

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'EL-Oued
Département d'hydraulique et de génie civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Spécialité : Conception et Diagnostic des systèmes d'AEP et d'assainissement

Thème

Utilisation des bases physiques pour évaluer et développer les réserves aquifères dans la région d'Oum-El-Bouaghi (Nord-est Algérien)

Dirigé par :

Dr. ZAIR Nadjet

Présenté par :

**- SOLTANI Mohammed Salah
- GOBBI Djamel Eddine**

Promotion : juin 2018

Dédicaces

En cet honorable lieu, d'un simple geste tracé par écrit, mais qui jaillie du profond sentiment de reconnaissance, permettez-nous de citer les noms comme un mémorandum pour ceux

Qui ont une place particulière :

A nos très chers pères

A nos très chères mères

A nos frères et sœurs

A tous nos cousins sans exception A toute nous familles.

A tous nos ami(e) s sans exception.

A tous ; nous dédie cet ouvrage, qui est le sens de nos études supérieurs, tel un présent du cœur, en priant ALLAH tout puissant à le mettre au service de notre nation et du bien de

L'humanité, et qu'il sera une lumière sur nous parcour professionnel.

Mohammed Salah

Djamel Eddine

Remerciements

Au terme de ce travail, on remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la Santé et la patience qu'il nous donné durant tous ces années d'étude.

Nous tenons à remercier vivement aussi notre encadreur madame **ZAIR NADJET** pour son aide, ses précieux conseils et son soutien tout au long de notre formation, et aussi plus particulièrement pour sa patience, ses encouragements et sa direction vigilante de notre travail de recherche.

Nous exprimons également notre gratitude aux enseignants du département d'hydraulique.

Nous tenons à remercier également d'avance, les professeurs de jury, qui vont examiner cet humble travail afin de l'enrichir de leurs précieux conseils et corrections.

Notre profond remerciement pour nos familles pour leurs patiences et nos collègues pour leurs encouragements.

Un grand merci pour ceux et celles qui nous ont aidé de près ou de loin toute la durée de notre parcours éducatif.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	PAGES
Dédicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Symboles	xi
Résumé	xii
Introduction Général	01
CHAPITRE I : Géographie &Géologie	
I. La géographie	03
I.1. Situation géographique	03
I.2. Le réseau hydrographique	05
I.3. Le climat	05
I.4. La végétation	05
I.5. Aperçu Socio-économique	05
II. Géologie	06
Introduction	06
II.2. La disposition de la chaîne Alpine	06
II.2.1. Domaine interne	06
II.2.2. Le sillon des flysch	06
II.2.3. Le domaine externe	06
II.3. Analyse stratigraphiques	07
II.4. Description structurale et tectonique	13
II.4.1. Principales Phases Tectoniques	16
II.4.2. Tectonique	16
II.5. Formations aquifères	17
III. Conclusion	22
CHAPITRE II : Hydroclimatologie	
I. Introduction	23
II. Cadre d'étude	23

III. Traitement des paramètres hydroclimatologiques	24
III.1. Les précipitations	24
III.2. Les températures	26
III.3 Autres paramètres	27
III.3.1. Indice De MARTONNE ou indice d'aridité	27
III.3.2. Climagramme de L. EMBERGER	28
III.3.3. Indice de Paul Moral	31
IV. Relation Température– Pluies	31
IV.1. Diagramme Ombro-thérométrique de GAUSSEN et BAGNOULS	31
IV.2. Méthode d'EUVERT (humidité du sol)	32
IV.3. Calcul l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement	33
IV.4. L'évapotranspiration réelle ou ETR	36
IV.5. Calcul du ruissellement (R) et de l'infiltration (I)	37
IV.6. Essai du bilan hydrologique	38
V. Conclusion	39
CHAPITRE III : Caractéristiques physiques et hydrogéologiques	
Partie I : Caractéristiques physiques des aquifères	40
I. Introduction	40
II. Prospection électrique de la haute plaine de Bir Chouhada(Levasseur) et Souk Naamane (Rouget de l'Isle)	40
II .1. Les sondages électriques d'étalonnage	41
II.2. Utilisation et exploitation des données de forages récents	43
II.3. Présentation et interprétation des résultats de la prospection électrique selon les données des forages récents	45
II.4. Présentation et interprétation des coupes géoélectriques	46
III. Résultats obtenus d'un point de vue hydrogéologique	49
III.1. La Nappe des calcaires du Crétacé inférieur	49
III.2. La nappe des calcaires lacustres du Mio-Pliocène	49
Partie II : Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères	50
IV. Introduction	50
V. Les formations aquifères	50
V.1. L'aquifère du Mio-Plio- Quaternaire	50
V.2. L'aquifère Karstique carbonaté du Crétacé inférieur	50
VI. Piézométrie	51

VI.1. Inventaire des points d'eau	52
VI.2. Evolution de la piézométrie	52
VI.3. Battement de la nappe	53
VII. Conditions aux limites	55
VIII. Détermination des paramètres hydrodynamiques	55
VIII.1. Répartition spatiale de la perméabilité	58
VIII.2. Répartition spatiale de la transmissivité	58
IX. Bilan du système aquifère	59
X. Conclusion	61
CHAPITRE VI : Evaluation quantitative et qualitative des réserves d'eaux souterraines	
Partie I : Evaluation qualitative des réserves d'eaux	63
I. Introduction	63
II. Echantillonnage et analyse hydrochimique	63
III. Description sommaires des paramètres physico chimiques	64
III.1. Paramètres physiques :	64
III.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)	64
III.1.2. La conductivité électrique (CE)	64
III.2. Les éléments chimiques majeurs	64
III.2.1. Le calcium (Ca^{2+})	64
III.2.2. Le magnésium (Mg^{2+})	64
III.2.3. Le sodium (Na^+)	64
III.2.4. Le potassium (K^+)	64
III.2.5. Les chlorures (Cl^-)	65
III.2.6. Les sulfates (SO_4^{2-}):	65
III.2.7. Les bicarbonates (HCO_3^-)	65
VI. Détermination des principaux faciès hydrochimiques	65
VI.1. Représentation graphique des faciès hydrochimiques	66
VI.1.1. Diagramme de PIPER	66
VI.1.1.1. Période de Juin 2014	67
VI.1.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF	67
VI.1.2.1. Période de juin 2014 (figures 32 a, b, c)	67
VI.1.3. Répartition des faciès chimiques	70
V. Cartographie hydrochimique	70
V.1. Les chlorures	71
V.2. Les bicarbonates	72
V.3. Les sulfates	72
V.4. Le calcium	73
V.5. Le sodium	73
IV. Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines	75
IV.1. Faciès caractéristiques	75
IV.2. Origine des éléments chimiques	76
IV.2.1. Les éléments Ca^{+2} , SO_4^{-2} et HCO_3^-	76
IV.2.2. Les éléments Na^+ , Cl^-	78
IV.2.3. Les éléments HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^-	79
IV.2.4. Les éléments SO_4^{-2} , Cl^-	81
IIV. Aptitude des eaux à l'irrigation	81

