

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة
Année 2018

Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

**Cartographie et étude hydrochimique des eaux souterraines de la
plaine de Tamlouka, Nord-est algérien.**

Influences lithologiques, climatiques et anthropiques

Option : **Hydrogéologie**

Par : **Samir DJORFI**

Devant le Jury

Président :	Azzedine HANI	Pr.	Univ. Badji Mokhtar, Annaba.
Encadreur :	Mohamed DJIDEL	Pr.	Univ. Kasdi Merbah, Ouargla.
Co-Encadreur :	Saadane DJORFI	Pr.	Univ. Badji Mokhtar, Annaba.
Examineurs :	Sofiane LABAR	Pr.	Univ. Chadli Bendjedid, El Tarf.
	Nafaa BRINIS	MCA	Univ. Mostefa Ben Boulaïd, Batna.
	Lamine SAYAD	MCA	Univ. Badji Mokhtar, Annaba.

ملخص

سهل تاملوكة، الواقع في شرق الجزائر ينتمي إلى منطقة الهضاب العليا القسنطينية، يمتلك حالياً موارد مائية محدودة نسبياً، وهي مياه المكنم الجوفي الموجود في التكوينات الجيولوجية المنتمية للعصر الرابع والمكنم الجوفي العميق المحتوى في الطبقة الكلسية للعصر الجوراسي. عرفت المنطقة تغير ملحوظ في المناخ والنمو الاقتصادي لا سيما في القطاع الزراعي، مما أدى، إلى زيادة الاحتياجات من المياه، من ناحية، وإلى تأثر جودتها، من ناحية أخرى.

إن معالجة هذا الموضوع البحثي فرضته حتمية الفهم الأفضل لآليات عمل نظام مكامن المياه الجوفية، وفقاً للعوامل المناخية والطبيعة الجيومورفولوجية، ابتداء من ظروفها الحدودية إلى خصائصها الهيدروجيولوجية والفيزيوكيميائية، فضلاً عن القضايا البيئية، المتمثلة في وجود الملوثات وأصولها، وبالتالي المساهمة في تطوير وحماية هذه الثروة الطبيعية التي لا يمكن استرجاعها.

اعتماداً على مجموعة البيانات التي تميز نظام مكامن المياه الجوفية والبيئة المحيطة بها، تم تصميم برنامج عمل لرصد التغيرات وفقاً للخصائص الصخرية والطبيعة الطبوغرافية والعوامل المناخية بالإضافة إلى التدخل البشري. مما سمح لنا من دراسة تطور العناصر الهيدروجيولوجية والفيزيوكيميائية خلال العديد من حملات القياس وأخذ العينات (من 2013 إلى 2017).

شملت عملية معالجة البيانات وتمثيلها أدوات حديثة مثل الكيمياء الهيدروجيوكيمياء والتحليل الإحصائي (ACP) ونظام المعلومات الجغرافية (GIS). وكان تفسير نتائج هذه البيانات كما يلي:

يتكون نظام المياه الجوفية في سهل تاملوكة من تراكب مكنان للمياه الجوفية تفصل بينهما طبقة طينية. اولاهما هي طبقة المياه الجوفية السطحية المحتواه في الرواسب الطميية الرملية والصوانية، مع ممرات طينية، تتغذى أساساً من مياه الأمطار حيث تبين خريطتها البييزومترية (المنسوب المائي) أن تدفق المياه الجوفية يتبع تماماً انحدار التضاريس الطبوغرافية. أما ثانيهما فهو المكنم الجوفي العميق المحتوى في تكوينات الحجر الكلسي المتشقق. بحيث يبين وجود مياه حرارية بين 1600 و3000 متر، مصادر تغذيتها الرئيسية هي التكوينات الكربونية في الحواف.

النوعية الكيميائية للمياه من مقبولة إلى متدهورة، الناتجة عن ارتفاع الملوحة المتأثرة بصخور المياه الجوفية والعوامل المناخية (الأمطار ودرجات الحرارة في مناخ شبه جاف). كما نلاحظ بعض الملوثات الناتجة عن الأنشطة الزراعية ومياه الصرف الحضرية، يدعمها الطابع المورفولوجي للسهل (حوض).

الكلمات المفتاحية: شبه جاف، الحوض الهيدروغرافي، الفيضانات، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، المياه الحرارية.

Abstract

The Tamlouka plain located in eastern Algeria and belonging to the Constantine high plains region, currently has relatively limited water resources, namely the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary nappe and the Jurassic limestone aquifer. In recent years, remarkable climate change and economic growth, particularly in agriculture, have taken place, leading to an increase in water needs and deterioration in water quality.

The treatment of this research theme was guided by the concern to better understand the mechanisms of functioning of this aquifer system following climatic inputs and geomorphological nature from its boundary conditions to its hydrogeological and physico-chemical characteristics, as well as environmental issues, namely the presence of pollutants and their origins, and consequently the contribution to the enhancement and protection of this irreversible natural wealth.

Following a set of data characterizing this aquifer system and its environment, an action programme was designed to monitor variations, depending on lithology, topographical conditions, climatic factors and human intervention. We were thus able to study the evolution of hydrogeological and physicochemical parameters during several measurement and sampling campaigns (from 2013 to 2017).

The data processing and representation process used modern tools such as hydrogeochemistry, statistical analysis (PCA) and geographic information system (GIS). The interpretation of these data shows the following:

The aquifer system of the Tamlouka plain consists of the superposition of two aquifers, separated by a clay substrate; the shallow aquifer included in sandy, sandstone and conglomerate alluvial deposits, with clay passages, is fed mainly from meteoric waters. Its piezometric map shows that groundwater flow perfectly follows the topography. The deep aquifer in Jurassic fissured carbonate formations, showing the presence of thermal waters between 1600 and 3000 m, its main sources of supply are the carbonate edge formations.

The chemical quality of the water is acceptable to poor, resulting from high salinity influenced by groundwater lithology and climatic factors (precipitation and temperatures in a semi-arid climate). We note the presence of some pollutants, originating from agricultural activities and urban discharges, favoured by the morphological character of the plain (basin).

Keywords: semi-arid, watershed, flood, remote sensing, GIS, hydrothermalism.

Résumé

La plaine de Tamlouka, située au Nord-est algérien et appartenant à la région des hautes plaines constantinoises, possède, actuellement, des ressources hydriques relativement limitées, à savoir les eaux souterraines de la nappe Mio-Plio-Quaternaire ainsi que la nappe des calcaires jurassique. Ces dernières années, des changements climatiques remarquables ainsi qu'un essor économique, particulièrement agricole, ont eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité des eaux.

Le traitement de ce thème de recherche a été guidé par le souci de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement de ce système aquifère suivant les apports climatiques et la nature géomorphologique depuis ses conditions aux limites jusqu'à ses caractéristiques hydrogéologiques et physico-chimiques, ainsi que les questions d'ordre environnemental, à savoir la présence de polluants et leurs origines, et par conséquent la contribution à la valorisation et la protection de cette richesse naturel irréversible.

Suite à un ensemble de données caractérisant ce système aquifère et son environnement, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations, en fonction de la lithologie, des conditions topographiques, des facteurs climatiques ainsi que de l'intervention anthropique. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres hydrogéologiques et physicochimiques au cours de plusieurs campagnes de mesures et de prélèvements (depuis 2013 jusqu'à 2017).

Le processus de traitement et de représentation des données a fait appel à des outils modernes tels que l'hydrogéochimie, l'analyse statistique (ACP) et le système d'information géographique (SIG). Il ressort de l'interprétation de ces données ce qui suit :

Le système aquifère de la plaine de Tamlouka est constitué par la superposition de deux nappes aquifères, séparées par un substratum argileux ; La nappe superficielle incluse dans les alluvions sableuses, gréseuses et conglomératiques, avec des passages argileux, est alimentée principalement à partir des eaux météoriques ; sa carte piézométrique montre que l'écoulement des eaux souterraines suit parfaitement la topographie de la plaine. La nappe profonde, incluse dans les formations calcaires Jurassique fissurées, montre la présence des eaux thermales entre 1600 et 3000 m ; ses principales sources d'alimentation sont les formations carbonatées de bordures.

La qualité chimique de l'eau est admissible à médiocre, résultant d'une forte salinité influencée par la lithologie de la nappe et les facteurs climatiques (les précipitations et les températures d'un climat semi-aride). On note la présence de quelques polluants, tirant leurs origines des activités agricoles et des rejets urbains, favorisés par le caractère morphologique de la plaine (cuvette).

Mots clés : semi-aride, bassin versant, inondation, télédétection, SIG, hydrothermalisme.

Dédicace

Je voudrais dédier ce modeste travail aux mémoires de mes parents, ceux qui ont veillés pour mon bien être pour leur patience et leur confiance, et qu'avec leurs disparitions une des pages les plus prestigieuses de ma vie était tournée, que Dieu le tout puissant les reçoive dans son vaste Paradis. à mes enfants, Salsabil, Soundes, Zineb et Youcef, à ma femme, à mes frères Salah, Saôdane et Abd Elmadjid, à mes sœurs, à toute ma grande famille, à tous mes amis qui ont toujours été à côté de moi toutes ces années en particulier Mohamed, Djamel, Omar, Rida.... à tous mes collègues du département de géologie de Jijel, à tous ceux qui m'ont encouragé et cru en moi, et à tous ceux qui luttent pour acquérir et développer la science.

Samir

Remerciement

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude, avant tout, à Allah le tout puissant qui m'a donné le courage et la force pour mener au bout ce modeste travail.

Ma première pensée va tout naturellement à mon encadreur le Professeur Djidel Mohamed qui suit fidèlement mon travail. Je tiens à le remercier pour son encadrement et son soutien, je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée en me confiant ce travail. J'ai apprécié sa grande chaleur humaine et son amitié.

Mes remerciements vont aussi à mon frère le Professeur Djorfi saâdane mon co-encadreur pour son intervention efficace, sa disponibilité son aide morale et physique.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont bien voulu accepter de lire et juger ce travail. Le Professeur Hani Azzedine a bien voulu m'honorer en présidant ce jury, de même que les Professeurs Labar Sofiane, Brinis Nafaa, Sayad Lamine qui ont bien voulu y siéger et enrichir le débat.

Mes profondes reconnaissances vont aussi à :

Pr Hadj zobir Soraya pour l'aide qu'elle m'a apportée pour la réalisation des analyses à l'étranger.

Pr Bouloulou Laroussi pour son aide, ses conseils et ses orientations.

M Rihia Djamel et M Medjani Fethi pour leur soutien moral et physique.

Mes remerciements vont également à :

-Tous les enseignants et le personnel des départements de Géologie d'Annaba et de Jijel.

-L'équipe du service technique de la commune de Tamlouka.

-Les responsables de la ferme pilote de Tamlouka et particulièrement M Sellaoui .E.

-Le personnel de la DHW de Guelma surtout Maizi .T

-Le personnel de L'ADE de la willaya de Guelma en particulier Gueroui .M.

-Le personnel du laboratoire d'analyse chimique de la SONATRACH à Skikda.

Je ne puis terminer ces remerciements sans évoquer la patience et les encouragements de mon épouse ainsi mes enfants, pour leurs patience et leurs sacrifice durant mes études.

A tous ceux qui, m'ont permis de jalonner cette période d'études et de recherche par une série de contacts et d'échanges scientifiques, parfois brefs mais toujours fructueux, Je ne puis les nommer tous mais qu'ils soient assurés de ma sincère reconnaissance.

Table des matières

Table des matières	VI
Liste des figures	XIII
Liste des tableaux	XV
Introduction générale	1
Chapitre I : Cadre géographique et géomorphologique	4
1.1. Introduction	4
1.2. Situation géographique :	4
1.3. Situation administrative :	4
1.4. Aperçus économique :	4
1.4.1- Agriculture :	4
1.4.2- Industrie :	5
1.5. Reliefs et géomorphologie :	5
1.5.1- Géomorphologie :	6
1.5.1.1- Les Montagnes :	6
1.5.1.2- Cuvette (graben) :	6
1.5.1.3- Les collines (horst) :	6
1.5.1.4- Le karst :	6
1.5.1.5- Les lits des oueds :	7
1.6- Réseau hydrographique :	7
Chapitre II : Hydroclimatologie	8
2.1. Introduction :	8
2.2. Analyse des données climatiques :	8
2.2.1. Les données disponibles et analyse des paramètres climatiques :	8
2.2.1.1. Les précipitation :	8
2.2.1.2. Variation interannuelle des précipitations :	9
2.2.1.3. Distribution mensuelle et saisonnière de précipitations :	9
2.2.1.4. Coefficient pluviométrique (Cp) :	10
2.2.2. Température de l'air :	11

2.2.3. Relation Précipitation–température : Diagramme pluvio-thermique :	12
.....	
2.2.4. Détermination des indices climatiques :	13
2.2.4.1. Calcul de l'indice d'aridité :	13
2.2.4.2. L'indice climatique de De Martonne(1923) :	13
2.2.4.3. L'indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923) :	13
2.3. Climagramme de Louis Emberger :	14
2.4. Bilan hydrique :	15
2.4.1. Étude de l'évapotranspiration :	15
2.4.1.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :	16
2.4.1.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle :	17
2.4.2. Estimation des réserves facilement utilisables (RFU) :	17
2.4.3. Formules de vérification :	18
2.4.4. Interprétation du bilan hydrique :	18
2.5. Estimation de la lame d'eau écoulée :	20
2.5.1. Le ruissellement :	20
2.5.2. L'infiltration :	21
2.6. Evaluation de la sécheresse.....	21
2.6.1. Introduction.....	21
2.6.2. Définition de la sécheresse.....	21
2.6.3. La Classification de la sécheresse.....	21
2.6.4. Les indices de sécheresse.....	22
2.6.5. Evaluation et surveillance de la sévérité de la sécheresse.....	22
2.6.5.1. Les caractéristiques de la sécheresse météorologique.....	23
2.6.5.2. Les indices de la sécheresse météorologique.....	23
<i>a- L'indice des précipitations normalisées.....</i>	<i>23</i>
<i>b- L'indice de la reconnaissance de la sécheresse.....</i>	<i>24</i>
<i>c- Evapotranspiration potentielle (ETP) selon la Méthode de Thornthwaite.....</i>	<i>25</i>
2.6.6. Surveillance et évaluation de la Sécheresse :	25
2.6.6.1. Corrélation entre le SPI et le RDI :	25

2.6.6.2. Evaluation de la Sécheresse Météorologique :	27
<i>a- Pour la Sécheresse Météorologique à court terme</i> :	27
<i>b- Pour la Sécheresse à moyen et au long terme</i> :	28
2.7. Conclusion :	29
Chapitre III : Cadre géologique et structural	30
3.1. Introduction :	30
3.2. Lithostratigraphie :	31
3.2.1. Unité de Djebel Djaffa	31
3.2.1.1. Jurassique :	31
3.2.1.2. Crétacé Inferieur :	32
<i>a- Hauterivien</i> :	32
<i>b- Barrémien</i> :	32
<i>c- Aptien</i> :	32
<i>d- Albien</i> :	32
<i>e- Cénomaniens</i> :	33
<i>f- Turonien</i> :	33
3.2.1.3- Sénonien :	33
<i>a- Coniacien</i> :	33
<i>b- Santonien</i> :	33
<i>c- Campanien</i> :	33
3.2.2. Nappe néritique de Constantine	33
3.2.2.1- Barrémien :	34
3.2.2.2- Aptien :	34
3.2.2.3- Albien :	34
3.2.2.4- Cénomaniens :	34
3.2.3. Unité des Sellaouas	34
3.2.3.1- Aptien :	34
3.2.3.2- Albien :	34
<i>a- Albien Inferieur et moyen</i> :	34
<i>b- Albien supérieur</i>	34
3.2.3.3- Cénomaniens :	34
3.2.3.4- Turonien :	35
3.2.3.5- Sénonien :	35
<i>a- Coniacien</i> :	35
<i>b- Santonien</i> :	35
<i>c- Campanien</i> :	35
<i>d- Maestrichtien</i> :	35
3.2.3.6- Paléogène :	35
3.2.3.7- Eocène :	36

- <i>Dano-Montien</i> :	36
3.2.4. Nappe tellienne:	36
3.2.4.1- Sénonien inférieur :	36
3.2.4.2- Sénonien supérieur :	36
3.2.4.3- Paléocène :	36
3.2.4.4- Eocène :	36
3.2.5. Nappe numidienne de Djebel Oncel :	36
3.2.6. Le remplissage mio plio quaternaire :	37
3.2.6.1- Mio Pliocène :	37
3.2.6.2- Quaternaire :	37
3.3. Paléogéographie et tectonique	39
3.3.1- Paléogéographie.....	39
3.3.2- Tectonique :	40
3.3.3. Conclusion :	41
3.4. Etude géophysique :	41
3.4.1. Historique.....	42
3.4.2. But de l'étude	42
3.4.3. Problème posé pour la géophysique :	42
3.4.4. Interprétation :	43
3.4.5. Les sondages Etalons :	43
2.4.6. Lecture des résultats du point de vue lithologique :	44
2.4.6.1. Nature du remplissage continentale :	44
3.4.6.2. Nature du substratum :	44
3.4.6.3. Interprétation des résultats des coupes géo-électrique :	45
3.4.7. Conclusion :	47
Chapitre IV : Etude Hydrogéologique	48
4.1. Introduction :	48
4.2. Inventaire des points d'eau :	48
4.2.1. Les forages :	49
4.2.2. Les sources :	49

4.3. Inventaire des puits :	49
4.4. Les différents aquifères dans la plaine de Tamlouka :	49
4.5. Identification des nappes :	51
4.5.1. Aquifère à nappe libre dans les dépôts du quaternaires :	51
4.5.2. Aquifère à nappe captive dans les dépôts Mio-Plio-Quaternaires	51
4.5.3. Aquifère à nappe captive dans les dépôts de l'Eocène :	51
4.5.4. Aquifère à nappe captive dans les formations maestrichtiennes :	51
4.5.5. Aquifère à nappe captive dans les calcaires jurassiques :	52
4.6. Alimentation des nappes :	52
4.7. Etablissement des cartes piézométriques :	52
4.7.1. Nappe profonde :	52
4.7.2. Nappe superficielle :	53
4.7.2.1. L'interprétation de la carte piézométrique de Tamlouka nappe superficielle (période basses eaux, Sept. 2013) :	54
4.7.2.2. Interprétation de la carte piézométrique des hautes eaux	55
4.8. Conclusion :	56
Chapitre V : Cartographie d'occupation du sol par télédétection et SIG	56
5.1. Introduction	56
5.2. Méthodologies du travail	57
5.2.1. Cartographie géologique	58
5.2.2. Cartographie des pentes	59
5.2.3. Cartographie du couvert végétal	60
5.2.4. Cartographie d'occupation du sol	60
5.3. Résultats et interprétations	61
5.3.1. Combinaison entre les classes géologiques et celles des pentes	65
5.3.2. Combinaison entre l'utilisation du sol et les classes de pente	66
5.3.3. Combinaison entre l'utilisation du sol et les classes géologiques	67

5.3.4. Cartographie des classes d'utilisation des terres et des zones inondables	68
5.4. Conclusions	69
Chapitre VI : Etude hydrochimique	70
6.1. Introduction :	70
6.2. Mode d'échantillonnage :	70
6.2.1. Prélèvement :	70
6.2.2. Mesures in situ :	70
6.3. Paramètres physico-chimiques :	70
6.3.1. Paramètres physiques :	71
6.3.1.1. Température :	71
6.3.1.2. Le potentiel d'hydrogène pH :	71
6.3.1.3. La dureté totale TH (°F) :	71
6.3.1.4. La conductivité (CE) :	72
6.3.2. Paramètres chimiques :	73
6.3.3. Formules ioniques et faciès chimique :	73
6.3.4. Représentation graphique des analyses chimiques :	74
6.3.4.1. Diagramme de Piper :	74
6.3.4.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff :	75
6.3.5. Les éléments chimiques et leurs origines :	76
6.3.5.1. Calcium (Ca^{2+})	76
6.3.5.2. Magnésium (Mg^{2+}) :	77
6.3.5.3. Potassium et sodium (K^+ , Na^+) :	78
6.3.5.4. Les chlorures (Cl^-) :	79
6.3.5.5. Les Sulfates (SO_4^{2-}) :	80
6.3.5.6. Bicarbonates (HCO_3^-) :	81
6.3.6. Etudes des valeurs relatives :	81
6.3.6.1. Rapports Caractéristiques :	81
<i>a- Le rapport (rSO_4^{2-}/rCl^-)</i> :	82
<i>b- Le rapport (rMg^{2+}/rCa^{2+})</i> :	82
<i>c- Le rapport (rNa^+/rCl^-)</i> :	83
6.3.6.2. L'indice d'échange de base (i.e.b) :	84

6.4. Aptitude des eaux pour l'irrigation :	85
6.4.1. Principe du diagramme :	85
6.4.2. Interprétation :	86
6.5. Normes et qualités des eaux :	87
6.5.1. Les Chlorures (Cl ⁻) :	88
6.5.2. Les Sulfates (SO ₄ ²⁻) :	88
6.5.3. Les Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) :	88
6.5.4. Le Calcium (Ca ²⁺) :	89
6.5.5. Le magnésium (Mg ²⁺) :	89
6.5.6. Le Sodium (Na ⁺) :	89
6.6. Etude statistique	89
6.6. 1. Analyse en composantes principales.....	89
6.6.1.1. Valeur propre.....	91
6.6.1.2. Analyse du cercle ACP (F1x F2).....	92
6.6.2. Classification Ascendante Hiérarchique des eaux souterraines (CAH)	94
6.7. Conclusion :	95
Chapitre VII : Caractérisation des eaux souterraines hydrothermales	96
7.1. Introduction	96
7.2. Stratégie d'échantillonnage.....	97
7.3. Géochimie	98
7.3.1 Géothermométrie	104
7.3.2 Modèle de fonctionnement.....	105
7.4. Conclusion	106
Conclusion générale.....	107
Références bibliographiques	109
Annexes	116

Liste des figures

Fig. 1. Situation géographique de la plaine de Tamlouka	5
Fig. 2. Réseau hydrographique du bassin versant d'oued El Maleh	7
Fig. 3. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles dans la station d'Ain Makhlouf (1986-2011).....	9
Fig. 4. Variation interannuelle de la précipitation dans la station d'Ain Makhlouf (1986-2011). 9	
Fig. 5. Distribution saisonnière des précipitations dans la station Ain Makhlouf (1986-2011)..	10
Fig. 6. Variation des températures moyennes mensuelles dans la station de Guelma (1986-2011).....	12
Fig. 7. Diagramme pluvio-thermique - station d'Ain Makhlouf (1986/2011)	12
Fig. 8. Climagramme d'Emberger de la station d'Ain Makhlouf.	15
Fig. 9. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite	19
Fig. 10. Variations mensuelles des résultats du bilan hydrique	20
Fig. 11. Diagramme de corrélation entre les SPI et les RDI pour la station de Guelma (1981-2015).....	26
Fig. 12. Comparaison des SPI 1 et RDI1 pour la station de Guelma (1981-2015) avec une Pas de temps de 1 mois.....	27
Fig. 13. Comparaison des SPI 3 et RDI3 pour la station de Guelma (1981-2015) avec une Pas de temps de 3 mois.....	27
Fig. 14. Comparaison des SPI 6 et RDI6 pour la station de Guelma (1981-2015) avec une Pas de temps de 6 mois.....	28
Fig. 15. Comparaison des SPI 9 et RDI9 pour la station de Guelma (1981-2015) avec une Pas de temps de 9 mois.....	28
Fig. 16. Comparaison des SPI 12 et RDI12 pour la station de Guelma (1981-2015) avec une Pas de temps de 12 mois.	29
Fig. 17. Carte géologique de la plaine de Tamlouka modifiée (Vila, 1980)	39
Fig. 18. Carte des discontinuités électriques – Failles probables (Djorfi et al. 1993).....	44
Fig. 20. Coupes géo-électriques transversales (Djorfi et al. 1993)	45
Fig. 19. Coupes géo-électriques longitudinales (Djorfi et al. 1993)	46
Fig. 21. Carte d'inventaire des points d'eau de la plaine Tamlouka 2013	48
Fig. 22. Les logs de quelques forages réalisés sur la plaine (DHW Guelma)	50
Fig. 23. Coupe hydrogéologiques schématisques des forages (DHW Guelma)	50
Fig. 24. Carte piézométrique de la plaine de Tamlouka nappe profonde (Avril).....	53
Fig. 25. Carte piézométrique de la plaine de Tamlouka nappe superficielle (Septembre 2013). 54	
Fig. 26. Carte piézométrique de la plaine de Tamlouka nappe superficielle (Avril 2014).	55
Fig. 27. Quantification des surfaces des différentes classes	61
Fig. 28. Carte géologique de la zone d'étude.....	62
Fig. 29. Carte des pentes	63

Fig. 30. Carte d'occupation du sol	64
Fig. 31. Relation entre les classes des pentes et les formations géologiques	65
Fig. 32. Relation entre les classes d'occupation du sol et les pentes	66
Fig. 33. Relation entre les classes d'occupation du sol et les formations géologiques	67
Fig. 34. Carte d'occupation du sol et risque d'inondation	68
Fig. 35. Carte iso conductivité des eaux souterraines, (Avril, 2014)	72
Fig. 36. Diagramme de Piper appliqué aux eaux souterraines de la plaine de Tamlouka (Avril 2014).....	74
Fig. 37. Représentation graphique des faciès chimiques sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Avril, 2014).....	75
Fig. 38. Carte iso teneurs de Ca^{2+} , (Avril 2014).....	76
Fig. 39. Carte iso teneurs de Mg^{2+} , (Avril 2014)	77
Fig. 40. Carte iso teneurs Na^+ , K^+ (Avril 2014)	78
Fig. 41. Carte iso teneurs du Cl^- (Avril 2014).....	79
Fig. 42. Carte iso teneurs du SO_4^{2-} (Avril 2014)	80
Fig. 43. Carte iso teneurs de HCO_3^- (Avril 2014)	81
Fig. 44. Carte iso rapport (rSO_4^{2-}/rCl^-).....	82
Fig. 45. Carte iso-rapport (rMg^{2+}/rCa^{2+})	83
Fig. 46. Carte iso-rapport (rNa^+/rCl^-)	84
Fig. 47. Carte de l'indice d'échange de base	85
Fig. 48. Représentation graphique de l'aptitude des eaux à l'irrigation.....	87
Fig. 49. Histogramme des valeurs propres.....	91
Fig. 50. Cercle des corrélations des variables dans le plan F1xF2.....	93
Fig. 51. Projection des individus sur le plan factoriel F1xF2	94
Fig. 52. Classification ascendante hiérarchique des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka (Avril 2014).....	95
Fig. 53. Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux thermales du bassin de Tamlouka.....	99
Fig. 54. Diagramme de l'institut international des recherches géothermiques de référence.....	100
Fig. 55. Diagramme IRG Appliqué aux eaux de la région de Tamlouka.....	101
Fig. 56. Diagrammes de Langelier-Ludwig appliqués aux eaux thermales du bassin de Tamlouka.....	102
Fig. 57. Relation Na-Cl des eaux thermales du bassin de Tamlouka.	102
Fig. 58. Relation Ca-SO4 des eaux thermales du bassin de Tamlouka.....	103
Fig. 59. Relation conductivité- $HCO_3^-/(Cl^-+SO_4^{2-})$ des eaux thermales du bassin de Tamlouka.	103
Fig. 60. Modèle conceptuel des eaux thermales du bassin de Tamlouka-Ain Makhoulf.....	106

Liste des tableaux

Tableau 1. Coordonnées des stations météorologiques.....	8
Tableau 2. Distribution saisonnières des précipitations (1986-2011).	9
Tableau 3. Précipitations annuelles en (mm) et coefficients pluviométriques dans la station d'Ain Makhoulf (1986-2011).....	11
Tableau 4. Indice mensuel d'aridité (1986-2011).....	14
Tableau 5. Paramètres du climagramme d'Emberger	14
Tableau 6. L'ETR annuelle selon Turc	16
Tableau 7. Comparaison entre les deux méthodes de calcul.....	17
Tableau 8. Bilan hydrique de Thornthwaite de la station d'Ain Makhoulf (1986-2006).....	18
Tableau 9. Ruissellement selon la formule Tixiront Berkouloff.....	20
Tableau 10. Estimation de l'infiltration en (mm).....	21
Tableau 11. Valeurs de l'indice SPI.....	24
Tableau 12. Probabilité d'occurrence.	24
Tableau 13. Classification de la sécheresse selon les indices météorologiques SPI et le RDI. (Asadi Zarch et al., 2011).....	24
Tableau 14. Coefficient de corrélation (R) entre les SPI et les RDI à différents pas de temps...	26
Tableau 15. Corrélation entre la géologie et les résultats géophysiques.....	43
Tableau 16. Inventaire des forages de la plaine de Tamlouka (DHW de Guelma).....	49
Tableau 17. Inventaire des sources "plaine de Tamlouka"	49
Tableau 18. Taux d'occupation des classes géologiques en fonction des pentes (en %)	65
Tableau 19. Taux d'occupation des classes de couverture terrestre en fonction des pentes (en %)	66
Tableau 20. Taux d'occupation des classes de couverture terrestre en fonction des classes géologiques. (en %).....	67
Tableau 21. Températures (°C) des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka (Avril 2014)..	71
Tableau 22. Classification des eaux selon le pH.....	71
Tableau 23. Dureté totale TH (°F) des eaux des puits analysés, plaine de Tamlouka (Avril 2014)	71
Tableau 24. Conductivité Electrique des eaux souterraines, plaine de Tamlouka (Avril 2014).	72
Tableau 25. Formules ioniques et faciès chimique en méq/l, (Avril, 2014)	73
Tableau 26. Faciès chimiques des eaux selon le diagramme de Schoeller-Berkouloff	76
Tableau 27. Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation par la méthode SAR	86
Tableau 28. Classe des qualités des eaux des puits pour l'irrigation	86
Tableau 29. Normes OMS de Potabilité d'eau.....	87
Tableau 30. Classification des eaux et norme pour les chlorures	88

Tableau 31. Classification des eaux et norme pour les Sulfates	88
Tableau 32. Classification des eaux et norme pour les Bicarbonates	88
Tableau 33. Classification des eaux selon la teneur en calcium	89
Tableau 34. Classification des eaux selon la teneur en magnésium.....	89
Tableau 35. Classification des eaux selon la teneur en Sodium.....	89
Tableau 36. Moyenne et écart-type des variables physico chimiques	90
Tableau 37. Matrice des corrélations Avril 2014.....	90
Tableau 38. Valeurs propres et pourcentage des sept axes principaux	91
Tableau 39. Corrélations entre les variables et les axes principaux.....	91
Tableau 40. Concentrations des éléments majeurs et silice (mg/L).....	98
Tableau 41. Indices de stabilité des eaux thermales du bassin de Tamlouka.....	104
Tableau 42. Relation profondeur des aquifères/température des eaux thermales Bassin de Tamlouka.....	105
Tableau 43. Annexe 1 : Inventaire des puits de la plaine de Tamlouka (2013-2014).....	116
Tableau 44. Annexe 2 : Températures mensuelles durant la période 1986-2011 (station de Guelma).....	116
Tableau 45. Annexe 3 : Précipitations mensuelles durant la période 1986.2011 (station de Ain Makhlouf).....	117
Tableau 46. Annexe 4 : Résultats physico chimiques des eaux de la plaine de Tamlouka (Avril 2014).....	118
Tableau 47. Annexe 4 : Résultats chimique de la plaine de Tamlouka (Avril 2014).....	119

Liste des symboles et abréviations

Symboles et abréviations	significations	Symboles et abréviations	significations
RFU	Reserve facilement utilisable	SIG	Système d'information géographique
DA	Déficit agricole	Cp	Coefficient pluviométrique
I	Infiltration	ETP	Evapotranspiration potentielle
AMS	Agence mondiale de la sécheresse	SPI	Standardized pluviométrie index (indice de précipitations normalisées)
NCDC	Nationale climatique data centre (Centre national des données climatiques).	RDI	Reconnaissance drought index (Indice de la reconnaissance de la sécheresse)
δ	Ecart type	ph	potentiel d'hydrogène
N	Nombre d'heure de lumière	TH	Titre hydrotimétrique (dureté)
Dm	Température moyenne	CE	Conductivité électrique
BEICIP	Bureau d'étude internationale de consultation et d'investigation pétrolière	CAH	Classification ascendante hiérarchique
Q	Quaternaire	DHW	Direction de l'hydraulique de la willaya
mp	Meo-pléocène	IRG	Institut de recherches géothermiques
J	Jurassique	ETR	Evapotranspiration réelle
e ^c	Eocène calcaire	R	Coefficient de corrélation
e ^m	Eocène marneux	méq	Milliéquivalent par litre
M ^c	Miocène	SAR	Sodium adsorption ration (taux d'adsorption de sodium)
Cam	Campanien	OMS	Organisation mondiale de la santé
MNT	Model numérique de terrain	AEP	Alimentation en eau potable
DEM	Diffraction électronique microscopique	P _{moy}	Pluviométrie moyenne annuelle
NDVI	Indice de normalisation de différentes végétations	A	Indice d'aridité de De Martonne
μ s	Micro siemens	ACP	Analyse en composante principale
°F	Degré français	μ m	Micromètre

Introduction générale

Introduction générale

L'eau, élément primordial dans la vie, joue un rôle important dans le développement socio-économique d'un pays. Ce dernier ne pourrait se concrétiser sans la connaissance parfaite de toutes les données régissantes d'une manière ou d'une autre l'évolution spatio-temporelle de cette richesse inépuisable. La pénurie d'eau est devenue un problème crucial vécu par toutes les sociétés. Il existe aujourd'hui une crise de l'eau, mais cette crise n'est pas due à son insuffisance à satisfaire nos besoins ; elle résulte plutôt d'une si mauvaise gestion de cette ressource que des milliards de personnes et l'environnement en souffrent grandement (Burton et al., 2001).

Actuellement l'Algérie se trouve confrontée au manque de réserves superficielles, et à l'exploitation excessive des ressources souterraines ; ajouté à cela la pollution des eaux qui commence à se sentir dans certaines régions. En outre pour remédier à tous ces problèmes, une évaluation qualitative et quantitative, ainsi qu'une exploitation rationnelle des ressources en eaux superficielles et souterraines s'imposent.

La plaine de Tamlouka, située dans le Nord Est algérien, que nous étudions dans le cadre de ce projet a fait l'objet, durant ces dernières années, de nombreux travaux de recherches (Djorfi et al. 1993 ; Hemila et Kowalski, 2002 ; Sebah et Safi, 2014 ; Gueroui, 2015 ; Telali, 2016). Les résultats de ces travaux ont mis en relief la dégradation de la qualité des ressources hydriques.

La plaine de Tamlouka est une zone à climat semi-aride. Elle renferme dans son sous-sol un système aquifère pour l'alimentation en eau potable des communes de Tamlouka, Oued Zenati, Ain Makhlof, Ain Reggada et Borj Sabat. Cette situation a engendré une menace constante, tant, sur la quantité que sur la qualité des ressources en eau.

La gestion de ces dernières est donc indispensable et requiert des compétences approfondies et pluridisciplinaires afin de préserver leur pérennité quantitative et qualitative et de répondre aux questions d'urgence de demande sans atteinte à l'équilibre naturel. La connaissance, donc, des facteurs (climatiques, géologiques, et anthropiques) régissant l'évolution de ces ressources s'avère indispensable.

Ce travail s'articule particulièrement sur les variations spatiotemporelles du chimisme des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka. Il s'agit de mettre en relief l'influence des conditions climatiques, lithologiques et des actions anthropiques sur leur composition chimique.

Il s'intéresse, également, à l'étude de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines en rapport avec leur usage quotidien (AEP, irrigation, industrie), d'où la nécessité d'un suivi rigoureux de leur qualité et leur degré de potabilité ou de pollution.

Dans le souci d'améliorer la connaissance des enjeux hydrauliques, environnementaux et anthropiques à l'échelle de la plaine de Tamlouka, la technique de la télédétection avec le système d'information géographique (SIG) a été utilisée. Il s'agit de l'identification de l'occupation du sol et la détermination des zones inondables pour la préparation des cartes de risques d'inondation pour les zones vulnérables.

Ainsi, dans cette étude nous allons essayer de faire le point sur l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur l'état de la dégradation des eaux souterraines de la région à travers les sept chapitres suivants :

Le premier chapitre, présente le contexte général de la région d'étude du point de vue physico-géographique (situation géographique, étude socio-économique, description des caractéristiques géomorphologiques).

Le deuxième chapitre, définit les caractéristiques hydro-climatologiques et évalue les différents termes du bilan hydrique pour pouvoir donner une estimation de la réserve en eau de la nappe. Il est, aussi, question de faire le point sur le changement climatique et son influence sur cette réserve.

Le Troisième chapitre est consacré à l'étude géologique et structurale de la région et leur relation avec les eaux souterraines. Une étude géophysique, donne une explication physique sur la répartition des roches réservoirs en profondeurs. La connaissance des accidents tectoniques par les discontinuités géoélectriques permet de localiser les zones favorables à l'implantation des forages pour l'exploitation des eaux des aquifères profonds. En effet, la structure en horst (zone d'alimentation) et graben (zone d'accumulation) de la plaine reflète l'importance hydrogéologique de cette dernière.

Quatrième chapitre, consacré à l'étude hydrogéologique ; la limitation des aquifères ainsi que la détermination des paramètres hydrodynamiques. On se sert des cartes piézométriques à différentes périodes pour déceler les fluctuations du niveau piézométrique, le sens d'écoulement, les zones d'alimentations et d'accumulation des eaux.

Cinquième chapitre, cartographie et synthèse, consacré à la détermination des enjeux hydrauliques, environnementaux et anthropiques à l'échelle de la plaine. Il s'agit de l'identification de l'occupation du sol et de son utilisation à l'aide du système d'information géographique (SIG).

Sixième chapitre, partie essentielle de cette thèse, il est consacré à l'hydrochimie et La connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux. L'état hydrochimique devrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes d'échange et d'alimentation et de caractériser, entre autres, l'évolution spatiotemporelle du chimisme des eaux des aquifères sous l'influence des facteurs naturels et des actions anthropiques (contamination lithologique et pollution anthropique).

Septième chapitre, permet l'identification des interactions eaux superficielles / eaux souterraines. Un volet spécial est réservé aux caractéristiques hydrothermales des eaux souterraines profondes. Ici, la thermalité des eaux est acquise dans des conditions lithostructurales en relation avec les formations calcaires karstifiées, d'une part, et le réseau de failles profondes relativement dense, d'autre part.

Selon les différentes études réalisées précédemment (citées plus haut) ; La plaine de Tamlouka renferme deux principaux aquifères : le premier est localisé dans les formations Mio-Plio-Quaternaires formant la nappe superficielle et exploitée par des puits domestiques pour l'irrigation et l'alimentation du bétail. Le deuxième aquifère, localisé, dans les formations calcaires et marno-calcaires du type Djebel Djaffa et telliennes, constitue le plus important horizon aquifère profond sous forme de nappes captives à semi-captives exploitées par des forages dont la profondeur peut atteindre 300m.

Chapitre I :

*Cadre géographique et
géomorphologique*

Chapitre I : Cadre géographique et géomorphologique

1.1. Introduction

La géographie est la base de toute étude de terrain, surtout pour l'étude géologique, elle délimite le secteur étudié et détermine la distribution des facteurs physico-géographique caractérisant cet espace.

1.2. Situation géographique :

La plaine de Tamlouka fait partie des hautes collines constantinoises ; située à l'Est de Constantine, elle s'étend de 6° 20' à 6° 40', de longitude Est et de 40° à 40° 30' de latitude Nord ; plus exactement entre les coordonnées Lambert : $x = 892,907$ et $y = 312,334$.

Elle fait partie du bassin de la Seybouse et située à environ 52 km ou Sud-ouest de ville de Guelma.

La plaine de Tamlouka qui s'étend en longueur dans la feuille d'Ain Regada notamment autour du village de Tamlouka. Elle forme une cuvette, allongée selon une direction Nord Est-Sud-ouest, bien encadrée par Chebka des Sellaouas au Sud-est, Djebel Djaffa au Nord-ouest et à l'Ouest, Djebel Ansel au Nord, à l'Est les collines de AinMakhlouf constituent sont prolongement oriental jusqu'à l'oued Chenniour. Elle a la forme d'un couloir arqué depuis la feuille de Ain Babouche, au Sud-ouest, jusqu'aux contre fort de la Mahouna à l'Est.

La plaine de Tamlouka d'une superficie de 215 km² occupe une position de dépression par rapport à la chebka des Sellaouas et de Djebel Djaffa. Le seul relief marquant cette vaste étendue est constituée par la butte d'Ain Arko, localisée au centre de la plaine, et les collines d'Ain Makhlouf.

1.3. Situation administrative :

La plaine de Tamlouka fait partie de la wilaya de Guelma. La ville de Tamlouka présente un point de transition très actif car elle constitue le carrefour de trois grandes villes : Constantine, Guelma, Oum El Bouaghi (Fig. 1).

1.4. Aperçus économique :

1.4.1- Agriculture :

La plaine de Tamlouka présente une activité agricole développée, qui joue un rôle très important dans l'économie de la région, elle occupe la première place au sein des activités de la population rurale, on trouve surtout l'agriculture du blé et de pomme de terre, qui demande un volume très important d'eau pour l'irrigation.

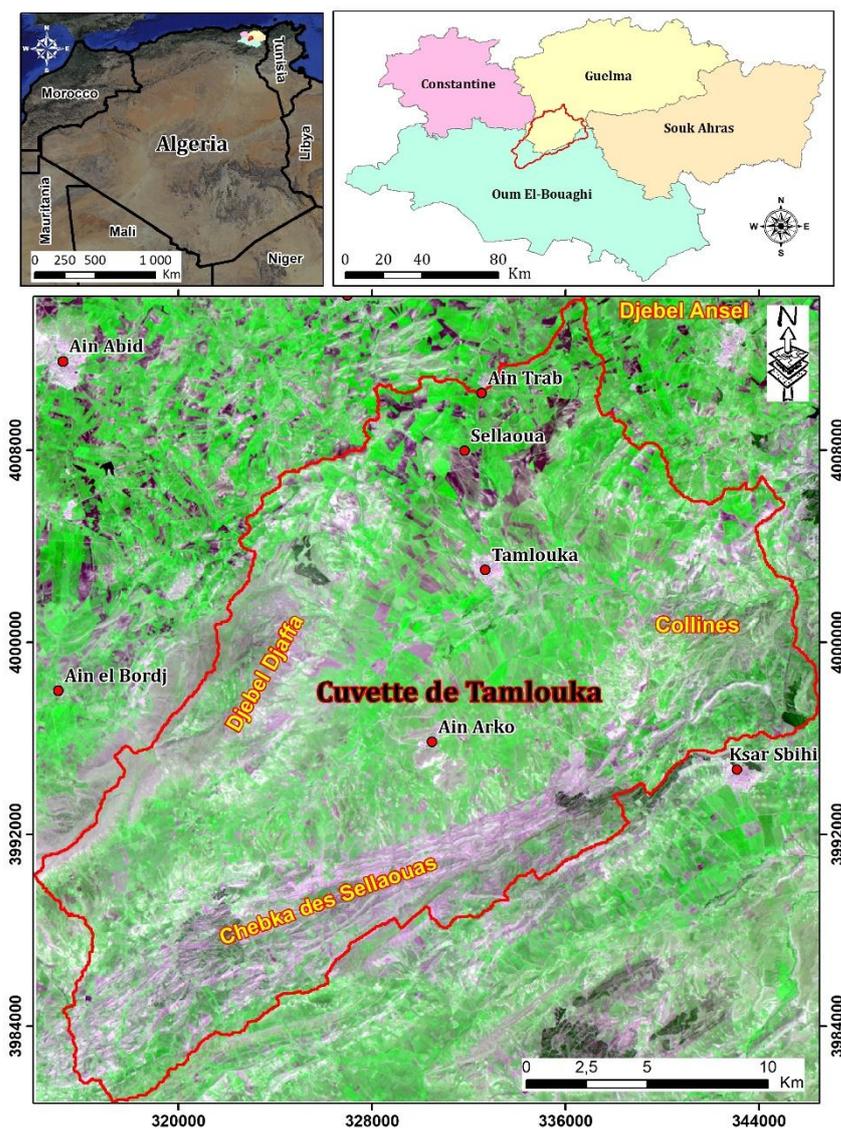


FIG. 1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA PLAINE DE TAMLOUKA

1.4.2- Industrie :

L'industrie est presque inexistante exceptées les quelques installations à caractère local (carrière, fabrique de carrelage etc...)

1.5. Reliefs et géomorphologie :

La région étudiée est caractérisée, dans son ensemble, par une topographie plate sauf pour la butte d'Ain Arko au centre de la plaine. Ses bordures sont constituées par le Djebel Djaffa à l'Ouest et au Nord-Ouest, la Chebka des Sellaouas au Sud et au Sud- Est. La pente générale est faible ; elle tend vers le Nord-Est.

Les altitudes dans la plaine suivent aussi la pente topographique. Elles prennent des valeurs élevées dans la partie nord de la plaine pour atteindre 825 m à Sebaa Mzair. Les plus faibles altitudes peuvent atteindre 732m au niveau d'Oued Mgaisba.

En ce qui concerne les collines d'Ain Arko l'altitude élevée se trouve dans la butte exploitée et prend une valeur de 929 m (point culminant).

1.5.1- Géomorphologie :

Les formes géomorphologiques existantes sont toutes liées à la tectonique qui a affecté la région « Notice explicative de la carte géologique de Constantine ». Le remplissage de la cuvette s'est effectué pendant la période Mio-Plio-Quaternaire, par le phénomène d'érosion du matériel existant dans la région limitrophe, les principales formes existantes dans la région sont :

1.5.1.1- Les Montagnes :

A la bordure Nord-Ouest, de la plaine se situent les monts de Djebel Djaffa et Djebel Stitira constitués, essentiellement, par des formations carbonatées d'âge secondaire. Ils sont marqués par une tectonique cassante se manifestant par des failles et une intense fracturation. On y rencontre également Djebel Ain Debagh (992 m) Djebel Fom Ain Alik (1073 m) et Kef El Mohgan. La limite sud est marquée par les reliefs relativement modérés de la Chebka des Sellaouas (900-1189m). Vers le Nord Est, les collines du bassin d'Ain Makhlouf (900 m) constituent le prolongement oriental de la plaine. Au Nord, on rencontre l'unité numidienne le Dj. Ansel (1148m)

1.5.1.2- Cuvette (graben) :

La cuvette de Tamlouka est marquée par un relief plat dont la pente générale est dirigée vers le Nord-Est ; l'altitude varie de 800 à 730m. La plaine de Tamlouka est la conséquence de mouvements tectoniques. Selon les données géophysiques, il s'agit d'un graben dont la base est probablement constituée de calcaires « métamorphisés » suite à la grande tectonique qui a affecté la région et cela à différentes profondeurs.

1.5.1.3- Les collines (horst) :

Elles sont situées à mi-chemin entre Balta et Tamlouka ; ils sont la conséquence d'une compression N-W suivie par une distension Plio-Quaternaire subméridienne N-S. D'après C. Voute, les collines d'Ain Arko peuvent révéler une structure comparable à celle de Djebel Djaffa.

1.5.1.4- Le karst :

La karstification est bien développée dans le calcaire de la région qui présente une micro-fracturation intense. En présence des eaux météoriques et par des processus chimiques et mécaniques cette fissuration va donner des formes karstiques telles que les cavités dans

Djebel Djaffa. Les fissures permettent une infiltration quasi-totale et rapide des eaux superficielles ; ce qui assure une alimentation efficace des réserves.

1.5.1.5- Les lits des oueds :

On les rencontre dans les remplissages du Quaternaire dans la région traversées par les oueds qui creuse au fur et à mesure de temps, le matériel détritique est composé principalement de ; sable, gravier ... etc.

1.6- Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique (Fig. 2) présente un réseau de drainage très dense, constitué essentiellement par : Oued Mgaisba ; qui est tributaire de Oued Cheref, et ces affluents, Oued Maleh qui prend naissance dans les monts de Djebel Amar et rejoint Oued Mgaisba au centre dans la plaine. Notons aussi l'existence d'autres affluents tels que Oued Bardo et également de plusieurs chaabats qui descendent de Djebel Djaffa de la Chebka des Sellaouas et de Djebel Ansel.

