 408.89 mm/an, ce qui représente près de 91.84% des précipitations annuelles. Le ruissellement est faible, correspondant à environ 8.47% du total des précipitations. Mais, l'infiltration est négative, suggérant que l'alimentation du système aquifère ne dépend pas uniquement de l'infiltration, mais provient principalement des bordures calcaires.

L'étude piézométrique révèle deux directions préférentielles pour l'écoulement des eaux souterraines :

- Région de Bekkaria : Les eaux se dirigent du nord, du sud et de l'est vers l'axe de la plaine, puis se déplacent vers l'ouest.
- Région de Tébessa : Les eaux suivent une direction sud-nord pour rejoindre celles venant de l'est, convergeant ainsi vers le même axe central.
- Région de Hammamet : Les eaux prennent une direction ouest-est pour converger vers le centre.

Ces écoulements se rencontrent vers Aïn Chabro et changent de direction vers le nord, via l'exutoire du bassin.

Les données de forages disponibles permettent de classer les zones selon leurs caractéristiques hydrodynamiques comme suivant :

1. Zone d'Aïn Chabro
2. Zone de Bekkaria
3. Zone de Tébessa

Il est important de noter que les ressources en eau de surface sont rares dans la région, ce qui rend les systèmes aquifères la principale source d'eau pour les différents utilisateurs dans le bassin de Tébessa.

L'étude statistique des eaux de la plaine de Tébessa présentent une variabilité significative en termes de caractéristiques physico-chimiques. Leur température varie de 10 à 13°C, leur pH se situe entre 7,01 et 7,42, et leur conductivité électrique oscille entre 480 et 6750 µs/cm.

L'utilisation des méthodes statistiques multi-variées (ANOVA, ACP) nous a permis de confirmer cette variabilité en concentration et en faciès.

Leur faciès prédominant est généralement sulfaté-sodique ou sulfaté-calcique, et chloruré sodique, bien qu'il puisse parfois être bicarbonaté-calcique, en raison de leur étroite relation avec les formations géologiques environnantes.

La qualité chimique des eaux de la région d'étude revêt une importance particulière, car elle constitue un enjeu environnemental crucial et un facteur déterminant dans divers domaines d'utilisation. Il est donc indispensable de bien connaître cette qualité avant de recommander l'eau à différents usagers. Le processus de chimisme des eaux est étroitement lié à certains paramètres, tels que la nature géologique du milieu récepteur et le temps de séjour ou la vitesse de circulation des eaux. Ces facteurs peuvent agir conjointement ou séparément.

Il est recommandé de prendre des mesures permettant d'identifier les éventuelles interdépendances entre la matrice et l'eau en tant que vecteur. Cela permet de caractériser et de classer les ressources hydriques, de suivre la variation spatio-temporelle de leur qualité et d'identifier les aquifères selon leurs faciès. Cette approche facilite la détection et la localisation de toute pollution, permettant ainsi de prendre les mesures préventives appropriées.

Il est important donc, de mener des études approfondies pour interpréter les données recueillies et obtenir des résultats significatifs. Cela implique souvent la collecte de données géologiques, hydrologiques et géophysiques pertinentes, ainsi que leur analyse chimique continue à l'aide de techniques appropriées.

En fin de compte, une compréhension plus approfondie de la nappe alluviale du bassin d'effondrement de Tébessa-Bekkaria-Hammamet permettra de développer des programmes de gestion et d'exploitation de la ressource en eau souterraine qui tiennent compte à la fois des besoins humains et de la préservation de la santé humaine et son environnement.

## Références bibliographiques

- 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.
- Blés J. L. et Fleury (1970)**: Carte géologique 1/50 000 Morsott et notice explicative. Publ. Serv. Geol. Algérie.
- Bouchagoura et al. (1996)** : Synthèse hydrogéologique du système alluvial Hammamet-Tébessa- Bekkaria, Mémoire d'Ing. Univers. Annaba, 84p.
- 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.
- 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.
- 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., Hani A., ManiA J. & Mudry J. (2001)**: Mise en évidence du processus de salinité des eaux superficielles - Vérification par les ACP dans le secteur AnnabaBoucheouf-Guelma. Tribune de l'Eau - Vol. 54 - N°610 - pp. 29-43.
- DJEBASSI, T. (2021)**. Caractérisation et cartographie des risques de pollution, par outil SIG, des eaux souterraines de la plaine de Tébessa (NE Algérien) et essai de gestion intégrée de la ressource en eau. Doctorat L M D, Université de 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 Chélif, incidence cartographique. 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 These de Doctorat (U.S.T B.H.M Alger).
- 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.
- Durozoy G. (1956):** Carte géologique de Tébessa. Feuille 206.
- 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.
- Gaudin G., 1982.** Mathématique et informatique, analyse en composantes principales. INA PG. 43P.
- 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).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. (Jakentaieve).

**O.R.G.M (1992)** : Rapport informatif sur les derniers résultats des travaux réalisés sur les minéralisations périadiapiques 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.

**Philipeau G., 1992**.Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes Principales ? Collection STA-ITCF. 93P.

**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.

**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).

**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.

**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.

**Schoeller H.(1962)** : Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie. Editions, 642 pages.

**Seghir, K. (2008)**. Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). Doctorat Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, 151P

**Tesco-Visiterv, 1982** : Régularisation de l'oued Kebir Ouest (étude hydrologique). 35 pages

**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.

**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.

**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.

WWW.INFOCLIMAT.FR