IIV.1. Introduction	81
IIV.2. Classification des eaux par la méthode de Richards	84
IIV.2.1. Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon Richards	85
IIV.3. Classification des eaux par la méthode de Wilcox	85
IIIV. Pollution des eaux	86
IIIV.1. Les principales sources de pollution	86
IIIV. 2. Etude l'évolution de teneurs de nitrates	87
IIIV.1.2. Répartition spatiale générale	87
IIIV.3. Relation nitrates - nitrites	88
IIIV.4. Relation nitrates – chlorures	88
IIIV.5. Les phosphates	89
Partie II : Evaluation quantitative des réserves d'eaux	91
IX. Aperçu théorique sur l'évaluation de réserve et ressource en eau souterraine	91
IX.1. Notion de réserve et ressource en eau	91
IX.2. Catégorie de réserves en eau souterraine	91
IX.3. Méthode d'évaluation de la réserve en eau souterraine	92
IX.3.1. Principe d'évaluation	92
IX. 3.2. Renouvellement de réserve en eau souterraine	92
IX.3.3. Evaluation quantitative de la réserve et la ressource en eau souterraine	92
IX.4. Réserve totale de la nappe	93
IX.5. Réserve permanente (Wp)	94
IX.6. Réserve exploitables ou renouvelables	94
IX.6.1. Méthode hydrologique	95
IX.6.2. Méthode cartographique (carte de fluctuation)	96
IX.6.3. Calcul du taux de renouvellement	97
X. Conclusion	98
Conclusion Général	99
Références bibliographiques	103
Annexes	I

Liste de figure

LES FIGURES	PAGES
Figure 01 : Situation géographique de la zone d'étude	03
Figure 02 : Limite administrative de la région d'étude	04
Figure 03 : Extrait de la carte géologique de la région d'étude (ANRH, 2004)	08
Figure 04 : Coupe géologique de la région d'étude (Carte géologique Sétif-Constantine 1/200000) (ANRH 2004)	08
Figure 05 : La série des lacs	11
Figure 06 : Schéma structural (feuille d'Ain Yaghout 1/50000)	13
Figure 07 : Extrait de la coupe géologique interprétative de (Ain Yaghout N°146) (SONATRACH, 1977).	14
Figure 08 : Répartition des bassins versants	23
Figure 09 : Variation moyenne mensuelle des précipitations 1998-2012 à la station de Bir Chouhada	24
Figure 10 : Variation moyenne annuelle des précipitations 1998-2012 de la station de Bir Chouhada	25
Figure 11 : Variations moyennes mensuelles des températures 1998-2012 de la station Ain Skhouna	26
Figure 12 : Variations moyennes annuelles des températures 1998-2012 de la station Ain Skhouna	27
Figure 13 : Diagramme Climagramme L. EMBERGER	30
Figure 14 : Diagramme Ombrothermique de H.Gaussen et F.Begaouls Station de Bir Chouhada et Ain Skhouna	32
Figure 15 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (P. VERDEIL 1909/1988)	34
Figure 16 : L'ETP estimée par la méthode de Thornthwaite	35
Figure 17 : Bilan hydrologique à la station de Bir Chouhada par la méthode de Thornthwaite pour la période 1998 -2012	41
Figure 18 : Carte de situation des sondages électriques dans la région de Bir Chouhada -Souk Naamane (D'après CGG (1970))	47

Figure 19 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques	47
Figure 20 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques	48
Figure 21 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques	48
Figure 22 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques	51
Figure 23 : Coupe hydrogéologiques synthétiques	52
Figure 24 : Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe Mio-Plio-Quaternaire	54
Figure 25 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire (Juin 2014)	54
Figure 26 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire (Octobre 2014)	55
Figure 27 : Carte de battement de la nappe Moi-Plio-Quaternaire en (m) durant l'année 2014	58
Figure 28 : Carte de répartition de la perméabilité de la nappe Moi-Plio-Quaternaire en (10^{-4}) m/s.	59
Figure 29 : Carte de répartition de la transmissivité de la nappe Moi-Plio-Quaternaire en (10^{-3}) m ² /s	63
Figure 30 : Carte des points d'eau échantillonnés	67
Figure 31 : Diagramme de Piper des eaux souterraines dans la plaine (Juin 2014)	68
Figure 32 (a, b, c) : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF (Juin 2014)	70
Figure 33 : Carte de répartition spatiale des faciès chimiques	71
Figure 34 : Carte de chlorure des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014)	72
Figure 35 : Carte de bicarbonate des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014)	73