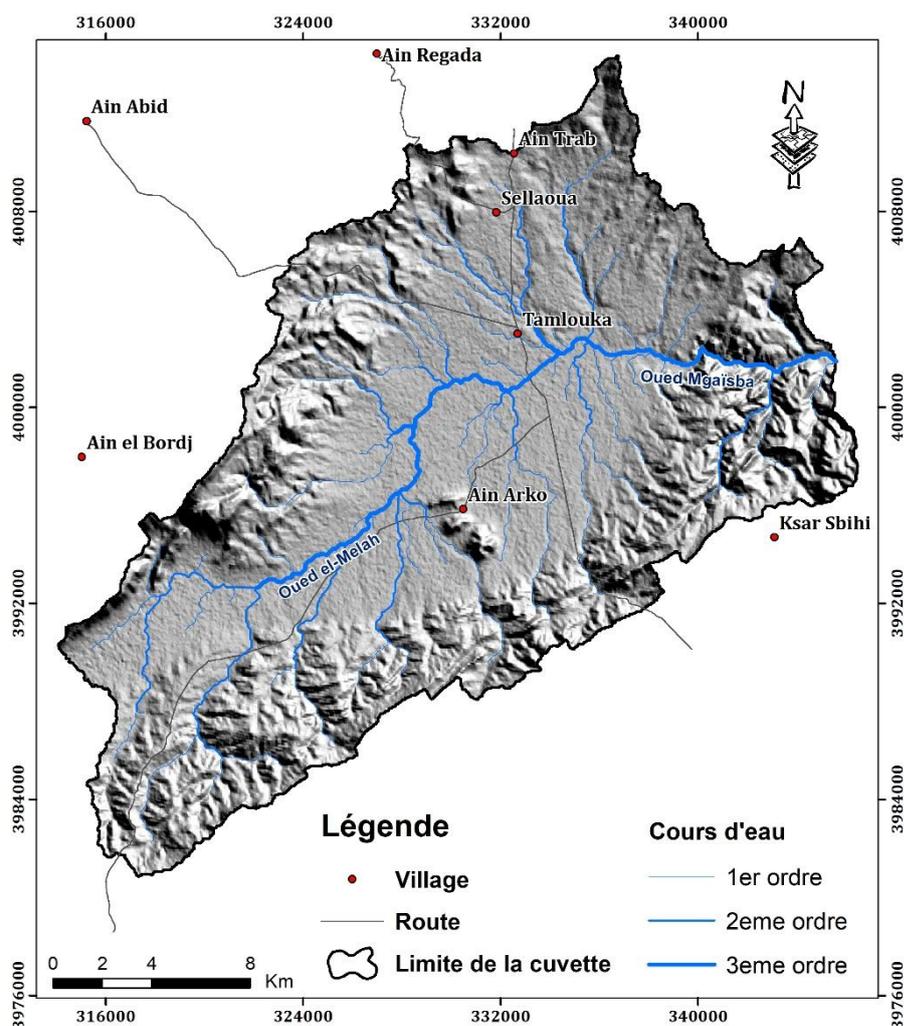


FIG. 2. RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT D'OUED EL MALEH

Chapitre III :

Hydroclimatologie

Chapitre III : Hydroclimatologie

2.1. Introduction :

Les facteurs qui déterminent le climat sont la précipitation, l'humidité, la température et le vent. La distribution de ces facteurs dans le temps et dans l'espace, influence l'évaporation et la transpiration. En effet, ils permettent d'évaluer quantitativement les variations du régime hydrologique.

Actuellement, La région d'étude est équipée de quelques stations météorologiques parmi les quelles, nous avons empruntés les données utilisées.

2.2. Analyse des données climatiques :

2.2.1. Les données disponibles et analyse des paramètres climatiques :

Les stations auxquelles on a emprunté les données pluviométriques sont répertoriées dans le tableau N°1 :

TABLEAU 1. COORDONNEES DES STATIONS METEOROLOGIQUES

Station	X	Y	Z	Code
Ain Makhlouf	910.10	355.10	834.10	14 02 05
Guelma	07°28' E	36°28' N	227	/

2.2.1.1. Les précipitation :

Les eaux météoriques qui tombent sur la surface du secteur d'étude, quel que soit leur nature (pluie, grêle, neige ou autre forme de condensation) constituent les facteurs déterminant de l'hydrogéologie de ce secteur.

Pour la détermination du régime hydrologique de la région nous essayons d'étudier à l'échelle du mois, de l'année et de la saison les différents paramètres climatiques.

Pour notre étude, il convient de choisir la station représentative du bassin versant, en l'occurrence, la station d'Ain Makhlouf. Pour évaluer la variation des précipitations moyennes mensuelles, nous avons établi l'histogramme relatif à cette station.

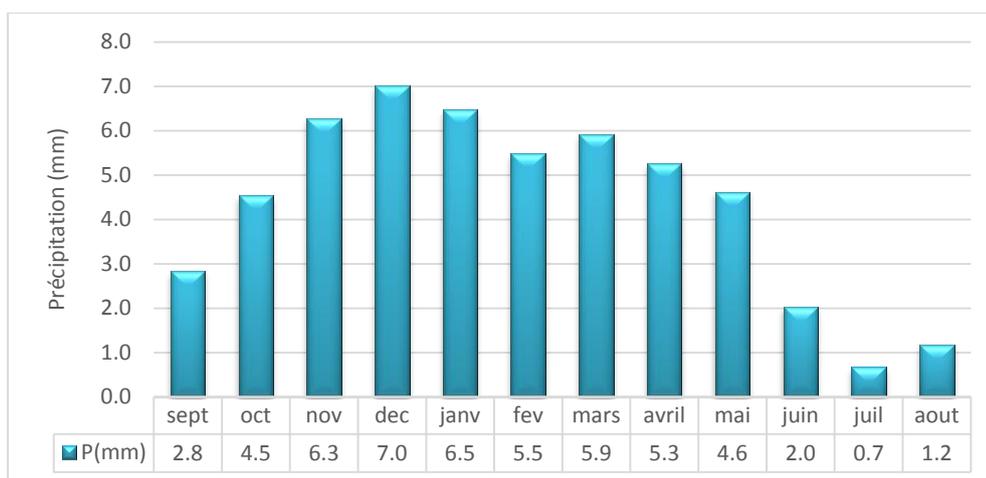


FIG. 3. HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES DANS LA STATION D’AIN MAKHLOUF (1986-2011)

L’analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 26 ans (1986-2011), montre que l’année 1998 est l’année la plus arrosée avec (1163mm) par contre l’année 1996 est l’année la plus sèche avec 112.3mm (Fig. 4).

Notons que les précipitations moyennes annuelles sont de l’ordre de 523.3mm.

2.2.1.2. Variation interannuelle des précipitations :

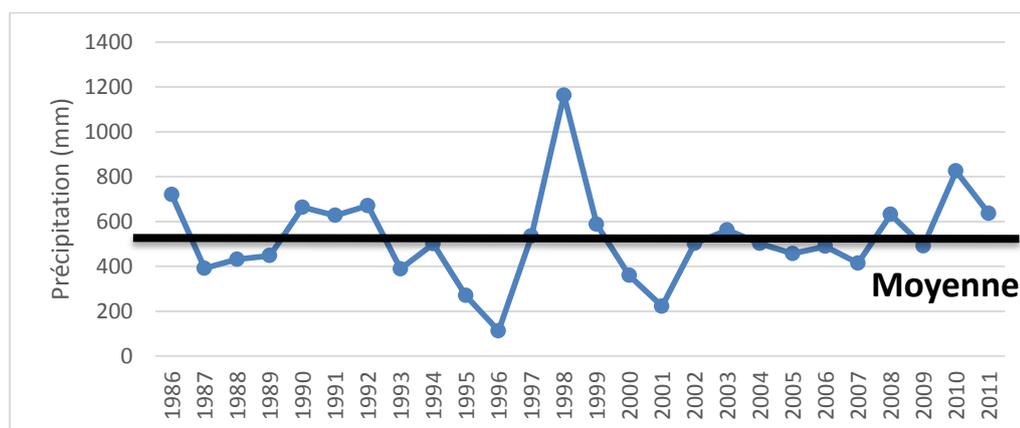


FIG. 4. VARIATION INTERANNUELLE DE LA PRECIPITATION DANS LA STATION D’AIN MAKHLOUF (1986-2011)

L’analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 26 ans (1986-2011), montre que l’année 1998 est l’année la plus arrosée avec (1163 mm) par contre l’année 1996 est l’année la plus sèche avec 112.3mm (Fig. 4).

Notons que les précipitations moyennes annuelles sont de l’ordre de 523.3 mm.

2.2.1.3. Distribution mensuelle et saisonnière de précipitations :

TABLEAU 2. DISTRIBUTION SAISONNIERES DES PRECIPITATIONS (1986-2011).

Saison Années	Automne		Hiver		Printemps		Été	
	Mm	%	Mm	%	Mm	%	Mm	%
(1986-2011)	136.6	26.1	189.7	36.3	158.1	30.2	38.8	7.4

D'après les résultats du tableau 2, on constate que :

-La saison hivernale est la plus Pluvieuse avec un total de 189.7 mm soit 36.3 % des pluies annuelles. Les saisons estivale et automnale sont les plus sèches avec respectivement, un total des pluies de 38.8 mm (7.4%) et 136.6 mm (26.1%). Au printemps, le total des précipitations est 158.1 mm soit 30.2% du total annuel, les résultats obtenus sont représentés dans la Figure 5.

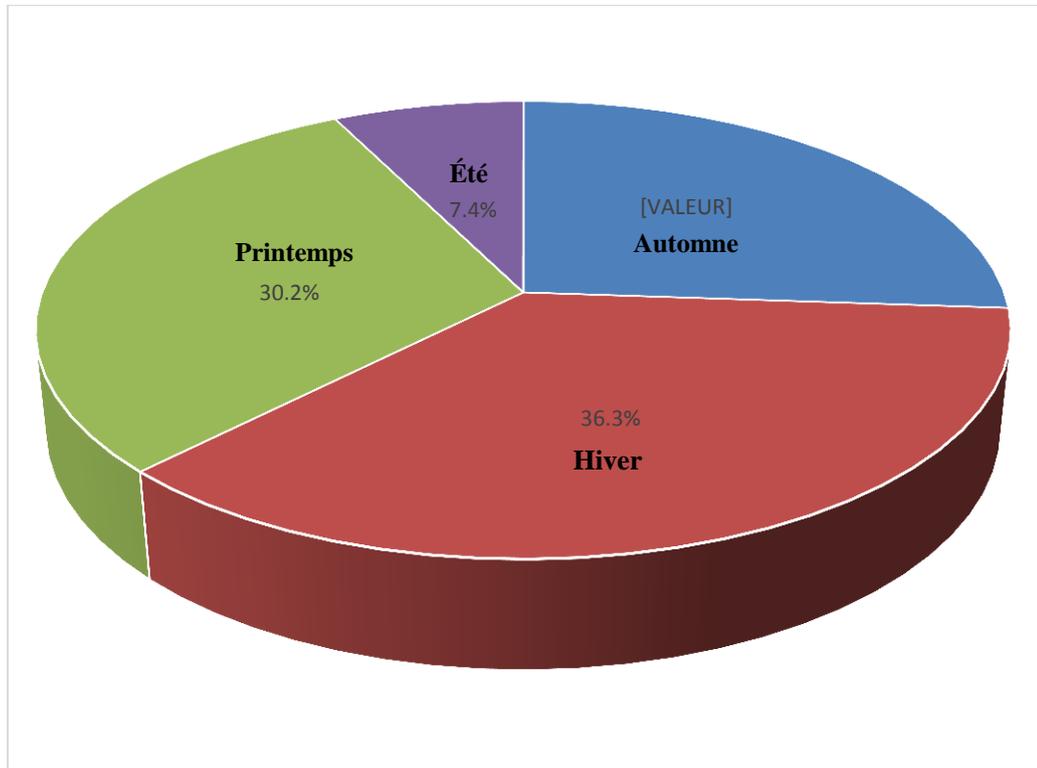


FIG. 5. DISTRIBUTION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS DANS LA STATION AIN MAKHLOUF (1986-2011)

2.2.1.4. Coefficient pluviométrique (C_p) :

Ce coefficient permet de distinguer une année excédentaire d'une autre déficitaire :

- Une année excédentaire (AE) si : $C_p > 1$.
- Une année déficitaire (AD) si : $C_p < 1$.
- La moyenne si : $C_p = 1$.

Ce paramètre est en relation proportionnelle avec la pluviométrie (Tableau 03), Il est calculé par le rapport de la pluviométrie de l'année considérée sur la pluviométrie moyenne annuelle observée à une station donnée :

Avec : $C_p = P/P_{\text{moy}}$

C_p : Coefficient pluviométrique.

P : Pluviométrie annuelle de L'année en (mm).

P_{moy} : Pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

TABLEAU 3. PRECIPITATIONS ANNUELLES EN (MM) ET COEFFICIENTS PLUVIOMETRIQUES DANS LA STATION D'AIN MAKHLOUF (1986-2011)

Année hydrologique	Pluie annuelle (mm)	CP station Ain Makhlouf	Observation
1986	719,5	1,38	AE
1987	391,5	0,75	AD
1988	431,5	0,82	AD
1989	447,8	0,86	AD
1990	663,7	1,27	AE
1991	627	1,2	AE
1992	670,7	1,28	AE
1993	389	0,74	AD
1994	500,4	0,97	AD
1995	270,1	0,52	AD
1996	112,3	0,21	AD
1997	534,8	1,02	AE
1998	1163,0	2,22	AE
1999	587,3	1,12	AE
2000	359,9	0,69	AD
2001	222,5	0,43	AD
2002	502	0,96	AD
2003	562	1,07	AE
2004	502,1	0,96	AD
2005	456,8	0,87	AD
2006	488,9	0,93	AD
2007	414,5	0,79	AD
2008	631,1	1,2	AE
2009	490,8	0,94	AD
2010	824,6	1,6	AE
2011	635,4	1,21	AE

D'après les résultats obtenus, il y a une alternance de périodes, souvent, triennales excédentaires (AE) et déficitaires (AD).

2.2.2. Température de l'air :

La température est un facteur influant sur la végétation et le déficit d'écoulement qui rentre dans l'estimation du bilan hydrique.

Vu le manque de température dans la station de Ain Makhlouf, nous avons utilisé les données de température de la station de Guelma pour la même période (1986/2011) pour la suite de tous nos calculs (bilan hydrique).

Les moyennes sont calculées sur une période de 26 ans (1986-2011) et résumées dans la figure 6 :

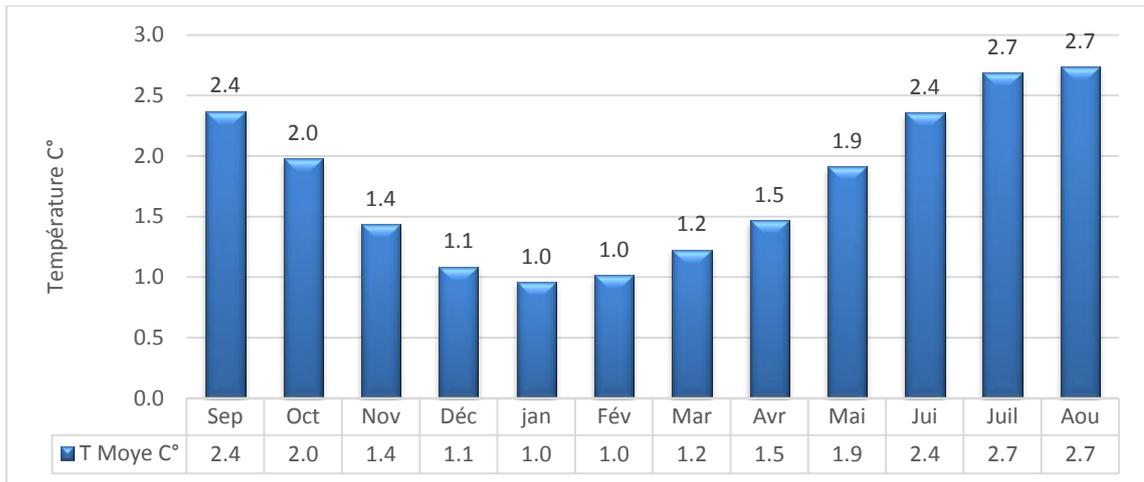


FIG. 6. VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES DANS LA STATION DE GUELMA (1986-2011)

Selon cette figure les variations mensuelles des températures montrent que le mois de Janvier est le plus froid avec une température minimale de 9.6 °C et le mois d’Août est le plus chaud avec une température de 27.4 °C.

A l’échelle annuelle, la moyenne annuelle des températures est de (17.7°C).

2.2.3. Relation Précipitation–température : Diagramme pluvio-thermique :

Le diagramme pluvio-thermique est établi selon la méthode de Bagnouls et Gaussen (1953) et dont les températures sont reportées à l’échelle double des précipitations. Cela permet de déterminer la période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois est inférieure ou égal au double de la température du même mois.

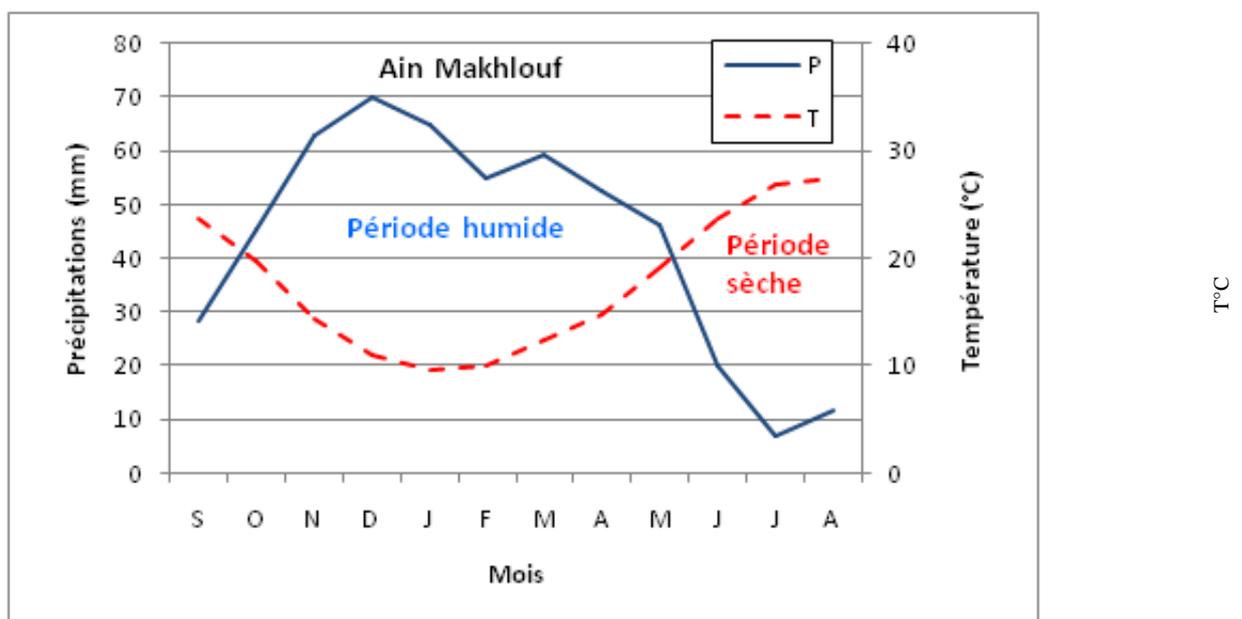


FIG. 7. DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE - STATION D’AIN MAKHLOUF (1986/2011)

Lorsque les températures passent au-dessus de la courbe des précipitations, la saison correspondante est sèche ou déficitaire en eau, et lorsque la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la saison correspondante est humide.

Selon le diagramme pluvio-thermique (Fig. 7) on constate que la période sèche s'étale sur 4 mois, depuis fin Mai jusqu'à fin Septembre.

2.2.4. Détermination des indices climatiques :

Le calcul des indices climatiques donne un aperçu sur les caractéristiques du climat de la région. Nous calculons en premier l'indice de De Martonne, appelé par fois indice d'aridité, qui va nous renseigner sur les caractéristiques régionales du climat.

2.2.4.1. Calcul de l'indice d'aridité :

Défini par la formule et la classification suivantes :

2.2.4.2. L'indice climatique de De Martonne(1923) :

La formule climatique de De Martonne est appelée indice d'aridité, il est fonction de la température et de précipitation

$$A = \frac{P}{T+10}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

T : température moyenne annuelle en °C.

A : indice d'aridité selon De Martonne

- si : $A < 5$ le climat est hyperaride.
- si : $5 < A < 7.5$ le climat est désertique.
- si : $7.5 < A < 10$ le climat est steppique.
- si : $10 < A < 20$ le climat est semi-aride.
- si : $20 < A < 30$ le climat est tempéré.
- si : $A > 30$ le climat est humide (l'écoulement est abondant).

Donc pour notre station d'Ain Makhlouf :

$$P = 523 \text{ (mm)} \text{ et } T = 17.7 \text{ donc } A = 18.88$$

D'après les résultats obtenus on peut dire que le climat est semi-aride avec une influence tempérée.

2.2.4.3. L'indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923) :

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

$$I = \frac{12P}{T + 10}$$

Avec :

P : moyenne mensuelle des précipitations en mm

T : moyenne mensuelle des températures en °C

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année, les résultats sont donnés dans le tableau 4.

TABLEAU 4. INDICE MENSUEL D'ARIDITE (1986-2011)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
P (mm)	28.4	45.4	62.8	70.2	64.7	54.9	59.2	52.7	46.2	20.2	6.8	11.8
T (°C)	23.7	19.8	14.4	10.9	9.6	10.1	12.3	14.7	19.1	23.6	26.9	27.4
I	10.1	18.3	30.9	40.3	39.6	32.8	31.8	25.6	19.1	7.2	2.2	3.8

Les mois de Juillet et Aout présentent un climat hyperaride, le mois de Juin un climat désertique ; les mois de Septembre, Octobre et Mai ont un climat semi-aride. On note que le mois d'Avril a un climat tempéré, alors que le climat humide marque le reste des mois de l'année.

2.3. Climagramme de Louis Emberger :

Afin de caractériser le climat du bassin étudié, nous avons calculé le quotient pluviométrique d'EMBERGER (Q_2) qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes des températures minimales et maximales.

$$Q = \frac{P}{\left[\frac{(M+m)(M-m)}{2} \right]} \times 1000$$

Où P : précipitation moyenne annuelle (mm).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/Kelvin).

m : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin).

Le résultat est indiqué dans le tableau 5 :

TABLEAU 5. PARAMETRES DU CLIMAGRAMME D'EMBERGER

Station	P (mm)	M (K)	m (K)	T°C moy. minima	Q	Type de climat
Ain Makhoulf	523	245.75	263.55	9.6	57.72	Semi-aride

D'après les résultats figurant dans le tableau 5 on peut déduire que la plaine de Tamlouka se caractérise par un climat semi-aride (Fig. 8).

D'après les diagrammes Ombro-thermiques et le climagramme d'Emberger pour la station des Ain Makhoulf, nous pouvons conclure que la plaine de Tamlouka est soumise à un climat

semi-aride, caractérisé par deux saisons : un hiver doux et relativement humide et un été chaud et sec.

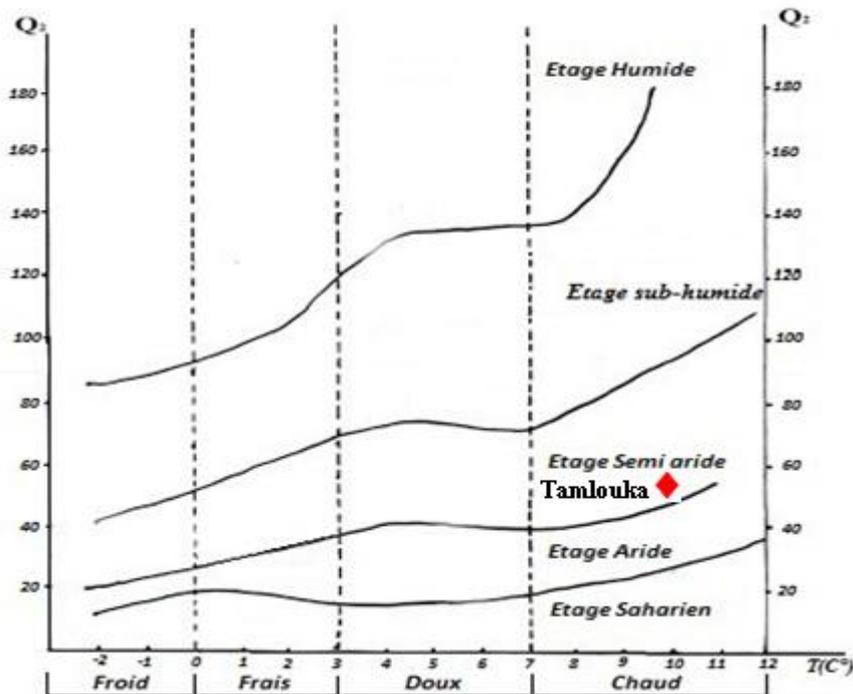


FIG. 8. CLIMAGRAMME D'EMBERGER DE LA STATION D'AIN MAKHLOUF.

2.4. Bilan hydrique :

Le bilan d'eau global correspond à une équation entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la zone d'étude, il est indispensable d'évaluer ses composants (infiltration, ruissellement et évapotranspiration). Pour cela, on va se baser sur les données qui possèdent des séries d'observations homogènes et continues de 26 ans (1986-2011).

2.4.1. Étude de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration constitue l'élément le plus important du bilan hydrologique après les précipitations. Elle est représentée par une quantité d'eau restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur.

L'évapotranspiration englobe l'ensemble de 02 phénomènes :

- **L'évaporation** : c'est un phénomène physique de la transformation d'eau en vapeur d'eau à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, marécage, cours d'eau.....) et du sol.

- **La transpiration** : est un phénomène biologique lié à la couverture végétale et à son stade de développement on distingue :

- a) L'évapotranspiration potentielle (ETP).
- b) L'évapotranspiration réelle (ETR).

2.4.1.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle s'identifie au déficit d'écoulement et peut se calculer à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie et la température. L'évapotranspiration réelle est en fonction de quantité de pluie dans le bassin et de la réserve maximale en eau du sol.

Formule de Turc :

$$ETR = \frac{P}{0.9 + \sqrt{P^2/L^2}}; L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Avec **ETR** : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

L : Pouvoir évaporant.

Les résultats sont portés dans le tableau 06 :

TABLEAU 6. L'ETR annuelle selon Turc

Station Paramètre	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Ain Makhlouf	523.3	17.7	1019.8	373.1

L'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) en (mm) est liée au volume de précipitation. Trois cas peuvent se présenter :

❖ 1^{er} cas : $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$:

Il y a une reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus va représenter l'écoulement superficiel.

❖ 2^{ème} cas : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$:

Dans ce cas, la RFU (réserve facilement utilisable) va s'épuiser jusqu'à satisfaction de l'ETP.

❖ 3^{ème} cas : $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$:

Il y aura donc un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation.

Formule de Thornthwaite :

Pour l'établissement du bilan hydrique, on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne calculée par la méthode de C.W. Thornthwaite.

Ce bilan repose sur l'hypothèse suivant :

- la satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.

- le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant trois cas :

1^{er} cas : $P > ETP \implies ETR = ETP$ on a alors un excédent.

2^{ème} cas : $P < ETP \implies ETR = P + RFU$.

3^{ème} cas : $P < ETP$ et $RFU = 0 \implies ETR = P$: Il y aura donc un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation.

Pour l'évaluation du bilan hydrique, on a utilisé les formules de Turc et de Thornthwaite afin de comparer les résultats. L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des méthodes précédentes pour aboutir une approche de l'ETR. Ce qui par la suite fera ressortir la formule qui est mieux appropriée à notre région d'étude (tableau 06).

-La formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée. Contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.

-L'ETR est surestimé pour tous les mois de l'année. Par ailleurs, Thornthwaite présente des résultats assez convaincants (des valeurs très proches de l'ETR).

TABLEAU 7. COMPARAISON ENTRE LES DEUX METHODES DE CALCUL

Méthode	Thornthwaite	Turc
ETR	432.7	373.1

2.4.1.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle :

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimé en hauteur de la lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisé la formule de Thornthwaite qui a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i) ou :

$$ETP = 16 (10 t / I)^a \cdot k$$

Avec: $a = 0.016 I + 0.5$; $I = \sum i$; $i = (t / 5)^{1.514}$.

- **t** : température moyenne du mois considéré en (°C).
- **ETP** : évapotranspiration potentielle mensuelle en (mm).
- **K** : Facteur correctif intégrant la durée d'insolation et la température.
- **i** : indice thermique mensuel.
- **I** : la somme des indices mensuels de l'année.

Avec :

$$I = 85.4 \quad a = 1.86$$

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 7.

2.4.2. Estimation des réserves facilement utilisables (RFU) :

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle.
- La profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère.
- Le climat de la région.
- Le type de la couverture végétale.

La RFU peut, en tenant compte de tous ces facteurs, varier entre 80 et 100 mm.

Les principaux résultats du bilan hydrique sont résumés dans le tableau 7.

TABLEAU 8. BILAN HYDRIQUE DE THORNTHTWAITE DE LA STATION D'AIN MAKHLOUF (1986-2006)

Période	Tp (°C)	i	K	ETPC (mm)	Pr (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	DA (mm)	EXC (mm)
S	23,7	10,5	1,03	110,7	28,4	-82,3	0,0	28,4	82,3	0,0
O	19,8	8,0	0,97	74,6	45,4	-29,2	0,0	45,4	29,2	0,0
N	14,4	5,0	0,86	36,5	62,8	26,3	26,3	36,5	0,0	0,0
D	10,9	3,3	0,81	20,4	70,2	49,8	76,1	20,4	0,0	0,0
J	9,6	2,7	0,87	17,3	64,7	47,4	100,0	17,3	0,0	23,5
F	10,1	2,9	0,85	18,6	54,9	36,3	100,0	18,6	0,0	36,3
M	12,3	3,9	1,03	32,6	59,2	26,6	100,0	32,6	0,0	26,6
A	14,7	5,1	1,10	48,5	52,7	4,2	100,0	48,5	0,0	4,2
M	19,1	7,6	1,21	87,0	46,2	-40,8	59,2	87,0	0,0	0,0
J	23,6	10,5	1,22	130,1	20,2	-109,9	0,0	79,4	50,7	0,0
J	26,9	12,8	1,24	168,9	6,8	-162,1	0,0	6,8	162,1	0,0
A	27,4	13,1	1,16	163,5	11,8	-151,7	0,0	11,8	151,7	0,0
Année	17,7	85,4		908,6	523,3	-385,3		432,7	476,0	90,6

Avec :

- **T** : température mensuelle en (C°).
- **P** : précipitation mensuelle en (mm).
- **I** : indice thermique.
- **RFU** : réserve facilement utilisable en (mm), (RFU=100mm) pour le calcul du bilan.
- **k** : coefficient de latitude.
- **ETR** : évapotranspiration réelle en (mm).
- **DA** : déficit agricole (mm).
- **ETP** : évapotranspiration potentielle en (mm).
- **BH** : bilan hydrique (mm).
- **EXC** : excédent en (mm).

2.4.3. Formules de vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad \Longrightarrow \quad P = 432.7 + 90.6 = 523.3 \text{ mm.}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad \Longrightarrow \quad ETP = 432.7 + 476.0 = 908.7 \text{ mm.}$$

$$DA = \sum ETP - \sum ETR \quad \Longrightarrow \quad DA = 908.7 - 432.7 = 476.0 \text{ mm.}$$

$$EXC = \sum P - \sum ETR \quad \Longrightarrow \quad EXC = 523.3 - 432.7 = 90.6 \text{ mm.}$$

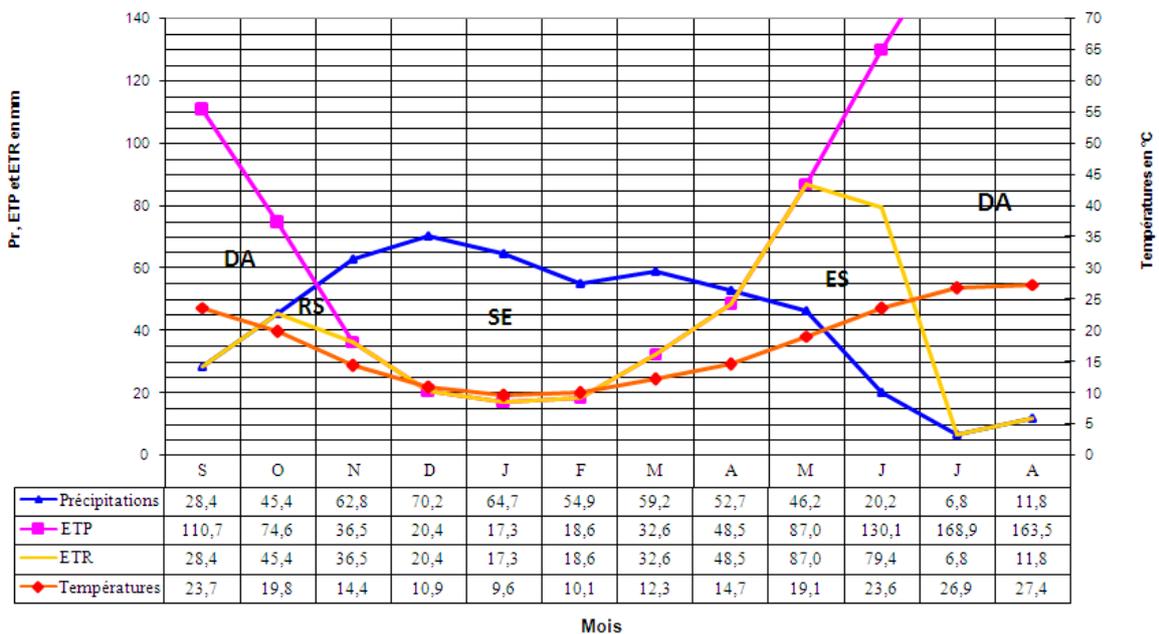
Nous constatons que les résultats issus des bilans sont vérifiés

2.4.4. Interprétation du bilan hydrique :

L'établissement du bilan hydrique a pour but de connaître les différents paramètres (ETP, RFU, DA, EXC), qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrologique.

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné généralement par un écoulement. Dès que la RFU diminue, il ya un épuisement du stock. Quand la RFU sera complètement vide, il y aura un déficit agricole (DA)

D'après le bilan hydrique calculé par la méthode de Thornthwaite (tableau 7), nous constatons que le RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois du Novembre pour atteindre son maximum (100mm) au mois de Janvier à Avril, période dans laquelle il y a un surplus d'eau qui se manifestant par un écoulement. Elle diminue à partir du mois d'Avril jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin, où on observe l'apparition du déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre.



DA- Déficit Agricole, RS- Recharge du Sol, SE- Surplus d'Eau, ES- Epuisement du Stock

FIG. 9. REPRESENTATION GRAPHIQUE DU BILAN DE THORNTHWAITE

La représentation graphique du bilan hydrique dans la région montre que :

L'ETP atteint son maximum durant le mois de Juillet (168.9mm) et son minimum est observé durant le mois de Janvier (17.3mm). L'excédent commence à partir du mois de Décembre et s'étale jusqu'au mois d'Avril avec un maximum au mois de Février (36.3mm).

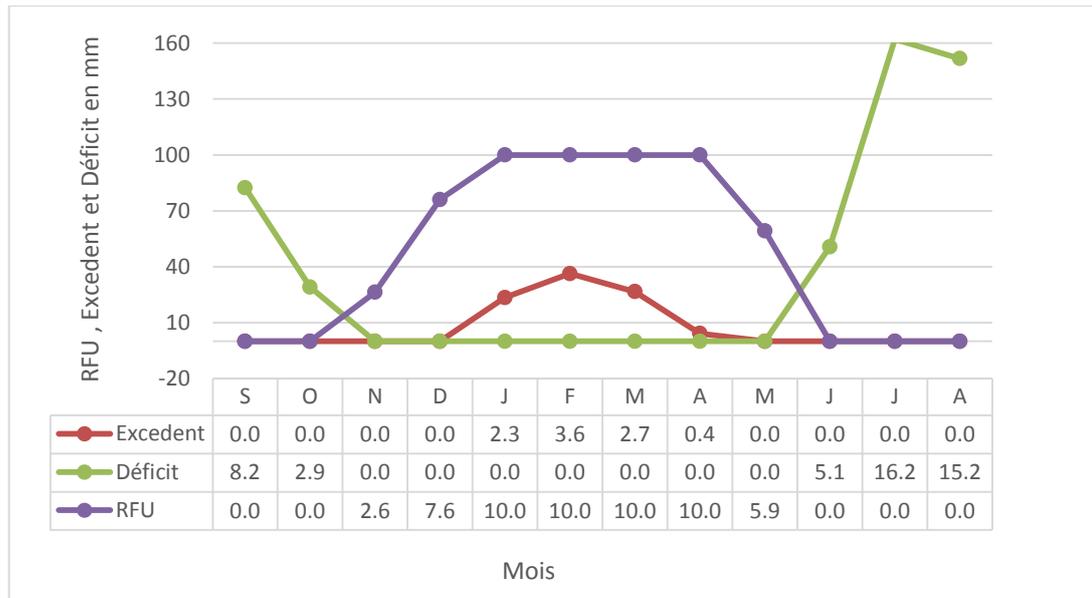


FIG. 10. VARIATIONS MENSUELLES DES RESULTATS DU BILAN HYDRIQUE

2.5. Estimation de la lame d’eau écoulée :

2.5.1. Le ruissellement :

Pour Déterminer le bilan hydrologique. Il est nécessaire d’évaluer le ruissellement dans le but d’apprécier l’importance de l’érosion mécanique et chimique qui affecte la surface de la terre.

Le ruissellement (R) peut être calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff :

Avec la condition de P < 600mm.

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec :

R : ruissellement (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle mm/an (selon Thornthwaite).

P : précipitation moyenne en mm.

NB :

Cette formule n’est valable que pour les valeurs des précipitations moyennes annuelles qui ne dépassent pas le 600 mm.

Le résultat obtenu est représenté sur le tableau suivant :

TABLEAU 9. RUISSELLEMENT SELON LA FORMULE TIXIRONT BERKALOFF

Station	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)
Ain Makhlouf	523.3	908.6	57.86

2.5.2. L'infiltration :

L'infiltration est la quantité d'eau franchissant la surface du sol, elle renouvelle les stocks d'eau souterraine et entretient le débit de l'écoulement souterrain de sortie, après circulation dans les formations hydrogéologiques perméables du sous-sol.

L'infiltration est un élément très important du bilan hydrogéologique, il dépend de plusieurs facteurs et les plus significatifs sont :

- La nature du sol (texture et composition granulométrique).
- Perméabilité et porosité du sol.
- La couverture végétale.

D'après la formule du bilan global :

$$\text{On aura : } \quad \mathbf{P = R + I + ETR}$$

$$\mathbf{I = P - R - ETR}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

R : ruissellement en mm.

I : Infiltration en mm.

ETR : évapotranspiration réelle calculée selon la formule de Thornthwaite en mm

TABLEAU 10. ESTIMATION DE L'INFILTRATION EN (MM)

Paramètre	P (mm)	ETR	R (mm)	I (mm)
Valeurs	523.3	432.7	57.86	32.74

2.6. Evaluation de la sécheresse

2.6.1. Introduction

L'apport de la surveillance et le diagnostic de la sécheresse hydrique est intéressant dans l'étude hydro-climatologique (Djellouli, 2016 ; Haied, 2015), les calculs ont été basés sur les données climatiques enregistrées sur une période de 44 ans.

2.6.2. Définition de la sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel récurrent associé à une disponibilité déficitaire des ressources en eau sur une grande zone géographique et s'étend sur une période de temps considérable (Rossi et al. 1992).

2.6.3. La Classification de la sécheresse

Les sécheresses sont généralement classées en quatre catégories (Wilhite & Glantz, 1985) qui inclut :

- **La sécheresse météorologique** : définie comme un manque de précipitations sur une région pendant une période de temps (Pinkeye, 1966).

- **La sécheresse hydrologique** : est liée à une période de sécheresse touchant les ressources hydriques superficielles et souterraines ce qui les rend insuffisantes pour les diverses utilisations de l'eau données par un système de gestion des ressources en eau (Dracupet al., 1980).
- **La sécheresse agricole** : en général, se réfère à une période avec une baisse de l'humidité du sol résultant une mauvaise récolte, sans aucune référence aux ressources en eau de surface (Haied, 2017).
- **La sécheresse socio-économique** : est associée à l'échec des systèmes de ressources en eau pour répondre à la demande en eau résultant des sécheresses associées à l'offre et à la demande d'un bien économique (eau). (AMS, 2004).

2.6.4. Les indices de sécheresse

Il existe plus de 150 indices de sécheresse (Zargar et al. 2011). Un certain nombre d'indices a été développés pour quantifier la sévérité de la sécheresse, chacun avec ses propres forces et faiblesses (Mishra et Singh, 2010). Ils comprennent l'indice de sécheresse de Palmer, l'indice d'anomalie des précipitations, les déciles, l'indice d'humidité des cultures, l'indice de la sécheresse de Bhalme et Mooly, l'indice d'approvisionnement en eau de surface, l'indice des précipitations nationales, l'indice des précipitations normalisés, l'indice de réclamation de la sécheresse et l'indice de reconnaissance de la sécheresse.

Afin d'évaluer et surveiller la sécheresse météorologique dans le but de prouver l'existence et d'adopter le meilleur scénario pour un essai de gestion, notamment, celle des infrastructures. On va utiliser l'Indice des précipitations normalisées(SPI) et l'Indice de reconnaissance de la sécheresse(RDI), le premier indice se base sur les précipitations moyennes mensuelles seulement et le second en plus des précipitations moyennes mensuelles, il se base aussi sur l'évapotranspiration potentielle déterminée à l'aide des températures moyennes mensuelles.

2.6.5. Evaluation et surveillance de la sévérité de la sécheresse

En raison de l'augmentation de la demande en eau et du changement climatique imminent, ces dernières années ont été particulièrement axées sur les scénarios de sécheresse dans le monde. Comme un risque naturel, la sécheresse est mieux caractérisée par de multiples paramètres pour définir le type de sécheresse (météorologiques, hydrologiques, agricoles ou socio-économique).

Dans notre étude la sécheresse va être étudiée dans le but de prouver son existence, et pour évaluer l'étendue sur le plan temporelle.

2.6.5.1. Les caractéristiques de la sécheresse météorologique

a. La durée : Selon la région, la durée de la sécheresse peut varier d'une semaine à quelques années. En raison de la nature dynamique de la sécheresse, une région peut subir des sorts humides et secs simultanément en tenant compte des différents pas de temps (NCDC. 2010).

b. L'intensité : C'est le rapport de la magnitude de la sécheresse par sa durée.

c. La sévérité : Deux usages sont prévus pour la sévérité de la sécheresse : le degré du déficit de précipitation, ou le degré d'impact résultant du déficit (Wu et Wilhite, 2004).

d. La fréquence (période de retour) : La fréquence ou la période de retour d'une sécheresse est définie comme le temps moyen entre les événements de sécheresse qui ont une gravité égale ou supérieure à un seuil.

2.6.5.2. Les indices de la sécheresse météorologique

Les indices de sécheresse météorologiques sont des mesures quantitatives qui caractérisent les niveaux de sécheresse en assimilant les données d'une ou plusieurs variables comme la précipitation et l'évapotranspiration en une seule valeur numérique (Mishra et Singh, 2010).

Il n'existe pas d'indice unique pouvant prévoir la sécheresse, les indices de sécheresse météorologiques simplifient les fonctions climatiques complexes et peuvent quantifier les anomalies climatiques quant à leur sévérité, leur durée et leur fréquence.

Parmi les indices météorologiques les plus connus il y a l'indice des précipitations normalisées (SPI) et l'indice de la reconnaissance de la sécheresse (RDI), ces deux indices vont être utilisés dans notre étude.

a- L'indice des précipitations normalisées

Le S P I dérivé du mot anglais Standardized Precipitation Index, c'est l'indice météorologique le plus connu, il est basé uniquement sur les données des précipitations. Il compare les précipitations avec leurs moyennes pluriannuelles et peut être calculé pour n'importe quelle zone. Une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et sa valeur atteint une intensité inférieure de -1, la durée sèche se termine lorsque le SPI devient positif. (McKee et al., 1993).

Parmi ces avantages, il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps ainsi qu'il présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents, par contre il ne repose que sur les relevés des précipitations et ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

Le calcul de cet indice se fait à l'aide de l'équation suivante (Tableaux 11 ; 12) :

$$SPI = (p_i - p_m) / \sigma$$

Sachant que :

P_i : est la Précipitation de l'année i ;

P_m : la Précipitation moyenne ;

σ : la Déviation standard ou écart type.

TABLEAU 11. VALEURS DE L'INDICE SPI.

> 2.0	Extremement humide
de 1.5 à 1.99	Très humide
de 1.0 à 1.49	Modérément humide
de -0.99 à 0.99	Proche de la normale
de -1.0 à -1.49	Modérément sec
de -1.5 à -1.99	Très sec
< -2	Extremement sec

Source : l'organisation météorologique mondiale.

TABLEAU 12. PROBABILITE D'OCCURRENCE.

Indice SPI	Catégorie	Nombre de fois sur 100 ans	Fréquence
De 0 à -0.99	Légère sécheresse	33	1 fois tous les 3 ans
De -1.00 à -1.49	Sécheresse modérée	10	1 fois tous les 10 ans
De -1.5 à -1.99	Grande sécheresse	5	1 fois tous les 20 ans
< -2.0	Sécheresse extrême	2	1 fois tous les 50 ans

Source : l'organisation météorologique mondiale.

b- L'indice de la reconnaissance de la sécheresse

Le R D I dérivé du mot anglais Reconnaissance Drought Index (Tsakiris et Vangelis, 2005) ; il quantifie le déficit de précipitation pendant plusieurs pas de temps, précisément il se base sur les données de la précipitation et de l'évapotranspiration, il est calculé comme suit (Tableau 13) :

$$RDI = \frac{Y^{(t)} - \bar{Y}}{\hat{\sigma}_y}$$

TABLEAU 13. CLASSIFICATION DE LA SECHERESSE SELON LES INDICES METEOROLOGIQUES SPI ET LE RDI. (ASADI ZARCH ET AL., 2011)

Catégories	Sécheresse météorologique	
	SPI	RDI
Extrêmement sec	≤ -2	$RDI < -2$
sévèrement sec	$[-1,5 \text{ à } -1,99]$	$-2 \leq RDI \leq -1,5$
Modérément sèche	$[-1 \text{ à } -1,49]$	$-1,5 \leq RDI \leq -1$
Ordinaire	$[-0,99 \text{ à } 0,99]$	$-0,5 \leq RDI \leq +0,5$
Modérément humide	$[1 \text{ à } 1,49]$	$+1 \leq RDI \leq +1,5$
Très humide	$[1,5 \text{ à } 1,99]$	$+1,5 \leq RDI \leq +2$
Extrêmement humide	$\geq +2$	$RDI > +2$

c- Evapotranspiration potentielle (ETP) selon la Méthode de Thornthwaite

Thornthwaite (1948) a conçu une méthodologie pour estimer l'ETP pour une végétation courte avec un approvisionnement en eau adéquat dans certaines parties des États-Unis. La procédure utilise la température moyenne de l'air et le nombre d'heures de lumière du jour, et est donc classée comme méthode à base de température. L'ETP mensuel peut être estimé selon Thornthwaite (1948) par l'équation suivante :

$$Et_p = ET_p sc \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{dm}{30} \right)$$

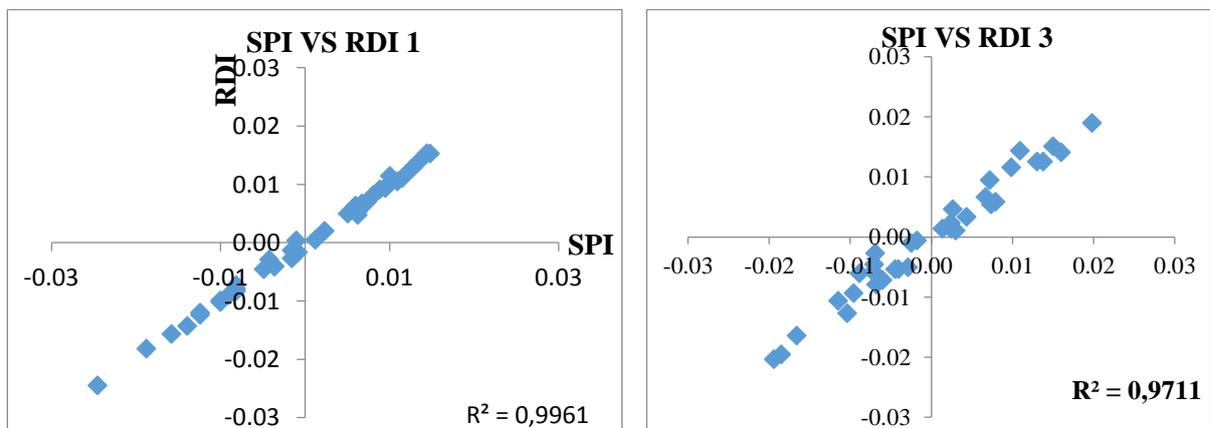
2.6.6. Surveillance et évaluation de la Sécheresse :

Cette surveillance et évaluation a pour objectif d'avoir une idée sur la sécheresse touchant notre région d'étude, pour élaborer des scénarios mieux adaptés pour une meilleure gestion des ressources en eaux. Deux indices de sécheresse vont être utilisés. Le premier indice utilisé est l'indice des précipitations normalisées (SPI), fréquemment utilisé dans le littérature pour l'étude des sécheresses (Raoult & Richard, 2003). Le second est l'indice de reconnaissance de la Sécheresse (RDI). Les données utilisées sont celles des précipitations et des températures mensuelles pour une période de 34 ans (1981-2015), la détermination de ces indices permet également d'avoir une idée sur la durée et la sévérité de la Sécheresse.