Figure 36 : Carte des sulfates des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014)	74
Figure 37 : Carte de calcium des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014)	74
Figure 38 : Carte de sodium des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014)	76
Figure 39 (A, B) : Evolution et distribution des faciès chimiques	77
Figure 40 (A, B) : Détermination l'origine de calcium	78
Figure 41 (A, B) : Détermination l'origine de sodium	79
Figure 42 (A, B) : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique	80
Figure 43 : Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique	81
Figure 44 : Diagramme de Richards pour Juin 2014	83
Figure 45 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Richards (Juin 2014)	84
Figure 46 : Diagramme de Wilcox pour Juin 2014	85
Figure 47 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation dans la région d'étude selon la classification de Wilcox (Juin 2014)	86
Figure 48 : Carte des nitrates en (mg /l) dans la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pour la période de juin 2014	87
Figure 49 : Evolution du nitrate en fonction des nitrites de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014	88
Figure 50 : Concentration des nitrates et des chlorures de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014	89
Figure 51 : Correlation des teneurs de nitrate avec celles des phosphates de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014	90
Figure 52 : Carte des phosphates de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014	90

LISTE DES TABLEAUX

LES TABLEAUX	PAGES
Tableau 01 : Log litho stratigraphique Synthétique	17
Tableau 02 : Coordonnées de la station climatologique d'Ain Skhouna	23
Tableau 03 : Coordonnées de la station climatologique de Bir Chouhada	23
Tableau 04 : Précipitations moyennes mensuelles (1998-2012)	25
Tableau 05 : Températures moyennes mensuelles en (C°) à la station d'Ain Skhouna (1998-2012)	26
Tableau 06 : Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Bir Chouhada et Ain Skhouna	28
Tableau 07 : Humidité du Sol	32
Tableau 08 : Indice mensuel (i) et ETP (mm)	35
Tableau 09 : Bilan Hydrique pour la période 1998-2012 selon la formule de C.W. Thornthwaite	36
Tableau 10 : Valeurs des éléments du bilan hydrique	38
Tableau 11 : Caractéristiques lithologiques des forages utilisés pour les sondages étalons	42
Tableau 12 : Etalonnage au voisinage du forage Tinsilt N°3	42
Tableau 13 : Etalonnage au voisinage du forage Bir Chouhada N°1	42
Tableau 14 : Etalonnage au voisinage des forages Tinsilt N° 5, 6 et 7	43
Tableau 15 : Caractéristiques des nouveaux forages	44
Tableau 16 : Étalonnages à partir des forages nouveaux	45
Tableau 17 : Détermination des paramètres hydrodynamiques	57
Tableau 18 : Faciès chimiques des eaux souterraines de la plaine d'étude	66
Tableau 19 : Evolution des classes d'irrigation selon Richards	83
Tableau 20 : Evolution des classes d'irrigation selon Wilcox	85
Tableau 21 : Estimation du volume total de la nappe et de la réserve totale	93
Tableau 22 : Estimation du volume total de la nappe et de la réserve	94

permanente	
Tableau 23 : Bilan hydrique globale de la région d'étude	95
Tableau 24 : calcul du volume de la réserve régulatrice de la nappe (2014)	96
Tableau 25 : récapitulatif des résultats de l'évaluation numérique des différentes réserves en eau souterraines	97

Liste des abréviations

ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
CGG	Compagne générale de géophysique
CE	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
DHW	Direction de l'hydraulique de la Wilaya
DRE	Direction des ressources des eaux
ETP	Evapotranspiration potentielle (mm)
ETR	Evapotranspiration Réelle (mm)
I	Infiltration de l'eau dans le sol (mm)
P	Précipitations (mm)
Qs	Débit d'écoulement de surface (l/s)
Qw	Débit d'écoulement souterrain (l/s)
R	Ruissèlement (mm)
s	Rabattements en (m)
T	Transmissivité (m/s^2)
T	Température ($^{\circ}\text{C}$)

Résumé :

La plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai possède actuellement des ressources hydriques relativement limitées, et qui ne sont représentées, uniquement, que par les eaux souterraines de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire. Ces dernières années, un essor économique, particulièrement agricole, a 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.

Suite à l'analyse de la situation actuelle de la nappe et de son environnement, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations, en fonction de la lithologie et des facteurs climatiques. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres hydrodynamiques et physicochimiques au cours de campagne (2014).

Le traitement et la représentation des données ont été menés en faisant appel à des outils modernes :

Analyse statistique, cartographie et graphisme automatique, ainsi que la géostatistique.

L'interprétation de ces données a abouti à :

- la description de la géométrie et de la structure des nappes, réalisée grâce à l'étude géophysique, qui montre que la nappe libre superficielle est constituée de conglomérats, calcaires lacustres, argiles et marnes. Elle est alimentée principalement à partir des formations carbonatées de bordures et par l'infiltration des précipitations.
- La qualité chimique de l'eau qui est médiocre, et résulte d'une forte salinité, influencée par la lithologie de la nappe.
- la présence de quelques polluants, tirant leurs origines des activités agricoles.

Les résultats obtenus de la réserve régulatrice (21,4 hm³) obtenues par le dépouillement de la carte de fluctuation de la nappe libre sont inférieures à celles qui sont déduites de la différence entre la réserve totale et permanente.

Mots clés : aquifère, hydrogéologie, évaluation des eaux souterraines, pollution, Oum El Bouaghi.

Introduction Générale

Introduction Générale :

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt une importance capitale pour toute activité humaine. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides, ou tout simplement de mauvaise qualité dans d'autres régions. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution.

Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

Dans ce contexte, la présente étude vient enrichir les anciens travaux de recherche, et ce pour donner un aperçu scientifique sur l'état actuel de la nappe de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai.

La région d'étude a connu un accroissement démographique et une expansion économique importante. Ce qui a augmenté la demande en eau et a conduit à la surexploitation des eaux souterraines. La qualité des eaux de la région a subi ces dernières années une détérioration sensible, à cause de rejets domestique non contrôlés et à l'utilisation intensive et irrationnelle des engrais. Ces facteurs ont modifié le chimisme de l'eau et l'ont rendu impropre aux usages souhaités à certains endroits.

Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des paramètres climatiques et lithologiques sur la qualité de cette ressource souterraine, d'optimiser l'interprétation des analyses physico-chimiques et de quantifier les réserves d'eau souterraines en utilisant des moyens adéquats.

Ce travail s'est attelé à répondre aux préoccupations suivantes :

- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la nappe?
- Quels sont les mécanismes physico-chimiques régissant l'évolution des éléments chimiques dans le temps et dans l'espace (influence de la lithologie et des facteurs climatiques sur le chimisme de la nappe)?
- Quels sont les différents polluants chimiques existant dans l'eau ainsi que leur origine?
- Quel est l'état actuel de la quantité des réserves d'eaux souterraines de la région d'étude?

Afin de répondre à ces préoccupations, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Etude du cadre naturel et hydrodynamique.
- Etude physique de la nappe.
- Etude des paramètres physiques et chimiques de l'eau.
- Etude des dépendances et relations entre les divers paramètres physico-chimiques de l'eau.
- Etude des polluants et de leur origine.

Plusieurs outils (géologique, géophysique, hydrodynamique, chimique, statistique et informatique) ont été utilisés, afin de mieux interpréter les données acquises.

La première partie est consacrée à l'étude des contextes géographique et géologique de la région d'étude en présentant les caractéristiques géologiques, géophysiques et hydroclimatologique.

La deuxième partie traite de l'hydrogéologie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai, en définissant les paramètres hydrodynamiques et interprétant sa piézométrie.

La troisième partie concerne l'étude de l'évolution des paramètres chimiques dans le temps et dans l'espace en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines, et de déterminer la quantité de ces eaux.

CHAPITRE I

Géographie & Géologie

I. La géographie

I.1. Situation géographique :

La région d'étude englobe les communes de Bir Chouhada (ex Levasseur) avec **10040** habitants, Souk Naamane (ex Rouget de l'Isle) avec **26230** habitants et Ouled Zouai qui compte **5465** habitants dans la wilaya d'Oum El Bouaghi, située à l'Est de l'Algérie (le nombre d'habitants se rapporte à 2012). Ces communes sont situées à l'extrémité sud-est de la wilaya.

La zone d'étude a une superficie de 530 Km² et est comprise entre les coordonnées Lambert suivantes : X min = 816 km et X max = 852 km ; Y min = 284 km et Y max = 303 km.

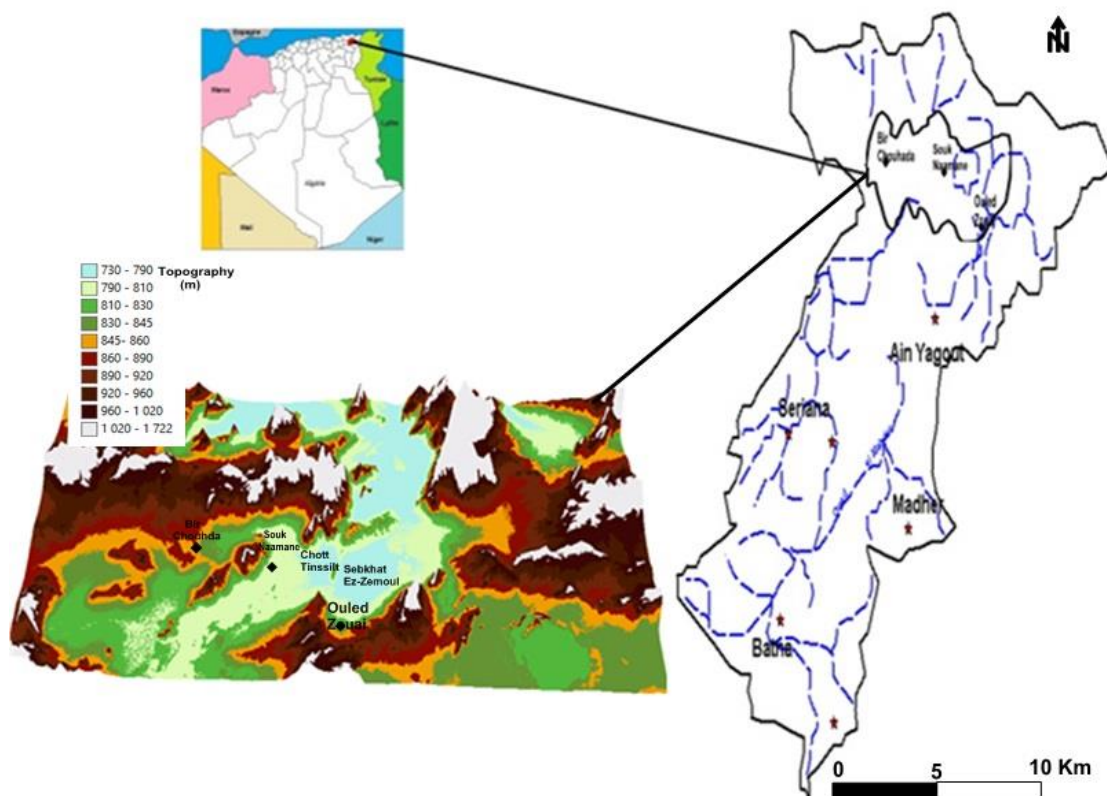


Figure 01 : Situation géographique de la zone d'étude.

Le secteur d'étude est limité administrativement par les wilayas de Mila au Nord et de Batna au Sud.