2.6.6.1. Corrélation entre le SPI et le RDI :

La figure (11) montre la corrélation entre les indices de la sécheresse (SPI et RDI), selon les pas de temps (1, 3, 6, 9, 12 mois).

Cette Corrélation varie d'un pas de temps à un autre, le tableau 14 illustre le coefficient de corrélation pour les différents pas de temps.



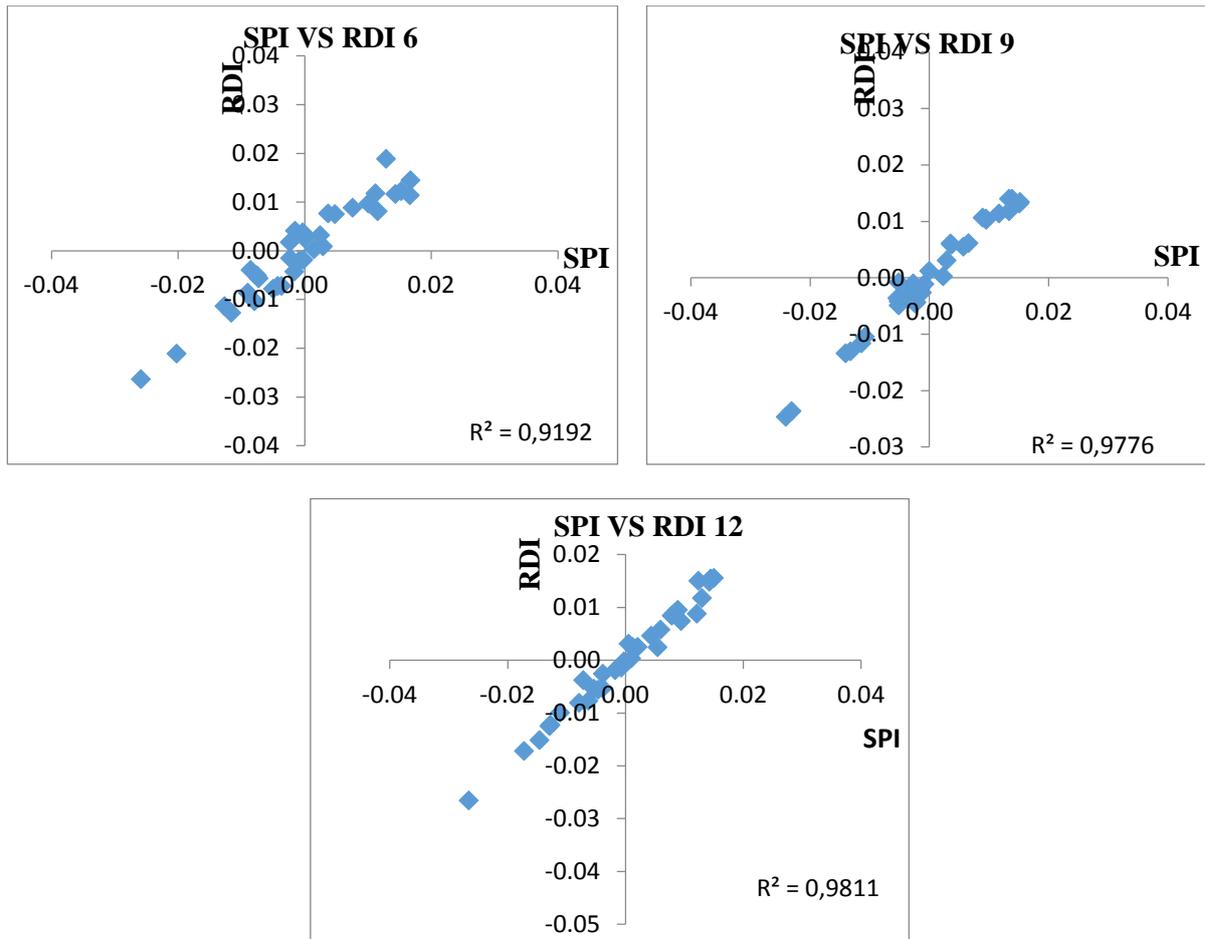


FIG. 11. DIAGRAMME DE CORRELATION ENTRE LES SPI ET LES RDI POUR LA STATION DE GUELMA (1981-2015).

La valeur maximale de (R) entre SPI et RDI a été obtenue pour un Pas de temps de 1mois (R=0.996), et la valeur minimale pour le Pas de temps de 9 mois (R=0.689) dans la wilaya de Guelma (Tableau 14). Dans un Pas de temps de 3, 6 et 12 mois, le coefficient de corrélation (R) est supérieur à 0,73.

Il est évidant que les deux indices sont bien corrélés dans tous les pas de temps, ce qui signifie que ces deux indices sont très bien adapté à étudier la sécheresse dans notre zone d'étude. Cette bonne corrélation va nous aider à évaluer la sécheresse agricole par les courts pas de temps ainsi que la sécheresse hydrologique par les longs pas de temps.

TABEAU 14. COEFFICIENT DE CORRELATION (R) ENTRE LES SPI ET LES RDI A DIFFERENTS PAS DE TEMPS.

Pas de temps	Coefficient de corrélation R
SPI 1 vs RDI 1	0.996
SPI 3 vs RDI 3	0.971
SPI 6 vs RDI 6	0.937
SPI 9 vs RDI 9	0.698
SPI 12 vs RDI 12	0.731

2.6.6.2. Evaluation de la Sécheresse Météorologique :

Deux indices de sécheresse Météorologique ont été utilisés, le SPI et le RDI pour la détermination de la durée et la sévérité de la Sécheresse dans notre région d'étude.

a- Pour la Sécheresse Météorologique à court terme :

Le court terme de la Sécheresse adapte un pas de temps d'un (1) mois et trois (03) mois. Les figures (12 ; 13) montrent la comparaison entre les SPI et les RDI pour la station de Guelma (1981-2015) avec un pas de temps de 1 et 3 mois. Les SPI et RDI 1 et 3 montrent cinq (05) années sèches.

Les durées maximales de la sécheresse sont observées entre 1987-1990 ; 1997-1999 ; 2000-2002 ; et 2003-2007 selon le SPI1 et RDI1 ; et entre 1985-1986 ; 1987-1991 ; 1993-1997 et 1998-2001 selon le SPI3 et RDI3, toutes ces périodes ont une sévérité modérée à extrême.

La sévérité maximale de la sécheresse s'observe durant l'année 1988-1989 pour SPI1 et RDI1 (SPI=3.33 et RDI =3.25 avec une sécheresse extrêmement sec), et durant l'année 1985-1986 pour SPI3 et RDI3 (SPI=1.94 et RDI =2.03 avec une Sécheresse extrêmement sec).

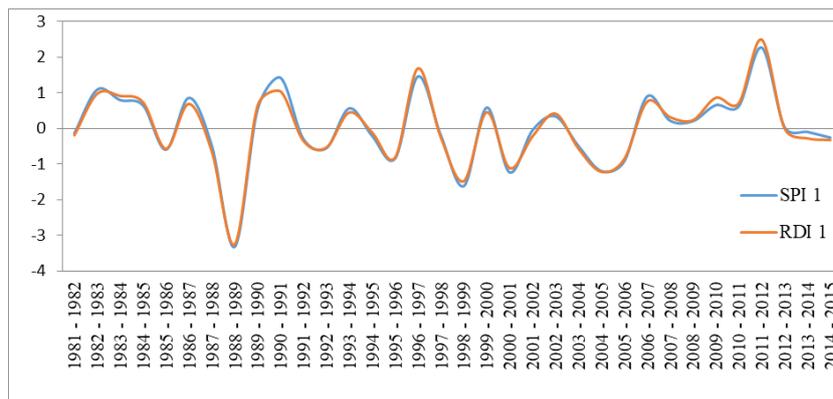


FIG. 12. COMPARAISON DES SPI 1 ET RDI1 POUR LA STATION DE GUELMA (1981-2015) AVEC UNE PAS DE TEMPS DE 1 MOIS.

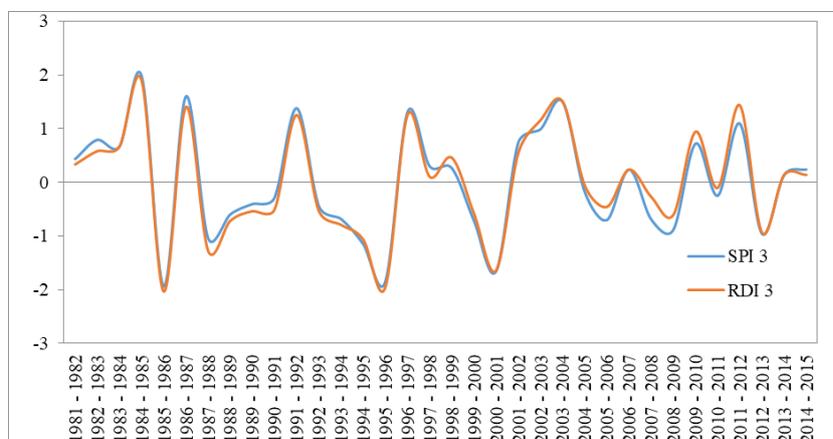


FIG. 13. COMPARAISON DES SPI 3 ET RDI3 POUR LA STATION DE GUELMA (1981-2015) AVEC UNE PAS DE TEMPS DE 3 MOIS.

b- Pour la Sécheresse à moyen et au long terme :

Le moyen terme, est représenté par le pas de temps de 6 mois, alors que le long terme est représenté par les pas de temps de 9 et 12 mois. Les SPI 6, SPI 9, SPI 12 et les RDI 6 ; RDI 9 ; RDI 12 montrent les mêmes durées au cours des années : 1985-1986, 1987-1990, 1995-1996, 2000-2001, en plus de ces années SPI 12 et RDI 12 montre une cinquième durée sèche entre 1992-1994, toutes ces durées sèches ont une sévérité modérée à extrême (Fig. 14 ; 15 ; 16).

Les valeurs maximales des SPI et RDI pour le moyen et long terme sont observées durant l'année 1995-1996 :

SPI 6 = -2.58 et RDI 6 = -2.64 où un climat extrêmement sec.

SPI 9 = -2.40 et RDI 9 = -2.47 où un climat extrêmement sec.

SPI 12 = -2.65 et RDI 12 = -2.66 où un climat extrêmement sec.

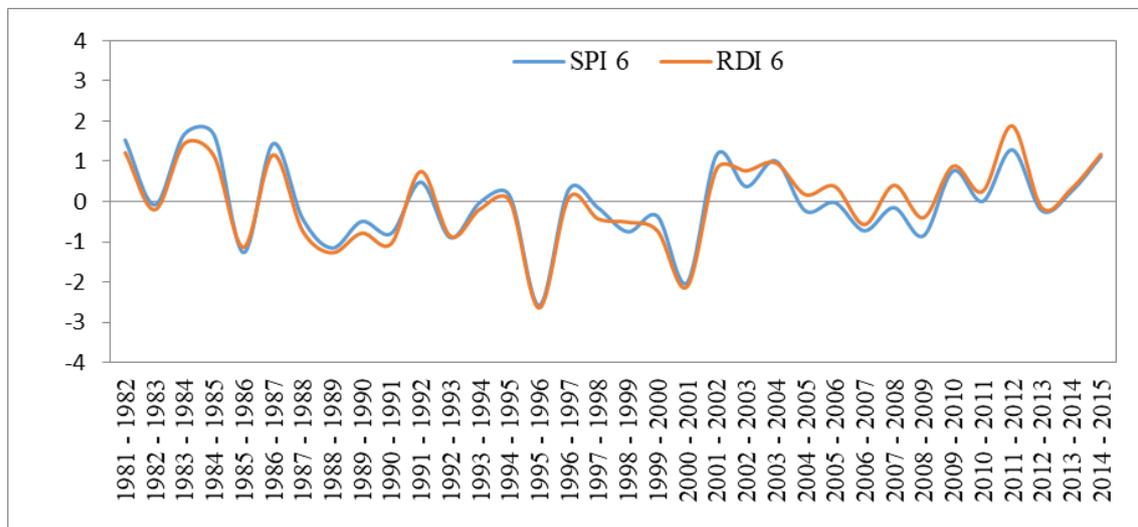


FIG. 14. COMPARAISON DES SPI 6 ET RDI6 POUR LA STATION DE GUELMA (1981-2015) AVEC UNE PAS DE TEMPS DE 6 MOIS.

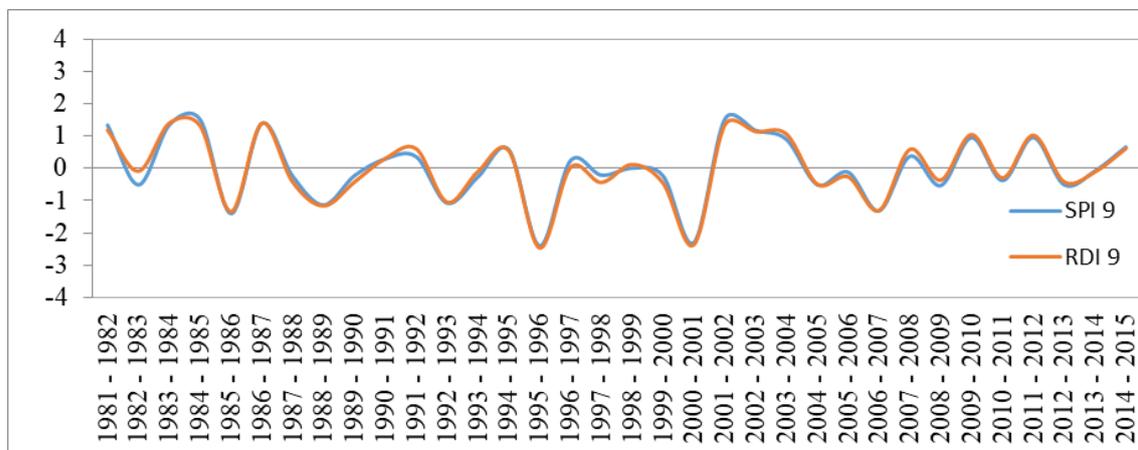


FIG. 15. COMPARAISON DES SPI 9 ET RDI9 POUR LA STATION DE GUELMA (1981-2015) AVEC UNE PAS DE TEMPS DE 9 MOIS.

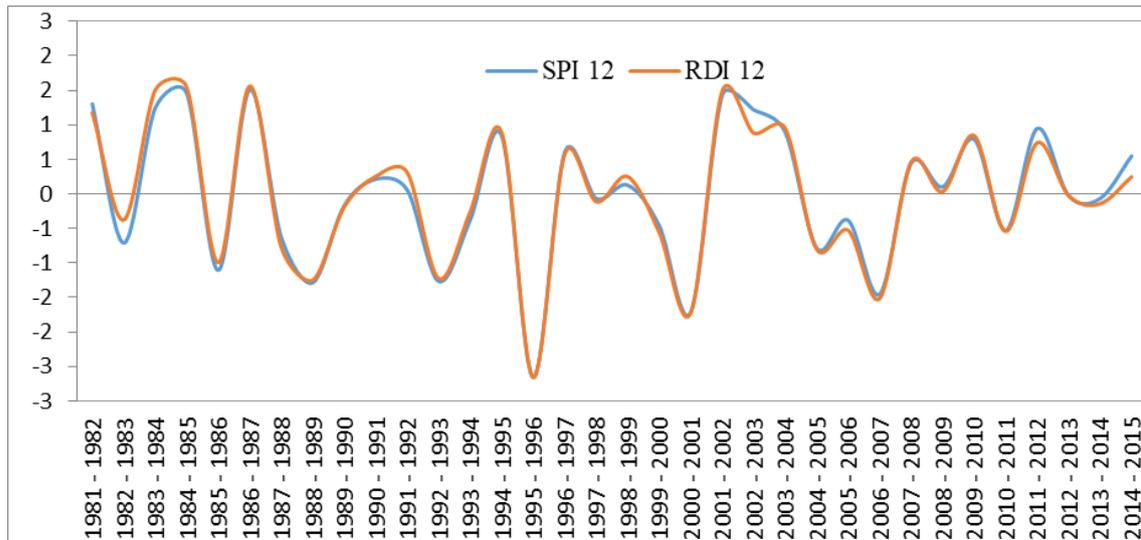


FIG. 16. COMPARAISON DES SPI 12 ET RDI12 POUR LA STATION DE GUELMA (1981-2015) AVEC UNE PAS DE TEMPS DE 12 MOIS.

Cette étude de sécheresse nous aide à conclure que la sécheresse dans notre région d'étude concerne l'agriculture et l'hydrologie, et que la région de Guelma peut subir d'autres périodes de sécheresse dans le futur. C'est pour cette raison qu'il faut surveiller les précipitations dans le temps.

2.7. Conclusion :

Dans notre travail nous avons essayé d'analyser les divers facteurs et paramètres climatologiques afin de définir les valeurs quantitatives (précipitation, températures, évaporation) concernant la période (1986-2011) pour la station de Ain Makhlof.

Les précipitations moyennes annuelles dans le secteur étudié sont de l'ordre 523.3 mm à la station d'Ain Makhlof. Le ruissellement et l'infiltration sont de l'ordre de 90.6mm ce qui représente 17.3% des précipitations. Le déficit agricole pour satisfaire les besoins en eaux d'irrigation des cultures sont estimés à 476 mm à la station d'Ain Makhlof.

D'après ces résultats on constate que la région d'étude se range dans une zone à climat semi-aride, caractérisée par des hivers pluvieux et froids et des étés chauds, secs et ensoleillés.

La surveillance et l'évaluation de la sécheresse à l'aide des indices météorologiques le SPI et le RDI ont montré que les périodes de sécheresse qu'a connue notre région sont d'une sévérité modérée à extrême, elles concernent l'agriculture et l'hydrologie en même temps et que la région d'étude peut subir d'autres périodes de sécheresse dans le futur.

Chapitre III :

Cadre géologique et structural

Chapitre III : Cadre géologique et structural

3.1. Introduction :

La plus ancienne étude géologique dans la région de Tamlouka est celle de La Chavanne faite au début du 20^{ème} siècle sous le titre : Les fossiles tertiaires dans la région de Guelma. Cette étude touche nettement les bordures de la plaine. Ensuite vient l'étude faite par Voute (1967). Cette dernière ne touche que la partie Sud de la plaine de Tamlouka

En 1973, l'étude géophysique faite par la société SONATRACH en collaboration avec BEICIP, a permis l'établissement du permis de Ain Regada dont la plaine de Tamlouka fait partie.

Vila (1980) a essayé de comprendre l'apparition et l'évolution structurale de la plaine de Tamlouka et des environs limitrophes, notamment de la colline d'Ain Arko et le bassin d'Ain Makhoulf (ex Renier) en se basant sur les études antérieures.

La carte géologique au 1/50000 d'Ain Régada n'existe pas. Nous nous sommes basés pour l'élaboration de ce chapitre sur les travaux antérieurs : thèse de Voute (1967), la carte géologique de Constantine au 200000^{ème} et le rapport sur l'étude géologique du permis d'Ain Regada fait par la SONATRACH-BEICIP. Ce dernier englobe entièrement notre région d'étude, de plus il a l'avantage de considérer la géologie de la région sous un angle nouveau par la vision globale de système de nappes s'imbriquant les unes dans les autres et soulignant le caractère spécifique de la géologie de la région.

Pour l'élaboration d'une carte géologique au 50000^{ème} de la région de Tamlouka, nous nous sommes servis de la carte géologique de Constantine au 200000^{ème} et de la photo aérienne de Ain Regada ; des sorties sur terrain ont été également effectuées pour préciser les contours géologiques. La carte obtenue met en relief les différents systèmes de nappes intervenant dans la région conformément à l'étude de la SONATRACH-BEICIP. Il s'agit des séries mixtes de Dj. Djaffa, de l'unité de Sellaoua, des unités telliennes, de la nappe néritique constantinoise, de la nappe numidienne et enfin des formations récentes du Mio-Plio-Quaternaire.

La plaine de Tamlouka est entièrement couverte par des dépôts Mio-Plio- Quaternaires masquant ainsi l'extension horizontale des formations géologiques tertiaires et secondaires plus anciennes. Seules les collines d'Ain Arko et les bordures de la plaine amplement étudiées offrent la possibilité de voir les affleurements et permettent des hypothèses sur les relations entre formation et structure.

Les bordures de la plaine sont constituées par :

La zone de Djebel Djaffa située à l'Ouest et au Sud-ouest. CE Djebel, comme le souligne Gramont et Lombard (1966), est une zone très tectonisée où plusieurs séries se superposent : la série Néritique du Constantinoise chevauche sur l'unité intermédiaire de Dj. Djaffa, à son tour, structurellement, chevauchées par le numidien, le tellien, les Babors le pré kabyle et les flyschs.

Au sud, on trouve la zone des écaillés des Sellaouas dont une grande partie a été étudiée par Voute (1967). Elle est constituée par un vaste ensemble d'affleurements où on rencontre des formations essentiellement pélagiques. La carapace des séries Néritiques et les faciès intermédiaires de Djebel Djaffa semble manquer dans les Sellaouas.

Au Nord-Ouest, on rencontre les séries telliennes atteignant systématiquement au moins le Sénonien supérieur, par endroit, l'Eocène ou le Miocène sont toujours présents ; parfois très développés, transgressifs et discordants reposant même sur des terrains très anciens de la série.

Au Nord et Nord Est, la nappe numidienne constituée par une alternance de grés hétérométriques et d'argiles chevauche sur toutes les formations anciennes.

A l'Est, le système collinaire du bassin miocène d'Ain Makhlouf constitue le prolongement oriental de la plaine. A ce niveau, quelques lambeaux isolés des unités de sellaouas et telliennes affleurent sous forme "d'iceberg" au sein des formations plus récentes Mio-Plio-Quaternaires.

3.2. Lithostratigraphie :

Dans ce paragraphe on va se limiter à la description des faciès pour la distinction entre les formations des différent systèmes et en se référant à l'extrait de la carte de Constantine 1/200000 et la notice explicative qui l'accompagne (Fig.17).

3.2.1. Unité de Djebel Djaffa

Les terrains les plus anciens rencontrés dans la zone limitrophe de la plaine appartiennent au Jurassique.

3.2.1.1. Jurassique :

Voute (1967) dans son étude sur la région, signale l'absence totale de cet étage et situe les formations les plus anciennes du djebel Djaffa au Barrémien ou à l'Hauterivien ; ce qui n'est pas l'avis des auteurs de la SONATRACH-BEICIP qui relèvent dans la série du Djebel Djaffa des fossiles du Jurassique terminal à savoir Kimméridgien et Portlandien. Le microfaciès calcaire jurassique rencontré à Djebel Djaffa est analogue à celui des collines de Ain Arko se présentant par les dolomies grises à la base, plus haut, par les calcaires récifaux et graveleux

en gros bancs contenant des fossiles de trocholina textuaires. Donc ce dernier par conséquent d'âge jurassique contredisant ainsi Voute et autres auteurs qui les attribuaient à l'Aptien.

3.2.1.2. Crétacé Inferieur :

a- Hauterivien :

Il se présente au Djebel Djaffa avec une épaisseur supérieure à 50m. Il existe deux faciès différents dans cette zone de transition, les marnes foncées alternant avec les calcaires micro brêchique à ammonites à croute ferrugineuse (signe de phase d'arrêt de sédimentation) et avec une intercalation de calcaire spathique de 20m d'épaisseur passant à une barre dolomitique de 40m d'épaisseur et de barre de calcaire glauconieux et grumeleux à Brachiopodes, oursins et huitres.

b- Barrémien :

Au Djebel Djaffa : c'est un faciès essentiellement marneux d'épaisseur d'environ 220m avec quelque intercalation de calcaire à Ammonites pyriteuses, le faciès de transition et représenté par 80m de marnes noduleuses et de calcaires brêchiques et pseudolitiques à Oursins, brachiopodes, et Orbitolines.

c- Aptien :

Au Djebel Djaffa, il atteint une épaisseur de 300m de calcaires subrécifaux à Rudiste à Foum el Allik ; alors qu'à Kef Ain Débagh, on a un sommet marno-calcaire. Au pied du Djebel Djaffa, un passage très régulier de ces calcaires de 200m d'épaisseur à des marnes avec quelques bancs de calcaire grumeleux fossilifère (oursins, huitre, orbitolines, ammonites ferrugineuses).

Au Djebel Djaffa, la région des massifs calcaires passe brusquement à la zone allongée de la Chebka des Sellaouas. La plaine de Tamlouka forme un élément de transition, il s'agit d'un fossé plissé en anticlinal parallèlement à son axe allongé, les faciès des étages crétacés se rapprochent beaucoup de ceux de la Chebka, mais l'Aptien montre encore une grosse lentille calcaire à Djebel Hammimat, situé au Sud-est. De là, on peut rappeler la confusion Aptien Jurassique faite par Voute (1967) et relevée par les autres (SONATRACH-BEICIP) ; ceci va par conséquent diminuer de l'épaisseur des calcaires de l'Aptien.

d- Albien :

A la crête de Djebel Djaffa, les calcaires micro-brêchiques ont une épaisseur de 150 m. Au Nord Est à Kef Ain Debagh, on observe aussi le passage à un faciès intermédiaire (Draa El Ksar) des marnes avec amas conglomératique de calcaire de 100 m d'épaisseur et marnes glauconieuses au sommet.

e- Cénomanién :

Au djebel Djaffa on a 60 m de calcaires subricifaux.

f- Turonien :

Djebel Djaffa : à son pied Sud-est on trouve le Turonien inférieur à faciès Chebka (calcaire lités à Inocérams). Dans le fossé axial, il y a passage latéral de marno-calcaire du Turonien inférieur à des marnes sableuses à Rudiste. Vers le Nord-est on observe une terminaison en biseau Turonien ; par contre il y a une lacune à l'Ouest.

3.2.1.3- Sénonien :*a- Coniacien :*

Il se présente dans les deux zones bordant la plaine. A Djebel Djaffa, Le fossé axial contient le Sénonien inférieur très mince ; localement transgressif sur le Cénomanién. En un point les marnes de base de ce Sénonien qui se terminent en biseau vers le Nord-est contiennent une microfaune plutôt coniacienne que santonienne. Le sous étage et présent ou pied Sud-est de Djebel Djaffa ;

b- Santonien :

A Djebel Djaffa, au Nord-Ouest du massif, l'étage est absent ; dans le fossé axial les marnes ont une épaisseur inférieure à 50 m au Nord de Draa El Kharrouba. A l'extrémité Nord-est de la chaîne de Djebel Djaffa, la transgression sénonienne débute probablement par le Santonien marin avec une épaisseur de 100 m.

Au centre, on trouve des calcaires brêchiques. Pour cet étage, le rapport SONATRACH-BEICIP complète ce qui a été fait par Voute qui souligne que les affleurements sénoniens situés au Nord et Nord-Ouest du massif de Djaffa sont allochtones et appartiennent à l'unité tellienne.

c- Campanien :

Au Djebel Djaffa, le Campanien inférieur se présente sous forme de marne de 50 à 100 m, avec des niveaux calcaires de 30 à 50 m ; par contre le Campanien supérieur est strictement marneux d'une épaisseur de 60 à 100 m. Dans cette région, le Campanien succède normalement le Santonien. Dans la région de Draa El Kharrouba, on rencontre une série normale relativement épaisse.

3.2.2. Nappe néritique de Constantine

Au niveau de Djebel Djaffa, cette série est localisée au Sud-ouest de la région d'étude. L'extension des affleurements est relativement réduite ; elle se limite aux étages suivants :

3.2.2.1- Barrémien :

Calcaires massifs d'une épaisseur d'environ 200m.

3.2.2.2- Aptien :

Calcaires à Orbitolines d'une épaisseur de 160m.

3.2.2.3- Albien :

Calcaires glauconieux d'une épaisseur très réduite d'environ 20m

3.2.2.4- Cénomaniens :

Calcaire massif à Caprines épais de 200m.

3.2.3. Unité des Sellaouas**3.2.3.1- Aptien :**

Dans la Chebka des Sellaouas, l'Aptien présente 100 à 200 m de marnes parfois gréseuses avec ammonites ferrugineuses et de niveau de calcaires lités.

3.2.3.2-Albien :

A la Chebka des Sellaouas, l'épaisseur totale varie de 150 m à 400 m et se subdivise en deux unités très distinctes par leur faciès :

a- Albien Inferieur et moyen :

Cet étage est constitué, à sa base, par une série marno-gréseuse avec une barre très apparente de grés durs de 120 à 300 m d'épaisseur.

b- Albien supérieur

Il présente une série de 20 m à 100 m caractérisé par des apports gréseux insignifiants et une sédimentation marno-calcaire régulière avec dépôt cyclique de calcaire lité à ammonites et fossiles ferrugineux.

3.2.3.3- Cénomaniens :

La transition des faciès entre le faciès type Djebel Djaffa et celui de Sellaouas est toujours très rapide, il y a des marnes et marno-calcaires à ammonites. Dans le fossé central le Cénomaniens terminal présente un faciès type Chebka (calcaire en plaquettes) passant à des calcaires grumeleux et marno- sableuse avec ammonite ferrugineuse et éponge.

Dans la Chebka des Sellaouas, on remarque la succession générale des dépôts avec prédominance de marne à la base et une alternance cyclique des calcaires lités et de marne vers le haut de la série.

3.2.3.4- Turonien :

La Chebka des Sellaouas permet une étude aisée d'une série turonienne complète avec de limites précises définies par des arguments paléontologiques. Le Turonien inférieur est présenté par des calcaires lités alternant avec des marnes, l'épaisseur varie de 8 m au centre à 30 m vers le Nord et à 60 m sur la bordure Sud Orientale. Le Turonien supérieur est formé par des marnes noduleuses à marne granuleuses souvent glauconieuse avec de petit niveau discontinu de calcaire tendre glauconieux et des calcaires brêchiques organiques d'épaisseur 20 à 150 m.

3.2.3.5- Sénonien :

a- Coniacien :

Ce faciès existe en bordure de la Chebka où il est très répandu. A la base, il présente un horizon constitué de marnes et calcaire glauconieux souvent grumeleux de 2 à 15 m. Dans la zone axiale de la Chebka apparaissent des traces d'algues et de piste de vers. Au-dessus viennent des marnes puis des calcaires parfois glauconieux, avec de petit niveau de calcaire constant, l'épaisseur sur la bordure de la Chebka dépasse les 300 m et se réduit au centre à 250 m.

b- Santonien :

Il est présent sur de grande distance, le niveau repère basal épais de 25 m au centre de la zone et de 5 à 10 m sur la bordure Sud-orientale. Il est constitué normalement par trois blocs de calcaires gris et jaunes séparés par des marnes. Au-dessus, on rencontre une série de marnes grises et vertes avec quelque intercalation de calcaire de 50 à 100 m sur la bordure Sud Oriental.

c- Campanien :

Le Campanien se rencontre dans la partie Sud-ouest avec une succession normale. Les marnes deviennent plus bleu, chargées de pyrite de fer, limonites et gypse.

d- Maestrichtien :

Dans la Chebka des Sellaouas, on y trouve les mêmes formations que celles le Djebel Djaffa.

Au niveau de la bordure d'Oued M'gaisba, les étages montrent une succession normale assez marneuse mais d'une épaisseur réduite.

3.2.3.6- Paléogène :

Epais de 170m, est constitué par des marnes noires contenant des boules jaunes selon Vila (1980), et des silex et nodules de phosphate selon Voute (1967).

3.2.3.7- Eocène :

- Dano-Montien :

Cet étage est absent dans la zone de Djebel Djaffa ; par contre il est local dans la Chebka des Sellaouas. Là où il existe, ses différents termes sont transgressifs et leur épaisseur est très faible par rapport aux faciès tellien du même étage appartenant aux Nord du village de Tamlouka. Ces formations de l'Eocène montrent une lithologie classique se présentant par des marnes noires du Paléocène, faciès marno-calcaire du sous étage Yprésien, des marnes noires également du Lutétien. De plus, Voute (1967) indique que les roches sont bitumineuses et contiennent des silex et de petits nodules de phosphates. Les niveaux marno-calcaires contiennent des calcaires conglomératiques à nodule de phosphates.

3.2.4. Nappe tellienne:

Chevauchante sur la série néritique de Djebel Djaffa, cette unité comprend de la base vers le sommet, les termes suivants :

3.2.4.1- Sénonien inférieur :

Représenté par des marnes et marnocalcaires à Ostréidés d'une épaisseur d'environ 100m.

3.2.4.2- Sénonien supérieur :

Il est organisé en deux séries marno-calcaires successives séparées par des marnes grises. L'ensemble est épais d'environ 550m.

3.2.4.3- Paléocène :

Épais de 170m, il est constitué par des marnes noires contenant des boules jaunes, selon Vila (1980), et des nodules de phosphates selon Voute (1967).

3.2.4.4- Eocène :

Il comprend trois termes avec à la base une barre marno-calcaire noires à silex avec un petit niveau (de 20cm) riche en Nummulites et au sommet un Lutétien supérieur plus ou moins épais d'environ 560m.

3.2.5. Nappe numidienne de Djebel Oncel :

Dans un contexte global, cette unité est constituée de bas en haut par les trois termes :

- ✓ Les argiles sous numidiennes à Tubotomaculum ;
- ✓ Les grés numidiens ;
- ✓ Les argiles et les marnes à silexites supra numidiennes.

L'ensemble constitue une épaisse série datée à l'oligocène-Burdigalien (Lahondère, 1983)

3.2.6. Le remplissage mio plio quaternaire :

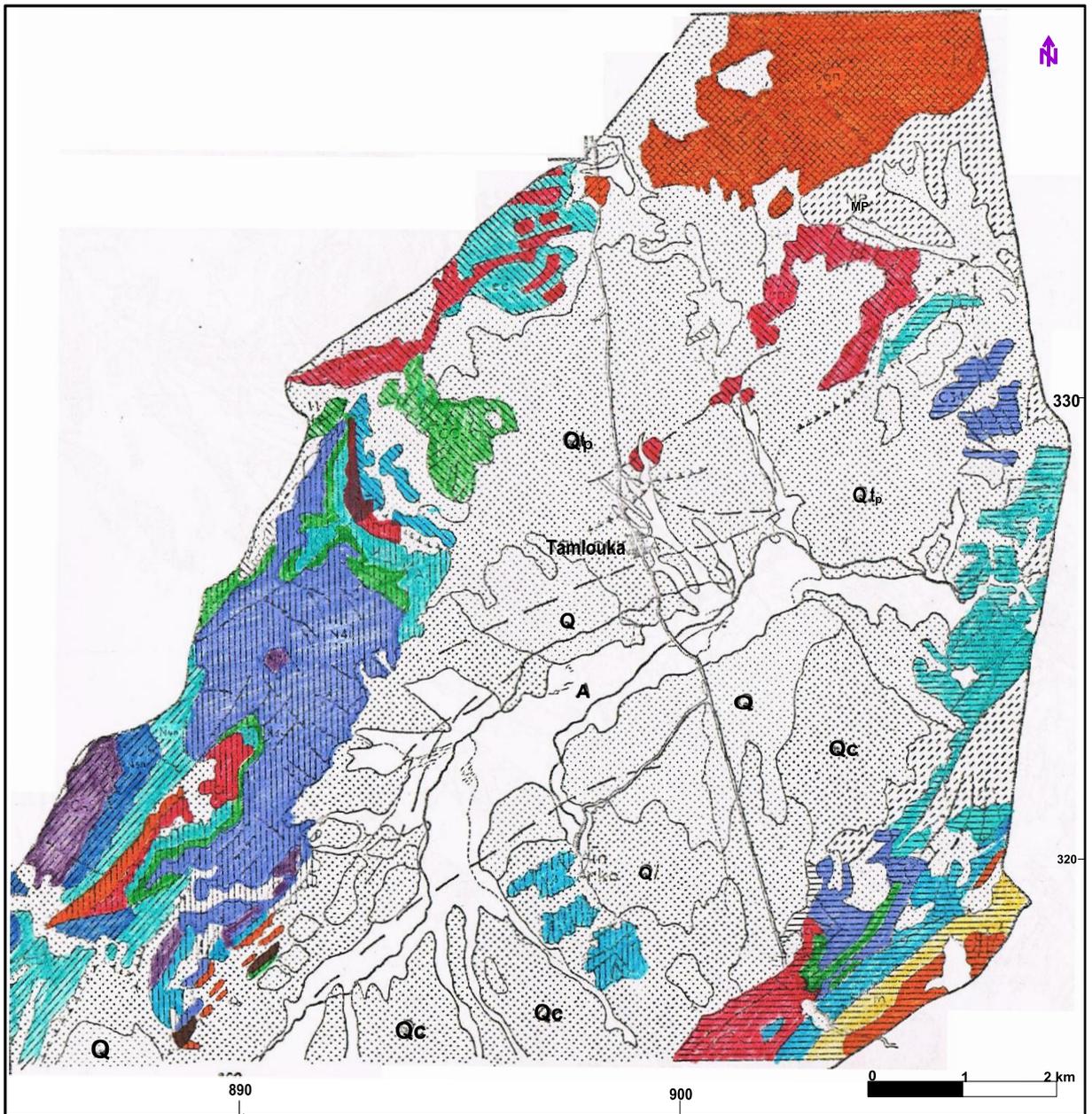
3.2.6.1- Mio Pliocène :

À la base, le Miocène marin est caractérisé par des grés jaunes brun, alternant parfois avec des marnes gréseuses, d'argiles et marnes sableuses jaune et grise ; vers le haut, il existe des bancs épais de calcaires brun et gris

Le Mio-Pliocène indique un stade de sédimentations continentales affectées après la réalisation de l'édifice allochtone grandement affecté par l'érosion. Les dépôts Mio-Pliocène atteignent 500 m d'épaisseur comme l'indique Voute (1967).

3.2.6.2- Quaternaire :

Dans la région d'étude, la croute calcaire principale et l'argile rouge brun sableuse et graveleuse sous-jacente passent latéralement à des couches lacustres formées par une alternance de marnes rouge sableuses et de calcaire très marneux, ou des marno-calcaires rougeâtre et blanchâtre crayeux et grumeleux en bancs de 20 à 40 cm. Vers le Nord-est, en allant en direction de Tamlouka, le quaternaire ancien lacustre atteint une certaine puissance. Il s'agit de remplissage d'un grand bassin indépendant (le bassin de Tamlouka) dont la terminaison Sud-ouest se trouve dans le cordon compris entre le massif de Djebel Fortas et Djebel Hirech situés plus au Sud dans la région d'Ain Mlila.



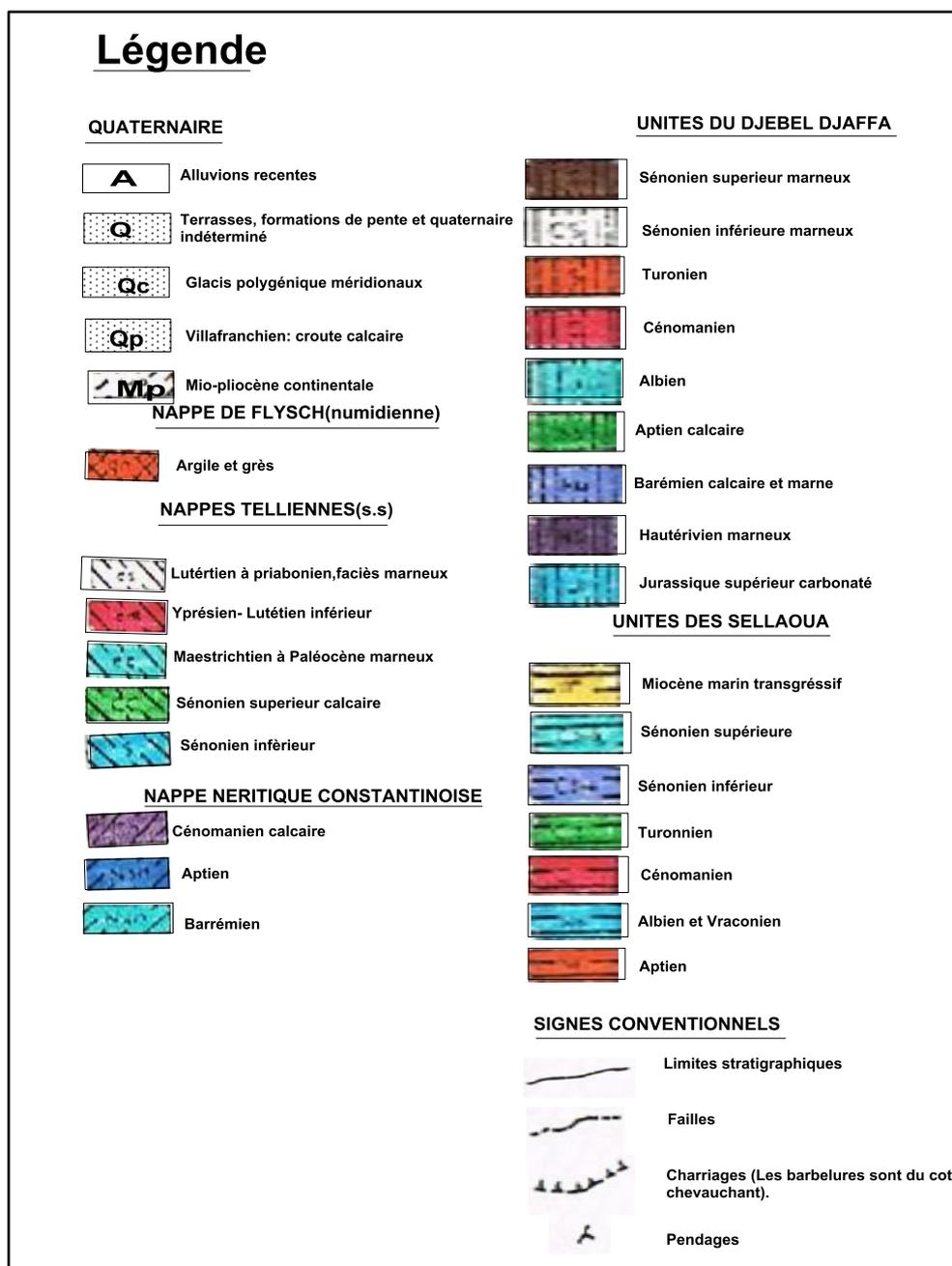


FIG. 17. CARTE GEOLOGIQUE DE LA PLAINE DE TAMLOUKA MODIFIEE (VILA, 1980)

3.3. Paléogéographie et tectonique

3.3.1- Paléogéographie

Ici nous donnerons un aperçu géologique qui va nous fournir des informations intéressantes sur l'ampleur du mouvement tectonique au Néogène et quaternaire. Les plus grandes épaisseurs de la série lacustre Mio-Plio-Quaternaire s'observent dans la partie Nord-est du bassin. Les travaux géophysique (sondage électrique) n'ont pas atteint le substratum sur une profondeur de 500 m. Voute (1967) écrit que la couche du Mio-Plio-Quaternaire est

supérieure à 100 m, alors dans la partie Sud-ouest (sur la feuille de Ain Babouche) il note que les épaisseurs ne dépassent pas les 20 m, et que le long de la bordure Nord de la Chebka des Sellaouas, l'épaisseur varie de 30 à 40 m.

On peut remarquer, ici, que le fond d'Oued M'gaisba draine le bassin de Tamlouka à la cote 715 m. En quittant la cuvette de Tamlouka, l'Oued coule sur des terrains crétacés en traverse la Chebka des Sellaouas avant de se jeter dans l'oued Cheref.

La cuvette de Tamlouka ne peut donc avoir pris naissance sous la seule influence de l'érosion fluviale, le climat du passé ne se prêtait non plus à un apport éolien très actif de telles phases sèches n'étant connues que dans des régions plus méridionales et beaucoup plus arides. Elle doit son développement à des mouvements de subsidence dont la preuve est à chercher aux alentours du village de Tamlouka. Des mouvements négatifs sont accompagnés probablement d'un entassement de l'anticlinorium de la Chebka des Sellaouas et du massif calcaire de Djebel Djaffa et Kef Ain Débagh. Ces mouvements ont dû commencer au début du Quaternaire et se poursuivre jusqu'après la formation de la croûte calcaire principale. La cuvette de Tamlouka ainsi formée à une allure d'un fossé d'effondrement et de synclinal à sa terminaison Sud- Ouest.

Seulement ceci nous emmène à dire que probablement il s'agit de l'enjeu de faille plus ancienne longeant le grand accident du socle qui forme la limite entre les zones paléogéographiques des massifs calcaires de Djebel Djaffa et de Chebka des Sellaouas. Le bombement de la partie axiale de la cuvette au Sud –Est d'Ain Arko peut également s'expliquer par la réactivation d'un anticlinal plus ancien dont le point culminant est formé par le calcaire Jurassique d' Ain Arko.

3.3.2- Tectonique :

La plaine de Tamlouka forme comme il a été décrit une cuvette allongée et encadrée par la Chebka des Sellaouas et le Djebel Djaffa. Ces derniers ont une direction Sud-ouest, Nord-Est annonçant ainsi le style d'alignement.

Le Djebel Djahfa, selon Voute (1967), forme un grand dôme dont la structure se complique par des failles et des flexures longitudinales et par une faille transversale d'âge beaucoup plus récent. Le flanc Nord-est est entièrement formé par une série très épaisse de calcaires rigides découpée en paliers marno-calcaire par des failles longitudinales. La zone axiale et coupée par un fossé, le flanc Nord-est formé, dans son ensemble, par une série marno-calcaire montre quelque plis d'anticlinaux relativement aigus, passant parfois à de

petits horsts bordés par des zones longitudinales faillées et séparés par de loges synclinales à fond relativement plat. Le flanc Sud-est des anticlinaux secondaires ont l'allure de flexure.

Le bassin de Tamlouka occupe une position de synclinal par rapport au Djebel Djaffa et aux chainons de la Chebka des Sellaouas tout en formant lui-même un anticlinal simple à grand rayon d'après le rapport SONATRACH-BEICIP. Cette hypothèse n'est pas l'avis de Voute concernant les bordures. Quant à la Chebka des Sellaouas la première impression que l'on reçoit et la répartition infinie des structures monoclinales du Crétacé au Burdigalien. L'hypothèse faite par Voute où il considère les montagnes isolées d'Ain Arko comme l'élément témoins culminant d'un ancien anticlinal réactivé.

Pour les auteurs du rapport SONATRACH –BEICIP, ces calcaires isolés dans la plaine de Tamlouka à Ain Arko représentent probablement eux aussi un noyau d'anticlinal couché en position chevauchante sur la série marneuse de la zone des Sellaouas.

3.3.3. Conclusion :

La région de Tamlouka occupe une situation structurale lui permettant d'appartenir au domaine tellien, à la plate-forme néritique constantinoise et au sillon des Sellaouas.

C'est pendant le miocène inférieur que s'est produit l'effondrement de la plaine de Tamlouka, donnant naissance à un fossé axiale, ce dernier se trouvait comblé ensuite par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire donnant naissance à un système aquifère superficiel, dont l'épaisseur est variable (indiqué par l'étude géophysique), reposant sur un complexe calcaire fissuré et karstifié d'âge Jurassique et Paléocène affecté par de nombreuses failles. Ce complexe présente à son tour une nappe profonde plus importante, caractérisée par une variation latérale des formations aquifères.

3.4. Etude géophysique :

Parmi les différentes méthodes géophysiques utilisées afin de déterminer les différentes formations souterraines selon leurs propriétés physiques, on a les méthodes électriques qui sont mises à contribution dans la recherche d'eau ou de matériaux utiles. Elles jouent toujours un rôle plus grand dans le génie civil et dans la recherche minière. Les documents utilisés pour l'élaboration de ce chapitre sont les résultats des études géophysiques de SONATRACH-BEICIP et les différentes campagnes géophysiques réalisées par le groupe ALGEO.

Dans le cadre de l'étude de notre terrain, on va essayer de déterminer l'épaisseur du remplissage Mio-Plio-Quaternaire et la nature du substratum et les différents accidents affectant cette région. La prospection électrique permet grâce aux mesures des résistivités des

terrains rencontrés de préciser la limite probable entre le remplissage conducteur et le substratum résistant.

3.4.1. Historique

Plusieurs études géophysiques ont été effectuées dans la plaine de Tamlouka dont les plus importantes sont celles menées par :

La compagnie Générale de Géophysique (CGG) qui a entrepris une étude par prospection géophysique. La méthode était celle du sondage électrique (quadripôle Schlumberger), les opérations sur le terrain ont été effectuées en 1961. Au total, 186 sondages électriques ont été exécutés, dont 37 suivant deux directions orthogonales avec une longueur de ligne AB d'envoi de courant atteignant 8000m.