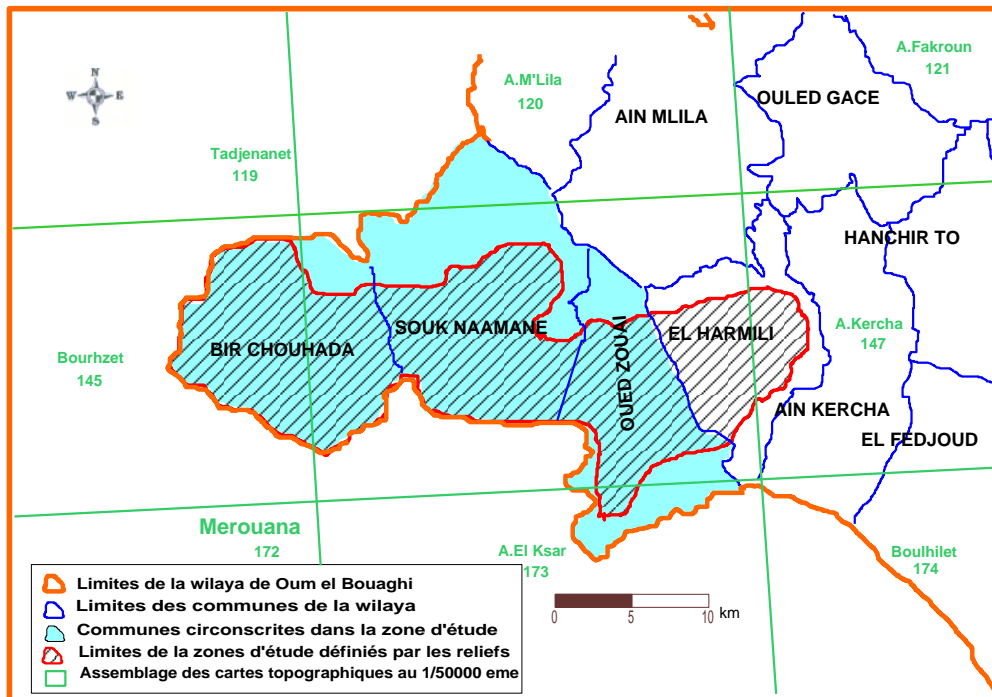


Figure 02 : Limite administrative de la région d'étude.

Du point de vue géomorphologique la région fait partie de la frange nord-ouest du bassin des chotts constantinois. Elle est circonscrite dans une dépression caractérisée par la présence de deux chotts (Chott Tinsilt et Sebkhha EzZemoul).

- Au Nord par une ligne passant par M'Chira et les djebels Faham, Gualaàt Ouled Sellem (1387 m), Guerouaou (1540 m) ainsi que la bordure septentrionale du chott Tinnsilt et Sebkheth Ezzemoul.
- A l'Ouest par les Djebels Rherour, El Hammam et Azraouat (1002 m) ;
- Au sud par la limite des wilayas de Batna et d'Oum El Bouaghi ;
- A l'Est par la bordure orientale de la Sebkhath Ezzemoul et son prolongement jusqu'au djebel Hanmout Kebir.

Les grands massifs se trouvent en plein centre de la zone d'étude et sont Djebel Guedmane (1134 m), Djebel Tizourit (1036 m), Djebel Amsid (952 m) et Djebel Hamouda (Djebel Snobra) avec 1161 m d'altitude. Les hautes plaines occupent la majorité de la zone d'étude et sont essentiellement représentées par les plaines de Souk Naamane à l'Est de Djebel Guedmane, la haute plaine de Bir Chouhada à l'Ouest de ce dernier et la plaine d'Ouled Zouai au Sud-Ouest de Sebkheth Ezzemoul et Chott Tinsilt. L'altitude de ses hautes plaines varie

entre 809 et 891 m pour Bir Chouhada, de 794 à 830 m pour Souk Naamane et de 792 à 836 m pour Ouled Zouai. Les plus basses altitudes correspondent aux chotts Tinsilt et Ezzemoul.

I.2. Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est peu dense, avec quelque cours d'eau temporaires. Ils sont tous endoréiques et convergent vers Sebket Ezzemoul et chott Tinsilt à l'Est de la région, comme : Oued Ben Zerhaib, Oued Bou Salem.

En général, le réseau hydrographique est représenté par des chaabets temporaires, telles que Chaabet El kela, Chaabet Bettoum au Sud de Sebket Ez Zemoul et Oued Zerhaib. L'alimentation de ses chaabets est assurée par les ruissellements qui se créent dans les massifs au Nord- Est et au centre de la zone d'étude. Pour la relation Oueds –nappes, l'alimentation des nappes par les Oueds en période de basses eaux est inexistante au vu de l'assèchement de ses derniers en été.

I.3. Le climat :

Le climat de la région est semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 465,30 mm sous forme de pluies violentes. L'hiver est caractérisé par des chutes de neige et de brusques gelées, par contre l'été se caractérise par un climat chaud avec une température moyenne annuelle de l'ordre de 16,20 ° C.

I.4. La végétation :

La majeure partie des terres de la plaine est exploitée par les habitants qui y pratiquent la céréaliculture. Autour des habitations et de quelques fermes, nous avons quelques petits jardins, irrigués à partir de puits de faible profondeur, ou sont cultivés des légumes et du tabac. Par ailleurs, dans certaines zones, comme la partie est de Souk Naamane se développent parfois des plantes halophiles qui servent de lieu de pâturage aux troupeaux.

I.5. Aperçu Socio-économique :

Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai sont des agglomérations les plus importantes.

Les mechtas sont réparties près des oueds et les puits qui sont utilisés pour les besoins domestiques et agricoles.

Les principales activités dans la région sont l'agriculture des céréales et l'élevage.

II. Géologie

II.1. Introduction :

L'étude géologique (stratigraphique et structurale) est la base de toute étude hydrogéologique, car elle donne des renseignements sur les formations lithologiques susceptibles de constituer les réservoirs en eau souterraine.

L'aperçu géologique peut être synthétisé à partir de l'analyse des documents suivants :

- Carte géologique d'Ain Yagout et sa notice explicative
- Rapport de l'étude géophysique effectuée par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) 1969-1970.
- Rapport de l'étude géophysique effectuée en 1960-1961
- Logs stratigraphiques des sondages mécaniques.

II.2. La disposition de la chaîne Alpine :

La chaîne alpine d'Algérie s'articule sur le rift et constitue la chaîne tello africaine. Elle se caractérise par une unité remarquable du Nord vers le Sud :

- Le domaine interne
- Le sillon des flysch
- Le domaine externe

II.2.1. Domaine interne :

Il comprend le socle kabyle cristallin et sa couverture sédimentaire paléozoïque peu ou pas métamorphisée et la chaîne calcaire ou dorsale kabyle.

II.2.2. Le sillon des flysch :

Composé par une double série :

- La série mauritanienne.
- La série massylienne.