La seconde étude a été faite par la société algérienne de géophysique (ALGEO). Les travaux sur terrain ont été effectués pendant l'année 1979. Le programme comporte 319 sondages électriques en AB=1000m, 26 SE en AB=5000m et 25 SE en AB=2000m.

3.4.2. But de l'étude

Les buts assignés à la prospection électrique sont les suivants :

- Permettre la connaissance de l'épaisseur du remplissage du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine.
- Déterminer les différents aquifères.
- Permettre la corrélation entre les résultats géophysiques et les données géologiques.
- Montrer les accidents tectoniques, et les localiser.
- Mentionnons enfin que la zone prospectée, couvre une superficie de plus de 200 km², dont la plus grande partie se trouve sur la feuille d'Ain Regada au 1/50000, le reste est constitué par la partie Nord de la feuille d'Ain Babouche au 1/50000.

3.4.3. Problème posé pour la géophysique :

Le problème posé à la prospection géophysique consiste à déterminer l'allure du toit des séries calcaires du Crétacé inférieur sous le Crétacé supérieur et le tertiaire marin et continental à en préciser l'allure structurale et à délimiter, si possible, les changements de facies souterrains existant, les niveaux perméables de la couverture et dans le réservoir calcaire à proximité des zones tectonisées.

La connaissance des principales propriétés physiques des roches est nécessaire pour le choix rationnel des méthodes géophysiques que pour les interprétations qualitatives et quantitatives des résultats obtenues.

Les données disponibles relatives aux propriétés physiques des roches sont fragmentaires ; aussi nous avons regroupé, dans ce chapitre, les données relatives seulement à la résistivité électrique des roches, provenant des différentes études menées dans la région investiguée et les régions avoisinantes ; dans le but d'en tirer un ordre de grandeur de ces paramètres qui serviront à une meilleure analyse des résultats des prospections électriques (fig. 18, 19 et 20).

3.4.4. Interprétation :

La corrélation entre les données de la géologie et celles de la géophysique nous a permis d'établir l'échelle de résistivité des principaux types de roches dans la région. Le tableau 15 montre quelques remarques :

Les intercalations grossières, sables, graviers ainsi que les conglomérats paraissent être négligeable, elles ne sont pas caractérisées par leurs propres valeurs de résistivité étant donné qu'elles disparaissent dans le milieu environnant argileux plus conducteur (6 à 10 ohm. m) ainsi que les conglomérats entre le milieu argileux plus conducteur et le milieu calcaireux plus résistant (100 à 300 ohm. m).

TABLEAU 15. CORRELATION ENTRE LA GEOLOGIE ET LES RESULTATS GEOPHYSIQUES

Echelle des résistivités (ohm. m)	Caractéristique lithologique	Etage
06 – 10	Argile sableuse + marnes + débris calcaires	Mio-Plio-Quaternaires
15 – 20	Argile sableuse + graviers et gravillons	
20 – 30	Calcaire marneux	Crétacé
80 – 100	Calcaire	Crétacé Eocène
100 – 300	Calcaire massif type Jurassique d'Ain Arko	Jurassique

3.4.5. Les sondages Etalons :

Dès la prospection, il n'existe dans la plaine de Tamlouka que trois forages.

Le forage (Fi) implanté au NE du village de Tamlouka à proximité de la source du même nom ; ses coordonnées Lambert sont :

$$X_1 = 889,350 \quad Y_1 = 328,600$$

Les sondages électriques SE₁ et SE₂ ont été exécutés en croix à proximité de ce forage afin d'éviter l'influence du tubage.

Les forages "F8" et "F9" sont implantés dans la région d'Ain Arko respectivement au NE et au SW des collines calcaires ; leurs coordonnées Lambert sont :

$$X_8 = 899,100 \quad Y_8 = 320,000 \quad X_9 = 895,700 \quad Y_9 = 317,600$$

2.4.6. Lecture des résultats du point de vue lithologique :

2.4.6.1. Nature du remplissage continental :

Dans la moitié Sud de la plaine de Tamlouka, le remplissage continental est assez homogène et sa résistivité comprise entre (7 et 120 ohm.m) correspond à un argilo sableux. Dans la moitié Nord de la plaine, le recouvrement passe progressivement de (10-120 ohm.m) à la périphérie à 20 ohm.m dans la partie centrale de la cuvette, indiquant alors un faciès franchement argileux, probablement salé.

3.4.6.2. Nature du substratum :

Les Calcaires du Crétacé inférieur au Djebel Ain Arko représente le Substratum résistant qui plonge sous la couverture Mio-Plio-Quaternaire et occupe près d'un tiers de la plaine de Tamlouka.

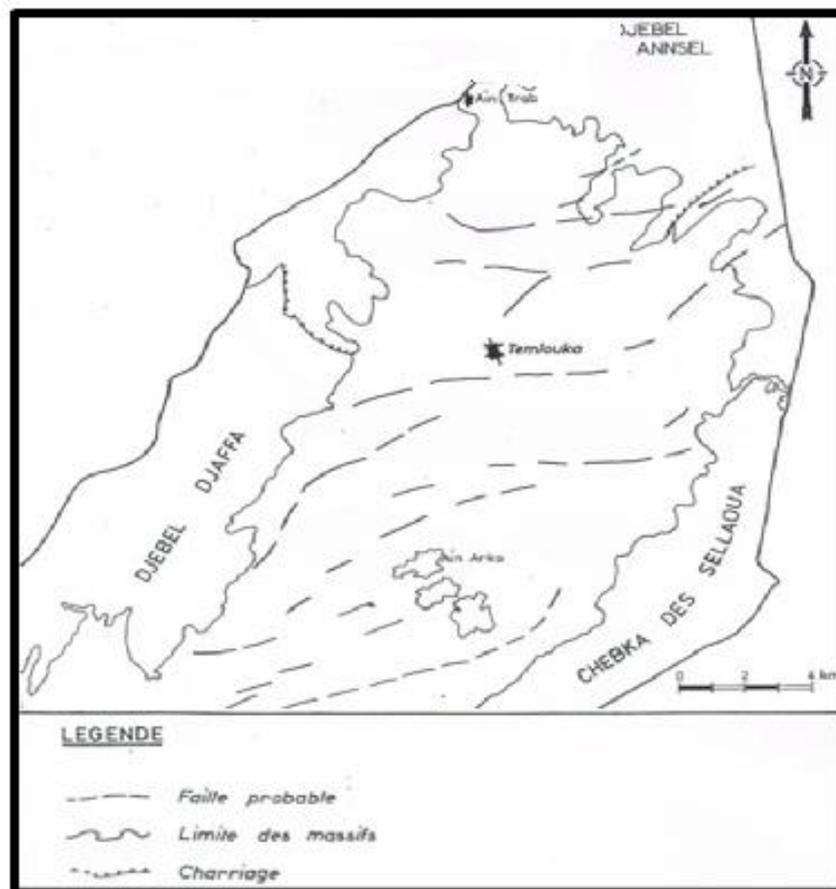


FIG. 18. CARTE DES DISCONTINUITES ELECTRIQUES – FAILLES PROBABLES (DJORFI ET AL. 1993)

Le substratum conducteur existant dans le reste de la plaine est formé par le tertiaire marin, du Crétacé supérieur ou du Crétacé inférieur à faciès marneux, ces différents terrains ne se différencient pas entre eux, car ils présentent de résistivités peu contrastées, par contre,

on distingue généralement un horizon résistant très profond qui correspond probablement à des Calcaires du jurassique Sous- jacent.

3.4.6.3. Interprétation des résultats des coupes géo-électrique :

Généralement les résultats des coupes géo-électriques confirment les résultats généraux des sondages mécaniques. Prenant par exemple les trois coupes transversales de directions N.W-S.E (Fig. 19). Généralement ces coupes montrent des discontinuités électriques indiquant des failles probables qui séparent une formation résistante (100 à 300 ohm.m) représentant probablement des calcaires jurassiques dans les coupes (D.D') et (E.E') qui se présentent en profondeur par un relèvement de certaines parties et enfoncements d'autres. La coupe (C.C') représente les formations de (30 à 50 ohm.m) indiquant les marno-calcaires et calcaires marneux du crétacé.

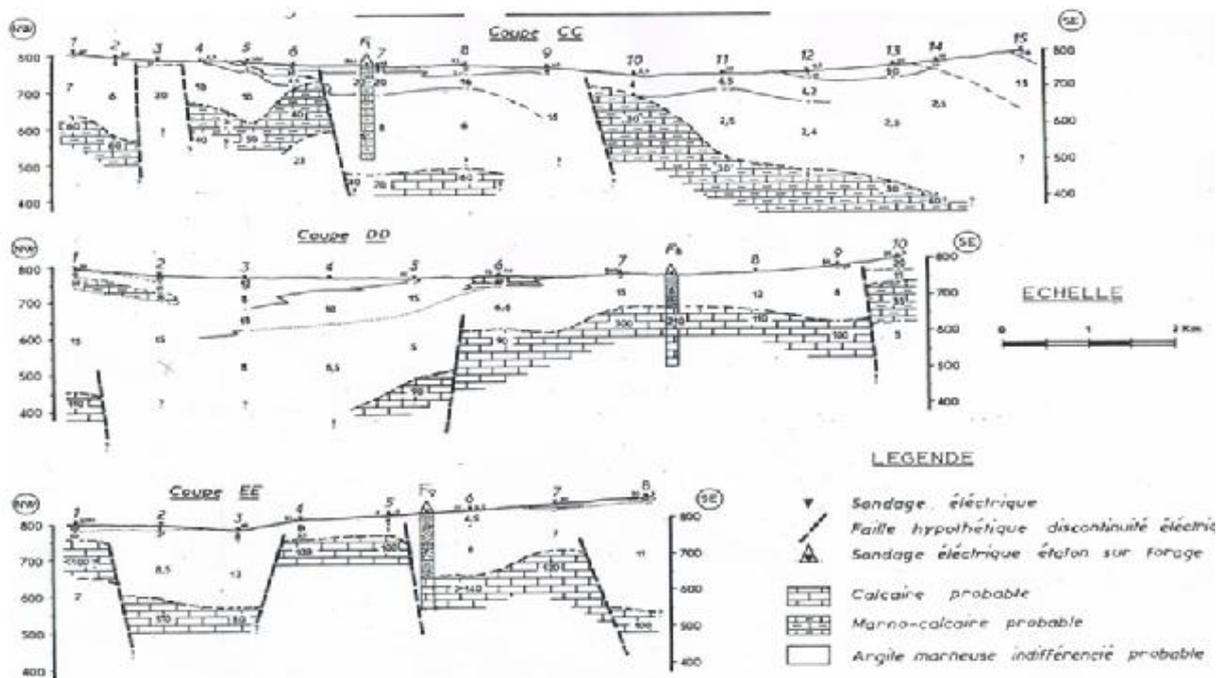


FIG. 19. COUPES GEO-ELECTRIQUES TRANSVERSALES (DJORFI ET AL. 1993)

- Les deux coupes longitudinales (A.A') et (B.B') de direction N.E-S.W (Fig. 20) montre que la majorité des sondages électriques en AB = 5000 m atteint le substratum résistant en profondeur (500 m), ce dernier constitue soit le prolongement des calcaires jurassique d'Ain Arko en profondeur ou bien tout simplement les formations crétacé effondrées. Dans le premier cas, la continuité infirmerait la thèse des auteurs du rapport BEICIP-SONATRACH. Le résistant (70 à 100 ohm.m) compartimenté appartiendrait aux lambeaux de calcaire éocène de la nappe tellienne.

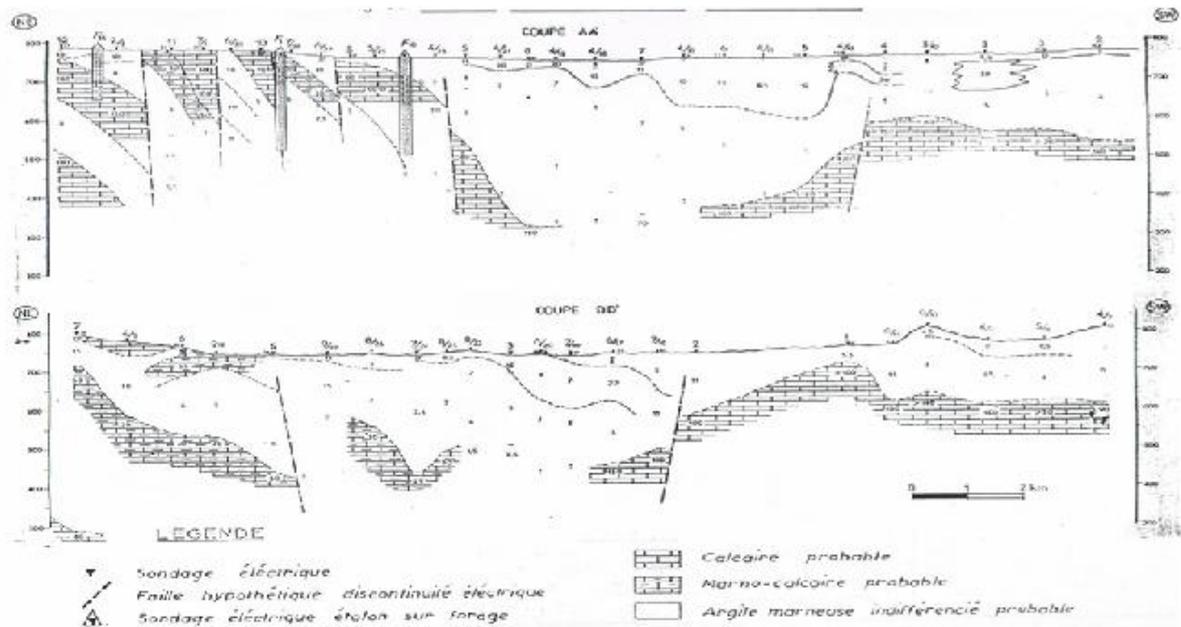


FIG. 20. COUPES GEO-ELECTRIQUES LONGITUDINALES (DJORFI ET AL. 1993)

Les fortes valeurs de la résistivité sont probablement dues à ce qu'une grande partie de ces calcaires affleurent en surface et se trouve au-dessus du plan d'eau. Dans l'ensemble les coupes nous montrent ainsi deux substratums de résistivité différente. L'un plus résistant (300 ohm.m) aux alentours d'Ain Arko avec prolongement vers le S.E est formé par les calcaires jurassiques affleurant aux collines d'Ain Arko. Ce substratum occupe près d'un tiers de la plaine de Tamlouka. L'autre moins résistant (30 ohm.m) existant dans le reste de la plaine est constitué par des calcaires et marno-calcaires du Crétacé. Dans les deux cas, ces substratums sont discontinus à cause du réseau de faille affectant les formations carbonatées ce qui leur confère un intérêt hydrogéologique certain, donc la circulation des eaux étant facilité par ce système de faille.

En plus les calcaires jurassique d'Ain Arko semblent être couvert d'une couche de conglomérats relativement épaisse (30 m) comme l'indique les forages exécutés dans la zone, mais l'étude électrique n'a pas pu les séparés des calcaires sous-jacent. Donc la nappe aquifère des calcaires jurassiques d'Ain Arko constitue l'unique possibilité intéressante dans la région.

Les formations aquifères dans le remplissage ne semblent pas être importantes. Les coupes indiquent de rares passages résistants (17 à 25 ohm.m) constitués probablement de conglomérats et autre éléments grossiers, de sables argileux ou calcaire lacustre ; dans l'ensemble argilo-marneux de (4 à 8 ohm. m). Généralement ce remplissage Mio-Plio-Quaternaire a une grande épaisseur dépassant parfois les 500 m au S.W de Tamlouka (Fossé d'effondrement) avec une moyenne oscillant autour de 300 m.

3.4.7. Conclusion :

La synthèse des résultats nous permet de dire qu'il y a une correspondance générale entre la géophysique et la géologie, mais les décalages observables sont souvent dus aux limites d'application et d'appréciation des méthodes électriques. Les coupes géo électriques confirment les résultats précédents : Les couches conductrices sont caractérisées par de grandes épaisseurs dépassant parfois 400 m, et de faibles résistivités de (4 à 10 ohm. m). Elles ont révélés l'importance des calcaires jurassiques d'Ain Arko et leurs étendues. Ces derniers continuent doucement vers le S-W en direction du Djebel Djaffa auquel ils semblent être liés. Vers le N-E en direction du village de Tamlouka, ces calcaires plongent abruptement sous la couverture Mio-Plio-Quaternaire, constituant le substratum de la cuvette.

D'autres formations moins résistantes apparaissent sur les coupes qui pourraient être constituées par les marno-calcaires du crétacé. Profondes, et couvertes d'une épaisse couche argilo-marneuse, elles pourraient recéler de bonnes potentialités aquifères dans le cas d'un lien probable avec les formations affleurant en bordure et d'une éventuelle circulation en profondeur, des eaux. Les calcaires du Crétacé et de l'Eocène affleurant au Nord de Tamlouka ont de grandes résistivités (80 à 100 ohm.m). Ils sont compartimentés par un système de faille avec une relative étendue en surface.

En définitive, les formations hydrogéologiquement intéressantes sont donc constituées par les calcaires altérés (fissurés) du Jurassique avec des conglomérats qui les couvrent, les calcaires Crétacé-éocènes du Nord du village de Tamlouka et les bordures de la cuvette. Les possibilités d'exploitation de la nappe phréatique sont faibles car le remplissage est essentiellement argileux.

Chapitre IV :

Etude Hydrogéologique

Chapitre IV : Etude Hydrogéologique

4.1. Introduction :

En se basant sur les données collectées sur terrain (mesures in situ) et celles disponibles à la DHW de Guelma, on va essayer de définir les horizons aquifères existants à l'échelle de la zone d'étude, puis faire ressortir les caractéristiques hydrodynamiques et établir des cartes piézométriques caractérisant l'écoulement sous terrain de l'eau. La dernière étape consiste à déterminer les zones favorables à l'exploitation.

4.2. Inventaire des points d'eau :

Les eaux exploitées dans la région sont des eaux qui proviennent des sous-sols à différentes profondeurs et à différentes formations atteignant les 300 m dans certains endroits ; elles sont exploitées par des forages sources et puits (Fig.21).

Sur la carte, nous avons matérialisé l'ensemble des puits, des forages et des sources ayant fait l'objet de collecte de données, de visite et de suivi méthodiques (mesures, prélèvements).

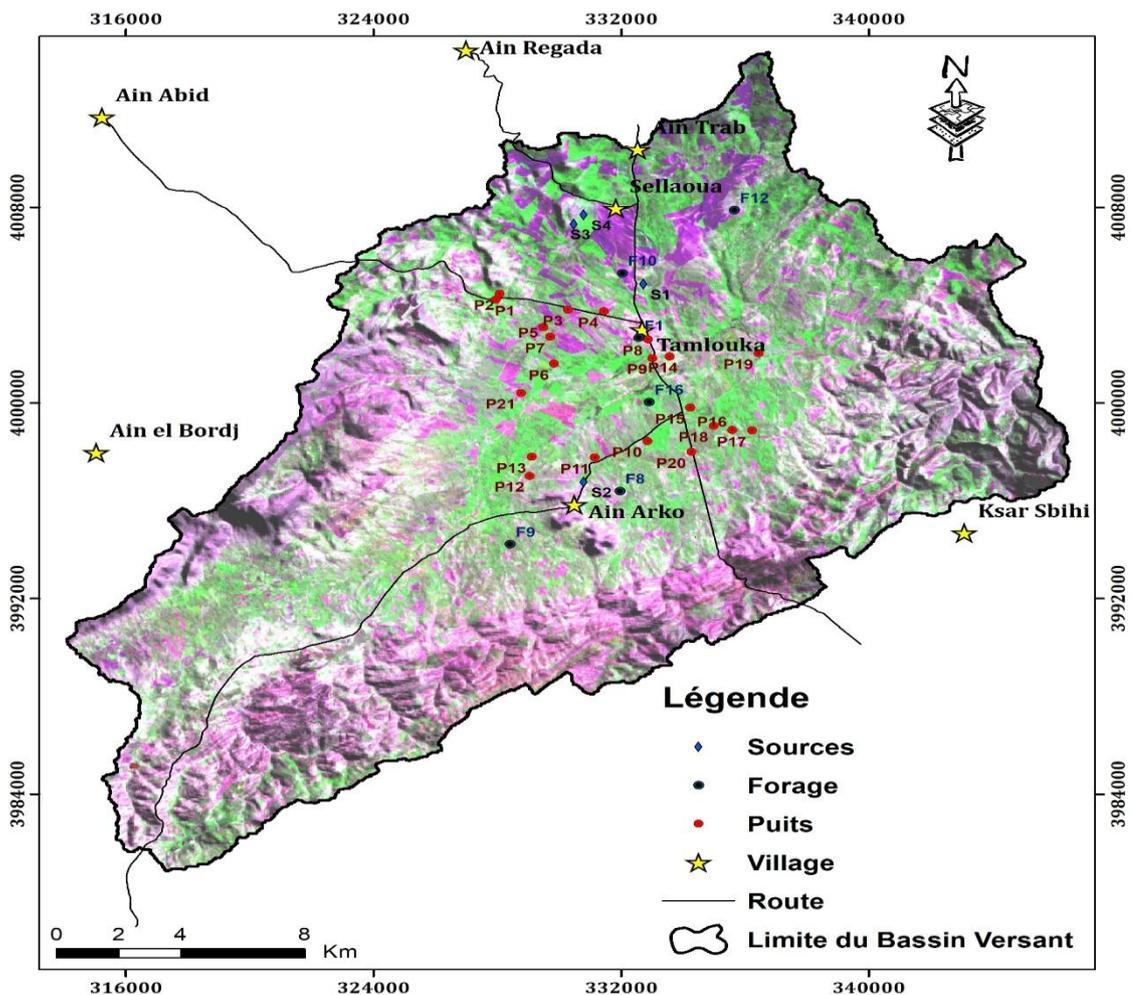


FIG. 21. CARTE D'INVENTAIRE DES POINTS D'EAU DE LA PLAINE TAMLOUKA 2013

4.2.1. Les forages :

Dans la plaine de Tamlouka, on a 06 forages qui ont été réalisés par différentes sociétés et exploités avec un débit total dépassant les 100l/s (Tableau 16). Ces forages sont destinés essentiellement à l'AEP des villages de Tamlouka, Oued Zenati, Ain Makhlouf etc...

TABLEAU 16. INVENTAIRE DES FORAGES DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (DHW DE GUELMA)

N° des forages	X (m)	Y (m)	Z (m)	PS (m)	NS (m)	Q l/s	Loc (sit)	Date r
F8	899.100	320.000	785.40	18.40	767	28	Ain Arko	67
F10	898.600	328.900	760.00	19.14	740.60	14	Tamlouka	85
F16	899.800	323.700	790.00	24	766	36	Ain Arko	97
F9	895.700	317.600	783.00	23.10	759.9	8	Ain Arko	67
F1	899.300	326.300	760.00	28.40	731.6	12	Tamlouka	92
F12	902.050	331.700	780.00	15.92	764.08	18	Tamlouka	85

Sit : situation, *Q* : débit, *PS* : profondeur de la surface de l'eau, *NS* : niveau statique,

Loc : localisation, *Date r* : date de réalisation

4.2.2. Les sources :

Les sources importantes et à grand débit sont peu nombreuses dans la région. Elles constituent, pour la plupart, des cas de résurgence aux pieds des formations calcaires (Tableau 17).

TABLEAU 17. INVENTAIRE DES SOURCES "PLAINE DE TAMLOUKA"

N° des Sources	Nom de la source	X (m)	Y(m)	Z(m)	Observation
1	Ain Tamlouka	899.3	328.5	750	Equipée, avec un débit très important.
2	Ain Arko	897.9	320.3	770	Source thermique avec t° de 30°C.
3	Ain Djenane	896.9	330.8	810	Eau potable.
4	Ain Kabrit	897.2	331.2	850	Source sulfureuse.

4.3. Inventaire des puits :

Les puits existent sur presque toute la plaine captant la nappe libre du Quaternaire avec un niveau piézométrique atteignant et dépassant parfois la surface du sol dans la période de hautes eaux ce qui se manifeste sur le terrain par des zones de marécage.

4.4. Les déférents aquifères dans la plaine de Tamlouka :

Le système hydrogéologique de la plaine de Tamlouka est très complexe ; car on y rencontre une multitude d'horizons. Il débute par les formations aquifères constituées par les dépôts du Quaternaire et du Mio-Plio-Quaternaire et se prolonge, en profondeur, jusqu'aux aquifères dans les calcaires crétacés et jurassiques. L'ensemble est compliqué par l'existence d'une multitude de passages argileux-marneux imperméables formants par endroit, le toit des nappes profondes en leur conférant le caractère de nappes captives.

A cause de la présence d'un substratum plus ou moins continu qui délimite la nappe superficielle des formations aquifères profondes, on considère que tout le système aquifère profond est constitué par des nappes « captives » dont les horizons aquifères communiquent entre eux soit directement par les couches perméables ou bien par l'intermédiaire de failles affectant les formations calcaires et qui permettent la circulation d'eau. Donc, deux types de nappes s'individualisent : la nappe libre et la nappe captive (Fig. 22 et 23).

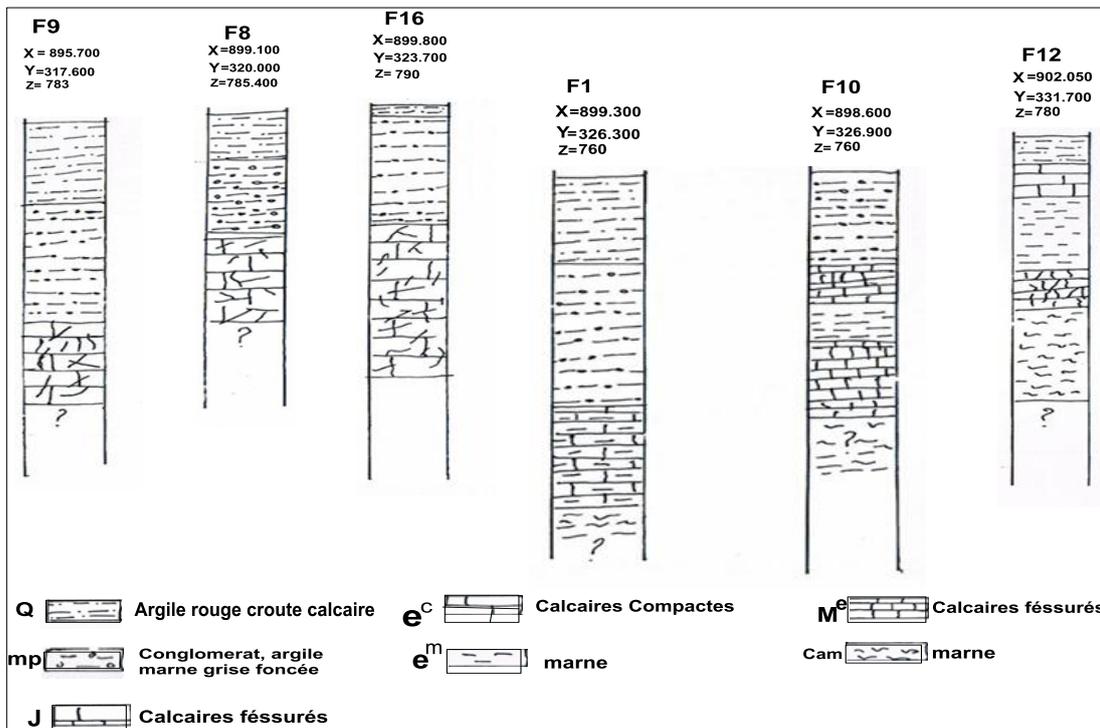


FIG. 22. LES LOGS DE QUELQUES FORAGES REALISES SUR LA PLAINE (DHW GUELMA)

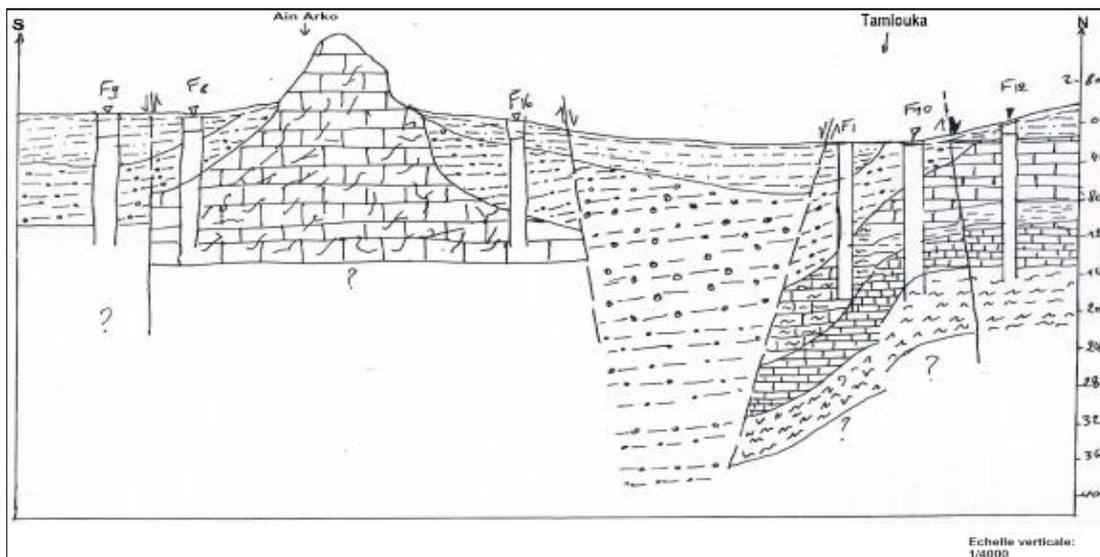


FIG. 23. COUPE HYDROGEOLOGIQUE SCHEMATIQUE DES FORAGES (DHW GUELMA)

La coupe hydrogéologique est établie en se basant sur l'étude géologique, et les logs de quelques forages réalisés dans la plaine.

Il s'agit d'une coupe longitudinale de direction Nord Sud qui nous donne de précieuses informations sur la structure complexe de la plaine. En effet, cette dernière est le siège d'une succession de horst (môle d'Ain Arko) et de graben (effondrement de la plaine).

Dans sa structure, le môle d'Ain Arko s'identifie à un anticlinal percé par les formations calcaires crétacées et jurassiques ; alors que l'effondrement de la plaine représente une zone de subsidence, ayant l'allure d'un synclinal comblé par les formations Mio-Plio-Quaternaires.

La coupe hydrogéologique nous a permis, également, de déterminer le niveau statique de la nappe libre ainsi que celui de la nappe profonde.

Localement, les faibles épaisseurs des formations imperméables entre les niveaux aquifères expliquent la présence d'une liaison hydraulique entre eux.

4.5. Identification des nappes :

4.5.1. Aquifère à nappe libre dans les dépôts du quaternaires :

D'après le log du forage F9, la nappe possède une faible puissance hétérogène constituée d'argiles sableuses, de sable argileux et débris calcaires ; ce qui lui donne une faible possibilité aquifère, cette nappe est exploitée par les puits domestiques avec un faible débit.

4.5.2. Aquifère à nappe captive dans les dépôts Mio-Plio-Quaternaires

Cette nappe est constituée par des couches argilo-sableuses à galets et graviers de faible puissance (4 m au Nord de Tamlouka) et aussi de faible possibilité aquifère. Alors qu'au Sud de Tamlouka, elle est traversée par un forage mécanique profond (F1).

4.5.3. Aquifère à nappe captive dans les dépôts de l'Eocène :

C'est une nappe contenue dans les calcaires éocènes situés aux alentours du village de Tamlouka. Le changement latéral du faciès des calcaires vers le marno-calcaire de l'éocène réduit l'importance de cette nappe ; signalant que lors de l'exécution du forage (F1) la nappe éocène a fourni 8.0 l/s.

4.5.4. Aquifère à nappe captive dans les formations maestrichtiennes :

Elle est constituée de calcaires fissurés et karstiques. C'est la plus importante nappe de la région, sa puissance varie du Nord vers le Sud (d'après le forage F10 et F12) à cause d'un changement d'épaisseur.

Les calcaires maestrichtiens possèdent une grande possibilité aquifère telle que signalé un niveau du (F12, Q=18 l/s et F10, Q=14 l/s). Dans la zone d'effondrement, la nappe est discontinue à cause des failles qui la traversent. Au Nord de Tamlouka, ces failles ont donné

naissance à la célèbre source de Tamlouka (source remontante). La température élevée de ces eaux explique leur origine profonde.

4.5.5. Aquifère à nappe captive dans les calcaires jurassiques :

La nappe est contenue dans les calcaires jurassiques affectés par une grande fissuration et karstification. Dans les calcaires du môle d'Ain Arko, la présence de grandes grottes, cavernes et canaux est très remarquable.

La capacité de l'aquifère est grande ; au niveau du forage F₁₆, le débit est de 36 l/S par contre il est de l'ordre de 28 l/S au niveau du forage F₈.

4.6. Alimentation des nappes :

Il existe une liaison hydraulique entre toutes les nappes existantes dans la région. La nappe phréatique peut alimenter la nappe captive par drainance (faible puissance des formations imperméables) et inversement, les nappes captives peuvent alimenter la nappe libre. Cette alimentation est assurée par un système de failles affectant les formations calcaires fissurées. A titre d'exemple, la source remontante de Tamlouka où les eaux remontent à la faveur d'une faille et alimentent les nappes sus-jacentes.

La nappe libre dans les dépôts du quaternaire s'alimente par l'infiltration directe des eaux météoriques et des eaux d'Oued Mguisba.

Au sud, l'alimentation de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire est assurée par l'échange entre cette nappe et celle du jurassique. Au Nord, elle est alimentée par la nappe du Maestrichtien et de l'Eocène par l'intermédiaire des failles, l'analyse chimique à confirmer cette relation.

Pour la nappe du Maestrichtien qui affleure au Nord de Ain Trab, son alimentation se fait par l'infiltration directe des pluies à travers les fissures. Dans la partie centrale de la plaine, l'alimentation se fait également, par l'infiltration directe des pluies passant à travers le Quaternaire.

L'alimentation de la nappe des calcaires du Jurassique se fait par l'infiltration directe des pluies par l'intermédiaire des failles et les fissures des collines de Ain Arko, aussi par les calcaires qui affleurent au pied de Djebel Djahfa et qui sont d'âge jurassique.

4.7. Etablissement des cartes piézométriques :

4.7.1. Nappe profonde :

Les données utilisées pour l'établissement de cette carte (Fig.24) ont été collectées au niveau de la DHW de Guelma.

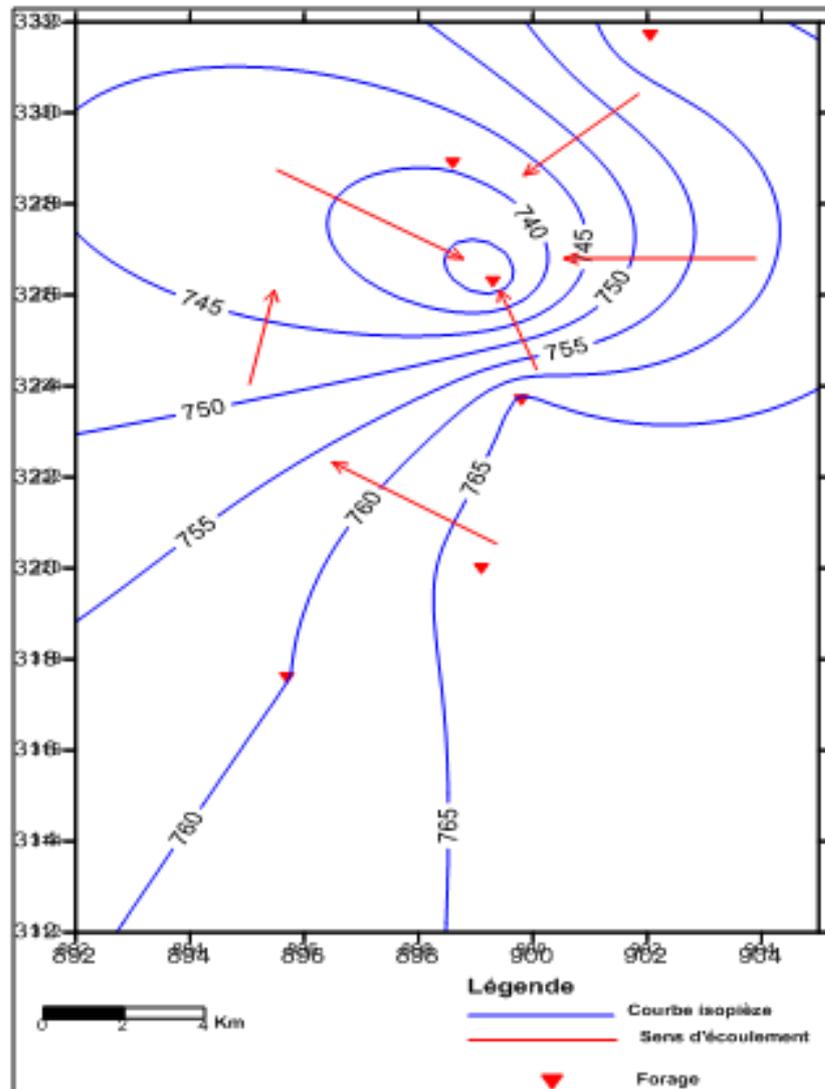


FIG. 24. CARTE PIÉZOMETRIQUE DE LA PLAINE DE TAMLOUKA NAPPE PROFONDE (AVRIL)

L'analyse de la carte piézométrique des forages période des hautes eaux (avril) nous a permis de constater que l'écoulement souterrain général de la nappe captive converge vers le centre de la plaine. Au Nord-Ouest, les courbes isopièzes sont espacées indiquant que le gradient hydraulique est faible ; ce qui se traduit par un écoulement lent. Par contre, vers le Sud-est, les courbes isopièzes sont relativement serrées montrant un gradient hydraulique fort ; l'écoulement est rapide.

4.7.2. Nappe superficielle :

Les cartes piézométriques hautes et basses eaux ont été établies suites aux différentes campagnes de mesures réalisées par nous-mêmes, sur terrain pendant l'année 2013/2014. Elles ont touché tous les puits utilisés pour l'AEP et l'alimentation du bétail. Les émergences des sources ont été également prises en considération (Fig. 25 et 26).

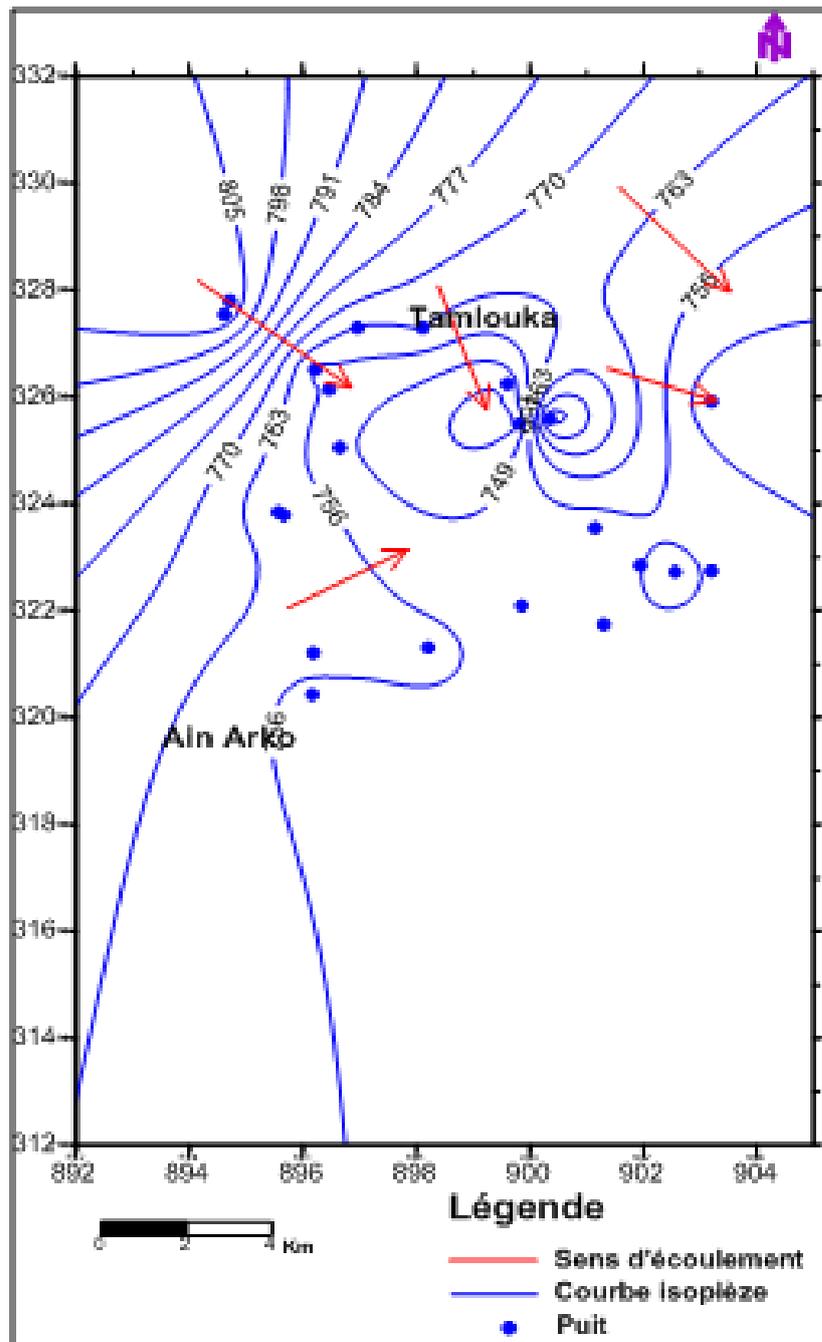


FIG. 25. CARTE PIÉZOMETRIQUE DE LA PLAINE DE TAMLOUKA NAPPE SUPERFICIELLE (SEPTEMBRE 2013)

4.7.2.1. L'interprétation de la carte piézométrique de Tamlouka nappe superficielle (période basses eaux, Sept. 2013) :

La carte piézométrique réalisée pendant la période des basses eaux (Septembre 2013) permet de déterminer le sens de l'écoulement, les principales zones de circulation des eaux souterraines et l'alimentation de la nappe. L'examen de la surface piézométrique a permis de distinguer que l'écoulement général suit la pente topographique. Il s'effectue de l'Ouest vers l'Est. L'existence de quelques dépressions piézométriques est due probablement à la surexploitation de la nappe.

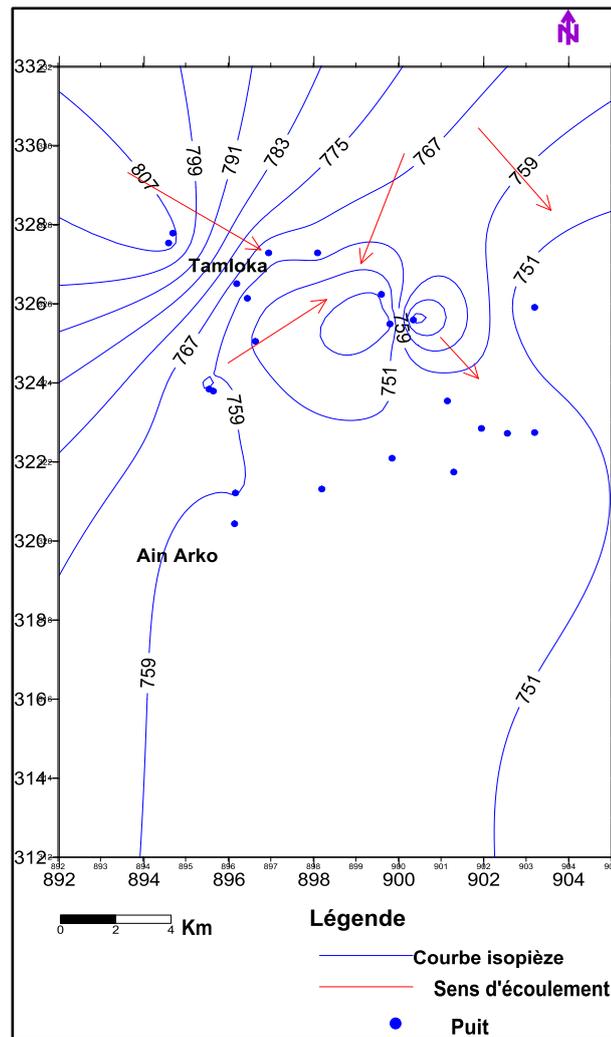


FIG. 26. CARTE PIÉZOMÉTRIQUE DE LA PLAINE DE TAMLOUKA NAPPE SUPERFICIELLE (AVRIL 2014).

4.7.2.2. Interprétation de la carte piézométrique des hautes eaux

L'analyse de la carte piézométrique période des hautes eaux (Avril 2014) nous a permis de constater que l'écoulement souterrain général de la nappe libre suit la topographie avec, localement, une convergence vers le centre de la plaine ; là où nous avons observé de vastes marécage.

Les courbes sont quasi- parallèles au relief ; les informations structurales et géologiques ont déjà montrées que les reliefs sont constitués par des formations carbonatés fissurées jouant le rôle de zones d'alimentation du réservoir alluvionnaire.

Au Nord-Ouest de la plaine, les courbes isopièzes sont peu espacées ; la valeur du gradient hydraulique est de l'ordre de 2.10^{-2} ce qui traduit un écoulement rapide vers le centre.

Au Nord-est de la plaine, les courbes isopièzes sont espacées, la valeur du gradient hydraulique et de l'ordre de 4.10^{-2} ce qui traduit un écoulement faible et un sens d'écoulement vers le Sud-est.

4.8. Conclusion :

L'étude hydrogéologique de la plaine de Tamlouka a permis de définir deux systèmes aquifères superposés et distincts par leur caractère lithologique et géométrique.

Le premier, se trouvant dans le remplissage argilo-sableux du Mio-plio-quaternaire, constitue la nappe superficielle, dont l'épaisseur augmente de la périphérie vers le centre de la plaine. Les puits captant cette nappe sont utilisés pour l'AEP, l'irrigation et l'alimentation du bétail.

Le deuxième, contenu dans les formations carbonatées crétacé-jurassiques, constitue la nappe profonde dont les paramètres hydrodynamiques sont tributaires des conditions lithostructurales. Ainsi, la prédominance, au Nord du faciès marno-calcaire est dû à l'unité tellienne, alors qu'au Sud ce sont les calcaires fissurés du néritique et de l'unité intermédiaire de Djebel Djahfa, qui constituent le principal réservoir.

L'interaction entre les deux nappes s'effectue soit à travers les couches semi-perméables localisées à la base de la nappe superficielle ; soit à la faveur de failles affectant les massifs calcaires.

L'écoulement général des eaux souterraines suit la pente topographique. Cependant, le caractère morphologique (cuvette) est la principale cause de l'apparition de vastes marais au centre de la plaine.

Chapitre V :

*Cartographie d'occupation du
sol par télédétection et SIG*

Chapitre V : Cartographie d'occupation du sol par télédétection et SIG

5.1. Introduction

Les sources d'eau de surface et souterraines sont à la fois dépendant des précipitations, des conditions géomorphologiques et des actions anthropiques. La variabilité interannuelle des précipitations influe directement sur le régime des eaux de surface (ruissellement). Les relations entre le taux des précipitations et la baisse des débits des cours d'eau ont été observées pour les flux dans le centre du Kenya Rift, bassin de la Volta et du bassin du Niger (Olago *et al.*, 2009 ; Mahe 2009). L'assèchement complet de certains aquifères a été observée en Ethiopie pendant la sécheresse (Walraevens *et al.*, 2009) ainsi que la baisse des niveaux des eaux souterraines observées au cours de la sécheresse au Burkina Faso (Thiery *et al.*, 1993) et dans le Bassins supérieur du Niger (Bamba *et al.*, 1996). Il est suggéré que le volume d'eau extraite ne doit pas être supérieur au volume rechargée (Kinzelbach *et al.*, 2003). En général, la population africaine n'a pas accès adéquat à l'eau. Les gouvernements et les organismes locaux ont travaillé à améliorer l'accès à l'eau, et des progrès ont été réalisés. Au rythme actuel des travaux, l'objectif de développement du millénaire de réduire de moitié la proportion de personnes sans accès à l'eau à 2015 ne sera pas atteint en 2040 (Stampini *et al.*, 2009). Le taux de travail ne peut pas suivre la croissance de la population et de l'urbanisation.

L'utilisation mondiale des eaux souterraines est conçue principalement pour l'approvisionnement en eau domestique, industrielle et agricole. Dans les dernières décennies, il y a eu une énorme augmentation de la demande en eau douce grâce à la croissance rapide de la population et l'industrialisation accélérée (Perret, 2006 ; Banoeng-Yakubo *et al.*, 2009). Dans le monde entier, le secteur agricole représente 70% de l'extraction de l'eau, tandis que moins de 5% des terres africaines est actuellement irriguée (Taylor *et al.*, 2009). L'utilisation des eaux de surface et souterraines pour l'agriculture a eu des résultats variables et a conduit à la surexploitation des eaux souterraines résultant en une baisse de la nappe phréatique et la dégradation de la qualité des eaux souterraines (Kinzelbach *et al.*, 2003).

L'Algérie se trouve parmi les pays les plus pauvres en réserves hydriques superficielles ajouté à cela la pollution des eaux et l'exploitation irrationnelle des ressources souterraines. La cuvette de Tamlouka est une zone à vocation agricole située à l'Est algérien ; elle appartient à la région des hautes plaines constantinoises. Dans cette région, les eaux souterraines représentent la principale source d'eau. Le développement industriel et surtout agricole, associé à l'essor démographique, réduit de plus en plus la qualité et le potentiel de ces réserves (Gueroui, 2015).

L'objectif de l'étude est d'essayer d'identifier d'une manière bien définie les relations entre les différents facteurs naturels (Géologie et Topographie) autrement dit la géomorphologie et l'occupation du sol dans une région semi-aride à vocation agricole.

Plusieurs recherches ont récemment utilisés la technique de la télédétection avec le système d'information géographique (SIG) comme le principal instrument de surveillance de crue au cours des dernières années. Le point principal dans ce domaine tourne autour de la délimitation des zones inondables pour la préparation des cartes de risques d'inondation pour les zones vulnérables (Sanyal et Lu, 2004). Des mesures des limites d'inondation ont été obtenues en utilisant l'analyse spatiale basée sur des images Landsat-5 et le modèle numérique d'élévation MNT, avec l'utilisation de l'algorithme de traitement d'image Isodata des images Landsat 5 ; ensuite, les MNT aux intersections des inondations. Enfin, l'étendue de l'inondation est généré sur la base de la relation estimée : élévation -décharge (Jung *et al.*, 2014). Une méthode d'interpolation en utilisant bi-cubique algorithme B-spline, à savoir BS-Horizon (Nonogaki *et al.* 2012), a été utilisé pour générer une haute résolution DEM « Digital Elevation Model » dans une zone de plaine alluviale dans le sud de la ville de Danang, Vietnam (Tran *et al.*, 2014). La même méthode a été utilisée pour la détermination des problèmes de la limite externe de la zone inondable de la plaine alluviale dans le midi-méditerranéen français. Ces problèmes de limite se présentent par le manque d'un talus et les contacts entre la zone inondable (lits mineur, moyen et majeur) et l'encaissant (le substratum, les terrasses alluviales pléistocènes ou les colluvions). (Delorme-Laurent et Ballais, 2006).

Pour atteindre l'objectif de ce travail, notre démarche est basée sur le traitement des données fondé sur l'intégration dans un système d'information géographique (SIG), des données interprétées à partir des images OLI de Landsat 8, des données géologiques et des produits dérivés d'un modèle numérique de terrain (MNT). L'analyse spatiale multicritère, réalisée a permis d'élaborer les cartes thématiques. La combinaison de ces cartes a permis la cartographie des zones à risque d'inondation de la cuvette de Tamlouka.

5.2. Méthodologies du travail

Deux images Landsat, acquises le 11 septembre 2013 et le 9 mai 2014 (Landsat 8 OLI), ont été utilisées pour l'étude. Les images satellites ont été choisies en fonction des critères suivants (Sun *et al.*, 2008):

1- Les images satellites doivent avoir une couverture nuageuse <10% sur toute la zone d'étude ou être exemptes de nuages si possible ;

2- Les images satellitaires devraient être disponibles pour une longue série, afin de maximiser la séparabilité et de différencier les différentes classes d'utilisation des terres. Parce que le bassin versant de Tamlouka est situé dans la région méridionale, il est possible d'obtenir 100% de données gratuites sur l'évolution des nuages. Cependant, les deux images satellites ne sont pas couvertes par des nuages et sont contenues dans les chemins 193 et 35.

Nous disposant d'une carte géologique (Delleau et Laffitte, 1951) d'une échelle de 1/500000.

Les données topographiques, sous la forme de United States Geological Survey (USGS) Format numérique « Model Numérique du Terrain » (MNT), ont été obtenus à partir de la Division d'information géographique.

La méthodologie suivie au cours de cette étude repose sur des données géologiques, topographiques et satellitaires ainsi que sur des mesures et des observations effectuées sur terrain.

5.2.1. Cartographie géologique

La carte géologique numériquement vectorisés de la zone d'étude a été utilisée. Cette carte a été dérivée à partir d'une digitalisation manuelle de la carte géologique (Delleau et Laffitte, 1951) d'une échelle de 1/500000. Elle affiche des informations géologiques sous la forme de vecteurs et des polygones. Cette méthode de stockage de données et l'affichage a permis une catégorisation simple des unités géologiques dans ArcMap (ArcGIS version 10.1).

La mise en œuvre des données géologiques, de telle manière, nécessite la numérisation et l'attribution d'un grand nombre d'objets (arcs). Pour faciliter cette tâche de longue haleine, un outil spécifique, appelé ArcToolbox a été élaboré dans ArcGIS. Il offre un ensemble de fonctions, accessibles via des menus, barres d'outils, ou des raccourcis et des fonctionnalités dédiées à la carte numérisation, l'attribution et la symbolisation. Les Tables d'attributs peuvent être facilement mis à jour et traités. Orientés et non-orientés symboles géologiques sont gérés d'une manière très simple et efficace à travers l'utilisation de fonctionnalités spécifiques et de police cartographique.

ArcCatalog intègre également les outils nécessaires pour effectuer une vérification topologique et sémantique ainsi que de manipuler l'information entre le thème de l'accumulation et les différentes couches géologiques. Bien que d'abord dédiée à la mise en œuvre des SIG géologique, ArcToolbox est très approprié pour la cartographie des autres types de données en raison de sa conception ouverte et ses fonctionnalités complètes.

5.2.2. Cartographie des pentes

La zone d'étude contenant un tel paysage (bassins de drainage et la topographie) avait une considération très importante dans la création de ces cartes. Les données topographiques, sous la forme de : United States Geological Survey (USGS) Format numérique par « Shuttle Radar Topographic Mission » (SRTM) « Digital Elevation Model » (DEM), ont été obtenus à partir de la division d'information géographique. Les MNT sont fondées sur la réalisation du bassin versant en utilisant l'application de calcul des bassins versants dans les outils Spatial Analyst ; des zones de sensibilité la plus élevée pourrait être extrapolée (Metz *et al.*, 2011). Afin de calculer le bassin versant, il y a une série de mesures qui doivent être prises pour préparer la trame d'analyse. D'abord la trame a été utilisée pour calculer une direction flow raster. Ce processus détermine la plus grande différence de niveau entre une cellule et ses voisines, puis attribue une valeur à la cellule pour identifier la direction ruissellement (flux). Avec la direction de flux déterminés, les éviers ou les cellules qui ont une altitude inférieure à tous ses voisins ont été identifiés.

L'algorithme définit une zone de captage par rapport à l'inclinaison de la pente par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$W = \ln(Af / \tan\beta) \quad (\text{Eq. 01})$$

Où

Af est le bassin versant spécifique ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$), qui est le nombre cumulé de cellules de la grille de drainage à travers la cellule cible (FLOW).

β est l'angle de la pente locale (degrés) liée à cette cellule (Burrough et McDonnell, 1998).

La classification de l'accumulation de flux et de zones de transit et de dissipation des cartes thématiques du plan et profil courbures ont été tirées du MNT par la méthode de Wood (1996).

Ensuite, les données du MNT ont été utilisées pour générer la carte de pente à la zone de pente sélectionnée. La carte de pente était classée en cinq classes, à savoir ($< 2^\circ$), (2° à 5°), (5° à 10°), (10° à 15°) et ($> 15^\circ$). L'analyse de la pente attributs pour chaque classe est menée afin de déterminer la différence des attributs de classe de pente à différentes résolutions de numérisation.

5.2.3. Cartographie du couvert végétal

Afin de quantifier l'occupation du sol, nous avons analysé deux images multi-bandes OLI-TIRS en date de 11/09/2013 et 09/05/2014 de Landsat-8 avec six bandes spectrales (3 visibles et 3 infrarouges) extraite de la scène (p193r035). Après découpage par « resize data », l'indice « Normalised Difference Vegetation Index » (NDVI) est calculé à partir de la lumière visible et le proche infrarouge réfléchi par la végétation (Mangolini, 1994). La végétation saine absorbe plus de la lumière visible qui frappe, et reflète une grande partie de la lumière dans le proche infrarouge. Généralement tous les satellites emploient cette formule de différence (Eq. 02) pour quantifier la densité de la croissance des plantes sur la Terre : rayonnement proche infrarouge moins rayonnement visible divisé par rayonnement proche infrarouge plus le rayonnement visible. Le résultat de cette formule est appelé indice de végétation normalisé (NDVI). La formule mathématique s'écrit comme suit :

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (\text{Eq. 02})$$

Où ρ_{red} est la réflectance de la récolte dans la bande de 640 à 680 nm et ρ_{NIR} est la réflectance proche de l'infrarouge dans la bande de 780 à 880 nm.

Cette indice a été appliqué à une classification afin d'estimer la masse végétale verte recouvrant le sol, la description de l'état phénologique du couvert végétal ainsi que l'évolution de cette culture végétale entre les deux dates. Le seuillage permet de masquer ou de ne faire apparaître qu'une partie d'une image en se basant sur les valeurs radiométriques des pixels (les valeurs NDVI).

Deux cartes de végétation ont été produites en utilisant la méthode de classification supervisée par « Arbre de Décision » (Bunke et Messmer, 1997). L'arbre de décision d'ENVI est un modèle de classification construit de manière interactive par l'utilisateur. Une arborescence de critères binaires permet de distribuer les pixels en classes distinctes (Irnigeret Bunke, 2008).

5.2.4. Cartographie d'occupation du sol

Sur la base de notre étude sur terrain, on a choisis de travailler ici sur 4 classes (« *Cerealcrop* », « *Reeds and treecrops* », « *Forest* » and « *Baresoil* ») pour mettre en œuvre la carte d'occupation du sol. Après une homogénéisation des classes des 2 classifications, selon les critères intelligents des méthodes de post-classification d'ENVI par « l'Analyse Majoritaire » (Dong *et al.*, 2006), l'utilisation de la méthode de détection des changements « change detection algorithm » est utilisée entre les deux classifications ; elle est nécessaire

pour distinguer entre les classes de végétation pérennes et temporaires (Chakraborty *et al.*, 2001).

Enfin une vectorisation par conversion des classes de type raster vers celles de type vecteur et extraction de ces différentes classes pour la création d'une base de données dans un système d'information géographique sous ArcGis (Souza *et al.*, 2009).

5.3. Résultats et interprétations

L'application des cartes de classification sous le système d'information géographique (SIG) a permis la quantification des surfaces des différentes classes et leurs répartitions spatiales (Fig.27).

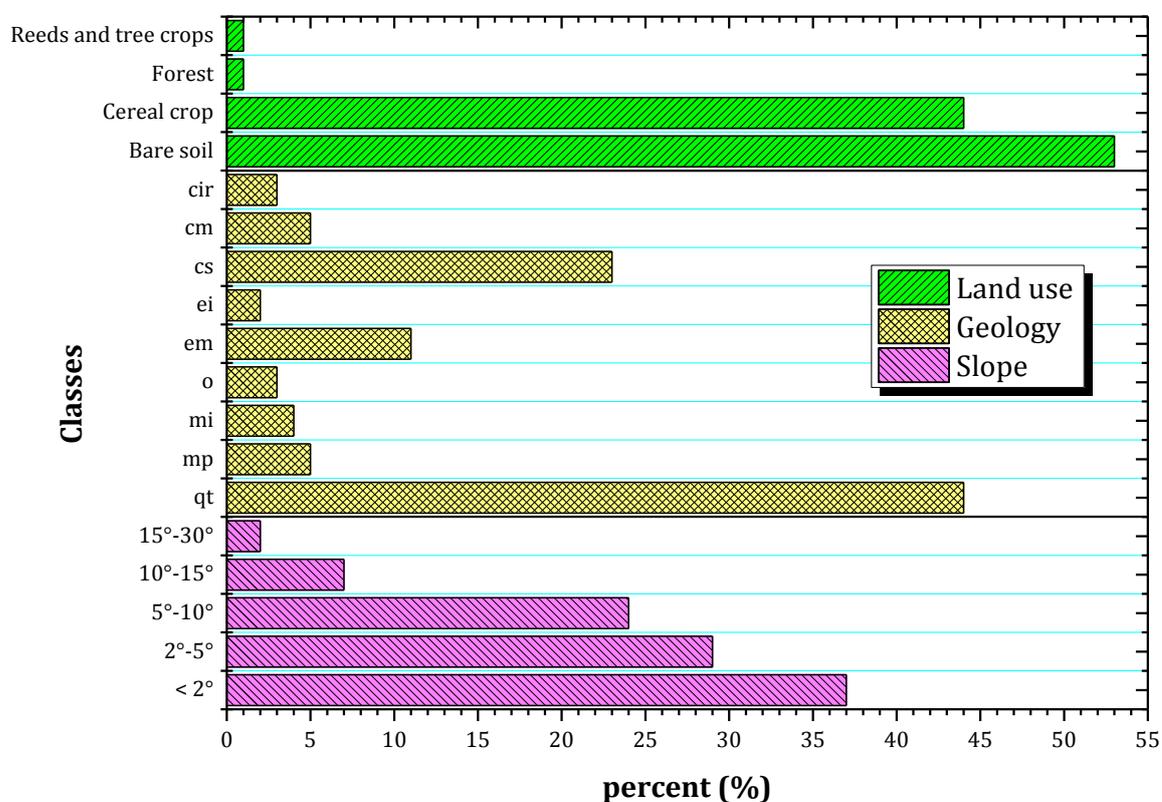


FIG. 27. QUANTIFICATION DES SURFACES DES DIFFERENTES CLASSES

La cartographie géologique (Fig. 28) montre que les affleurements Quaternaires alluvionnaires « *qt* » dominant dans la zone d'étude occupant 22592 ha soit un taux de 44% de la surface totale de la cuvette. Les deux classes « *cs* » (Crétacé supérieur marin carbonaté) et « *em* » (Eocène moyen marin carbonaté) occupent respectivement 11787 ha (23%) et 5598 ha (11%). Le reste (22%) se répartisse entre les autres classes.

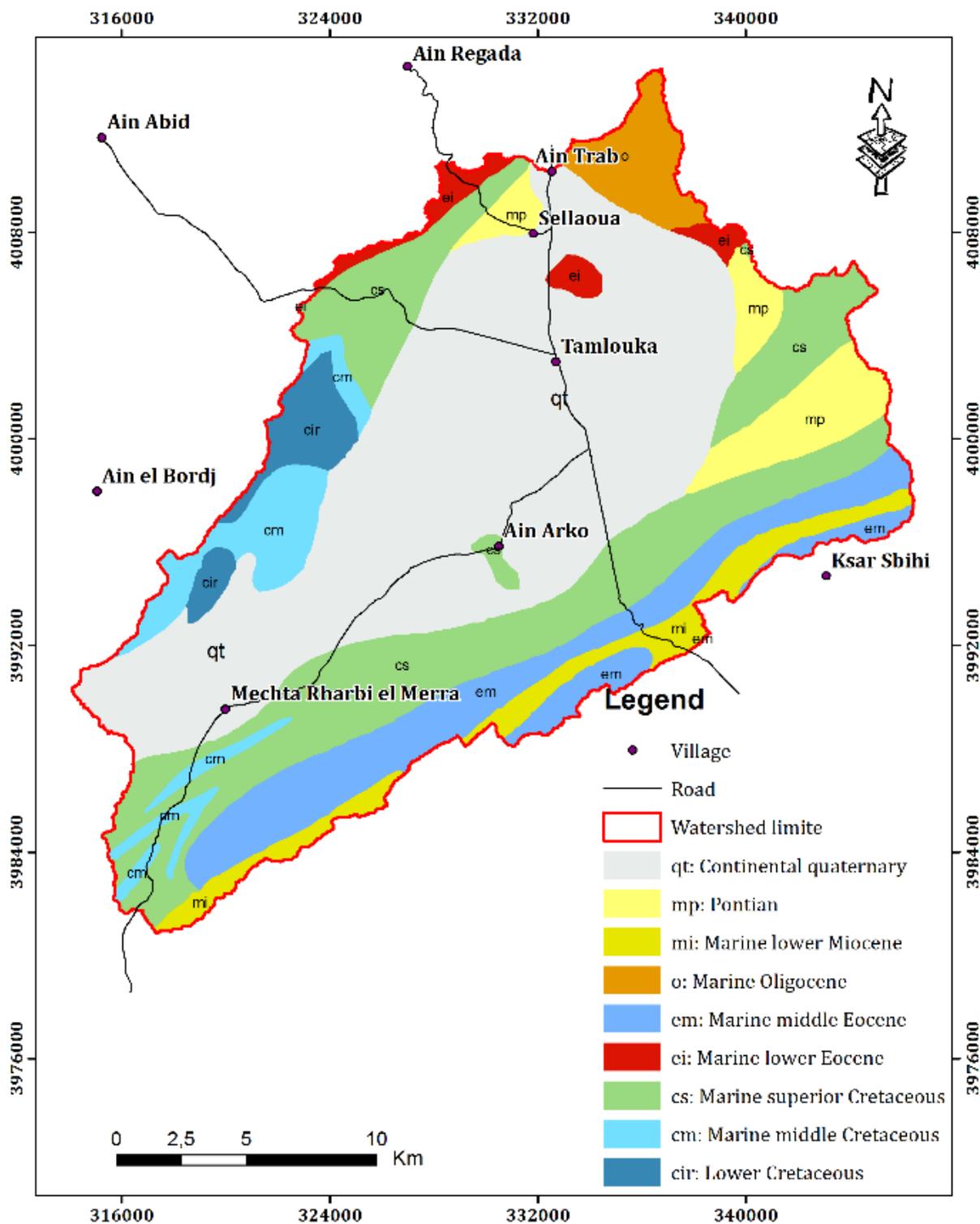


FIG. 28. CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La cartographie des pentes (Fig. 29) fait apparaître une dominance de la classe « <2° » avec 19057 ha et présente un taux de 37% de la surface totale de la cuvette. Les classes des pentes « 2°-5° », « 5°-10° » prennent respectivement une surface de 15210 ha (29%) et de 12583 ha (24%). Le reste de surface (10%) se répartisse entre les autres classes.

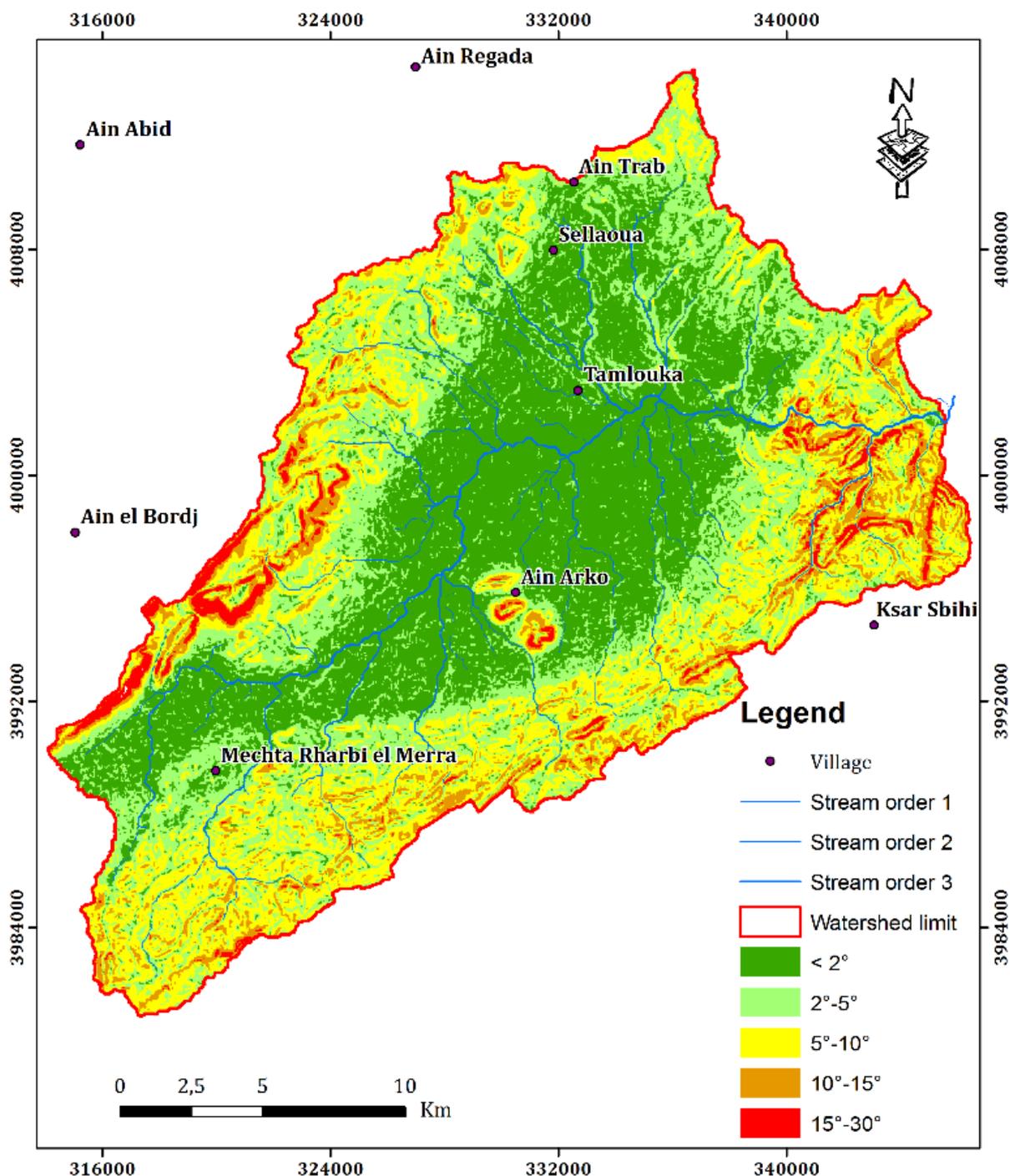


FIG. 29. CARTE DES PENTES

La cartographie d'occupation du sol (Fig. 30) montre que la superficie de la classe « *Bare soil* » (Sol nu) est la plus grande de 27636 ha avec un taux de 53% de la surface totale de la cuvette. La classe « *Cerealcrop* » (Céréales) occupe elle-même une surface importance de l'ordre de 23039 ha (44%). Le reste de surface (3%) se répartisse entre les végétaux pérennes (*Reeds and Treecrops* et *Forest*).

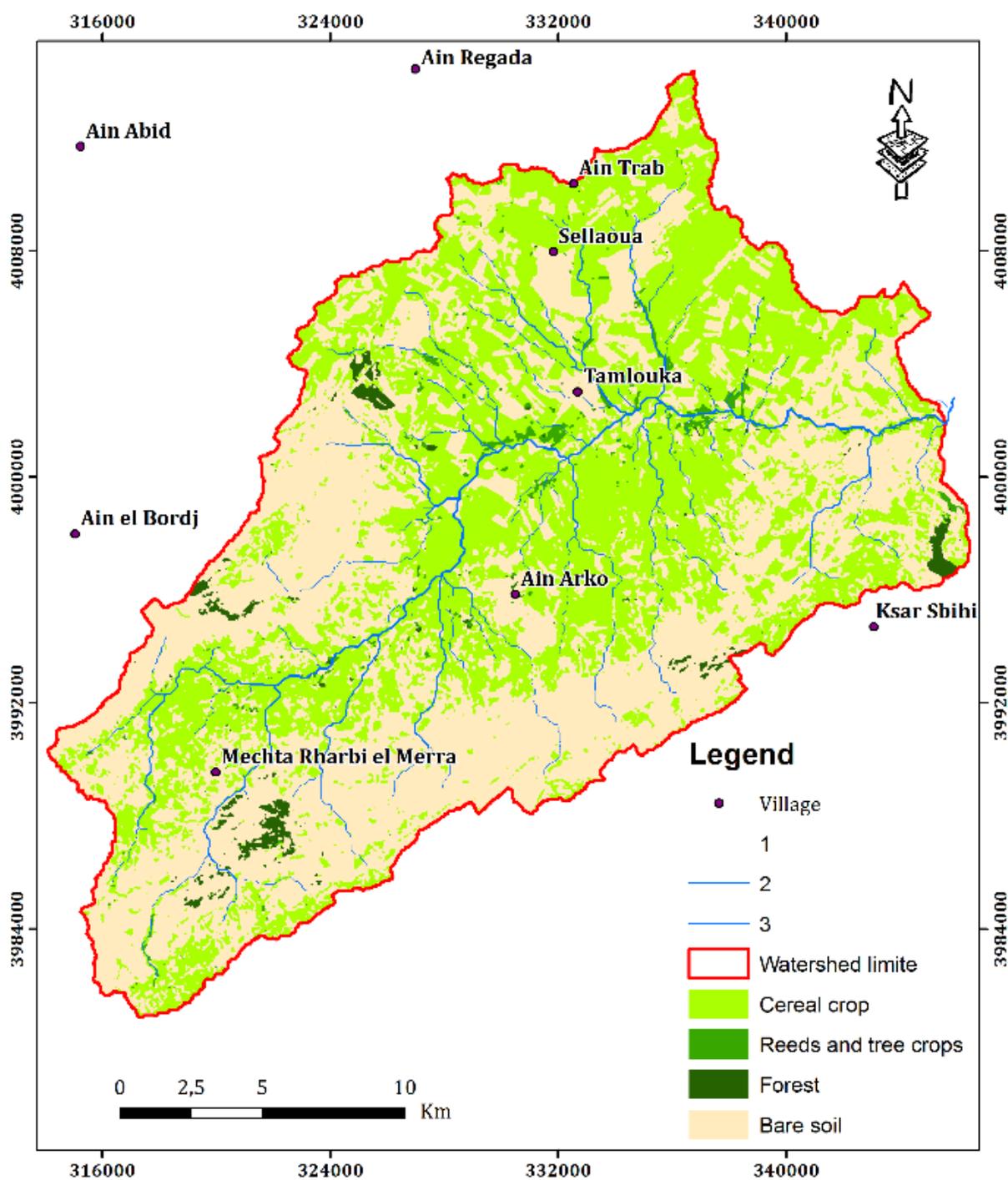


FIG. 30. CARTE D'OCCUPATION DU SOL

Tous ces résultats indiquent clairement que la cuvette de Tamoulouka est une plaine dont 66% de sa surface a une pente $< 5^\circ$. Elle est recouverte dans la majeure partie par des affleurements Quaternaires alluvionnaires avec une vocation agricole s'articule sur les grandes cultures.

La superposition et la combinaison entre ces classifications conduit aux résultats suivants :

5.3.1. Combinaison entre les classes géologiques et celles des pentes

Une superposition de la carte géologique sur celle des pentes a été faite afin de ressortir la répartition de la surface de différentes classes géologiques par rapport à celles des pentes et vis-versa (Fig. 31). La classe géologique « quaternaire continentale alluvionnaire » (*Qt*) d'un pourcentage majoritaire (44%) de la surface totale de la cuvette de Tamlouka se répartisse en fonction des pentes avec 71% (15939 ha) se trouve dans la classe des pentes « <2° » et 24% (5463.54 ha) dans la classe « 2°-5° ». Cette classe de quaternaire alluvionnaire s'allonge d'une direction sud-ouest – nord-est forme une plaine alluviale qui draine la cuvette par le biais d'oued El-Melah.

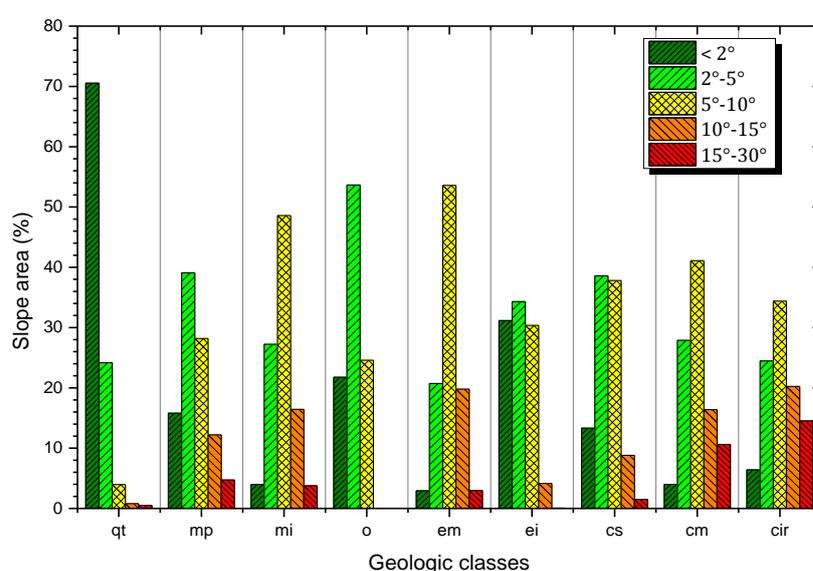


FIG. 31. RELATION ENTRE LES CLASSES DES PENTES ET LES FORMATIONS GEOLOGIQUES

Par ailleurs, 41.53% de surface de la classe des pentes « <2° » est occupé par des alluvions, ce taux reste toujours le plus important par rapport aux autres classes des pentes (Tableau 18). Ces résultats montrent que la cuvette de Tamlouka est une plaine alluviale favorable pour une activité agricole.

TABLEAU 18. TAUX D'OCCUPATION DES CLASSES GEOLOGIQUES EN FONCTION DES PENTES (EN %)

Classes	<02°	02°-05°	05°-10°	10°-15°	15°-30°
<i>qt</i>	41.53	8.34	1.31	0.81	1.33
<i>mp</i>	9.30	13.47	9.31	12.36	12.21
<i>mi</i>	2.35	9.39	16.06	16.63	9.73
<i>o</i>	12.80	18.49	8.13	0.02	0.00
<i>em</i>	1.73	7.14	17.71	20.02	7.67
<i>ei</i>	18.34	11.83	10.03	4.19	0.10
<i>cs</i>	7.84	13.3	12.49	8.91	3.89
<i>cm</i>	2.35	9.61	13.59	16.59	27.49
<i>cir</i>	3.77	8.43	11.37	20.47	37.59
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

5.3.2. Combinaison entre l'utilisation du sol et les classes de pente

La combinaison des classes d'occupation du sol avec celles des pentes (Fig. 32) a quantifié le taux de répartition des classes d'occupation du sol en fonction des pentes. La classe « *Cerealcrop* » occupe 64% de la classe « <2° », 45% de la classe « 2°-5° », 26% de la classe « 5°-10° » et 16% de la classe « 10°-15° ». Donc la céréaliculture se concentre au niveau de la plaine et leurs surfaces diminuent avec de l'augmentation de la pente laissant la place aux sols nus.

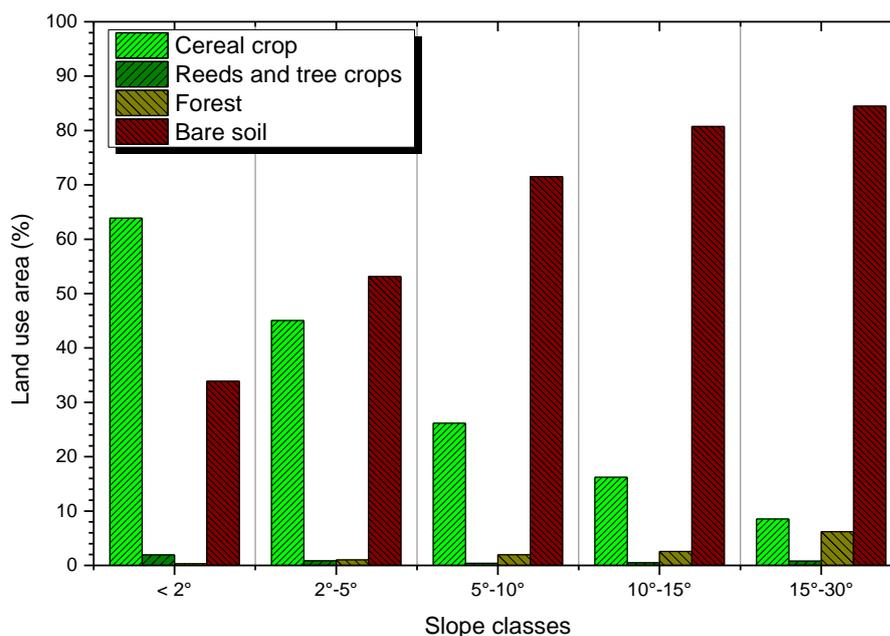


FIG. 32. RELATION ENTRE LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL ET LES PENTES

D'autre part, 53% de surface de « *Cerealcrop* » se trouve dans la classe des pentes « <2° » (Tableau 19), ce taux reste toujours le plus important par rapport aux autres classes des pentes. En plus 23% de « *Baresoil* » est dans la classe « <2° » et 29% dans la classe « 2°-5° », ce sont généralement des terres en jachère « *Fallow land* ». Ces surfaces sont en rotation agricole qui peut être déterminée avec une étude de changements interannuels.

TABLEAU 19. TAUX D'OCCUPATION DES CLASSES DE COUVERTURE TERRESTRE EN FONCTION DES PENTES (EN %)

Classes	Cerealcrop	Reeds and treecrops	Forest	Baresoil
<02°	52.84	64.51	9.38	23.36
02°-05°	29.72	22.39	24.18	29.22
05°-10°	14.29	8.19	39.21	32.58
10°-15°	2.71	3.24	15.61	11.23
15°-30°	0.44	1.67	11.62	3.63
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

5.3.3. Combinaison entre l'utilisation du sol et les classes géologiques

La combinaison des classes d'occupation du sol avec celles des classes géologiques (Fig. 33) a quantifié le taux de répartition entre eux. La classe « *Cerealcrop* » occupe 61% (13792 ha) de la classe « *qt* » (Quaternaire alluvionnaire), 71% de la classe « *o* » (Oligocène moyen), 50% de la classe « *ei* » (Eocène moyen marin), 48% de la classe « *mp* » (Mio-pliocène), 38% de la classe « *mi* » (Miocène inférieur), 48% de la classe « *Cs* » (Crétacé supérieur marin carbonaté) et 16% de la classe « *Cm* » (Crétacé moyen). Mais l'occupation de la classe « *qt* » par la classe « *Cerealcrop* » reste toujours la plus importante dont 60 % de cette culture se fait sur des terrains de Quaternaire alluvionnaire (Tableau 20), cela traduit la vocation agricole de la cuvette de Tamlouka qui s'articule principalement sur les grandes cultures dans une plaine alluviale.

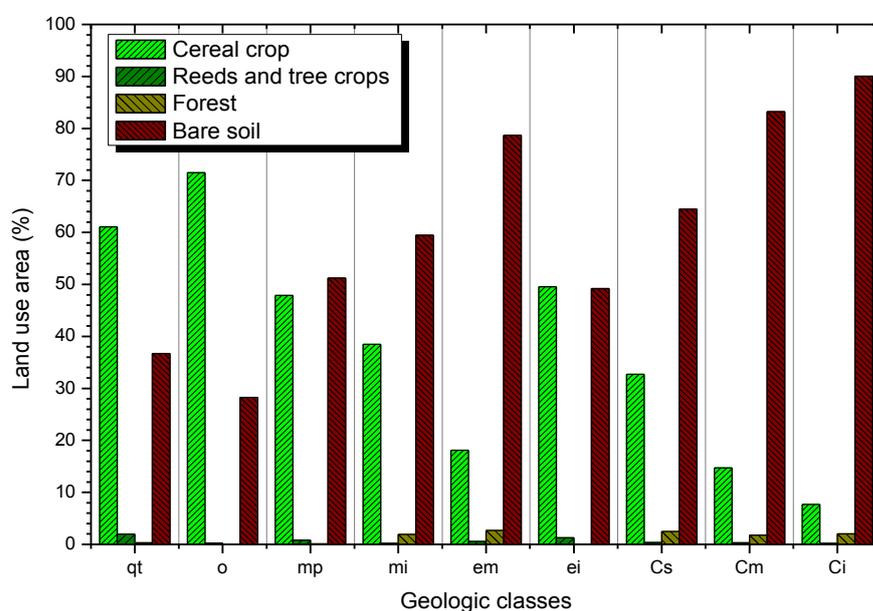


FIG. 33. RELATION ENTRE LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL ET LES FORMATIONS GEOLOGIQUES

TABLEAU 20. TAUX D'OCCUPATION DES CLASSES DE COUVERTURE TERRESTRE EN FONCTION DES CLASSES GEOLOGIQUES. (EN %)

Classes	Cerealcrop	Reeds and tree crops	Forest	Bare soil
<i>Ci</i>	0.49	0.57	4.76	4.83
<i>Cm</i>	1.75	1.48	7.73	8.27
<i>Cs</i>	16.75	7.16	45.87	27.49
<i>ei</i>	2.03	2.06	0.06	1.68
<i>em</i>	4.40	5.58	23.70	15.94
<i>mi</i>	3.84	0.73	6.91	4.95
<i>mp</i>	5.85	3.95	0.43	5.21
<i>o</i>	4.94	0.70	0.00	1.63
<i>qt</i>	59.95	77.78	10.54	30.01
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

5.3.4. Cartographie des classes d'utilisation des terres et des zones inondables

Après la combinaison des différentes cartes de classifications, le résultat est une carte de risque d'inondation (Fig. 34) de la plaine alluviale, d'une superficie de 19500 ha représentant 38% de la surface totale de la cuvette de Tamlouka à des pentes moyennes inférieures à 2° . Cette plaine d'une altitude moyenne de 830m est entourée par une série de montagnes atteignant des altitudes qui dépassent 1250 m du côté amont de la plaine et 1000 m du côté aval. Elle est drainée par un réseau hydrographique très dense, constitué essentiellement par oued Melah qui prend naissance à travers les affluents et également de plusieurs chaabats qui descendent de djebel Djaffa et de la Chebka des Sellaouas et rejoignent oued Mgaïbsa au centre de la plaine.

La plaine de Tamlouka présente au niveau de son exutoire à Oued Mgaïbsa une zone à risque d'inondation d'une surface de 1180ha et représente 2% de la surface totale de la cuvette et 6% de la surface de la plaine. Cette zone inondable d'une pente de 0.3° se trouve dans une topographie inférieure à 780 m d'altitude dans un sol alluvionnaire récent et supérieure à 760 m à l'exutoire au niveau des reliefs calcaires de la Chebka des Sellaouas.

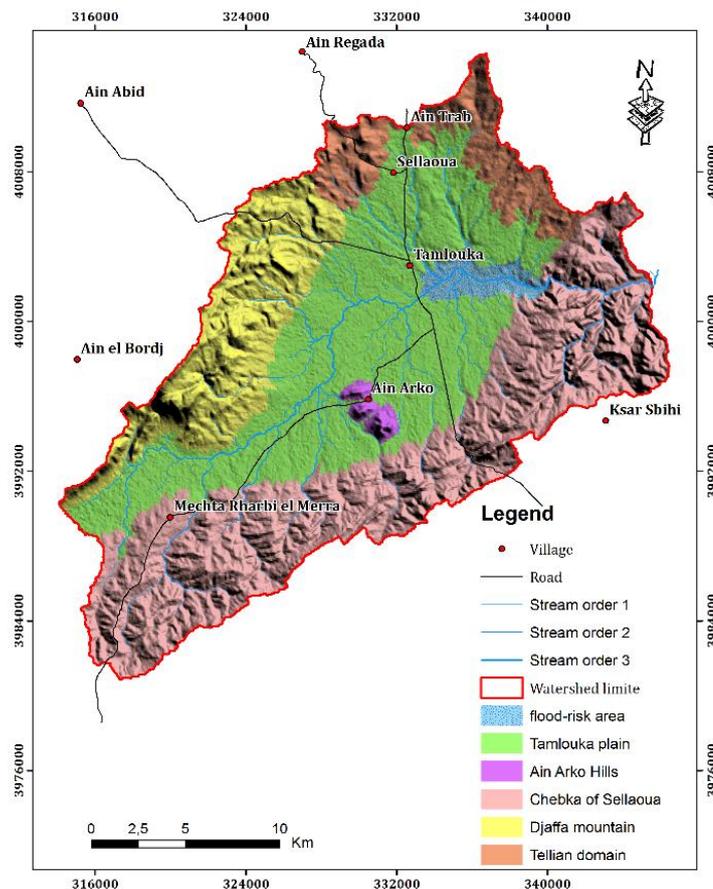


FIG. 34. CARTE D'OCCUPATION DU SOL ET RISQUE D'INONDATION

Le climat semi-aride de cette région rend toujours cette zone marécageuse restreinte dans le temps et n'apparaît qu'en temps des précipitations torrentielles. Ainsi que les eaux des oueds sont temporaires et deviennent à sec en saison chaude. A cet effet l'agriculture se concentre à 90% sur les grandes cultures qui ne dépendent que de la précipitation. Les autres cultures (Arboriculture, culture maraîchère ... etc.), l'élevage de bétail et l'aviculture dépendent de l'exploitation des eaux souterraines.

5.4. Conclusions

La cuvette de Tamlouka est couverte à 44% de sa surface totale par un dépôt alluvionnaire Quaternaire, composée essentiellement d'argile et des sables et graviers formant une plaine à pente inférieure à 2°. Son climat semi-aride est caractérisé par des étés chauds, secs et ensoleillés et des hivers froids à de faible intensité de précipitations. Cela accentue le prélèvement des ressources en eau souterraines pour accomplir les besoins de cette zone à vocation agricole. Des méthodes de classifications et de combinaisons ont été réalisées afin de quantifier l'occupation du sol vis-à-vis la géomorphologie de la cuvette.

Les résultats des classifications montrent la dominance des terrains de la classe « *Bare soil – sol nu* » avec une superficie de 27636 ha soit un taux de 53% de la surface totale de la cuvette et 34% de la plaine. La classe « *Cerealcrop* » a une superficie de 23039 ha et occupe 64% de la plaine. Le reste n'est que des terres en jachère « *Fallow land* » qui sont en rotation agricole. Les habitants de la cuvette de Tamlouka utilisent cette plaine pour une agriculture qui s'articule essentiellement sur les grandes cultures.

La combinaison des différentes cartes de classifications issues des différentes méthodes montre que la plaine alluviale de Tamlouka, d'une superficie de 19500 ha et d'une pente moyenne inférieure à 2° draine les reliefs qui l'entourent, par un réseau hydrographique très dense qui présente au niveau de son exutoire à Oued Mgaïbsba une zone à risque d'inondation d'une surface de 1180ha. Cette zone inondable d'une pente de 0.3° se trouve dans une topographie inférieure à 780 m d'altitude et supérieure à 760 m à l'exutoire à l'entrée des reliefs calcaires de la Chebka des Sellaouas. Le climat semi-aride de cette région rend toujours cette zone marécageuse restreinte dans le temps et n'apparaît qu'en temps des précipitations torrentielles. Ainsi que les eaux des oueds sont temporaires et deviennent à sec en saison chaude. A cet effet l'agriculture se concentre à 90% sur les grandes cultures qui ne dépendent que des précipitations. Les autres cultures (Arboriculture, culture maraîchère ... etc.) sont irriguées par les eaux souterraines.

Chapitre VII :

Etude hydrochimique

Chapitre VI : Etude hydrochimique

6.1. Introduction :

La composition chimique d'une eau souterraine est très variée. Dans une nappe, l'eau peut subir les effets de plusieurs facteurs (concentration, échanges de base, réduction), qui sont capables de modifier partiellement ses caractéristiques chimiques. Dans une même nappe, on observe presque toujours des variations de l'amont vers l'aval. L'eau circule en lessivant les terrains encaissant et il peut y avoir, une augmentation de la concentration totale en sels dissous et des variations des valeurs des rapports caractéristiques qui peuvent nous renseigner sur l'origine des eaux (Detay, 1993).

Ce chapitre s'articule particulièrement sur les variations physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka afin de mettre en évidence l'influence de la nature lithologique sur leur composition chimique. Les points analysés sont tous situés sur les principaux axes routiers et près des agglomérations. Leurs eaux sont donc destinées à un usage quotidien, d'où la nécessité d'un suivi rigoureux de leur composition chimique et leur degré de potabilité ou de pollution.

6.2. Mode d'échantillonnage :

6.2.1. Prélèvement :

Le prélèvement a été effectué au niveau de 13 échantillons d'eau des puits et des forages, le choix des points d'eau a été fait de telle sorte qu'on puisse avoir une répartition régulière et homogène sur toute la superficie de la nappe

6.2.2. Mesures in situ :

Trois paramètres physiques [T (°C), pH et conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)] sont mesurés in situ, directement après le prélèvement des échantillons, à l'aide d'un pH mètre de marque Consort C561 et un conductivimètre de marque WTW Cond 1971.

Les éléments majeurs sont dosés au laboratoire central du complexe de la raffinerie de Skikda.

6.3. Paramètres physico-chimiques :

Les résultats des analyses physico-chimiques sont interprétés selon les normes algériennes et celles de l'organisation mondiale de la santé (OMS). Ils sont exprimés sous formes de diagrammes et de cartes de distribution spatio-temporelles pour les différents paramètres mesurés ou analysés.

6.3.1. Paramètres physiques :

6.3.1.1. Température :

La température de l'eau joue un rôle déterminant dans la solubilité des sels et des gaz, elle est étroitement liée à la profondeur de l'aquifère si l'aquifère est très profond, les eaux sont influencées par le gradient géothermique ; cependant, s'ils sont peu profond, la seule influence possible reste les variations atmosphériques particulièrement le changement saisonnier de la température de l'air.

Les valeurs mesurées de la température oscillent entre 12.7 et 20.3 °C (Tableau 21).

TABLEAU 21. TEMPERATURES (°C) DES EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

Les puits	P2	P3	P6	P7	P8	P10	P12	P13	P14	P15	P17	P19	P22
T (°C)	20.3	14.9	15.9	17.3	12.9	17.2	15.8	12.7	14.4	13.2	17.6	16.1	16.6

6.3.1.2. Le potentiel d'hydrogène pH :

Le pH mesure la concentration en ion (H^+) de l'eau et conditionne les équilibres physico-chimiques, il dépend de facteurs multiples, comme l'origine de l'eau (Castany et Margat, 1977). Il détermine aussi l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Le pH des eaux de la zone d'étude varie entre 7.72 et 8.54, donc il est légèrement basique ; cependant, tous les points de la zone d'étude appartiennent à la classe « bonne » (tableau 22).

TABLEAU 22. CLASSIFICATION DES EAUX SELON LE PH

pH	Type d'eau	Points correspondants
6.5-9.5	Bonne	Tous les points
>9.5 et <6.5	Mauvaise	/

6.3.1.3. La dureté totale TH (°F) :

Elle exprime la teneur de l'eau en sels de calcium et de magnésium. Dans notre zone d'étude, la dureté totale est variable allant de 15 à 55 °F. 99% des eaux des puits analysés et représentent une dureté moyenne < 50° F (tableau 23).

TABLEAU 23. DURETE TOTALE TH (°F) DES EAUX DES PUIITS ANALYSES, PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

Puits	P2	P3	P6	P7	P8	P10	P12	P13	P14	P15	P17	P19	P22
TH (°F)	29	12	11	16	44	25	38	55	41	31	38	27	15

6.3.1.4. La conductivité (CE) :

La conductivité est essentiellement liée à la présence des espèces ioniques en solution. Elle permet une estimation de la minéralisation .On sait que l’eau pure est très résistante, par contre l’eau salé est très conductrice.

Pour, les eaux de la plaine, la conductivité varie entre 495 $\mu\text{s/cm}$ et 5360 $\mu\text{s/cm}$ (tableau 24) ; les plus fortes valeurs sont observées au Sud de la plaine et aux alentours des zones marécageuses (fig. 35).