II.2.3. Le domaine externe :

En Algérie orientale, il est représenté par :

- Les séries telliennes
- Les séries de l'avant pays allochtone
- Les séries de l'avant pays autochtone
- **Les séries telliennes** : masses allochtones chevauchant vers le Sud et caractérisées par le développement de faciès marneux et marno calcaire. On distingue la nappe ultra tellienne, les nappes telliennes et les nappes peni-telliennes.

- **Les séries de l'avant pays allochtones** : sont orientées suivant la direction SW-NE. On peut distinguer d'Est en Ouest les domaines et les unités suivantes :
 - Unité néritique constantinoise
 - Unité sud sétifienne
 - Avant pays plissés et écaillés des unités des Sellaouas.
- **Les avant pays autochtones plissés** : constituent les monts des Aurès, du Hodna et du Belezma.

La région d'étude fait partie de deux ensembles :

L'un est l'allochtone Sétifien au Djebel Amsid (au Nord –Ouest de Bir Chouhada), il est écaillé et flotte sur une lame de Trias et l'autre, autochtone nord Aurassien, représenté par les monts d'Ain Yagout, les djebels Hanout, Harshel et Terbenut, Ces massifs présentent des plis de direction atlasique ou hodnéenne.

Une couverture mio-plio-quadernaire s'étend sur les plaines.

II.3. Analyse stratigraphiques :

Sur la carte géologique d'Ain Yagout, qui couvre la grande majorité de la zone, nous pouvons constater 04 ensembles d'âge géologique différent :

- L'ensemble des terrains où les formations sédimentaires sont peu ou pas tectonisées. Il est formé de différentes formations telles que les Quaternaire, Villafranchien, sol de sebkha et aussi du Mio-Pliocène.
- L'ensemble de la nappe néritique constantinoise, avec un Aptien qui affleure.
- L'ensemble allochtone Sud Sétifien qui débute de l'Aptien au Jurassique supérieur.
- L'ensemble Aurésien des séries para autochtones qui débute au Miocène jusqu'au Lias.

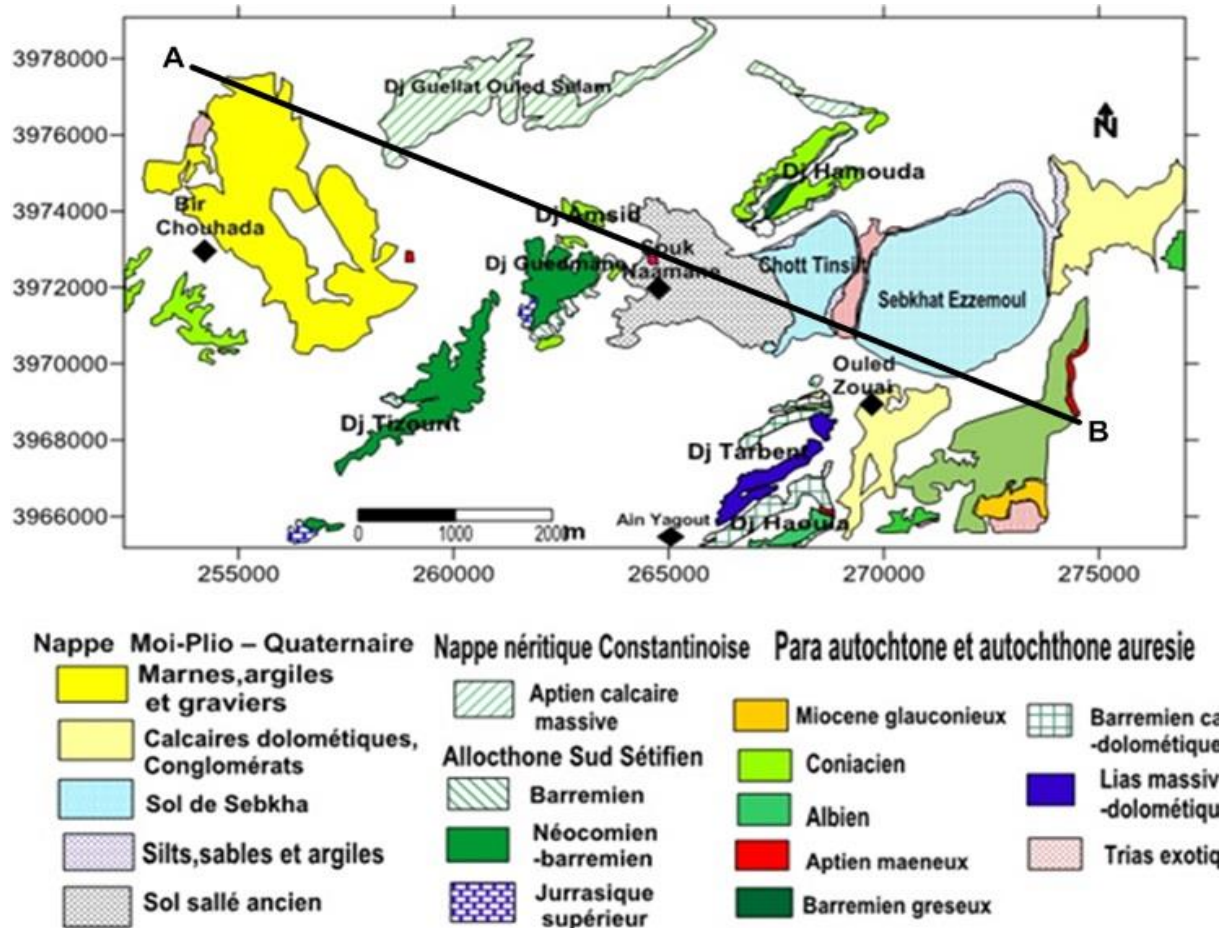


Figure 03 : Extrait de la carte géologique de la région d'étude (ANRH, 2004).