TABLEAU 24. CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES EAUX SOUTERRAINES, PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

Puits	P2	P3	P6	P7	P8	P10	P12	P13	P14	P15	P17	P19	P22
CE ($\mu\text{s/cm}$)	2320	952	990	1180	495	3080	3430	5360	3440	3200	3180	3340	1467

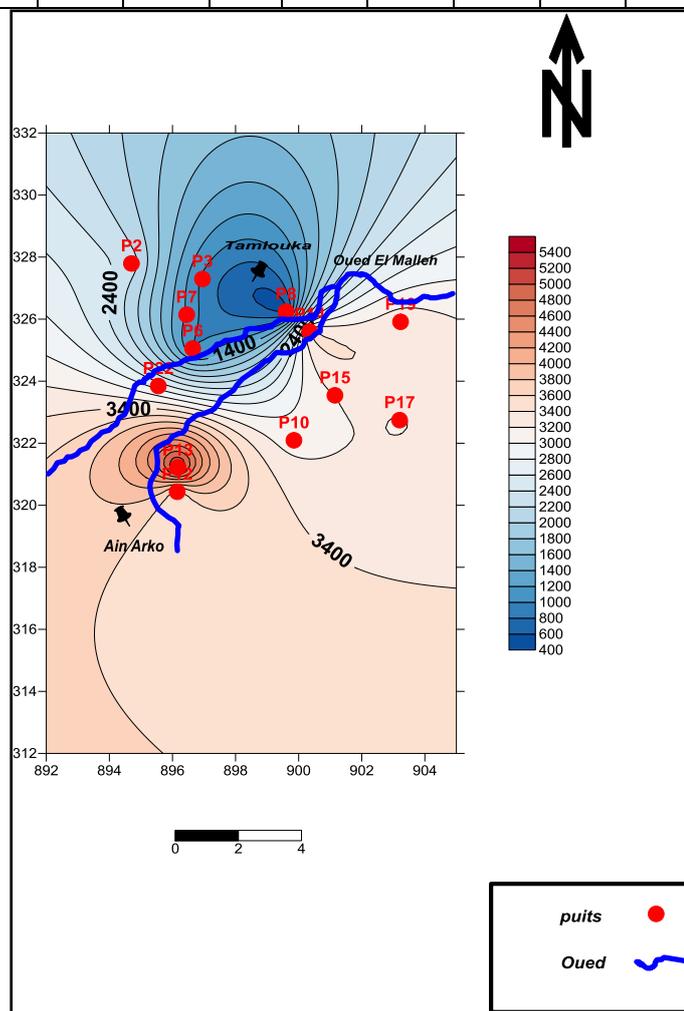


FIG. 35. CARTE D’ ISO CONDUCTIVITE DES EAUX SOUTERRAINES, ($\mu\text{s/cm}$) (AVRIL, 2014)

D’une manière générale, la distribution de la conductivité est influencée par deux facteurs qui sont la morphologie et les zones d’alimentation.

Le premier facteur concerne la partie Sud et Sud-est de la plaine, la morphologie par son caractère stagnant favorise l’évaporation et la concentration des éléments chimiques.

Le deuxième concerne la partie Nord et Nord-Ouest correspondant au massif calcaire fissuré de Djebel Djaffa qui constitue une zone d'alimentation favorisant la dilution des eaux souterraines.

6.3.2. Paramètres chimiques :

Toute eau contient des sels minéraux, acquis lors de son trajet souterrain, cette acquisition se fait soit par la dissolution, soit par échange d'ions avec des terrains traversés.

La nature lithologique traversée joue donc un rôle capital dans la détermination des différents éléments chimiques que l'eau peut contenir.

L'analyse des éléments majeurs concernant les 13 échantillons, a été faite au niveau du laboratoire de la raffinerie (RA1K) dans la zone industrielle de Skikda.

Les éléments analysés sont :

- Les cations : Ca^{++} , Mg^{++} et Na^+ , K^+
- Les anions : Cl^- , SO_4^{--} et HCO_3^-
- Les micropolluants métalliques : Fe
- Les éléments polluants : PO_4^-

6.3.3. Formules ioniques et faciès chimique :

La formule ionique est obtenue en classant de gauche à droite par ordre décroissant les quantités en réaction pour cent du groupe des anions puis celui des cations.

La vérification des analyses chimiques a été faite par la balance ionique, qui a été satisfaisante pour les 13 analyses.

Remarque : pour l'erreur de la balance ionique, on peut aller jusqu'à 10%.

Les formules ioniques (Tableau 25) nous donnent les faciès chimique pour les eaux analysées.

TABLEAU 25. FORMULES IONIQUES ET FACIES CHIMIQUE EN MEQ/L, (AVRIL, 2014)

Puits	Formule ionique	Faciès chimique
P2	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Sulfaté Calcique
P3	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ $r\text{Na}^+ + \text{K}^+ > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté Sodique
P6	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ $r\text{Na}^+ + \text{K}^+ > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté Sodique
P7	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ $r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ + \text{K}^+ > r\text{Ca}^{2+}$	Bicarbonaté magnésien
P8	$r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Bicarbonaté magnésien
P10	$r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ + \text{K}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique

P12	$rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rCl^-$ $rMg^{2+} > rCa^{2+} > rNa^+ + K^+$	Sulfaté Magnésien
P13	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$ $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+ + K^+$	Sulfaté Calcique
P14	$rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rCl^-$ $rMg^{2+} > rCa^{2+} > rNa^+ + K^+$	Bicarbonaté magnésien
P15	$rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rCl^-$ $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+ + K^+$	Bicarbonaté calcique
P17	$rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rCl^-$ $rMg^{2+} > rCa^{2+} > rNa^+ + K^+$	Sulfaté Magnésien
P19	$rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$ $rCa^{2+} > rNa^+ + K^+ > rMg^{2+}$	Bicarbonaté Calcique
P22	$rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rCl^-$ $rNa^+ + K^+ > Ca^{++} > rMg^{++}$	Bicarbonaté Sodique

Les eaux étudiées ont été classés en 5 faciès chimique :

- Bicarbonaté magnésien (03 puits)
- Bicarbonaté calcique (03 puits)
- Bicarbonaté sodique (03 puits)
- Sulfaté calcique (02 puits)
- Sulfaté magnésien (02 puits)

6.3.4. Représentation graphique des analyses chimiques :

Pour bien visualiser les résultats des analyses chimiques effectuées sur les eaux souterraines de la plaine de Tamlouka, on a trouvé utile de faire la représentation selon Piper et Schoeller-Berkaloff.

6.3.4.1. Diagramme de Piper :

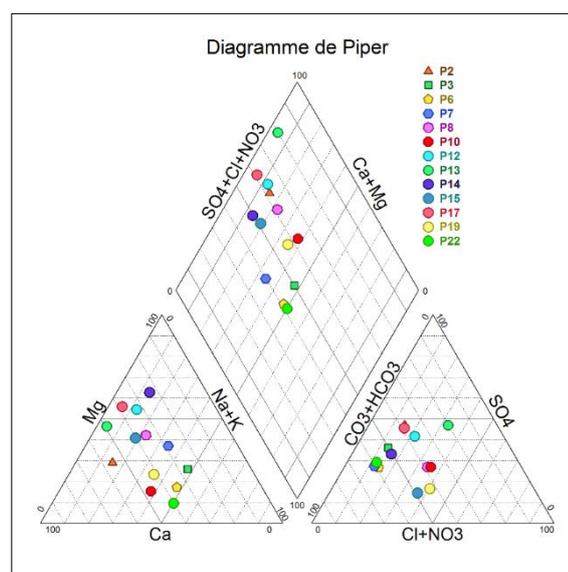


FIG. 36. DIAGRAMME DE PIPER APPLIQUE AUX EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

Le diagramme est bien adapté pour l'étude comparative d'un nombre important d'échantillons. En plus le diagramme met en évidence l'évolution spatio-temporelle du faciès chimique.

La représentation des concentrations des points d'eau sur le diagramme de Piper, nous a permis de définir trois familles de faciès chimique (Fig. 36) :

- Chloruré et Sulfaté calcique - magnésien.
- Bicarbonaté calcique et magnésien.

6.3.4.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme Schoeller-Berkaloff évalue l'évolution de l'eau du système aquifère et la relation entre les types de roches réservoir et la composition de l'eau. La représentation des analyses sur ce diagramme, dans le quel, on reporte directement les résultats des analyses en mg/l (fig. 27), montre une variation des faciès chimiques des eaux de la nappe.

D'après le diagramme de Schoeller-Berkaloff, les eaux étudiées sont réparties généralement dans les classes : bonne, passable, médiocre et mauvaise.

En termes de pourcentage, les eaux bicarbonatées calciques, magnésiennes et sodiques sont prédominants (tableau 26).

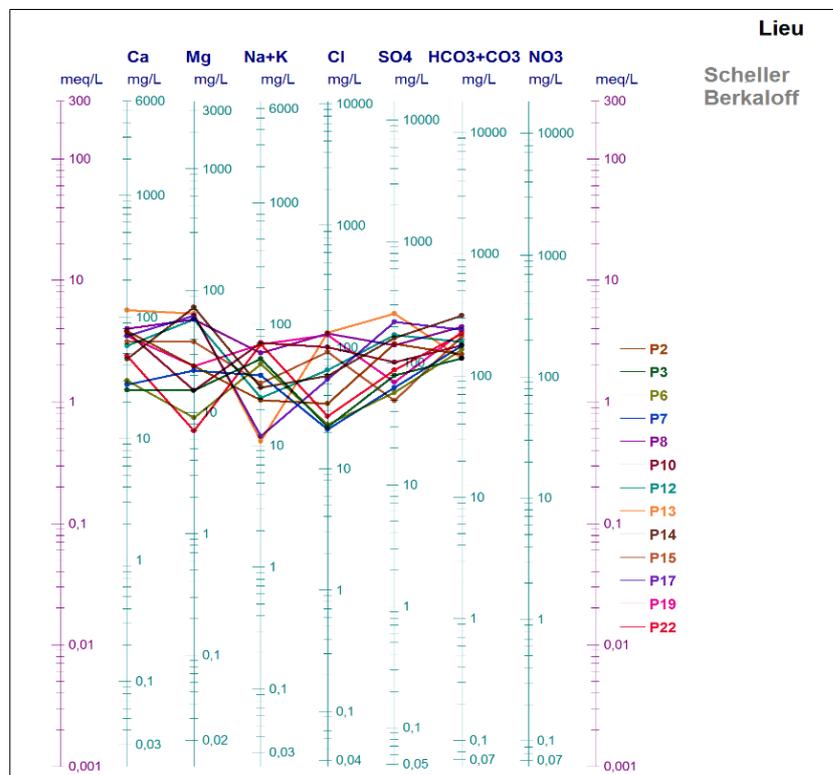


FIG. 37. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES FACIES CHIMIQUES SUR LE DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF (AVRIL, 2014)

TABLEAU 26. FACIES CHIMIQUES DES EAUX SELON LE DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALLOF

Faciès chimique	Les échantillons	Pourcentage %
Bicarbonaté sodique	P3,P6,P22	23.07 %
Bicarbonaté magnésien	P7,P8,P14	23.07 %
Bicarbonaté calcique	P10,P15,P19	23.07 %
Sulfaté calcique	P2,P13	15.38 %
Sulfaté magnésien	P17,P12	15.38 %

6.3.5. Les éléments chimiques et leurs origines :

6.3.5.1. Calcium (Ca^{2+})

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4).

Les teneurs sont très variables ; le minimum de 25 mg/l est enregistré dans le puits N°03, alors que le maximum est de 114 mg/l, au niveau du puits N°13 (fig. 38).

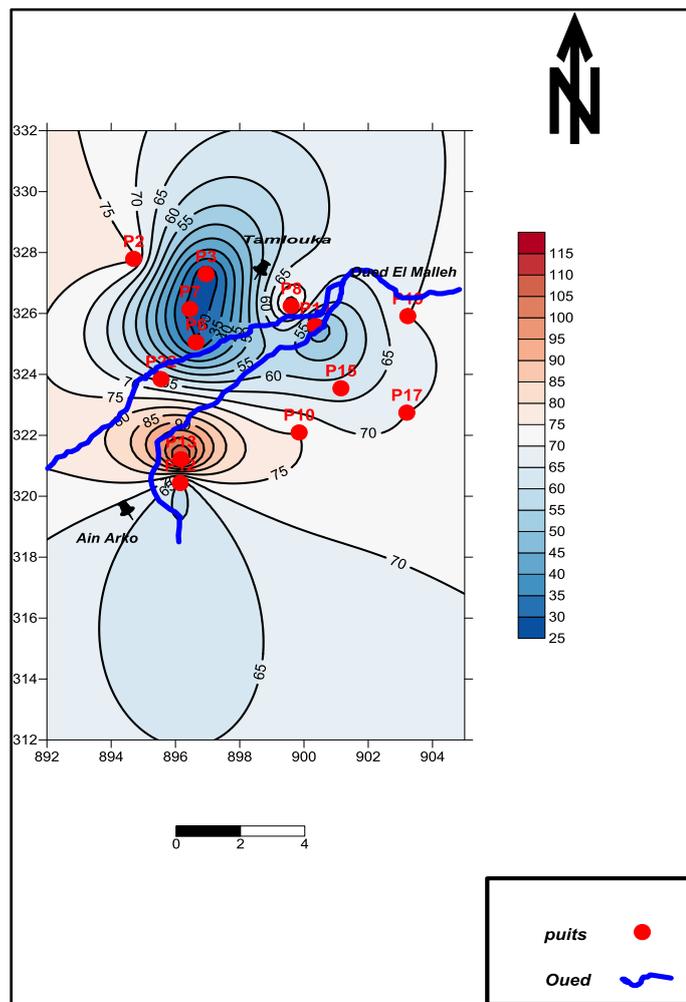


Fig. 38. Carte d'iso teneurs de Ca^{2+} (mg/l), (Avril 2014)

La répartition du calcium est tributaire de la lithologie, les teneurs les plus élevées sont observées dans le centre et le Nord-ouest de la plaine, là où la zone d'alimentation est constitué par les calcaires de Djebel Djaffa et du Horst de Ain Arko.

6.3.5.2. Magnésium (Mg^{2+}) :

Il en résulte principalement de la dissolution des formations dolomitiques. Il peut également provenir de la dissolution de $MgSO_4$ (sulfate Magnésien) dans les terrains gypsifères. Les valeurs en Mg^{++} varient entre 7 et 73 mg/l (fig. 39).

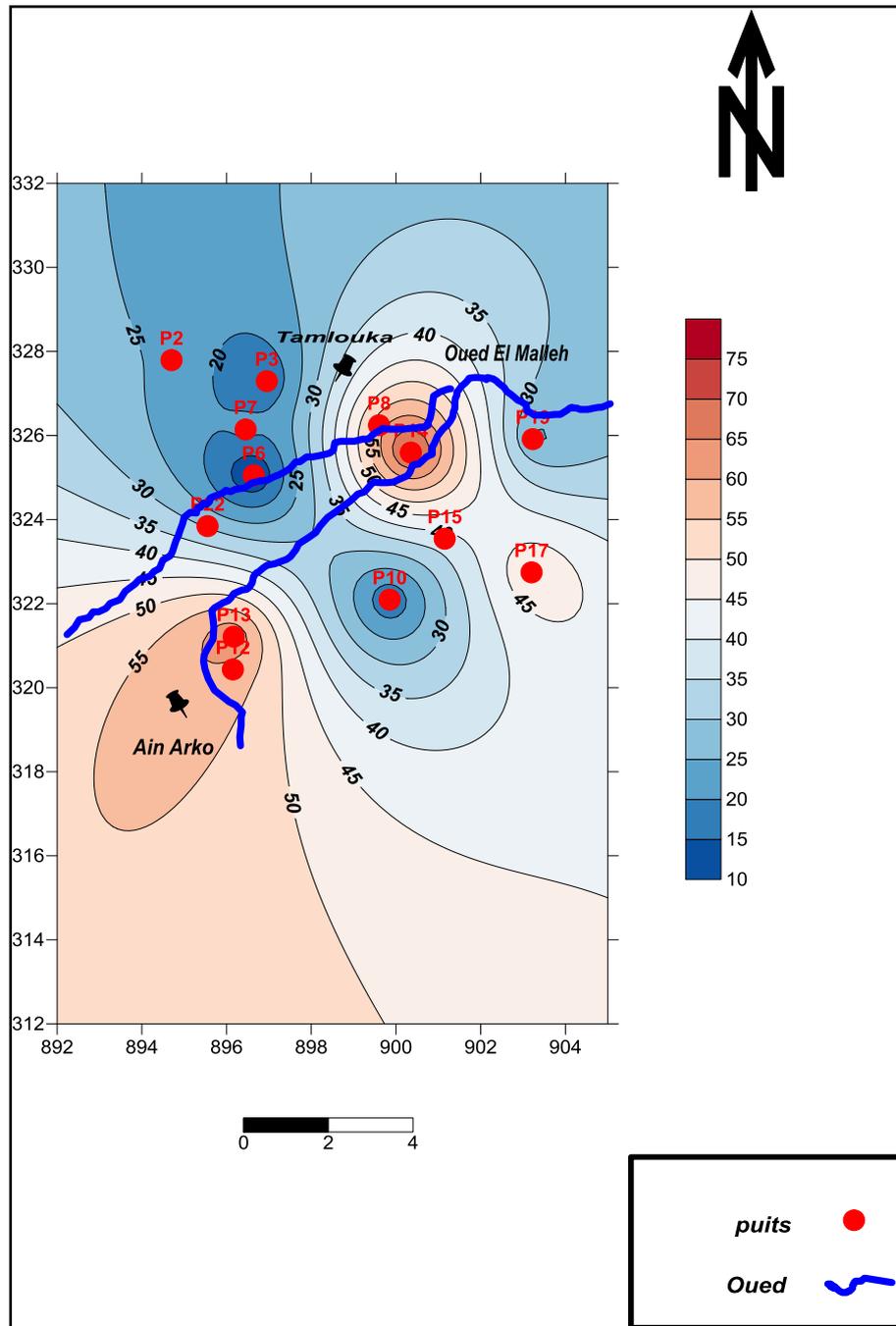


Fig. 39. Carte d'iso teneurs de Mg^{2+} (mg/l), (Avril 2014)

Dans les secteurs Nord-est et Sud-ouest, La répartition de Magnésium suit la même évolution que le Calcium. Ces teneurs relativement fortes sont dues au lessivage des formations néritiques du Djebel Djaffa et du môle d'Ain Arko composé, en partie, de passages dolomitiques.

6.3.5.3. Potassium et sodium (K^+ , Na^+) :

Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl et des formations argileuses et argilo-marneuses et du rejet des eaux usées d'origine industriel et domestique, ainsi que l'invasion de l'eau salé (fig. 40).

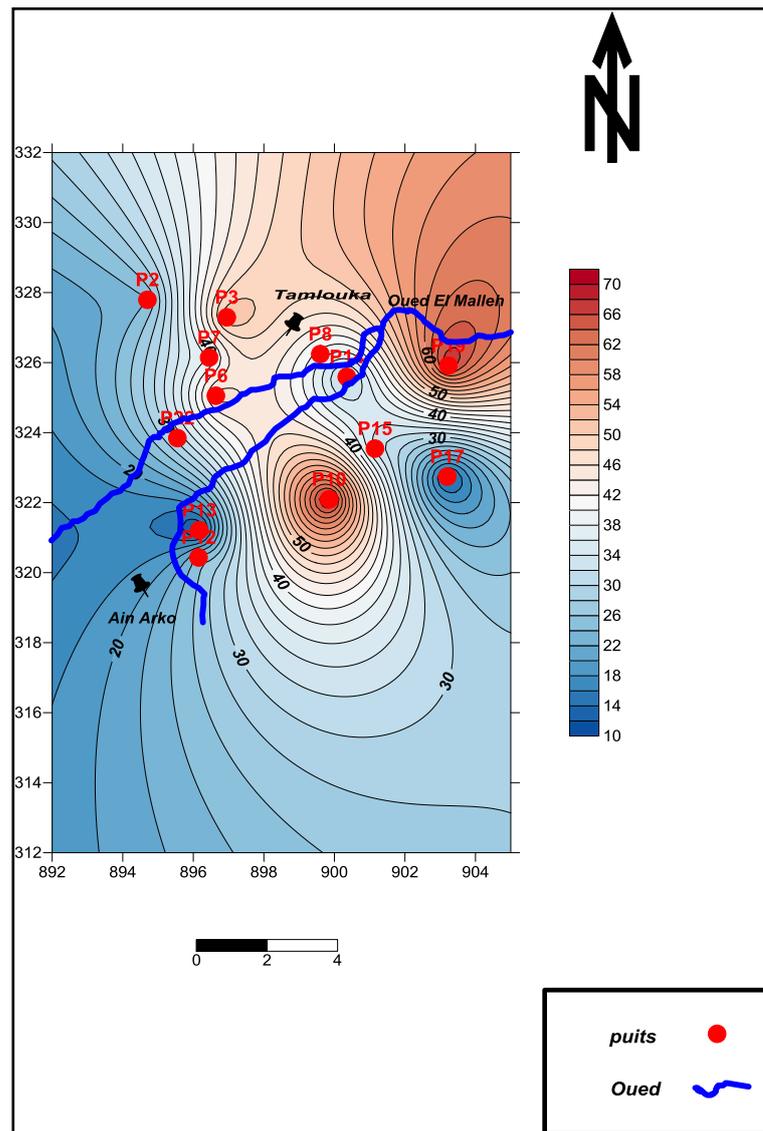


Fig. 40. Carte d'iso teneurs Na^+ , K^+ (mg/l), (Avril 2014)

Les teneurs de sodium sont dues essentiellement aux formations argilo-marno- sableuses du Mio-Plio-Quaternaire constituant la nappe phréatique. La morphologie de la plaine sous forme de cuvette peut être à l'origine de l'augmentation des teneurs du sodium au centre de celle-ci ; l'évaporation à ce niveau, est très intense.

6.3.5.4. Les chlorures (Cl⁻) :

Les chlorures proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par lessivage des terrains salifères et des rejets des eaux usées, industrielles et domestiques (Fig. 41).

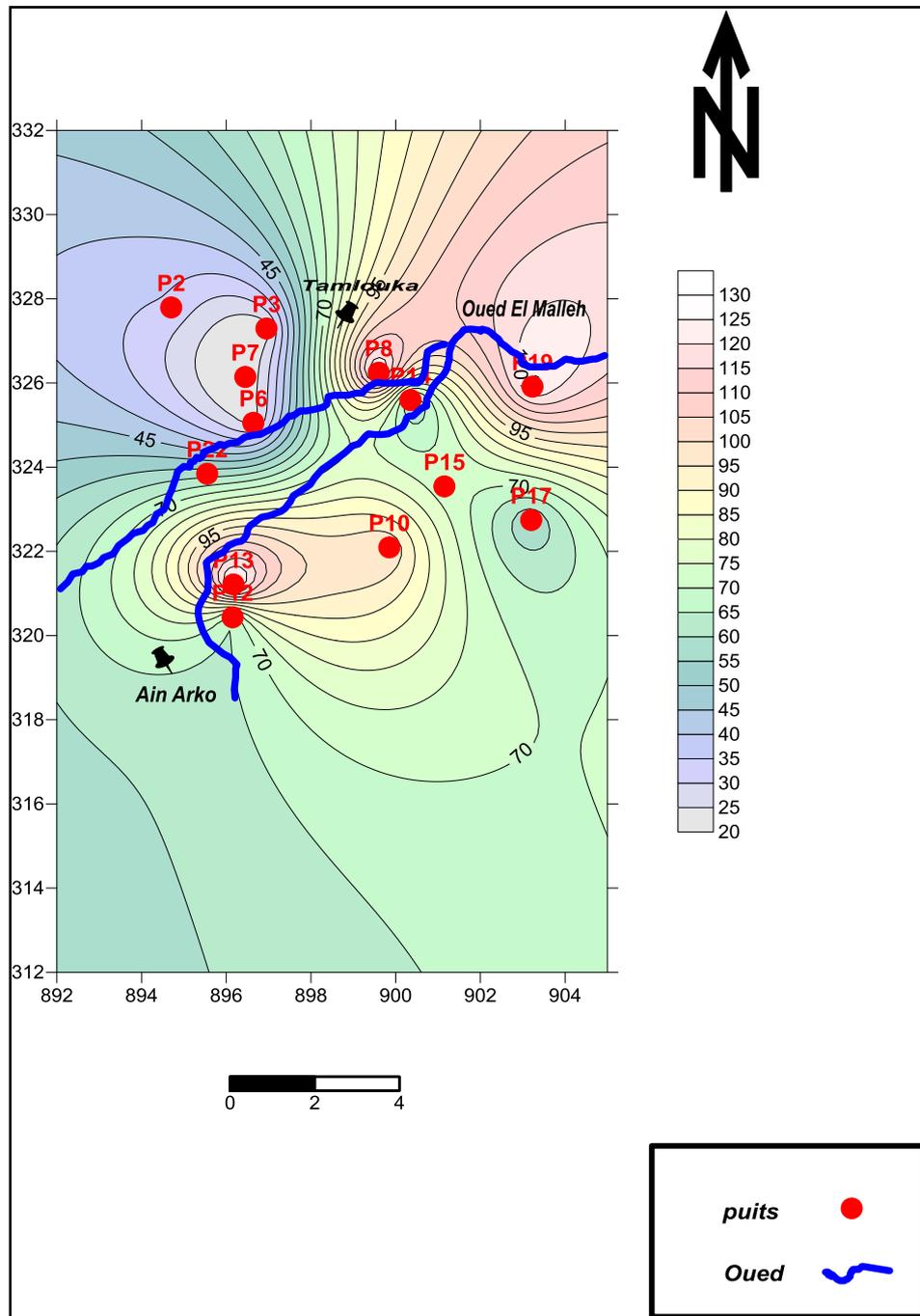


Fig. 41. Carte d'iso teneurs du Cl⁻(mg/l) (Avril 2014)

Les chlorures suivent la même évolution que le Sodium, ils sont dus au lessivage des formations évaporitiques et gypseuses très abondantes à l'amont du bassin versant de l'Oued El Maleh.

6.3.5.5. Les Sulfates (SO_4^{2-}) :

La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses (Fig. 42).

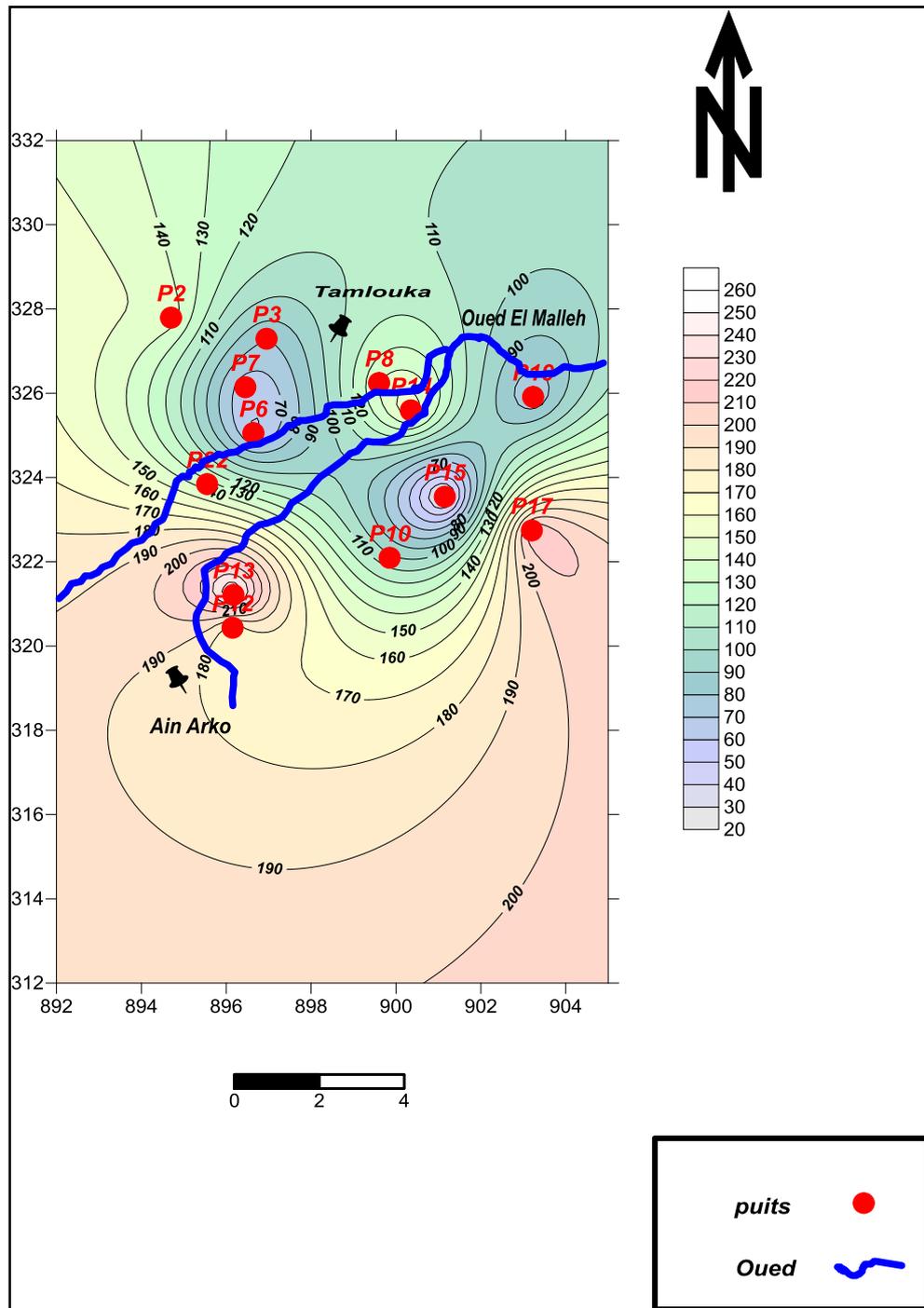


Fig. 42. Carte d'iso teneurs du SO_4^{2-} (mg/l), (Avril 2014)

Les plus fortes teneurs des sulfates sont observées dans la partie sud et Sud-ouest de la zone. Elles sont dues à l'existence de passage gypseux et évaporitiques au sein de l'unité des Sellaouas (Trias).

6.3.5.6. Bicarbonates (HCO_3^-) :

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique (Fig.43).

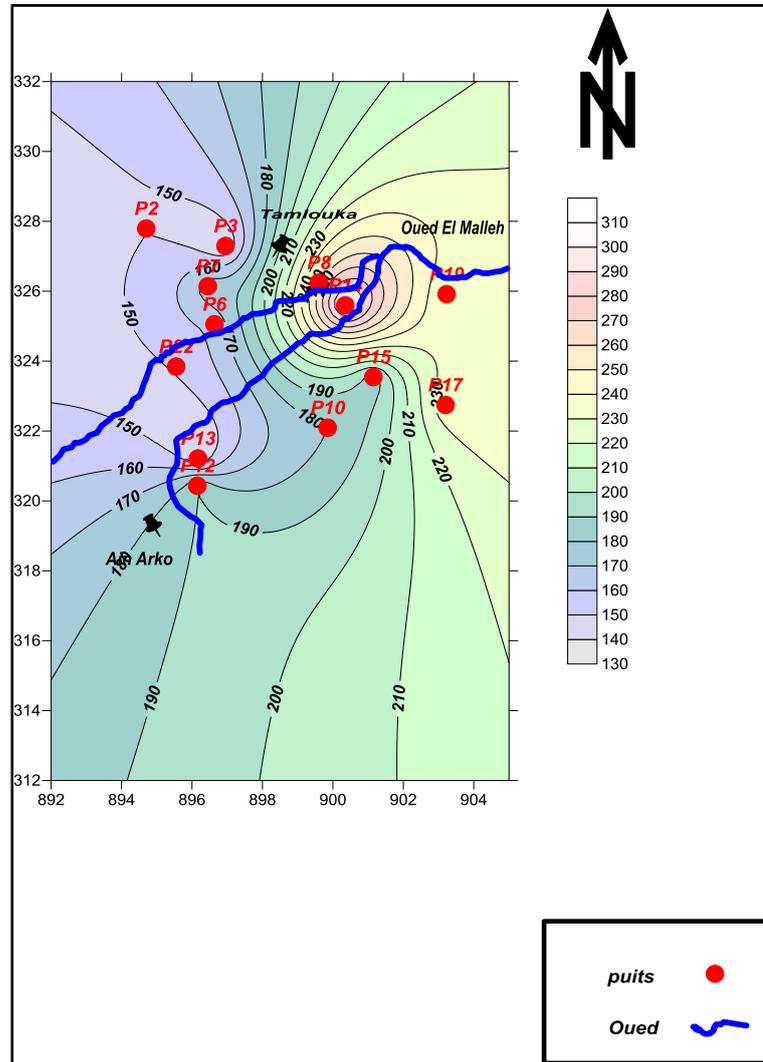


Fig. 43. Carte d'iso teneurs de HCO_3^- (mg/l) (Avril 2014)

Les puits qui représentent des teneurs élevées en bicarbonates atteignent, en profondeur, les formations calcaires du crétacé et du Jurassique ; c'est le cas des environs du village de Tamlouka.

6.3.6. Etudes des valeurs relatives :

6.3.6.1. Rapports Caractéristiques :

Le rapport caractéristique est le rapport de certains éléments chimiques, exprimés en quantité en réaction (még). Les rapports utilisés en hydrochimie sont :

$$rSO_4/rCl \quad -rMg/rCa \quad -rNa/rCl$$

Ces rapports permettent d'expliquer l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines en identifiant la nature lithologique des roches réservoirs.

a- Le rapport (rSO_4^{2-}/rCl) :

On remarque que ce rapport est supérieur à 1 dans presque toutes les eaux des puits. Cela se traduit par la prédominance des sulfates liés au lessivage des terrains marno-argileux, et des terrains triasiques, très abondants dans la plaine (Fig.44).

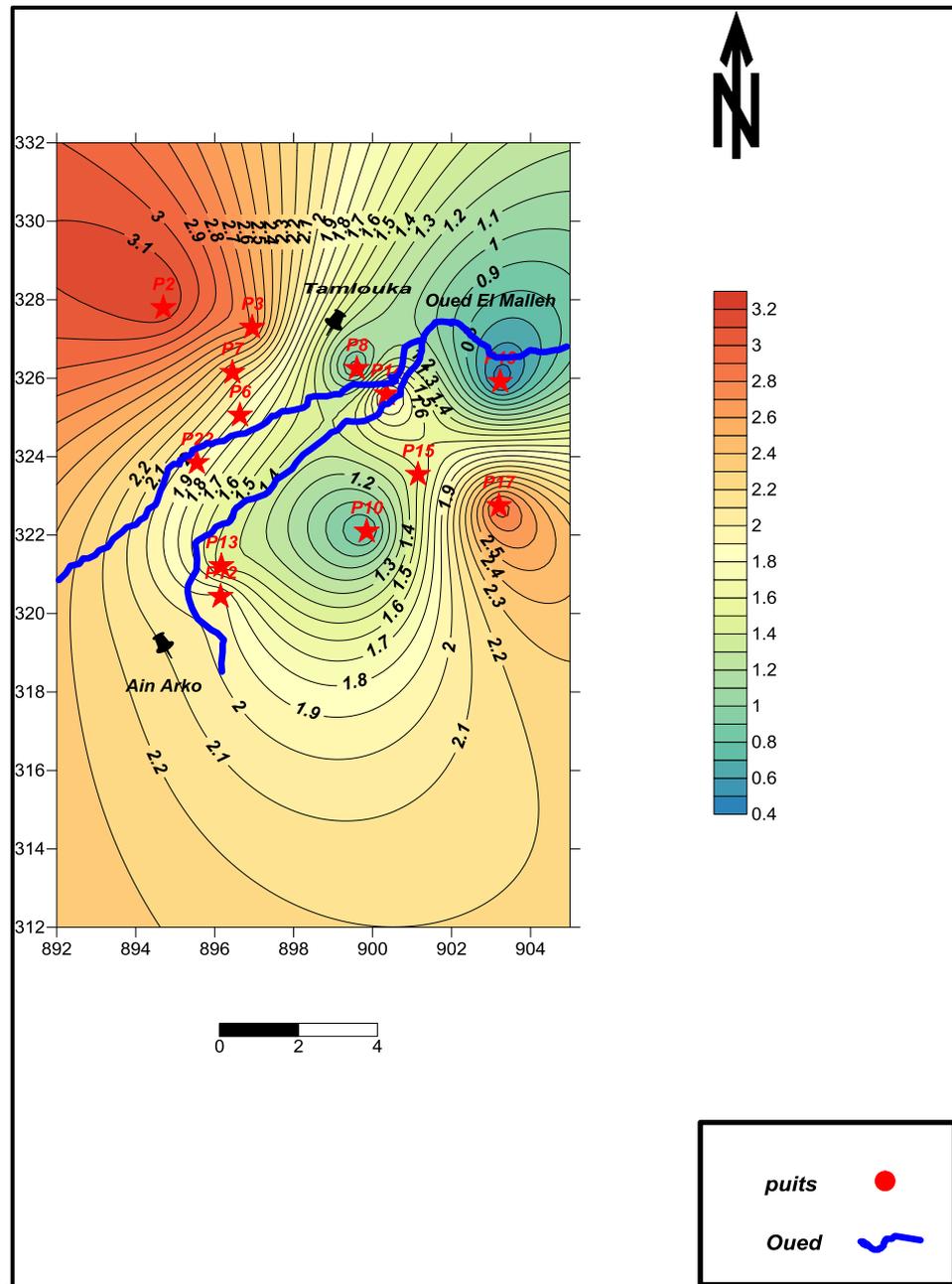


FIG. 44. CARTE D'ISO RAPPORT (rSO_4^{2-}/rCl)

b- Le rapport (rMg^{2+}/rCa^{2+}) :

Lorsque ce rapport est inférieur à 1 cela implique une prédominance du calcium (Ca^{2+}). Selon la carte, ce rapport est inférieur à 1 dans presque la majorité des points d'eau (7 puits),

parce que la solubilité des sulfates de calcium est plus forte que celle des sulfates de magnésium (Fig.45).

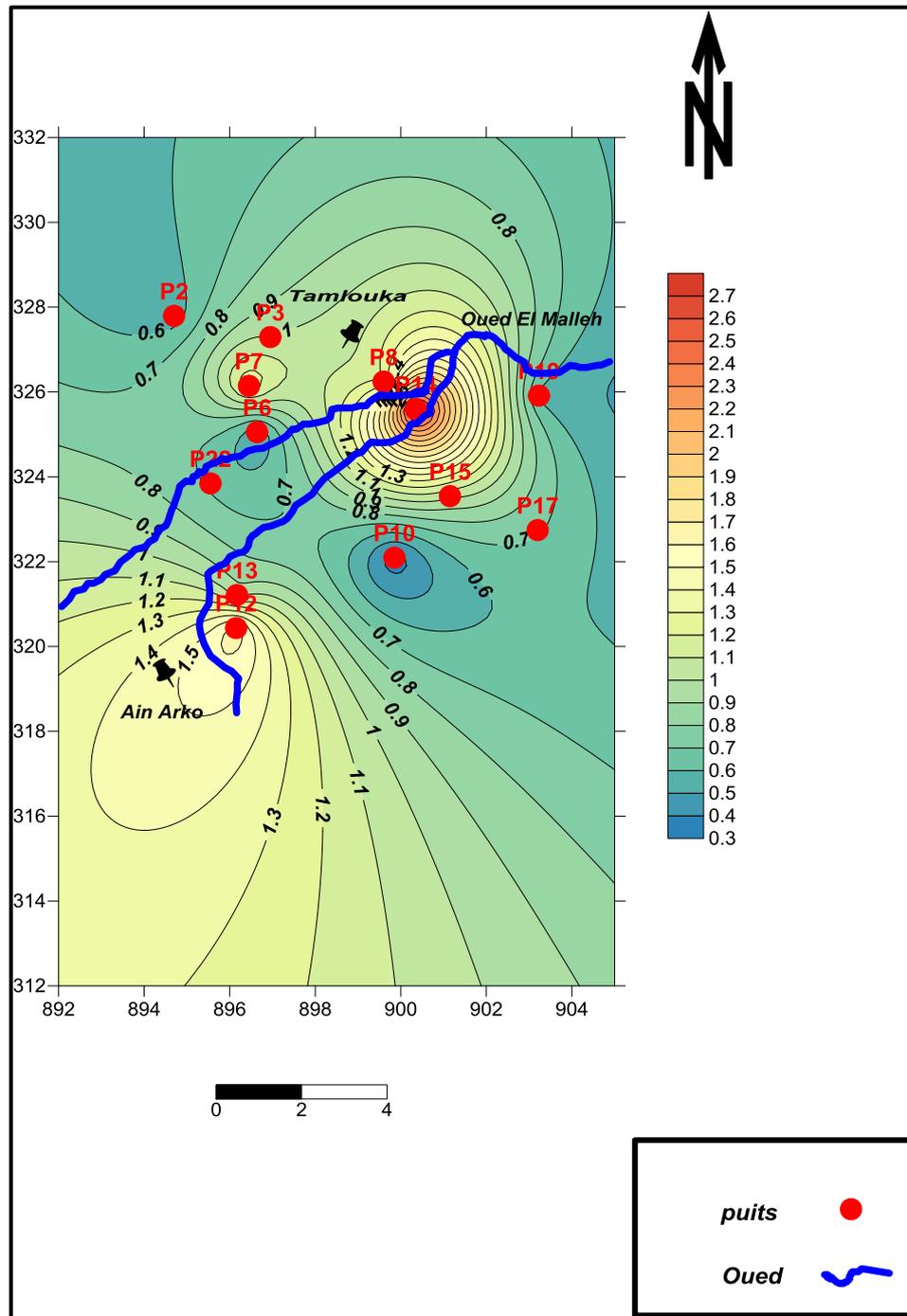


FIG. 45. CARTE D'ISO-RAPPORT (RMG^{2+}/RCa^{2+})

c- Le rapport (rNa^+/rCl^-) :

Lorsque le rapport est inférieur à 1, il y a une prédominance des chlorures qui sont liées aux lessivages des argiles et de marnes ainsi qu'aux rejets domestiques.

Ce phénomène est constaté dans la partie centrale de la plaine là où les formations géologiques du Mio-Pliocène sont à dominance argilo-marneuse. Lorsque ce rapport est

supérieur à 1 il y a une prédominance du sodium (Na^+) qui est lié aux formations riches en NaCl (Fig.46).

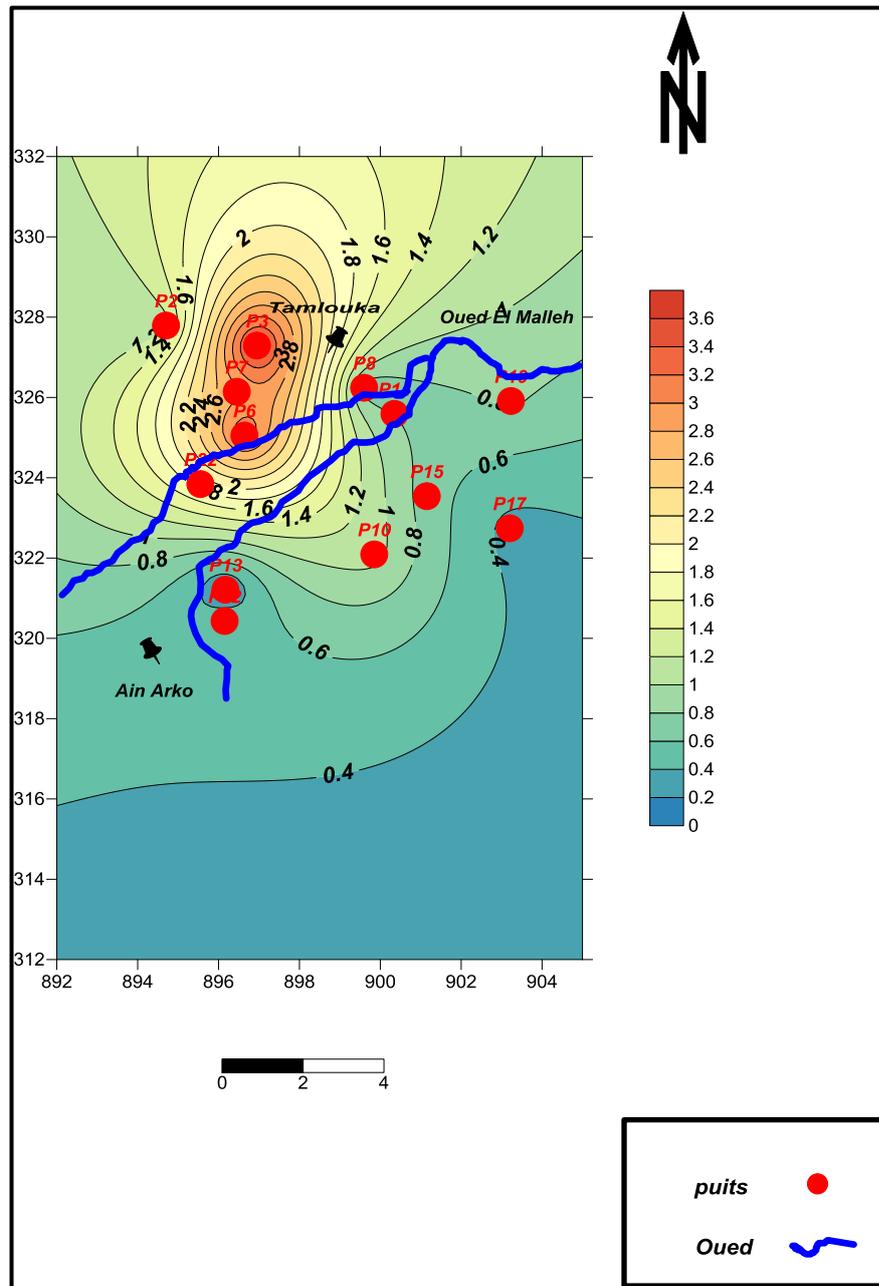


FIG. 46. CARTE D'ISO-RAPPORT ($\text{RNA}^+/\text{RCL}^-$)

6.3.6.2. L'indice d'échange de base (i.e.b) :

Il s'agit du rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau, il est obtenu en appliquant la relation suivante :

$$i.e.b = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-}$$

Si : $i.e.b < 0$  L'eau est d'origine cristalline.

Si : $i.e.b > 0$  L'eau est d'origine sédimentaire.

On constate que (06) échantillons (46.15%) présentent un $i.e.b > 0$ cela est expliqué par la prédominance des roches sédimentaires dans la plaine. Il s'agit de la fixation du sodium (Na^+) par l'argile et libération du Ca^{2+} dans l'eau. En revanche (53.84%) des échantillons testés présentent : $i.e.b < 0$ cela est due à la libération du Sodium (Na^+) de la roche vers l'eau et fixation du Ca^{++} par la roche(Fig.47).

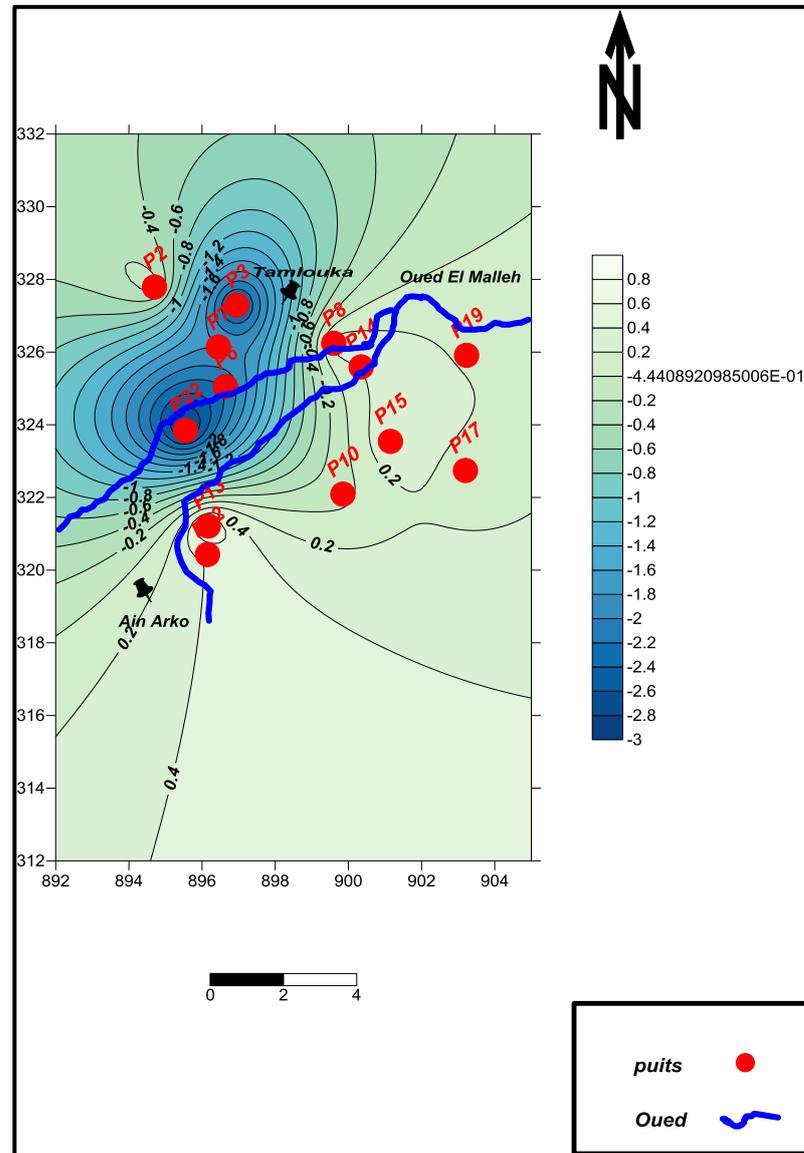


FIG. 47. CARTE DE L'INDICE D'ÉCHANGE DE BASE

6.4. Aptitude des eaux pour l'irrigation :

La plaine de Tamlouka s'étale sur une superficie plus de (200 km²) dont la plus grande partie est occupée par les cultures céréalières. Pour cela nous sommes obligés de classer ces eaux, en utilisant le diagramme de Wilcox.

6.4.1. Principe du diagramme :

Le S.A.R (Sodium Adsorption ration) est donné par la formule :

$$SAR = \frac{Na +}{\sqrt{(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / 2}}$$

Où : Na⁺, Ca⁺² et Mg⁺² sont exprimés en (méq/l).

Les valeurs de SAR sont représentées en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau (tableau. 27), cette dernière permet une estimation de la minéralisation des eaux, elle est exprimée en (µs/cm).

TABLEAU 27. CLASSIFICATION DES EAUX PAR DEGRE D'APTITUDE A L'IRRIGATION PAR LA METHODE SAR

Degré	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1	Excellente	C1-S1	Eau à utilisation sans danger pour l'irrigation pour la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En générale, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes en sels
3	Admissible	C3-S1 C4-S2 C3-S3	En générale, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes en sel, sur des sols bien drainés l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4	Médiocre	C4-S1 C4-s2 C4-S3	En générale, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes en sel sur des sols bien drainés et lessivés
5	Mauvaise	C4-S1 C4-S2 C4-S3	Eau ne convenant pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certains conditions.

6.4.2. Interprétation :

Sur le Diagramme de Wilcox (Fig. 48), on peut distinguer les classes des eaux analysées pour les 13 puits, les résultats sont reportés sur le tableau 28.

TABLEAU 28. CLASSE DE L'APTITUDE DES EAUX DES PUIITS POUR L'IRRIGATION

Classe	Nombre d'échantillon	Puits	Qualité
C1-S1	0	/	Excellente
C2-S1 C2-S2	1	P8	Bonne
C3-S1 C4-S2 C3-S3	5	P2, P3, P6, P7, P22	Admissible
C4-S1 C4-S2 C4-S3	7	P10, P12, P13, P14, P15, P17, P19	Médiocre

C4-S1			
C4-S2	0	/	Mauvaise
C4-S3			

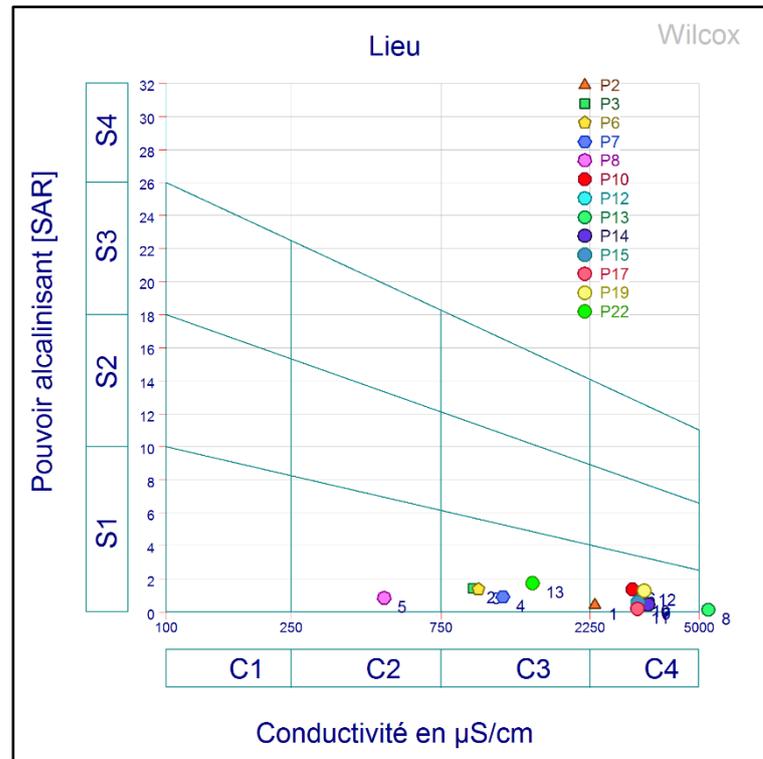


FIG. 48. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE L'APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION

Les puits des bordures des reliefs représentent les classes : bonne et admissible pour l'irrigation, par contre les puits du centre de la plaine et au long de l'Oued El Maleh représentent les classes médiocre et mauvaise, pour l'irrigation.

6.5. Normes et qualités des eaux :

Dans le but de faire une approche qualitative des résultats des analyses effectuées, on a procédé à une classification selon les normes OMS (Organisation Mondiale de la Santé) pour chacun des paramètres étudiés précédemment (tableau 29).

TABLEAU 29. NORMES OMS DE POTABILITE D'EAU

Paramètre		Norme
Potentiel d'hydrogène	PH	6.5-9
Calcium	Ca ²⁺ (mg/l)	100
Magnésium	Mg ²⁺ (mg/l)	50
Sodium	N ⁺ (mg/l)	150
Potassium	K ⁺ (mg/l)	12
Dureté	TH (°F)	< 30
Chlorures	Cl ⁻ (mg/l)	200

Sulfates	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250
Bicarbonates	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Pas de norme
Conductivité	(μs/cm)	≥ 180 et ≤ 1000

6.5.1. Les Chlorures (Cl⁻) :

Une eau contenant moins de 200 mg/l de chlorures est bonne pour tous les usages, elle peut encore être considérée comme potable (tableau 30).

TABLEAU 30. CLASSIFICATION DES EAUX ET NORME POUR LES CHLORURES

Chlorures mg/l	Type d'eau	Puits correspondants
0-200	Bonne	Tous les puits
>200	Mauvaise	/

Selon le tableau 30 représentant les normes pour les chlorures, on note que tous les puits représentant une eau de bonne qualité, avec une teneur en chlorures inférieur à 200 mg/l.

6.5.2. Les Sulfates (SO₄²⁻) :

Leur présence est souvent d'origine naturelle, les teneurs en sulfates des eaux sont liées principalement à la nature des terrains traversés.

En ce qui concerne les classes établies pour les sulfates, le tableau 31 met en évidence les deux classes retenues pour cette classification.

TABLEAU 31. CLASSIFICATION DES EAUX ET NORME POUR LES SULFATES

Les Sulfates (mg/l)	Type d'eau	Puits correspondants
0-250	Bonne	P2, P3, P6, P7, P8, P10, P12, P14, P15, P17, P19, P22
>250	Mauvaise	P13

La majorité des puits sont de bonne qualité, la teneur en sulfates est inférieur à 250 mg/l sauf pour le puits n°13 de l'ordre de 256 mg/l présente une mauvaise qualité.

6.5.3. Les Bicarbonates (HCO₃⁻) :

Selon les normes de l'OMS, la teneur en bicarbonates des eaux de la plaine de Tamlouka, ne dépasse pas 518 mg/l, donc, elles sont de bonne qualité. (Tableau32).

TABLEAU 32. CLASSIFICATION DES EAUX ET NORME POUR LES BICARBONATES

Les Bicarbonates mg/l	Type d'eau	Puits correspondants
0-518	Bonne	Tous les puits
>518	Mauvaise	/

6.5.4. Le Calcium (Ca^{2+}) :

Les teneurs en calcium (Ca^{2+}) dans les eaux des puits analysées sont de bonne qualité sauf le puits n°13 où la teneur en calcium dépasse 100 mg/l donc il est de mauvaise qualité (tableau 33).

TABLEAU 33. CLASSIFICATION DES EAUX SELON LA TENEUR EN CALCIUM

Le Calcium (Ca^{2+})	Type d'eau	Puits correspondants
0-100	Bonne	P2, P3, P6, P7, P8, P10, P12, P14, P15, P17, P19, P22
>100	Mauvaise	P13

6.5.5. Le magnésium (Mg^{2+}) :

Dans le tableau 34 ; huit (08) points représentent des eaux de bonne qualité où la teneur en magnésium est inférieure à 50mg/l, et cinq (05) points correspondant à la qualité passable, pour lesquelles le teneur en magnésium est compris entre 50 et 100mg/l.

TABLEAU 34. CLASSIFICATION DES EAUX SELON LA TENEUR EN MAGNESIUM

Magnésium (Mg^{2+})	Type d'eau	Points correspondants
0-50	Bonne	P2, P3, P6, P7, P10, P15, P19, P22
50-100	Passable	P8, P12, P13, P14, P17
>100	Mauvaise	/

6.5.6. Le Sodium (Na^+) :

Le tableau 35 montre que selon la teneur en sodium, toutes les eaux des puits appartiennent à la bonne qualité.

TABLEAU 35. CLASSIFICATION DES EAUX SELON LA TENEUR EN SODIUM

Le Sodium (Na^+)	Type d'eau	Puits correspondants
0-69	Bonne	Tous les Puits
>69	Mauvaise	/

6.6. Etude statistique

6.6. 1. Analyse en composantes principales

L'ACP, est une méthode largement utilisée dans de très nombreux domaines se rapportant à l'environnement pour mettre en évidence les associations entre les individus et/ou les variables. L'analyse en composantes principales a été utilisée par de nombreux chercheurs afin de mettre en évidence sur des cours d'eaux les influences saisonnières et anthropiques. Cette technique s'est avérée également être un outil tout à fait adapté au suivi de la qualité des plans d'eaux et en particulier à l'étude des phénomènes d'eutrophisation.

L'ACP permettra de regrouper selon des facteurs identiques les échantillons présentant des caractères d'origine ou d'évolution similaire. L'interprétation de l'ACP consiste ensuite à déterminer les facteurs responsables (composantes principales) de la structure observée (Debieche, 2002)

La matrice des données est composée de 07 variables (conductivité, Chlorures, sulfates, bicarbonates, sodium, magnésium et calcium), et 13 individus représentés par les puits (Tableau 36).

TABLEAU 36. MOYENNE ET ECART-TYPE DES VARIABLES PHYSICO CHIMIQUES

	Max	Min	Moyenne	Ecart-type
CE	5360	495	2494,923	1343,374
Cl ⁻	131	21	67,923	41,320
SO ₄ ⁻²	256	49	123,231	62,707
HCO ₃ ⁻	310	140	200,385	48,344
Ca ²⁺	114	25	60,077	24,056
Mg ²⁺	73	7	32,692	22,078
Na ⁺ +K ⁺	70	11	41,323	20,169

Le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré présente l'apport de la variable dans la composition de l'axe factoriel principal, autant que ce coefficient est important, autant que la variable contribue à la conception de cet axe (Tableau37).

TABLEAU 37. MATRICE DES CORRELATIONS AVRIL 2014

	CE	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺ +K ⁺
CE	1						
Cl ⁻	0,510	1					
SO ₄ ⁻²	0,601	0,314	1				
HCO ₃ ⁻	0,026	0,218	0,066	1			
Ca ²⁺	0,654	0,788	0,664	-0,034	1		
Mg ²⁺	0,477	0,515	0,554	0,374	0,426	1	
Na ⁺ +K ⁺	-0,510	0,078	-0,679	0,116	-0,278	-0,446	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

L'examen du tableau 37 montre des rapports de corrélations très significatifs, notamment entre les éléments de la minéralisation. L'examen des coefficients d'autres couples de variables pourrait de même apporter des compléments d'information sur l'état des eaux souterraines.

La conductivité est positivement corrélée avec les Chlorures (r=0.510), les sulfates (r=0.601) et le calcium (r=0.654). Elle représente la minéralisation des eaux dont l'origine est liée aux caractéristiques lithologiques de l'aquifère ainsi que les interactions avec les eaux de surface.

Les sulfates sont positivement corrélés avec le calcium ($r=0,664$) et le magnésium ($r=0,554$). La présence de lentilles évaporitiques gypsifères dans des formations aquifères Mio-Plio-Quaternaires de la région explique ces rapports préférentiels entre les sulfates, le calcium et le magnésium.

Le coefficient de corrélation est très positif entre les chlorures et le calcium ($r=0,778$) dû aux échanges de base entre le sodium et le calcium pendant la période des hautes eaux où l'apport des massifs calcaires de Djebel Djaffa est très important.

6.6.1.1. Valeur propre

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Le premier axe principal F1 explique 50,163 % de la variation totale, F2 explique 19,89 % de la variance totale (Fig. 49). Le pourcentage cumulé est très représentatif 70,054 % (Tableau 38)

TABLEAU 38. VALEURS PROPRES ET POURCENTAGE DES SEPT AXES PRINCIPAUX

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	3,511	1,392	1,091	0,407	0,389	0,155	0,054
% variance	50,163	19,892	15,585	5,811	5,561	2,211	0,778
% cumulé	50,163	70,054	85,640	91,451	97,012	99,222	100,000

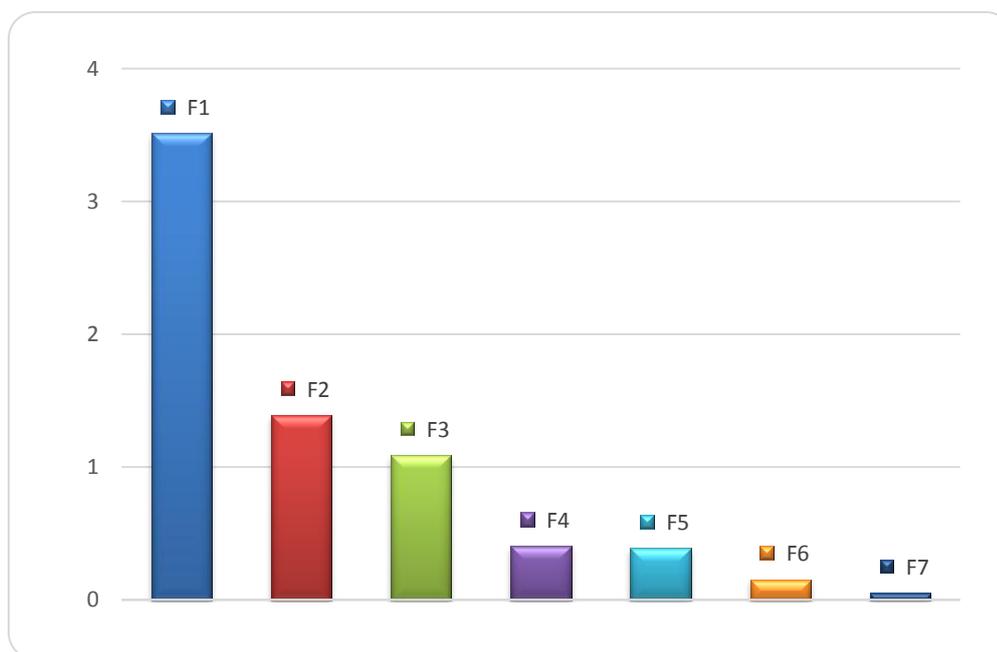


FIG. 49. HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES

TABLEAU 39. CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES ET LES AXES PRINCIPAUX

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
CE	0,825	-0,114	-0,132	-0,345	0,397	0,113	0,008
Cl⁻	0,688	0,597	-0,350	0,115	0,044	-0,110	-0,144
SO₄⁻²	0,837	-0,309	0,123	-0,061	-0,379	0,189	-0,077

HCO_3^-	0,164	0,633	0,689	-0,290	-0,096	-0,074	0,016
Ca^{+2}	0,843	0,135	-0,435	-0,038	-0,216	-0,102	0,151
Mg^{+2}	0,755	0,176	0,416	0,430	0,166	0,101	0,060
$\text{Na}^{+2}+\text{K}^{+}$	-0,592	0,691	-0,315	-0,020	-0,054	0,261	0,032

6.6.1.2. Analyse du cercle ACP (F1x F2)

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (Fig. 50) donnant 70,054 % de l'information totale montre, selon l'axe F1 (50.163 %), les observations suivantes :

La répartition des variables mesurées sur le plan des axes F1 et F2 (Fig. 51) montre que le long de l'axe F1 se regroupe dans un ensemble la majorité des variables en rapport avec la minéralisation. Il s'agit de la conductivité, des chlorures, des sulfates, du calcium et du magnésium. Cet ensemble est positivement corrélé avec cet axe. Ce dernier représente, donc, l'information relative à la minéralisation totale des eaux de la nappe aquifère.

Le long de l'axe F2 se regroupe les bicarbonates, le sodium et le potassium. Ils sont positivement liés à cet axe. L'axe F2 résume l'information relative à l'influence de la dissolution des formations évaporitiques salifères et carbonatées au niveau des zones d'alimentation.

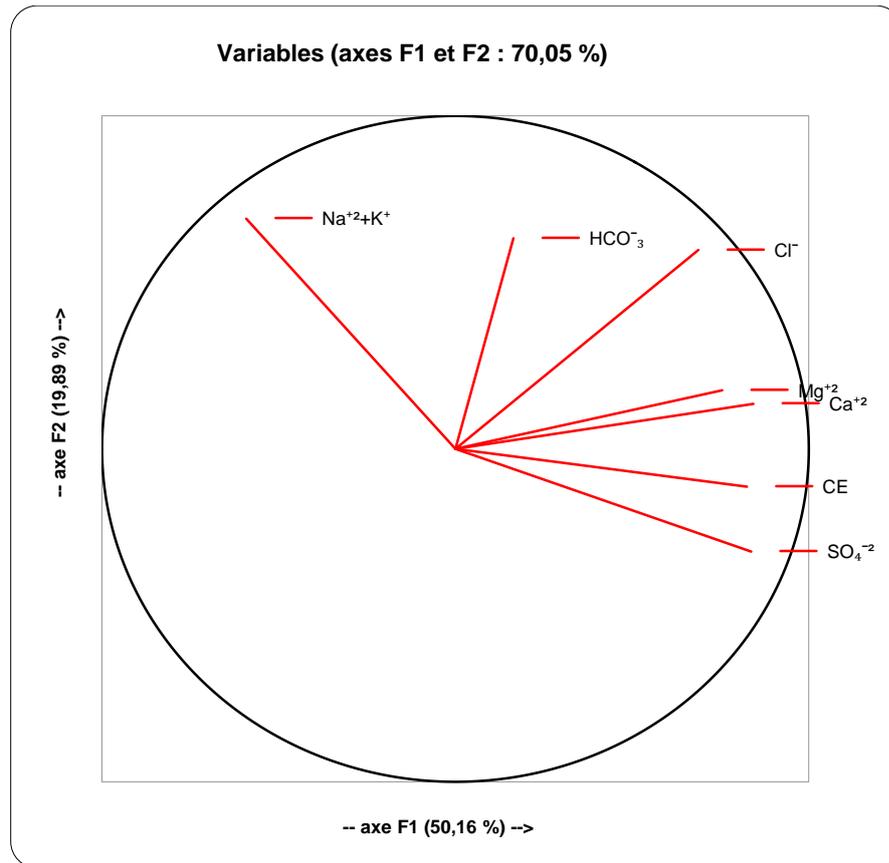


FIG. 50. CERCLE DES CORRELATIONS DES VARIABLES DANS LE PLAN F1x2F2

La projection des individus sur le plan F1x2F2, traduit des positions adéquates des points de prélèvement à ce qui est connu de leurs environnements dans la plaine de Tamlouka. En effet on constate l'existence de quatre groupes d'eaux (Fig. 51) :

- Le premier groupe est représenté par le point P13 caractérisé par une forte conductivité (5360 μ S/s) et une eau de type sulfatée chlorurée calcique.
- Le deuxième groupe comprend les points P8, P10, P14, P15, P19, dont les eaux sont caractérisées par des conductivités relativement fortes à moyennes et un faciès bicarbonaté très dominant.
- Le troisième groupe (P2, P12 et P17) représente les eaux avec une conductivité relativement forte et un équilibre entre les bicarbonates et les sulfates.
- Le quatrième groupe (P3, P6 et P7) marqué par de faibles conductivités et un faciès nettement bicarbonaté calcique.

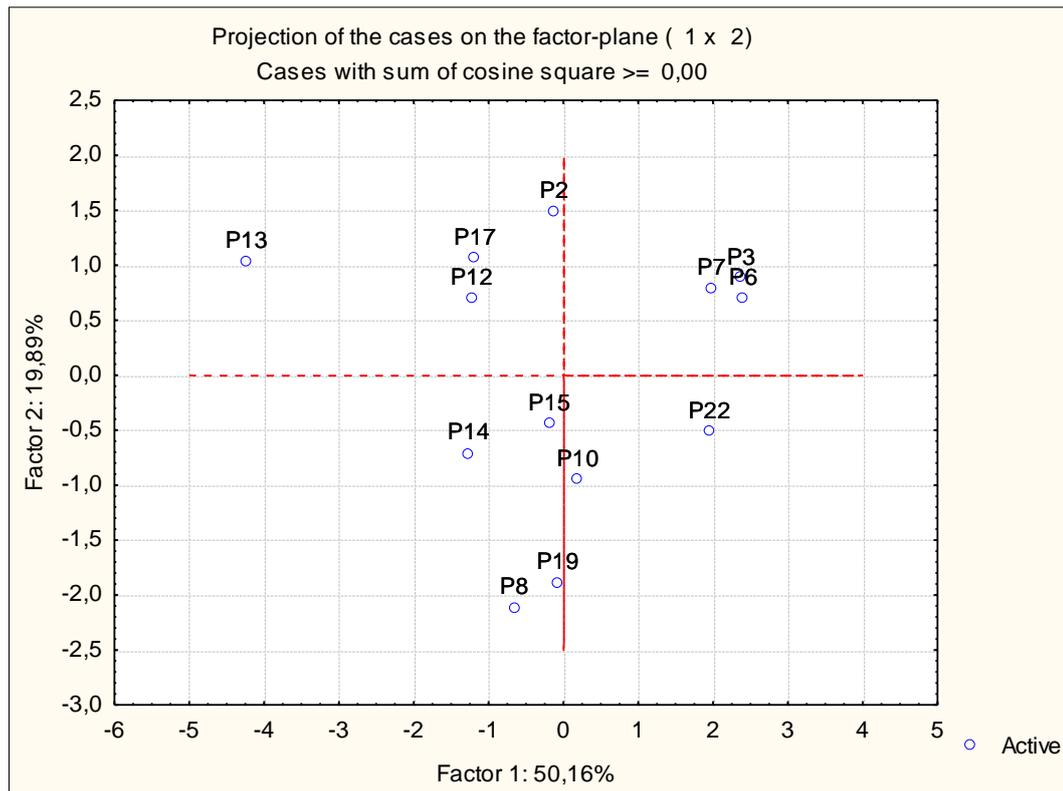


FIG. 51. PROJECTION DES INDIVIDUS SUR LE PLAN FACTORIEL F1XF2

6.6.2. Classification Ascendante Hiérarchique des eaux souterraines (CAH)

La méthode statistique de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été utilisée pour l'étude des phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux. La CAH est une technique qui mesure la dissimilarité ou la similarité entre les échantillons afin de définir un critère d'agrégation des classes (Templ et al, 2008). Les classes ainsi obtenues produisent un arbre binaire de classification appelé "dendrogramme".

Le dendrogramme (Fig. 52) confirme les résultats de l'ACP et révèle deux groupes dont l'un est représenté par deux sous-groupes. Le premier groupe comprend le point P13 marque une conductivité excessivement forte et un faciès à dominante sulfaté calcique. Le deuxième groupe représente globalement les eaux du type bicarbonaté calcique avec des conductivités relativement faibles à moyennes.

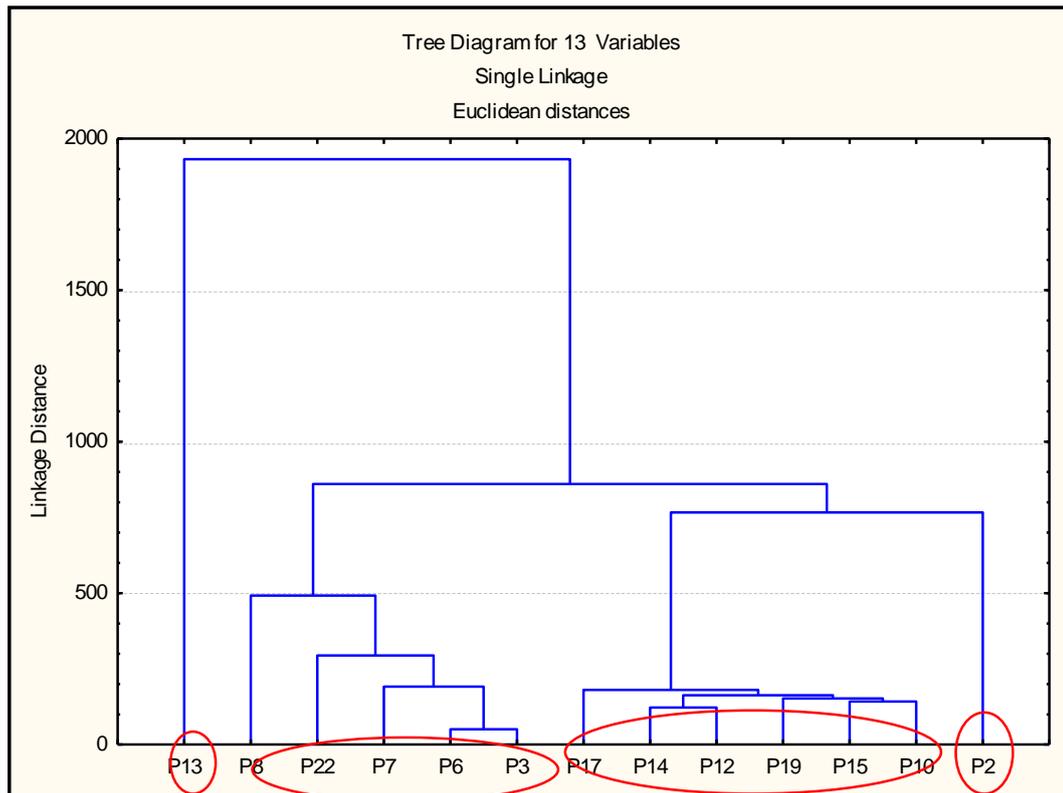


FIG. 52. CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

6.7. Conclusion :

L'étude hydrochimique de la plaine de Tamlouka nous a permis de mettre en évidence plusieurs constatations :

-Il en ressort pour les eaux souterraines des faciès chimiques variés : bicarbonaté magnésien, bicarbonaté calcique, bicarbonaté sodique, sulfaté calcique et sulfaté magnésien. Ces faciès obéissent à une répartition spatiale bien déterminée. En effet, toutes les concentrations augmentent de la périphérie vers le centre. Le caractère morphologique de la plaine étant la principale cause de cette augmentation.

-Concernant l'aptitude des eaux pour l'irrigation, les eaux des puits analysés peuvent être subdivisé en trois (3) classes : la classe bonne présentée par un seul puits, la classe admissible regroupant cinq (5) puits et enfin la classe médiocre correspondant à sept(7) puits.

-L'étude de la qualité des eaux montre que la majorité des eaux des puits, sont de bonne qualité, pour les bicarbonates les eaux sont de types bonnes sauf le puits 13 qui représente une mauvaise qualité, notamment, pour les autre éléments chimiques.

-Au niveau des formations carbonatées (calcaire) des massifs de Djebel Djaffa et Djebel Ain Arko, les eaux montrent une faible minéralisation avec un faciès Bicarbonaté calcique et magnésien

- Les eaux de formations marno-calcaires de la chebka des Sellaouas présentent une minéralisation relativement élevée que la précédente avec une augmentation sensible des sulfates (SO_4^{2-}) à cause des passages gypsifères.

L'ACP présente un avantage supplémentaire de mettre en évidence l'évolution spatiotemporelle du chimisme en relation avec les conditions naturelles (hydrodynamiques et lithologiques). L'acquisition du chimisme des eaux souterraines est tributaire de plusieurs facteurs à savoir précipitation-évaporation, zone d'alimentation, accumulation et circulation et l'effet des actions anthropiques.

Chapitre VIII :

*Caractérisation des eaux
souterraines hydrothermales*

Chapitre VII : Caractérisation des eaux souterraines hydrothermales

7.1. Introduction

La plaine de Tamlouka – Ain Makhoulf (situé dans le Nord Est algérien) renferme dans son sous-sol plusieurs aquifères contenant, par endroit, de l'eau chaude dont la température varie de 30 à 72°C. Afin d'élucider le mode de gisement et de circulation de ces eaux et d'évaluer le potentiel en eau thermale de ce bassin, nous avons utilisé une approche pluridisciplinaire axée sur la géologie, la géophysique, l'hydrodynamique et l'hydrochimie. Il ressort de cette approche que ce bassin occupe une situation structurale intermédiaire entre le domaine tellien, le domaine néritique et l'unité de Sellaoua. Il est également caractérisé par la présence d'une série de horsts formés par des calcaires et des dolomies, datés du Lias au Miocène et de grabens comblés par des formations alluvionnaires du Mio-Plio-Quaternaire. Cette situation structurale s'est traduite, du point de vue topographique, par l'apparition de la plaine de Tamlouka et du système collinaire d'Ain Makhoulf. L'aperçu hydrogéologique montre que les formations du Mio-Plio-Quaternaire forment la nappe superficielle dont les possibilités aquifères sont réduites et compliquées par une salinité excessive. Les calcaires et dolomies du domaine néritique peuvent offrir des possibilités aquifères non négligeables. L'outil hydrochimique montre que les eaux chaudes se caractérisent par la présence de deux faciès chimiques, le premier du type HCO_3Ca , à l'ouest et le deuxième SO_4Ca , à l'est. La salinité de ces eaux chaudes thermales est principalement due à la circulation des eaux à grande profondeur dans les formations cristallophylliennes et les formations carbonatées qui sont en contact avec les formations terrigènes salifères. Les géothermomètres à silice et Na montrent que les eaux thermales ont une température de 80-100°C et que l'eau proviendrait d'une profondeur allant de 1800 à 2000m à travers un système de failles qui affecte le socle. Il est montré que la baisse de la température de 30°C est due en partie au mélange avec les eaux de surface.

Elle est caractérisée par la présence d'un certain nombre de sources d'importance variables (débits 100l/s) dont 8 sources chaudes. Il s'agit de Ain Arko (AA), des forages F8, F17 et F18 situés au sud-ouest, et hammam Belhachani (HB), hammam Guerfa (HG), Ghallaia1(GH1), Ghallaia2(GH2) et Ain Debba (AD) au nord-est. La température de l'eau de ces sources chaudes varie de 30 à 72°C. Actuellement, les eaux des forages F8, F17, F18 et d'Ain Arko sont exploitées pour l'AEP, alors que celles des autres sources sont utilisées dans l'agriculture et le tourisme thermal.

La présente note qui porte, pour la première fois, sur la région, se propose par le biais d'une étude géologique, géophysique, géochimique et géothermique, d'apporter une nouvelle approche

du contexte structural et géochimique de ces eaux « chaudes ». Ceci permettra de mieux comprendre les mécanismes tectoniques responsables de leur alimentation, circulation, accumulation et émergence et de mettre en évidence leurs caractéristiques typologiques et leur parenté chimique.

7.2. Stratégie d'échantillonnage

La composition chimique d'une eau thermale reflète les processus et les mécanismes dont elle était soumise. L'eau circule, à travers les circuits hydrothermaux, en lessivant les terrains encaissant et il peut y avoir, une augmentation de la concentration totale en sels dissous et des variations des rapports caractéristiques qui peuvent nous renseigner sur l'origine des eaux, le circuit souterrain emprunté, l'influence des conditions litho structurales et les mélanges éventuels avec les eaux froides superficielles.

Pour aborder ce contexte, un échantillonnage a intéressé huit points d'eau (trois forages et cinq sources) dont les eaux ont fait l'objet d'analyses chimiques. Ces points d'eau sont notés :

Le forage F8, situé à environ 3km, au Nord Est du village de Ain Arko a atteint une profondeur totale de 300m ; il traverse une colonne de calcaire cristallin fissuré du néritique de 200m. Le débit d'exploitation est de 30.2l/s avec une température de 36°C.

Le forage F18 situé à 700m du village d'Ain Arko avec une profondeur totale de 300 m, crépiné de 120 à 300 m

Le débit d'exploitation est de 20l/s, la température de l'eau est de 30°C. Les formations aquifères sont représentées par les calcaires jurassiques fissurés de djebel Djaffa.

Le forage F17 situé à 2km au sud-ouest du village d'Ain Arko, profondeur totale 300 m, crépine de 110 m à 300m, le débit est de 20l/s, la température de l'eau est de 31.5°C, les formations aquifères sont représentées par les calcaires fissurés du jurassique néritique constantinois

Les sources au nombre de 04 sont réparties en 3 groupes : le premier groupe comprend les sources GH, HG formant les griffons de Hammam Guerfa. Le deuxième groupe comprend l'émergence de Hammam Belhachani (HB) et le 3^{ème} la source d'Ain Debba (AD).

Les échantillons ont été prélevés à l'aide de trois flacons en polypropylène lavés à l'acide. Chaque échantillon a été filtré immédiatement sur le site à l'aide de filtres de 0,45 µm d'acétate de cellulose. Le filtrat pour les analyses des éléments traces et des cations a été stocké dans des flacons de 250 cm³ en polyéthylène et immédiatement acidifié à pH<2 par ajout d'acide nitrique MerckTM ultrapur. Les échantillons dont l'eau est destinée à l'analyse des anions n'ont pas été acidifiés. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à

4°C et transférés au laboratoire et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4°C jusqu'à ce qu'ils soient analysés avec un délai d'une semaine au maximum. La température (T) de l'eau, le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un multi-paramètre WTW (P3 MultiLine pH / LFSET) et un Oxymètre (WTW) avec une sonde (CelloX 325) pour la mesure de l'oxygène dissous.

Les résultats des analyses ont été reportés dans le tableau 40.

TABLEAU 40. CONCENTRATIONS DES ELEMENTS MAJEURS ET SILICE (MG/L)

Echant.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	T°C	pH	CE (µS/S)	SiO ₂
F8	288	73	155	12	239	280	439.2	36	8.7	1300	27
F18	255	72	144	9.8	144	284.16	790	30.6	7.65	1220	25
F17	256	72	144	10	222.3	284	390	31.5	7.5	1231	26
HB	326.7	109	109	14	198	873	420.9	56	8.5	2280	40
HG	500	100	120	30	185	1150	501.4	58.1	7.8	2320	44
GH	463.2	102	105.7	32	160.9	1032.5	511.79	46	7.8	2380	37
AD	310.5	96	110	29	169.7	750	481.3	30	7.5	2286	32

7.3. Géochimie

Ces eaux thermales émergent avec de températures qui varient entre 30°C à Ain Arko, au Sud-ouest et 72°C à Hammam Belhachani au Nord Est. Elles appartiennent, selon la classification de Schoeller aux classes méso et hyperthermales (Djorfi, 1988). Leur pH varie entre 7 et 8.7 avec une conductivité électrique de 1200 à 2400µS/cm. Cette dernière est proportionnelle à la salinité des eaux. L'acquisition de cette salinité relativement faible montre que la circulation de l'eau s'est faite en grande partie dans des terrains non salifères, probablement à travers un système de failles affectant les formations carbonatées. Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Fig. 53) montre que les eaux de la région présentent deux faciès chimiques différents. Le premier est de type SO₄-Ca (HB, HG, GH, AD), au Nord-est, le second de type HCO₃-Ca (F8, F17, F18), au Sud-ouest. Ces faciès témoignent d'une circulation dans les terrains carbonatés en contact avec les terrains salifères.

La méthode d'IIRG (Institut International de recherches Géothermiques) développée par D'AMORE *et al.* (1983), constitue l'outil le plus approprié pour la détermination de la nature lithologique du réservoir des eaux thermales.

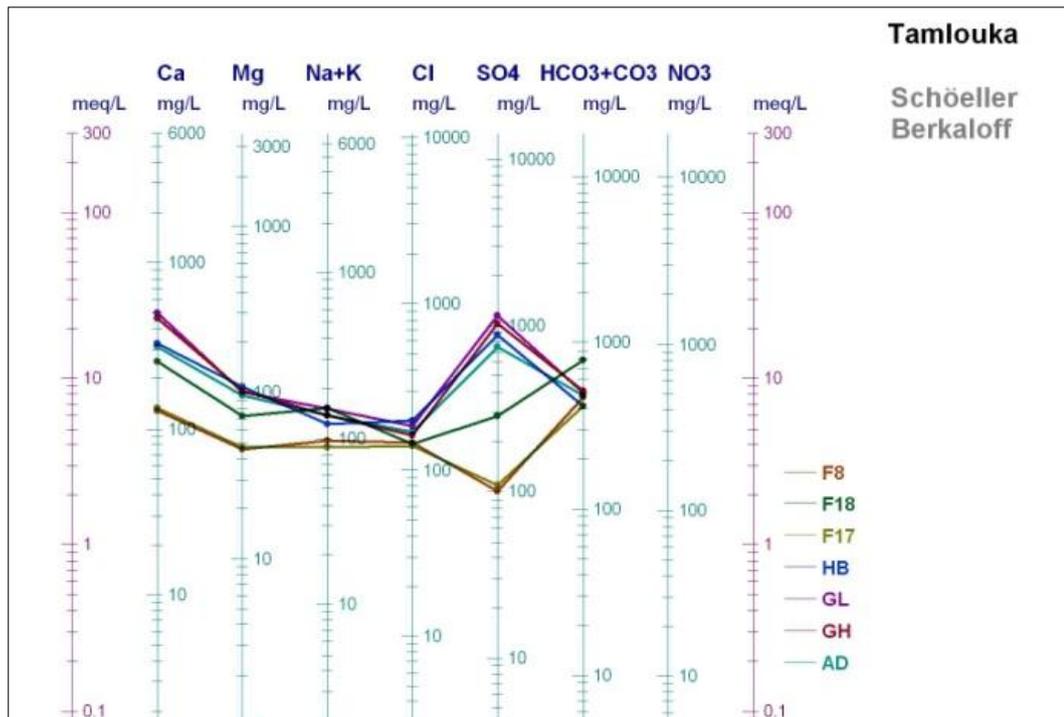


FIG. 53. DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF APPLIQUE AUX EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA.

Le principe de cette méthode repose sur l'utilisation des rapports des concentrations des éléments majeurs et la somme des cations $\Sigma(+)$ et des anions $\Sigma(-)$ exprimées en méq/l. Six paramètres (A, B, C, D, E et F), sans unité, sont ainsi définis et normalisés entre -100 et +100 de la manière suivante :

$$A = 100 \times ((\text{HCO}_3 - \text{SO}_4) / \Sigma(-))$$

Ce paramètre aide à différencier entre les eaux circulant à travers les terrains calcaires de celles qui traversent des couches évaporitiques.

$$B = 100 \times ((\text{SO}_4 / \Sigma(-)) - (\text{Na} / \Sigma(+)))$$

Le paramètre B permet la discrimination entre les eaux enrichies en sulfate circulant dans les terrains évaporitiques et les eaux enrichies en sodium rencontrées dans les terrains sédimentaires argilo-marneux.

$$C = 100 \times (\text{Na} / \Sigma(+) + \text{Mg} / \Sigma(-))$$

Ce paramètre tend à distinguer entre les eaux dérivées des flyschs ou « volcanites » et celles venant des séries carbonatées évaporitiques ou à partir d'un socle schisto-quartzitique. Les deux types d'eaux ont des teneurs élevées en Na^+ , mais les premières ont une teneur très faible en Cl^- et les secondes ont un rapport Na/Cl proche de 1.

$$D = 100 \times ((\text{Na} - \text{Mg}) / \Sigma(+))$$

Ce paramètre individualise les eaux ayant circulé dans les calcaires dolomitiques.

$$E = 100 \times ((Ca + Mg)/\Sigma(+) - HCO_3/\Sigma(-))$$

Le paramètre E distingue principalement les circulations dans les réservoirs carbonatés de celles dans les réservoirs sulfatés.

$$F = 100 \times (Ca - Na - K)/\Sigma(+)$$

Le paramètre F révèle la croissance de la teneur en K dans les échantillons d'eaux.

Les valeurs permettent d'établir des diagrammes rectangulaires et de les comparer aux diagrammes de référence (α , β , γ et δ) établis par les auteurs (Fig.54). Appliquée aux eaux chaudes de la région de Tamlouka (Fig.55), cette méthode montre deux configurations rectangulaires différentes intermédiaires entre les standards théoriques de référence.

- La région de Ain Arko, au Sud-ouest, s'adapte beaucoup plus au standard de référence « β » des formations calcaires, mais plutôt marquée par les paramètres « C », « E » et « F ». Ces paramètres témoignent d'une circulation dans un réservoir carbonaté enrichi en sodium à partir des formations terrigènes salifères lors de la remontée vers la surface.

- La région de l'Oued Cheniour au Nord-Ouest s'adapte beaucoup plus au standard de référence « α » que les autres standards. Ce standard est caractéristique des séries évaporitiques. Le paramètre C étant très significatif, il témoigne d'une circulation dans un réservoir carbonaté enrichi en évaporites.

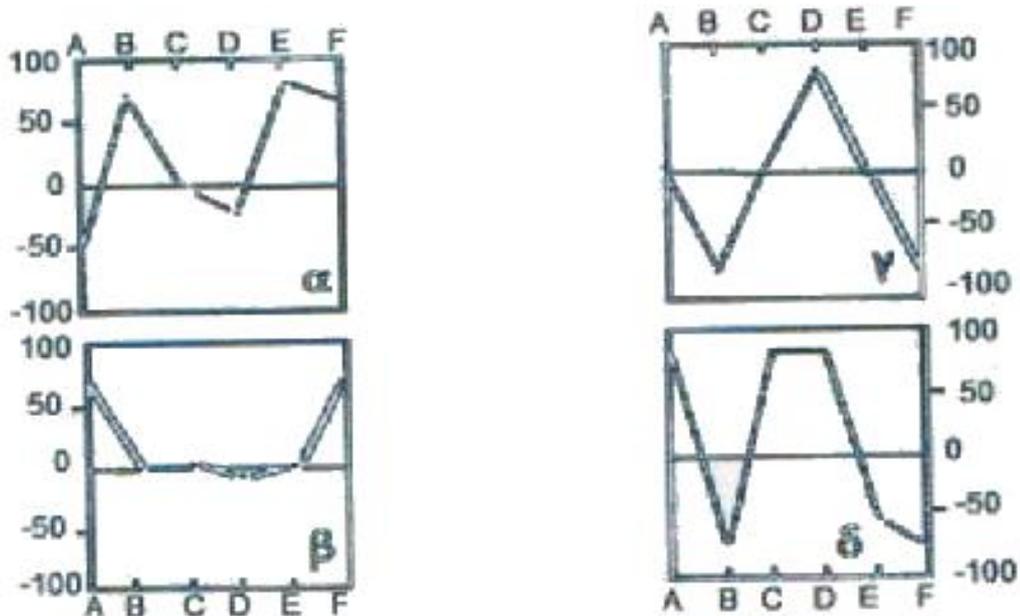


FIG. 54. DIAGRAMME DE L'INSTITUT INTERNATIONAL DES RECHERCHES GEOTHERMIQUES DE REFERENCE

(IRG: α : série évaporitiques; β : circulation dans les calcaires; γ : circulation profonde à travers un socle cristallin; δ : formation argileuse.

L'application des diagrammes de l'IIRG permet de dire que les solutions chaudes sont d'origine profonde, ayant circulé dans un socle cristallophyllien et dans des formations carbonatées en liaison, par endroit, avec les terrains terrigènes salifères. C'est le cas des points HB, GL, GH et AD.

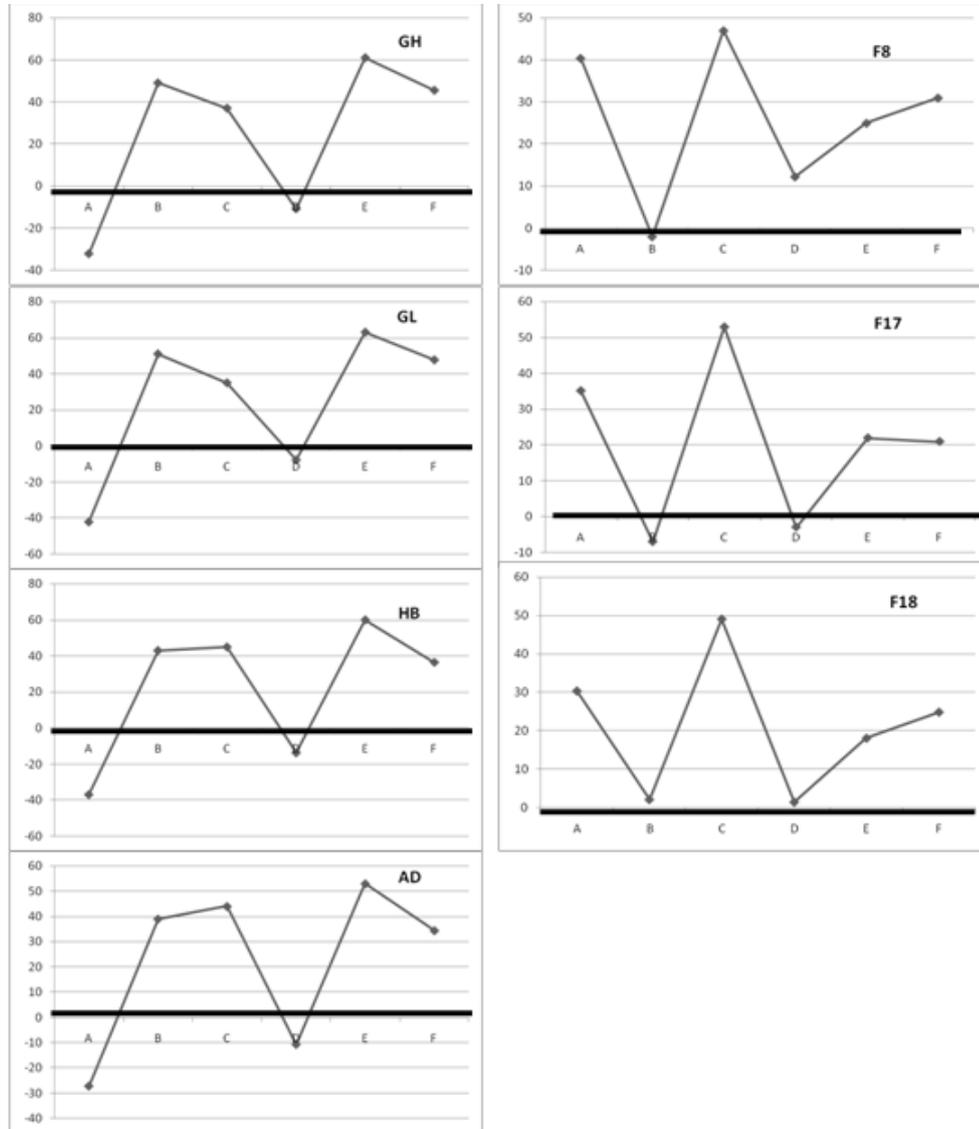


FIG. 55. DIAGRAMME IRG APPLIQUE AUX EAUX DE LA REGION DE TAMLOUKA

Le diagramme de Langelier-Ludwing (Langelier, 1942) montre également cette influence des terrains salifères sur le chimisme des eaux thermales de la région (Fig. 56). Ainsi, l'augmentation de la concentration du sodium et du potassium se fait en parallèle avec celle des chlorures et des sulfates (Fig. 56A), mais d'une manière inverse avec celle des éléments carbonatés (Fig. 56B). Cette tendance pourrait être due, localement, à un échange de base Na-Ca avec les argiles, entraînées des profondeurs par la dysharmonie thermique affectant la région, comme il a été démontré par Boudoukha et *et al.* (2012) dans un cas similaire dans le domaine sud sétifien.

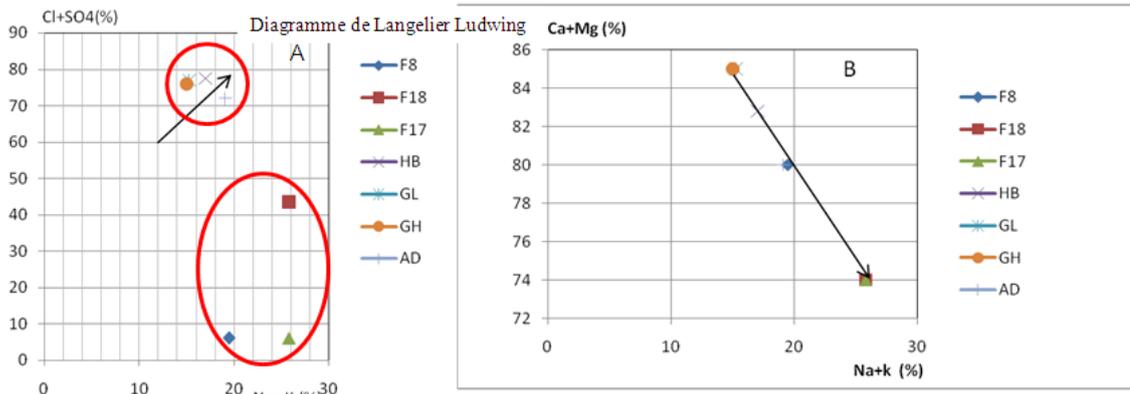


FIG. 56. DIAGRAMMES DE LANGELIER-LUDWIG APPLIQUES AUX EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA

A: Relation $Cl+SO_4-Na+K$; B : $Ca+Mg-Na+K$

L'acquisition des teneurs en Cl^- et Na^+ peut également résulter de la dissolution de l'halite ou à partir d'un mélange avec de l'eau de mer. Cette deuxième hypothèse se trouve écartée du fait de l'éloignement de la mer Méditerranée (plus de 100 km). Par contre, la présence de la sebkha de Tamlouka (lacs salés) peut justifier la présence de ces fortes teneurs.