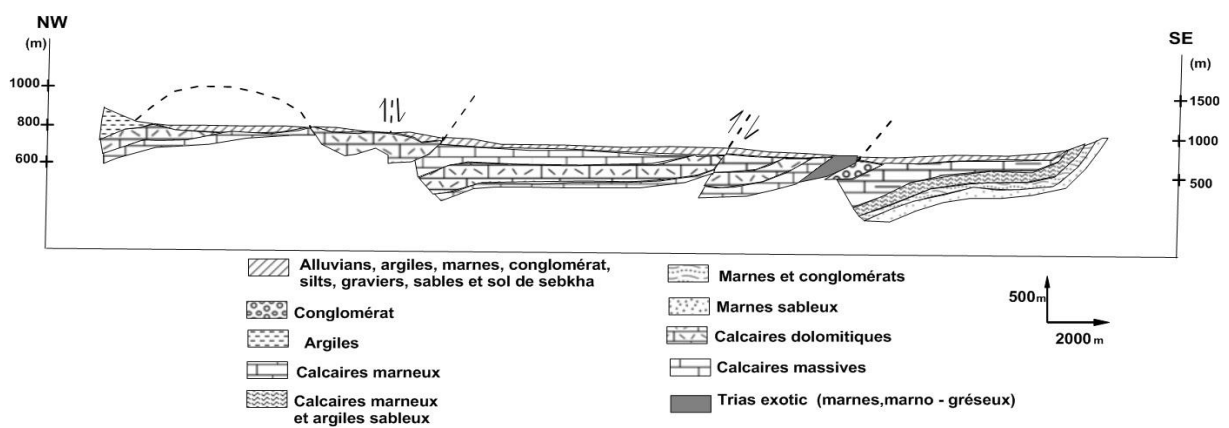


Figure 04 : Coupe géologique de la région d'étude (Carte géologique Sétif-Constantine 1/200000) (ANRH 2004).

❖ **Formations peu ou pas tectonisées :**

A / Quaternaire (q) :

Les sols salés anciens forment de vastes étendues à végétation caractéristiques de salsolacées. L'irrigation les rend cultivables localement, aussi en trouve des glacis polygéniques, qui est la forme de relief la plus caractéristique des hautes plaines constantinoises. Elle correspond à des surfaces très faiblement pentées près des plaines et dont la pente augmente progressivement vers les montagnes. Le Villafranchien est une croûte calcaire massive dans le Nord-Est du Douar Mraouna.

B / Mio-Pliocène (mp) :

Les formations attribuées au Mio-Pliocène affleurent d'une façon très dispersée, au Douar Mraouna, à l'Est de Bir Chouhada et dans les monts de Ain Yaghout. Il s'agit de conglomérats mal cimentés, d'argile jaunâtre sableuse et de calcaires lacustres mal stratifiés, rosâtres ou blancs.

❖ **Nappe néritique constantinoise :**

A / Aptien (n⁵ⁿ) :

Un seul affleurement est visible dans le Nord de la région, à la mechta El Henchir. Ce sont des calcaires sombres en bancs réguliers, leur nature est micritique.

❖ **Ensemble Allochtone Sud Setifien**

▪ **la série de Djebel Guedmane :**

Les formations de cette unité forment tous les affleurements de Djebel Merzguene, Rhires, Djebel Tizourit, Djebel Guedmane, Draa El Gueblia, Djebel Amsid et Djebel Hamouda (Djebel Snobra).

A / Aptien (n5) :

Avec une épaisseur de 150 m au maximum l'Aptien est formé de calcaires à petits bancs. La première moitié de la série débute par des calcaires massifs, la seconde moitié montre un ensemble bien lité de micrite avec des cassures sombres.

B / Barrémo-Aptien (n⁴⁻⁵) :

Ce sont des calcaires organogènes, formant une corniche massive de calcaires compact à cassure blanche de 60 m d'épaisseur à Djebel Hamouda. Elle est nommée corniche noire avec une masse peu ou pas stratifiée au Djebel Guedmane. La corniche noire à une épaisseur de 70 m.

C / Barrémien (n^{4b}) :

Il est formé de calcaires, de dolomies et de grès, avec des intercalations marneuses au Djebel Hamouda. Sous la barre des calcaires massifs du Barrémo-Aptien, cet ensemble forme une puissante et épaisse série d'une centaine de mètres de calcaires et grès roux. Ces bancs sont séparés par des intercalations de marnes sableuses ou argileuses. L'épaisseur de cet étage est de 180 m au Djebel Guedmane et de 150 m au Djebel Hamouda.

D / Néocomien – Barrémien (n¹⁻⁴) :

Au Djebel Hamouda et Kef El Geussâa seul le Barrémien est présent. C'est un ensemble calcaro –dolomitique où 60 m de la série sont visibles au Djebel Guedmane. La série se complète vers le bas par un ensemble de grosses barres de calcaires roux ou graveleux à intercalations de dolomie grise. Cette série atteint 150 m à 200 m d'épaisseur.

E / Jurassique (J⁶) :

La formation y est organisée en trois grosses barres de calcaires massifs fins ou finement graveleux avec un Jurassique supérieur de 80 m d'épaisseur.

❖ Para autochtone et autochtone Aurésien**La série des lacs**

Les affleurements de cet ensemble forment les monts d'Ain Yagout et les affleurements de la région des lacs au piedmont de Djebel Hamouda.