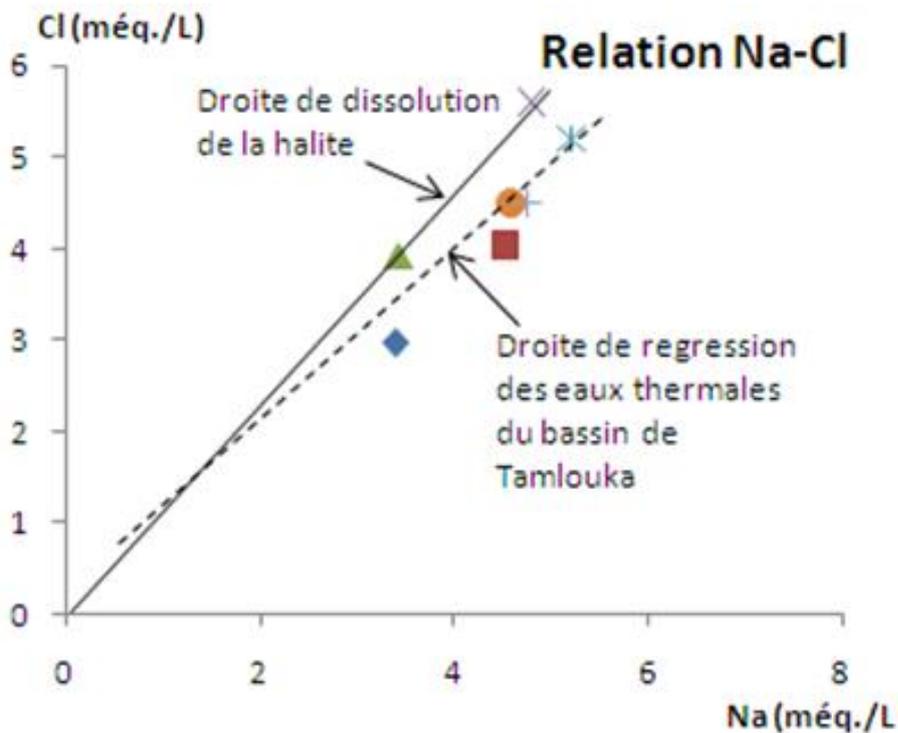


FIG. 57. RELATION NA-CL DES EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA.

Il est connu que le chlore est une espèce chimique très mobile, interagissant faiblement avec l'encaissant, et qui fait partie des éléments dits conservatifs, fréquemment employés comme traceurs pour les études de cycle hydrologique (Boudoukha et al, 2012). Les points analytiques des sources thermales de la région de Tamlouka, reportés dans un diagramme Na^+/Cl^- , montrent

une bonne distribution ($R = 0,99$) autour d'une droite de pente légèrement inférieure à celle de la halite (Fig.57). En d'autres termes, le ratio molaire Na/Cl moyen de ces échantillons est similaire à celui de la halite ($\text{Na/Cl halite} = 1,00$). Cette approche tend donc à indiquer que la salinité de l'eau thermique résulterait d'une dissolution des formations salifères.

D'autre part, la bonne concordance sulfates-calcium ($r = 0,98$) et C.E. - $\text{HCO}_3/(\text{Cl} + \text{SO}_4)$ appuie cette hypothèse (Fig. 58 et 59). La présence de sulfates en grandes quantités dans les eaux des sources thermales (3 à 24 még.L^{-1}) pourrait également être attribuée à la dissolution de l'anhydrite ou de la pyrite selon la formule proposée par Appelo et Postma (1993) :

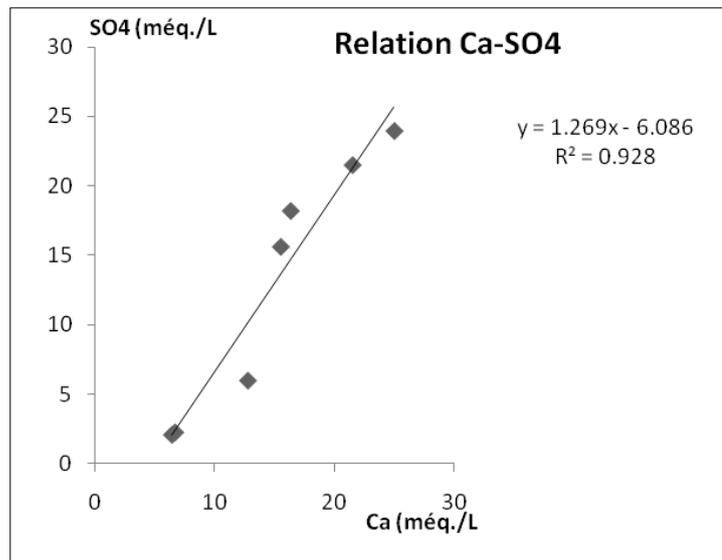
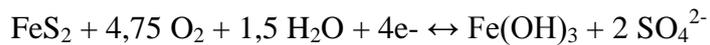


FIG. 58. RELATION CA-SO₄ DES EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA

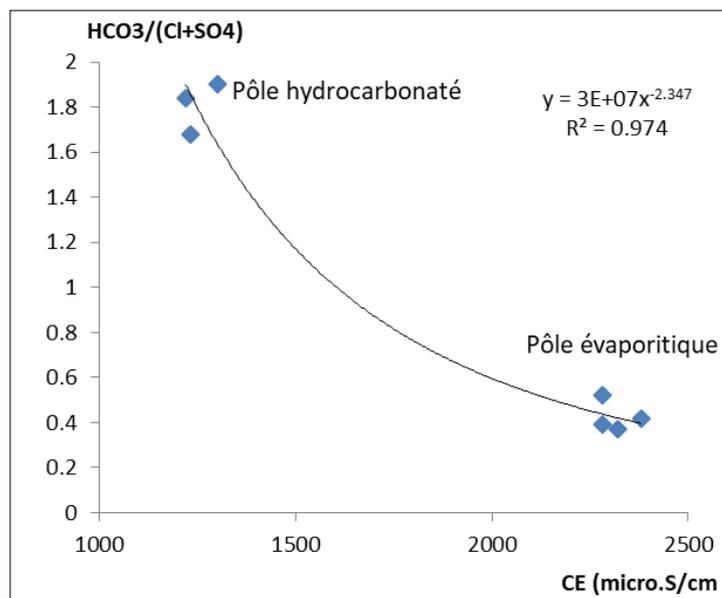


FIG. 59. RELATION CONDUCTIVITE- $\text{HCO}_3/(\text{Cl} + \text{SO}_4)$ DES EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA.

Comme il ressort clairement, les eaux thermales acquièrent leur composition chimique en profondeur par interaction avec les roches carbonatées en contact avec les sédiments terrigènes salifères. Ce mécanisme a été également étudié à l'aide de l'indice de saturation (IS) de quelques minéraux évaporitiques (halite, anhydrite, gypse), carbonatés (aragonite, calcite, dolomite), la silice et le CO₂ dissous. Cette simulation a été établie à l'aide du programme Phreeqc (Parkhurst *et al.* 1980). Les indices de saturation (Tableau 41) montrent que les minéraux évaporitiques sont sous-saturés (IS<0) traduisant un temps de contact avec les minéraux assez long pour permettre leur dissolution, accélérée par la température du fluide hydrothermal. Les indices de saturation positifs des minéraux carbonatés indiquent que l'eau a subi des changements importants suite à un dégazage de CO₂ (IS<0). D'après Djidi *et al.* (2008), ce dégazage se produit généralement lors de la recharge des aquifères karstiques ou suite à l'élévation de la température de l'eau, générant la précipitation de la calcite. La deuxième hypothèse indiquerait que le temps de contact avec les minéraux est assez court.

TABLEAU 41. INDICES DE STABILITE DES EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA

Point d'eau	Halite	Anhydrie	Gypsum	SiO ₂	Calcite	Aragonite	Dolomite	CO ₂ (gaz)
F8	-6.53	-1.74	-1.58	-0.77	1.85	1.72	3.74	-3.13
F18	-6.34	-1.16	-0.96	-0.71	1.33	1.19	2.52	-1.79
F17	-6.58	-1.68	-1.49	-0.70	0.72	0.58	1.40	-1.91
HB	-6.39	-0.52	-0.51	-0.75	2.04	1.91	4.07	-2.91
GL	-6.40	-0.26	-0.26	-0.67	1.72	1.60	3.19	-2.00
GH	-6.48	-0.42	-0.32	-0.66	1.60	1.47	2.99	-2.06
AD	-6.39	-0.73	-0.53	-0.60	0.98	0.84	1.84	-1.86

7.3.1 Géothermométrie

La géothermométrie est un outil qui permet l'estimation de la profondeur des réservoirs géothermiques et la température des derniers équilibres chimiques ou isotopiques avant l'émergence. Les eaux profondes et les gaz arrivent à la surface et apportent généralement avec eux leur histoire géochimique. Toutefois, pendant son ascension, l'eau chaude peut subir un mélange avec les eaux froides superficielles pouvant compliquer l'utilisation des géothermomètres chimiques, cela conduirait soit à une surestimation, soit à une sous-estimation des températures. À noter que la remontée des eaux thermales depuis leurs réservoirs d'origine s'accompagne généralement d'une diminution de la température et d'un changement de la minéralisation totale. D'après Bouri *et al.* (2007), l'utilisation des géothermomètres suppose qu'il n'y a pas de changement chimique significatif de l'eau au cours de sa remontée, malgré les différents refroidissements possibles et souvent remarquables. Pour estimer la température du dernier équilibre thermodynamique, on a appliqué le géothermomètre de la silice (quartz) qui est le mieux adapté aux eaux thermales de la région de Tamlouka ; La température obtenue est une valeur minimale de la température atteinte en profondeur.

La température minimale (T₂) est calculée selon la formule suivante :

$$T_2 = (1522/5,75 - \log [\text{SiO}_2]) - 273$$

Avec :

$$[\text{SiO}_2] \text{ en (mg /l)}$$

Les températures des eaux, estimées à l'origine, varient entre 79°C au Sud-ouest et 100.9°C au Nord-est (tableau 42). Cette dernière valeur, très supérieure aux températures mesurées, montre ainsi une dissipation moyenne de 45°C au cours de la remontée d'eau du réservoir jusqu'à la surface du sol. Cette dissipation pourrait être due, soit à un mélange avec les eaux de surface, soit à la diffusion thermique liée au long trajet parcouru par ces eaux pour arriver en surface

TABLEAU 42. RELATION PROFONDEUR DES AQUIFERES/TEMPERATURE DES EAUX THERMALES BASSIN DE TAMLOUKA

Echantillon	Géothermomètre	T°C eau en profondeur	T°C eau à l'émergence	T°C Air	Profondeur aquifère (m)
F8	SiO ₂	79.16	36	17.3	2173.1
F18	SiO ₂	76.73	30.6	17.3	2098
F17	SiO ₂	78.35	31.5	17.3	2154.75
HB	SiO ₂	100.9	56	17.3	2944
AD	SiO ₂	63.6	30	17.3	1638
GH	SiO ₂	89.29	46	17.3	2537

7.3.2 Modèle de fonctionnement

Les formations du bassin de Tamlouka–Ain Makhoulouf présentent une lithologie variée (calcaires, dolomies, marno-calcaire et grès) en relation avec les unités tectonique formant les massifs de bordure (Fig. 60). Ces derniers constituent des zones potentielles d'alimentation des eaux profondes.

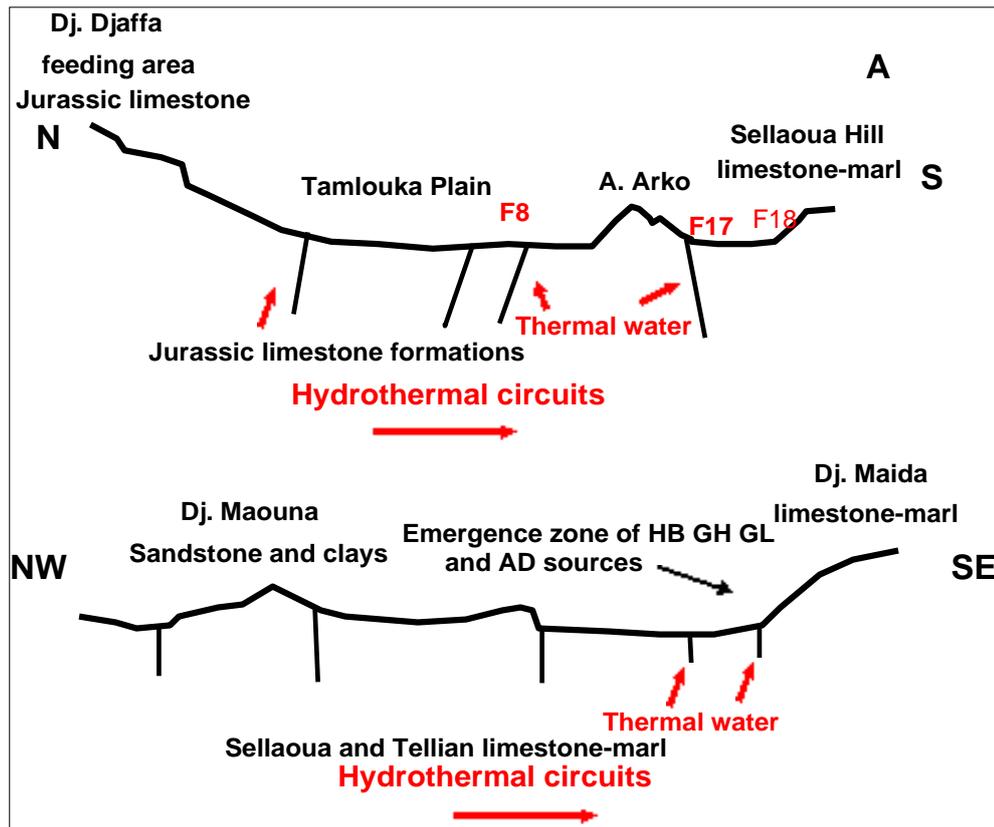


FIG. 60. MODELE CONCEPTUEL DES EAUX THERMALES DU BASSIN DE TAMLOUKA-AIN MAKHLOUF

Au sud-ouest, ce sont les calcaires dolomitiques de Dj. Djaffa qui constituent, par excellence, la zone d'alimentation des aquifères. Les débits des forages (dont la température de l'eau dépasse 30°C) peuvent atteindre 40 l/S.

Au Nord-est, l'apport des massifs des Dj. Maida et Mahouna est réduit du fait de leur lithologie compliquée par des passages argileux et marneux. A ce niveau, l'émergence des sources thermales se fait à la faveur de failles profondes en relation avec les circuits hydrothermaux.

7.4. Conclusion

La méthodologie adoptée a montré que les massifs carbonatés du bassin de Tamlouka-Ain Makhlouf présentent une structure en horsts et grabens, limités par de grandes failles qui faciliteraient la communication entre les différents réservoirs et l'acheminement des eaux thermales profondes jusqu'à la surface. Ce réservoir géothermal se trouve dans les formations carbonatées du Jurassique entre 1600 et 3000m où les eaux acquièrent leur minéralisation originelle (carbonatée) et se minéralisent davantage en chlorures, sodium et sulfates au contact des formations terrigènes salifères et par échange de base avec les argiles. Au cours de la remontée, l'eau thermique traverse des terrains perméables et donne, au Nord Est, la zone thermique de l'Oued Cheniour et, au Sud-ouest, celles de Ain Arko. Ces eaux ont un faciès qui

varie selon les régions avec, au Nord- est, un faciès de type $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$, et, au Sud-ouest, un faciès de type $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$. Ces eaux montrent également des teneurs importantes en éléments traces et métallifères témoins d'une circulation profonde à travers les circuits hydrothermaux.

Conclusion générale

Conclusion générale

La région de Tamlouka est caractérisée par un climat continental à variation saisonnière bien marquée, avec un été chaud et sec et un hiver froid et humide. Pour une pluviométrie de l'ordre de 523.3 mm et une évapotranspiration réelle de l'ordre 432.7 mm présentant 82.7 % des précipitations, la plaine de Tamlouka révèle un déficit très important, confirmant ainsi le caractère semi-aride de la région avec des périodes de sécheresse qui sont d'une sévérité modérée à extrême, elles concernent l'agriculture et l'hydrologie en même temps.

La plaine de Tamlouka occupe une situation structurale permettant de conclure qu'elle appartient au domaine tellien, à la plate-forme néritique constantinoise et au sillon de Sellaoua. C'est pendant le miocène inférieur que s'est produit l'effondrement de la plaine de Tamlouka, donnant naissance à un fossé axiale. Ce dernier se trouvait comblé ensuite par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire donnant naissance à un système aquifère superficielle, dont l'épaisseur est variable, reposant sur un complexe calcaire fissuré et karstifié d'âge Jurassique et Miocène affecté par de nombreuses failles, mises en évidence par l'étude géophysique. Ce complexe présente à son tour une nappe profonde plus importante, caractérisée par une variation latérale des formations aquifères, au Nord, marno-calcaire vers le Sud, calcaires.

L'étude piézométrique de la nappe superficielle a permis de préciser la direction de l'écoulement d'eau souterraine qu'est en général de l'Ouest vers l'Est. La nappe est alimentée par le massif calcaire de Djebel Djaffa à l'ouest et le massif gréseux du Djebel El Ansel au Nord, ainsi que par l'infiltration directe des eaux de pluies. Alors que la nappe profonde est alimentée essentiellement par le massif calcaire du Djebel Djaffa, et les collines d'Ain Arko, ainsi que par le phénomène de drainance à partir de la nappe superficielle à travers les couches semi-perméables et/ou les failles.

L'utilisation du système d'information géographique (SIG) montre que la cuvette de Tamlouka est couverte à 44% de sa surface totale par un dépôt alluvionnaire Quaternaire, composée essentiellement d'argile et des sables et graviers formant une plaine à pente inférieure à 2°. Son climat semi-aride accentue le prélèvement des ressources en eau souterraines pour accomplir les besoins de cette zone à vocation agricole. Des méthodes de cartographie et de combinaisons ont quantifié les surfaces d'occupation du sol vis-à-vis la géomorphologie de la cuvette, en indiquant ainsi les besoins en eau ainsi que les zones inondables.

Selon l'étude hydrochimique, basée sur les illustrations graphiques (diagramme de Piper, Schoeller-Berkalouf et Wilcox) et cartographiques (cartes hydrochimiques) les eaux souterraines de la plaine de Tamlouka révèlent une diversité des faciès chimiques (Bicarbonaté-Sodique,

Sulfaté-Calcique, Bicarbonaté-Calcique, Bicarbonaté-Magnésien et Sulfaté-Magnésien) due aux causes climatiques (évaporation), géologiques (lithologie) et hydrogéologiques (la perméabilité et la surface d'interaction eau-roche).

L'étude des caractéristiques hydrothermales des eaux souterraines de la région de Tamlouka montre que le réservoir géothermal se trouve dans les formations carbonatées du Jurassique entre 1600 et 3000m où les eaux acquièrent leur minéralisation originelle (carbonatée) et se minéralisent davantage en chlorures, sodium et sulfates au contact des formations terrigènes salifères solubles et par échange de base avec les argiles. Au cours de la remontée, l'eau thermique traverse des terrains perméables et donne, au Nord-est, la zone thermique de l'Oued Cheniour avec un faciès de type $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ et, au Sud-ouest, celles de Ain Arko avec un faciès de type $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$.

Malgré cette diversité chimique, les eaux restent généralement aptes à la consommation humaine, excepté les puits se trouvant à proximité d'exploitations agricoles. La salinité plus ou moins élevée des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka nécessite le choix des plantes à cultiver.

Recommandations :

Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence :

-Restaurer le système de Drainage des marécages afin d'éviter les problèmes d'inondation et de contamination des puits.

-Installer un réseau de piézomètres à travers la nappe, pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique, pour prendre les mesures de gestion conservatoires et appropriées de la nappe.

-Encourager les agriculteurs à améliorer leurs pratiques agricoles, puisqu'un lien significatif a été établi entre la présence de nitrates dans l'eau des puits et la zone d'agriculture intensive. Ce résultat est en soi un avertissement, puisque le seuil qui a été révélé atteste de l'influence indéniable des activités anthropiques.

-Maîtriser le stockage et l'utilisation des matières organiques résultant de l'élevage animal.

-Arrêter le déversement direct des rejets urbains et industriels au niveau de l'Oued El Maleh en réalisant un traitement préalable de ces effluents avant qu'ils atteignent les oueds et surveiller en permanence la qualité des eaux au niveau de l'oued.

-Réétudier l'emplacement des décharges ménagères des agglomérations en les installant loin des zones vulnérables à la pollution, et ce pour éviter leurs effets sur les ressources hydriques.

-Réaliser une étude de modélisation des écoulements souterrains pour connaître les mécanismes de transfert des polluants, ce qui peut beaucoup aider à la protection de la nappe contre la pollution.

-Mener des études pluridisciplinaires pour une meilleure exploitation des eaux hydrothermales de la région.

La nécessité d'une étude agronomique pour le choix des plantes à cultiver.

La possibilité de L'implantation de nouveaux forages aux niveaux des zones à grande productivité (AIN ARKO).



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- AMS (American Meteorological Society), (2004)** “Statement on meteorological drought”. In: Bulletin of American Meteorological Society, 85, p. 771-773.
- Appelo C.A.J. and Postma D. (1993)** “*Geochemistry, groundwater and pollution*”. J. Hydrol. 155, 295-296.
- Asadi Zarch, M.A., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Dastorani M.T., Kousari M.R. (2011)** Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. Water Resour Manage 25: 3485. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9867-1>
- Bagnouls F. et Gaussen H. (1953)** « *Saison sèche et indice thermique xéothermique* ». Doc. Carte product. Végét, sér. Généralités, 3(1), 47 p.
- Bamba F., Mahé G., Bricquet J.-P., Olivry J.-C, (1996)** « *Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la cuvette lacustre* ». In :Xlf Journées hydro.'Orstom, Paris, IRD.
- Banoeng-Yakubo B, Yidana SM, Nti E. (2009)** “*Hydrochemical modeling of groundwater using multivariate statistical methods – the Volta Region, Ghana*”. KSCE Journal of Civil Engineering. 13(1):55-63. DOI: 10.1007/s12205-009-0055-2
- Boudoukha A, Athamena. M. (2012)** « *Caractérisation des eaux thermales de l'ensemble Sud sétifien. Est algérien* ». Journal of Water Science 25(2), 103-118.
- Bouri S, Gasmi M, Jaouadi M, Souissi M, Mimi A, Lahlou A, Dhia H. (2007)** « *Étude intégrée des données de surface et de subsurface pour la prospection des bassins hydrogéothermiques : cas du bassin de Maknassy (Tunisie centrale)* ». Hydrol. Sci. J. 52, 1298-1315.
- Bunke H. and Messmer B.T. (1997)** “*Recent advances in graph matching*”, Journal of pattern recognition and artificial intelligence, Volume 11, Issue 01, pp. 169-203, 1997. DOI: 10.1142/S0218001497000081
- Burrough Peter A. & McDonnell Rachael A. (1998)** “*Principles of Geographical Information Systems (Spatial Information Systems)*”, Oxford University Press, USA, 333 p.
- Burton J., Easingwood C. and Murphy J. (2001)** “*Using qualitative research to refine service quality models*”. Qualitative Market Research, 4(4), 217-223.
- Castany G. & Margat J. (1977)** « *Dictionnaire français d'hydrogéologie* », BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.

- Chakraborty D, Dutta D, Chandrasekharan H. (2001)** “*Land Use Indicators of a Watershed in Arid Region, Western Rajasthan Using Remote Sensing and GIS*”. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 29, No. 3, pp. 115-128.
- D’Amore F, Scandifio G, Panichi C. (1983)** “*Some observations on the chemical classification of ground waters*”. Geothermics 12, 141-148.
- Débieche T.H., (2002)** « *Evolution 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 - Nord-est Algérien* ».Thèse, université Franche Compté P 235.
- Deleau P. et Laffitte R. (1951)**« *Carte géologique du Nord-est Algérien, échelle 1/500000* ». Publier par le Service de la Carte Géologique de l’Algérie.
- Delorme-Laurent Virginie, Ballais Jean-Louis (2006)** « *Les problèmes de la détermination de la limite externe de la zone inondable dans le midi méditerranéen français* ». Bulletin de l'Association de géographes français, 83e année, 2006-4 (décembre). Le nettoyage ethnique / Cartographie géomorphologique. pp. 469-476. doi : 10.3406/bagf.2006.2532
- Detay M. (1993)** “*The use of artificial recharge to improve groundwater quality and quantity: the Lyonnaise des Eaux-Dumez experience*”, in International Workshop: Groundwater quality and quantity and water supply in Lithuania - Vilnius - Druskininkai pp. 18-19
- Djellouli F., Bouanani A., Baba-Hamed K., (2016)** “*Efficiency of some meteorological drought indices in different time scales, case study: wadi Louza basin (NW-Algeria)*”. Journal of Water and Land Development. No. 31. p 33–41. DOI: 10.1515/jwld-2016-0034
- Djidi K., Bakalowicz M. and Benali A. (2008)** “*Mixed, classical and hydrothermalkarstification in a carbonate aquifer hydrogeological consequence. The case of the Saida aquifer system, Algeria*”. C.R. Geosci., 340: 462–473.
- Djorfi Saadane (1988)** « *Étude des eaux minérales et thermales du Nord-Est algérien et leur importance socio-économique* ». Th. Doct. PhD, Univ. d’état d’Azerbaïdjan (URSS). 196p.
- Djorfi Samir, Djidel Mohamed et Bougdah Hocine (1993)** « *Etude hydrogéologique de la plaine de Tamlouka* », mémoire d’ingénieur d’état en hydrogéologie –Univ-Annaba.

- Dong Rencai, Dong Jiajia, Wu Gang, Deng Hongbing. (2006)** “*Optimization of post-classification processing of high-resolution satellite image: A case study, Science in China*” Series E: Technological Sciences, Volume 49, Supplement 1, pp. 98-107. doi: 10.1007/s11431-006-8111-3
- Dracup, J.A., Lee, K.S. and Paulson, E.G. (1980)**“*On the Definition of Droughts*”. Water Resources Research, 16, 297-302. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>
- Gramont M. et Lombard J.P. (1966)** « *Observations stratigraphiques et tectoniques dans la région du Djebel Djaffa* ». Publication du service de cartes géologiques, N.S., Alger, Algérie. Bull. No 35:27–49.
- Gueroui Yacine (2015)** « *Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de L'aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (Nord-est Algérien)* ». Thèse, Université 8 mai 1945-Guelma, Algérie, 162 p.
- Haied Nadjib, (2015)**« *Evaluation quantitative d'une réalimentation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey et son impact sur la qualité des eaux souterraines* ». Thèse de doctorat.Univ Annaba. P 166.
- Hemila M. et Kowalski W. (2002)** « *Synthèse géoélectrique appliquée à la caractérisation des contacts entre nappes de charriage et son apport hydrogéologique dans la Plaine de Tamlouka « Région de Guelma, Est Algérien* ». Can Geotech J 39:725–737.
- Irniger C. & Bunke H. (2008)** “*Graph matching: filtering large databases of graphs using decision trees*”, International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, Volume 3, Issue 3/4, pp. 166-187. DOI: 10.1504/IJISTA.2007.014258
- Jung Y, Kim D, Kim D, Kim M, Lee SO. (2014)** “*Simplified Flood Inundation Mapping Based on Flood Elevation-Discharge Rating Curves Using Satellite Images in Gauged Watersheds*”, Water 2014, 6, 1280-1299; doi: 10.3390/w6051280
- Kinzelbach, W., P. Bauer, T. Siegfried, and P. Brunner. (2003)** “*Sustainable groundwater management*” – Problems and scientific tool, Episodes, 26(4), 279–284.
- Lahondere J.C. & Magne J., (1983)**« *L'évolution du 'domaine néritique constantinois' dans la région de Guelma (Algérie), à la fin du Secondaire et au début du Tertiaire : conséquences Paléogéographiques* ». C.R. Acad. Sci. Paris., v. 229, pp. 775-778.

- Langelier W, Ludwig H. (1942)** “Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters” J. Am. Water Ass. 34, p. 335-352.
- Mahé Gil. (2009)** “Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta river basins, West Africa”. Hydrological Sciences Journal, vol. 54, no 4, pp. 704–712. ISSN 0262-6667
- Marc Mangolini. (1994)** « Apport de la fusion d'images satellitaires multi-capteurs au niveau pixel en télédétection et photo-interprétation. Signal and Image processing ». Université de Nice Sophia Antipolis, French. <pastel-00957754>
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993).** The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society pp. 179-184.
- Metz, M., Mitasova, H., Harmon, R. S. (2011)** “Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search”, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 667-678. doi: 10.5194/hess-15-667-2011.
- Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2010)** A Review of Drought Concepts. Journal of Hydrology, 391, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- NCDC (National Climatic Data Center). 2010.** Texas climate summary - May 2010. U.S. Department of Commerce National Climatic Data Center. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/cag3/tx.html>. Accessed June 14, 2010.
- Nonogaki, S., Masumoto, S. and Shiono, K. (2012)** “Gridding of geological surfaces based on equality-inequality constraints from elevation data and trend data”. International Journal of Geoinformatics, vol.8, no.4, pp.49-60.
- Olago Daniel, Opere Alfred, Barongo Justus. (2009)** “Holocene palaeohydrology, groundwater and climate change in the lake basins of the Central Kenya Rift”. Hydrological sciences journal, vol. 54, no 4, pp. 765–780.
- Parkhurst DL, Thorstenson DC, Plummer LN. (1980)** “Phreeqc. A computer program for geochemical calculations”. US Geol. Survey Water Resource Invest. Rept. 80-96.
- Perret, S. (2006)** “Climate Change and African Agriculture”; Policy Note 36; Centre for Environmental Economics and Policy in Africa: Pretoria, South Africa, <http://www.ceepa.co.za/docs/POLICY%20NOTE%202024.pdf>

- Pinkeye, S. (1966)** “*Conditional Probabilities of Occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area*”. Hydrol. Paper 12, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., Giakoumakis S., (1992)** “*On regional drought estimation and analysis*”. Water Resources Management: 6, 249-277.
- Rouault M. and Richard Y. (2003)** “*Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales*”. WaterSA Vol.29(4) 2003: 489-500.
- Sanyal J, Lu XX. (2004)** “*Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia*”: A Review, Natural Hazards, Volume 33, Issue 2, pp. 283-301. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000037035.65105.95
- Sebagh Imed et Safi Sofiane, (2014)** « *Qualité des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka- influence de la lithologie et de la géomorphologie* », Mémoire d’ingéniorat Université Badji Mokhtar Annaba. 90 p.
- Souza CM, Pereira K, Lins V, Haiashy S, Souza D. (2009)** “*Web-oriented GIS system for monitoring, conservation and law enforcement of the Brazilian Amazon*”. Earth Science Informatics, Volume 2, Issue 4, pp. 205-215. doi: 10.1007/s12145-009-0035-6.
- Stampini M, Davis B. (2009)** “*Does non-agricultural labor relax farmers’ credit constraints? Evidence from longitudinal data for Vietnam*”. Agric. Econ., 40(2): 177-188.
- Sun Z, Ma R, Wang Y. (2008)** “*Using Landsat data to determine land use changes in Datong basin, China*”. Environmental Geology, Volume 57, Issue 8, pp. 1825-1837. DOI: 10.1007/s00254-008-1470-2
- Taylor R, Koussis A, Tindimugaya C. (2009)** “*Groundwater and Climate in Africa*” – A review. Hydrological Sciences Journal, 54, 4, pp. 655-664.
- Telali Yaqota, (2016)** « *Contribution à l’étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine de Tamlouka par application de la télédétection et SIG* » mémoire master, Univ. Ouargla, 60p.
- Templ M., Filzmoser P., Reimann C., (2008)** “*Cluster analysis applied to regional geochemical data : Problems and possibilities*”. Applied geochemistry, 23: 2198-2213.

- Thiéry D, Diluca C, Diagana B. (1993)** “*Modelling the aquifer recovery after a long duration drought in Burkina Faso*”. Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts (Proceedings of the Yokohama Symposium, Yokohama, Japan. IAHS Publication No. 213:43-50.
- Thorntwaite, C.W., 1948.** An approach towards a rational classification of climate. Geographical Review 38, pp 55-94.
- Tran TA, Raghavan V, Masumoto S, Yonezawa G, Nonogaki S. (2014)** “*Characterizing Topographic Features and Flood Inundation Mapping in Alluvial Lowland Area*”, International Symposium on Geo-informatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, 6 p.
- Tsakiris, G. and Vangelis, H. (2005).** Establishing a Drought Index incorporating evapotranspiration. European Water, 9-10: 3-11.
- Vila J.M. (1980)** « *La chaîne alpine d’Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens* ». PhD of Science, University Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Voûte C. (1967)** « *Essai de synthèse de l’histoire géologique des environs d’Ain Fakroun, Ain Babouche et les régions limitrophes* ». Publication du service de cartes géologiques, N.S., Bull. no 36(3), Alger, Algérie.
- Walraevens K, Vandecasteele I, Martens K, Nyssen J, Moeyersons J, Gebreyohannes T, De Smedt F, Poesen J, Deckers J, Van Camp M (2009)** “*Groundwater Recharge and Flow in a Small Mountain Catchment in Northern Ethiopia*”. Hydrological Sciences Journal, 54(4):739-753.
- Wilhite, Donald A. and Glantz, Michael H., (1985)** "Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions". DroughtMitigation Center Faculty Publications. 20. <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20>
- Wu H. and Wilhite D.A. 2004** An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA Natural Hazards 33 1-21.
- Zargar A. Sadiq R. Naser B. Khan F.I. (2011)** “*A review of drought indices*”. Environmental Reviews 19(1):333-349. DOI: 10.1139/a11-013

Les livres et les rapports des bureaux

- ✓ Direction hydraulique de la wilaya de Guelma(DHW).fiches techniques des forages et la coupe hydrogéologique.
- ✓ Prélèvement des données climatiques, station météorologique du Guelma.

- ✓ Agence Nationale des Ressources Hydraulique de Constantine (pluviométrie de la station de Ain Makhlouf) A.N.R.H.

Les planches de références :

- ✓ Carte topographique au 1/50000 d'Ain Regada.
- ✓ Carte topographique au 1/50000 d'Ain Babouche.
- ✓ Carte géologique au 1/200000 de Constantine.
- ✓ Source bing Maps.

Les images satellitaires :

- ✓ 4 scènes MNT (SRTM 1 arc second v3).
- ✓ 1 scène d'image Landsat 8 OLI-TIRS (11 Septembre 2013 et 9 Mai 2014)



Annexes

Annexes

TABLEAU 43. ANNEXE 1 : INVENTAIRE DES PUIITS DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (2013-2014)

N° Du puit s	Date de prélèvement		Coordonnées Lambert			Niveau piézométrique				Analyse chimique	Observation
	Hautes eaux	Basses eaux	X	Y	Z (m)	Hautes eaux		Basses eaux			
P1	Avr. 2014	Sept. 2013	894.600	327.550	812	1.30	810.70	1.50	810.50	Non	Non équipé
P2	Avr. 2014	Sept. 2013	894.700	327.800	810	1.5	810.50	2.20	807.80	Oui	équipé A.E.P
P3	Avr. 2014	Sept. 2013	896.950	327.300	768	5.40	762.60	6.40	761.60	Oui	Non équipé
P4	Avr. 2014	Sept. 2013	898.100	327.300	765	1.50	763.5	2.70	762.3	Non	Non équipé
P5	Avr. 2014	Sept. 2013	896.200	326.520	765	10.40	754.60	10.40	764.60	Non	Non équipé
P6	Avr. 2014	Sept. 2013	896.640	325.060	752	1.80	750.20	2.40	749.60	Oui	Non équipé
P7	Avr. 2014	Sept. 2013	896.450	326.150	765	9.40	755.6	9.40	755.6	Oui	Non équipé
P8	Avr. 2014	Sept. 2013	899.600	326.250	745	1.50	743.50	1.70	743.30	Oui	Non équipé
P9	Avr. 2014	Sept. 2013	899.800	325.500	742	1.25	740.75	2.20	739.80	Non	Non équipé
P10	Avr. 2014	Sept. 2013	899.850	322.100	761	6.75	754.25	7.25	753.75	Oui	Non équipé
P11	Avr. 2014	Sept. 2013	898.200	321.320	763	5.70	757.3	6.10	756.9	Non	Non équipé
P12	Avr. 2014	Sept. 2013	896.150	320.440	762	9.00	753	10	752	Oui	Non équipé
P13	Avr. 2014	Sept. 2013	896.170	321.220	768	7.40	760.60	8.50	759.5	Oui	Non équipé
P14	Avr. 2014	Sept. 2013	900.350	325.600	790	0.5	789.50	1.50	788.50	Oui	Non équipé
P15	Avr. 2014	Sept. 2013	901.150	323.550	754	1.5	752.50	2.10	751.90	Oui	Non équipé
P16	Avr. 2014	Sept. 2013	902.560	322.730	762	4.80	757.2	5.70	756.3	Non	Non équipé
P17	Avr. 2014	Sept. 2013	903.200	322.750	764	8.50	755.5	9.00	755	Oui	Non équipé
P18	Avr. 2014	Sept. 2013	901.950	322.855	760	4.00	756	5.00	755	Non	Non équipé
P19	Avr. 2014	Sept. 2013	903.200	325.920	749	5.40	743.6	5.90	743.10	Oui	Non équipé
P20	Avr. 2014	Sept. 2013	901.300	321.750	770	15.00	755	15.5	754.50	Non	Non équipé
P21	Avr. 2014	Sept. 2013	895.650	323.800	768	4.20	763.8	4.90	763.1	Non	Non équipé

TABLEAU 44. ANNEXE 2 : TEMPERATURES MENSUELLES DURANT LA PERIODE 1986-2011 (STATION DE GUELMA)

Mois Années	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1986	9,6	11,3	11,3	13,9	20,4	22,2	25,5	28	23,2	19,6	13,4	9,3
1987	9,2	10,3	10,7	15,2	16,3	22,4	26,9	28,2	25,5	22	14,4	12,7
1988	11,1	9,2	11,8	15,7	20,2	23,2	27,6	27,5	22,4	21,4	14,9	9,1
1989	8,4	9,8	13,2	14,3	17,7	22,2	26,7	27,7	23,7	18,6	15,3	13,4
1990	9,8	11,9	12,2	14,2	18,8	24,7	26,3	25,4	26,1	20,7	14,6	9,2
1991	8,8	9,2	13,5	11,9	14,7	21,8	26,3	26,6	24,6	19	13,3	8,7
1992	7,8	9,2	11,3	13,4	17,5	20,9	24,1	26,2	24,3	19	14,2	10,3
1993	8,1	8,4	10,9	13,9	18,6	23,2	26,3	27,6	23,6	20,3	14	10,7
1994	10,4	10,8	13,2	12,6	20,9	23,5	27,7	30,1	25,3	19,4	15,3	10,8
1995	9,1	11,6	10,9	13	19,2	23,1	27	26,7	23	19,1	14,4	12,9
1996	12,2	9,4	12,6	14,2	18,2	21,6	25,3	26,9	21,4	17,7	15,4	13,4
1997	12	11	11	14,1	21,5	25,7	26,7	27,2	23,3	19,6	14,6	11,5
1998	9,8	10,5	11,6	15,1	18,1	25,3	26,9	26,6	24,1	17,2	12,6	9,3
1999	9,9	8,5	12,6	14,7	21,4	24,8	26,6	30,2	25,5	22,2	13,9	10,8
2000	7,3	10,7	12,6	15,9	21,1	23,5	27,4	27,8	23,8	18,6	15,3	11,8
2001	10,6	9,6	15,8	14	18,8	24,6	27,2	27,5	23,5	22,3	14,1	9,5
2002	8,3	10,7	13	15,8	20	25,6	26,9	26,7	23,3	19,7	15,5	11,9
2003	10,1	9,2	12,3	15,6	19	26,6	29,7	29,5	23,5	21,2	14,7	10,1

2004	9,9	11,7	12,8	14,2	17,2	22,5	26,1	27,6	23,3	21,2	12,8	11,1
2005	7,7	7,8	12,4	15,5	20,2	24,6	27,3	25,7	23	20	14,8	9,8
2006	8,6	9,9	13,2	17,2	21,6	25,4	27,8	26,2	23,3	21,1	15,3	11,1
2007	10,2	11,6	11,4	15,4	18,9	24	26,9	26,8	23,2	19	12,6	9,7
2008	9,4	10	11,7	15,4	19,8	23	27,7	27,5	23,8	19,8	13,7	10,1
2009	10	9,9	11,8	13,8	19,9	23,9	28,5	27,5	22,5	18,2	14,2	12,8
2010	10,5	11,8	12,6	16,1	18	22,4	27,1	26,6	23	19,2	15	11,8
2011	10	9,6	12,5	16,4	19,1	22,7	26,8	27,3	24,2	18,6	15,2	10,8
moy	9,6	10,1	12,3	14,7	19,1	23,6	26,9	27,4	23,7	19,8	14,4	10,9

TABLEAU 45. ANNEXE 3 : PRECIPITATIONS MENSUELLES DURANT LA PERIODE 1986.2011
(STATION D'AIN MAKHLOUF)

Mois Années	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Annuel
1986	35,5	70,5	103,5	131	47,5	142,5	76	40,4	60,5	0	10,6	1,5	719,5
1987	3,5	19	66,5	16	78,5	27,5	55	26,5	38	63	0	1,5	391,5
1988	38	7	28	128,5	30	66	31,5	48,5	5	34	9,5	5,5	431,5
1989	52,5	48,5	24,5	28	101,8	0	42	34	57	8,7	3,8	47	447,8
1990	0	19,5	119,5	122,5	51,5	69,7	92	77,5	60,5	30	15,5	5,5	663,7
1991	46,5	123	34	22	37	51,5	55	131,5	102	10,5	6,5	7,5	627
1992	8,5	56	145,5	200,5	50	47,5	40,5	33	70	13,2	0	6	670,7
1993	5,5	6	10,5	128,7	63	90,5	5,5	63,5	11	0	0	4,8	389
1994	37	75	14	49	51,5	0	189	52	8	21,3	0	3,6	500,4
1995	31	13,8	16,2	14	37,5	75,5	26	15,6	15,4	8,8	6,4	9,9	270,1
1996	4,8	6,1	5	14,9	23	5,5	7,2	14,4	3,2	12	6,2	10	112,3
1997	24,8	11,2	78,2	58,9	21,6	61	119,1	108	16,2	6,1	6	23,7	534,8
1998	41,5	108,3	339,8	111,6	203,1	50,8	153,3	46	55,2	24	14,9	14,5	1163,0
1999	58,1	38,8	80,1	126,7	36	19,5	23,3	57,6	113,2	25,7	0	8,3	587,3
2000	51	0	11,5	34	103,5	34,5	19	37,5	45	15,4	6,5	2	359,9
2001	8,5	16	27,5	7,5	15,5	52,5	17,5	29	10,5	5	13	20	222,5
2002	6	19,5	74,5	50,5	159	26,5	16,5	71,5	48	13	10	7	502
2003	14	40,5	12,5	95	54	13	62	33	110,5	104,5	11,5	11,5	562
2004	14	19	132	116	24,5	46	10,5	56,5	2	54,4	11,2	16	502,1
2005	14,4	29,8	6,9	113,6	102,3	53	27,9	16,2	68,9	4,2	10,9	8,75	456,8
2006	25,8	34,1	15,3	76,7	56,6	50,7	154,3	18,2	19,7	23,6	12,45	1,5	488,9
2007	50,8	38,5	21,5	52,6	10,8	7,4	86,6	20,1	39,4	14,6	14	58,2	414,45
2008	39	43,4	30,5	40	123,9	52,7	77,7	143,1	59	0	7	14,8	631,1
2009	70,1	56,8	13,8	27,4	115,4	27	52,8	53,6	73,9	0	0	0	490,8
2010	13,2	77,2	206,4	30,7	17,3	228	48,7	77	97,4	23	0	5,7	824,6
2011	44,1	201,7	15,7	29,1	66,4	127,5	50,8	65,3	11,5	11,5	0	11,9	635,4
Moy.	28,4	45,4	62,8	70,2	64,7	54,9	59,2	52,7	46,2	20,2	6,8	11,8	523,2

TABLEAU 46. ANNEXE 4 : RESULTATS PHYSICO- CHIMIQUES DES EAUX DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

Appareillage					Dosages							
Paramètres physiques					Paramètres chimiques							
puits	T°C terrain	T°C labo	Cond us /cm	PH	Cl ⁻ mg/l	So ₄ ²⁻ mg/l	(HCO ₃ ⁻) mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ +mg/l	Na ⁺ +K ⁺ mg/l	TH CaCO ₃	
P2	20,3	18,3	2320	8,54	34	146	150	76	24	23,9	100	
P3	14,9	18,2	952	8,05	22	80	140	25	15	52	40	
P6	15,9	18,23	990	7,77	23	58	163	30	9	47	39	
P7	17,3	18,38	1180	7,85	21	63	176	28	22	38	50	
P8	12,9	18,3	495	7,95	130	140	255	80	58	58.5	138	
P10	17,2	18,35	3080	7,85	100	102	180	75	15	70	90	
P12	15,8	18,4	3430	8,15	65	170	190	58	58	25	116	
P13	12,7	18,2	5360	8,16	131	256	139	114	65	11	179	
P14	14,4	18,35	3440	7,9	58	160	310	45	73	30	117	
P15	13,2	18,4	3200	8,05	91	49	211	62	38	33	100	
P17	17,6	18,3	3180	7.80	55	220	238	70	17	12	87	
P19	16,1	18,35	3340	7,77	126	70	230	70	24	68	94	
P22	16,6	18,2	1467	7,72	27	88	223	48	7	68,8	55	

Elément Puits	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Fe ²⁺ (mg/l)	NH ₃ (mg/l)
P2	0.02	0	0
P3	0.04	0	0
P6	0.02	0	0
P7	0	0	0
P8	0	0	0
P10	0.01	0	0
P12	0.02	0	0
P13	0.003	0	0
P14	0	0.01	0
P15	0.04	0	0
P17	0.08	0	0
P19	0	0	0
P22	0.009	0.001	0
P23	0	0	0

TABLEAU 47. ANNEXE 4 : RESULTATS CHIMIQUE DE LA PLAINE DE TAMLOUKA (AVRIL 2014)

puits	Cl ⁻ méq/l	SO ₄ ⁻² méq/l	(HCO ₃) ⁻ méq/l	Ca ⁺² méq/l	Mg ⁺² méq/l	Na ⁺ +K ⁺ méq/l	∑ r ⁺	∑ r ⁻	∑ r ⁺ /∑ r ⁻	$\frac{\sum r^+ - \sum r^-}{\sum r^+ + \sum r^-} * 100$	%	rSO ₄ ⁻ /rCl ⁻	rMg/rCa	rNa/rCl ⁻	$\frac{rCl^-}{r(Na+K)}$	r/rCl
P2	0,95	3,04	1,04	3,7	2	1,04	6,74	6,44	1,04	2,27		3,2	0,5	1,1	-0,09	-0,095
P3	0,62	1,67	2,29	1,25	1,25	2,26	4,76	4,58	1,04	1,93		2,7	1	3,6	-1,64	-2,65
P6	0,64	1,21	2,67	1,5	0,75	2,04	4,29	4,52	0,95	2,5		1,9	0,5	3,2	-1,4	-2,19
P7	0,6	1,31	2,88	1,4	1,83	1,65	4,88	4,79	1,01	0,93		2,2	1,3	2,8	-1,05	-1,75
P8	3,66	2,91	4,18	4	4,83	2,54	11,37	10,75	1,05	2,8		0,8	1,2	0,7	1,12	0,31
P10	2,81	2,12	2,95	3,75	1,25	3,04	8,04	7,88	1,02	1		0,8	0,3	1,1	-0,23	-0,08
P12	1,83	3,54	3,11	2,9	4,83	1,08	8,81	8,48	1,03	1,9		1,9	1,7	0,6	0,75	0,41
P13	3,69	5,33	2,28	5,7	5,41	0,47	11,58	11,3	1,02	1,22		1	0,9	0,1	3,22	0,87
P14	1,63	3,33	5,08	2,25	6,08	1,3	9,63	10,04	0,96	2,08		2,0	2,7	0,8	0,33	0,20
P15	2,3	0,83	3,6	3,1	3,16	1,43	7,69	6,73	1,14	6,65		0,4	1,0	0,6	0,87	0,38
P17	1,54	4,58	3,9	3,5	4,16	1,39	9,05	10,02	0,90	5		3,0	1,2	0,9	0,15	0,10
P19	3,55	1,45	3,77	3,5	2	2,95	8,45	8,77	0,96	1,85		0,4	0,6	0,8	0,6	0,17
P22	0,76	1,83	3,65	2,4	0,58	2,99	5,97	6,24	0,96	2,21		2,4	0,2	3,9	-2,23	-2,93