Echelle: 1/1000 A. Yagout

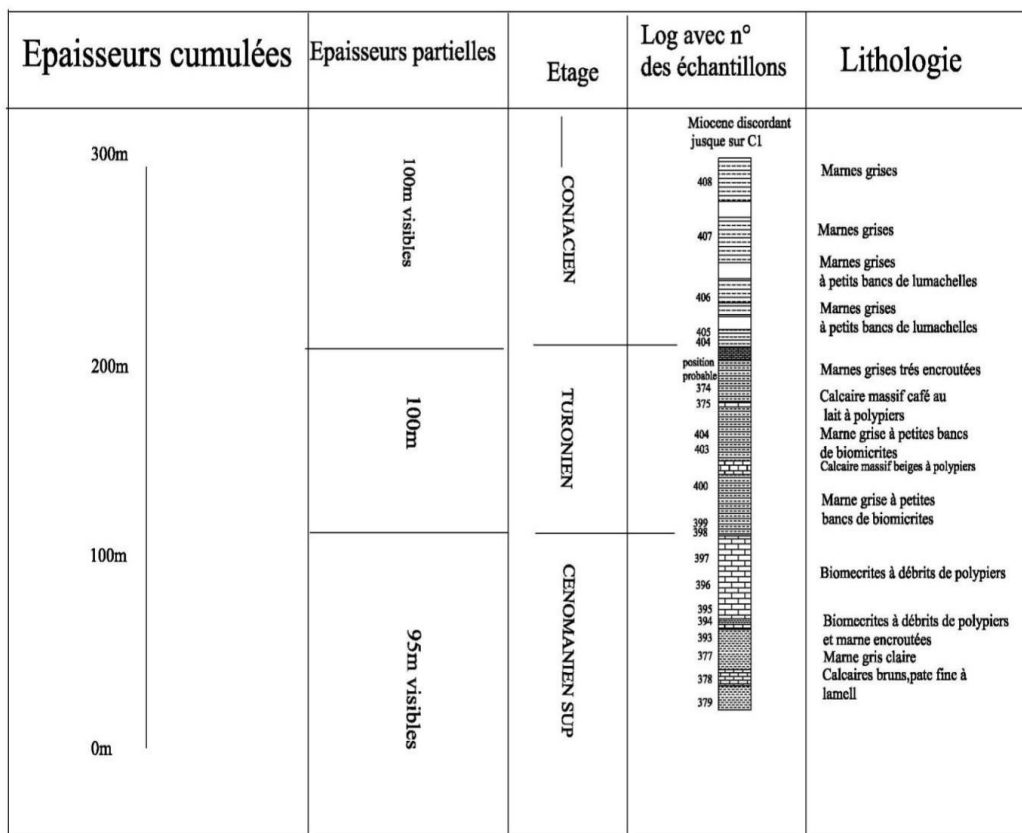


Figure 05 : La série des lacs.

▪ **Miocène (m^h) :**

C'est une série qui débute par des conglomérats rubéfiés, polygéniques et discordants, suivie par quelque mètre de calcaires gréseux roux.

▪ **Coniacien (C^{2h}) :**

Cet étage visible est formé essentiellement par des marnes grises de 100 m d'épaisseur.

▪ **Turonien (C^{1h}) :**

Cette série a une épaisseur de 100 m d'épaisseur. C'est une série marneuse très encroûtée, avec intercalations des bancs calcaires massifs beiges. Elle affleure légèrement au Nord de Sebkhet Ez-Zemoul.

- **Cénomaniens (C^{1h}) :**

Ce sont des alternances de marnes grises claires et de calcaires massifs beiges.

L'affleurement de ces calcaires est visible près de Sebket Ez –Zemoul. Le Cénomaniens supérieur a une épaisseur de 95 m.

- **Albien (n^{6-7h}) :**

Il est visible à la base de la série renversée de Djebel Tarbent et sur le flanc nord d'Ain Yagout au Djebel Haouia. Ce sont des séries marno-gréseuses à la base et marneuses au sommet avec une épaisseur d'environ 70 m.

- **Aptien (n^{5bc}_h) :**

Il s'agit de calcaires bien lités qui se placent entre l'Albien marno-gréseux et la série marneuse de l'Aptien inférieur. Ils forment une barre de 350 m d'épaisseur.

- **Aptien (n^{5a}_h) :**

C'est une série à dominante marneuse dont l'épaisseur varie entre 70 m et 80 m. A la base, on note quelques intercalations gréseuses.

- **Barrémien (n^{4d}_h) :**

Il s'agit de 200 m à 250 m de série à dominante gréseuse, à rares intercalations dolomitiques, c'est une série très monotone de grès roux ou blancs.

- **Barrémien (n^{4bc}_h) :**

C'est une formation qui est constituée de grosses barres calcaires –dolomitiques, séparées par des zones plus tendres (intercalations argileuses) ou argilo – silteuses.

Les barres présentent des faciès de dolomies, de calcaires dolomitiques et de micrite de calcaire graveleux.

- **Crétacé basal (n¹⁻³_h) :**

C'est un ensemble argilo-pelitique très épais qui dépasse les 600 m d'épaisseur.

- **Bérriasien – Valenginien (n¹⁻²_h) :**

Ce sont des marnes verdâtres avec intercalations de petits bancs grésos-quartzitiques avec une épaisseur de 800 m à 1000 m à Djebel Tombait.

- **Calcaires écrasés à calpionelle (j^s –n¹_h) :**

C'est une série d'une centaine de mètres d'épaisseur, avec à la base des marnes roses et jaunes qui appartiennent au Kimméridgien – Portlandien. Au sommet des brèches de 10 m d'épaisseur.

▪ **Jurassique (jH^S) :**

Le Dogger est essentiellement formé de marno – calcaires roses et jaunes, d’une épaisseur de 55 m. Le Malm est formé de 40 m de calcaires à silex rougeâtres et verdâtres avec à la base des calcaires gris clairs. Le lias est formé de dolomies caractéristiques de cet étage, 20 m de marno –calcaire et 25 m de marne grise, au Djebel Tarbent. Cet étage est constitué par une épaisse masse calcaire dolomitique mal litée qui a une épaisseur de 400 m.

▪ **Trias (t) :**

Au Nord, il affleure au Djebel Amsid juste à la base de la nappe allochtone sud sétifienne. L’affleurement du Trias au Djebel Amsid souligne un contact anormal plat. Il se trouve aussi entre les deux lacs (Chott Tinsilt et Sebkhet Ez- Zemoul) sous forme d’une bande de direction Nord – Sud, sur laquelle est construite la route nationale N° 20 qui relie Constantine à Batna. Au sud de la ville d’Ain Yagout, se sont des marnes bariolées et des gypses bréchiques. Un seul affleurement d’ophite a été repéré près des lacs.

II.4. Description structurale et tectonique :

La structure et la forme des réservoirs ont été conditionnées par la tectonique. La région est limitée par la base de l’ensemble para autochtone et autochtone Aurassien Sud.

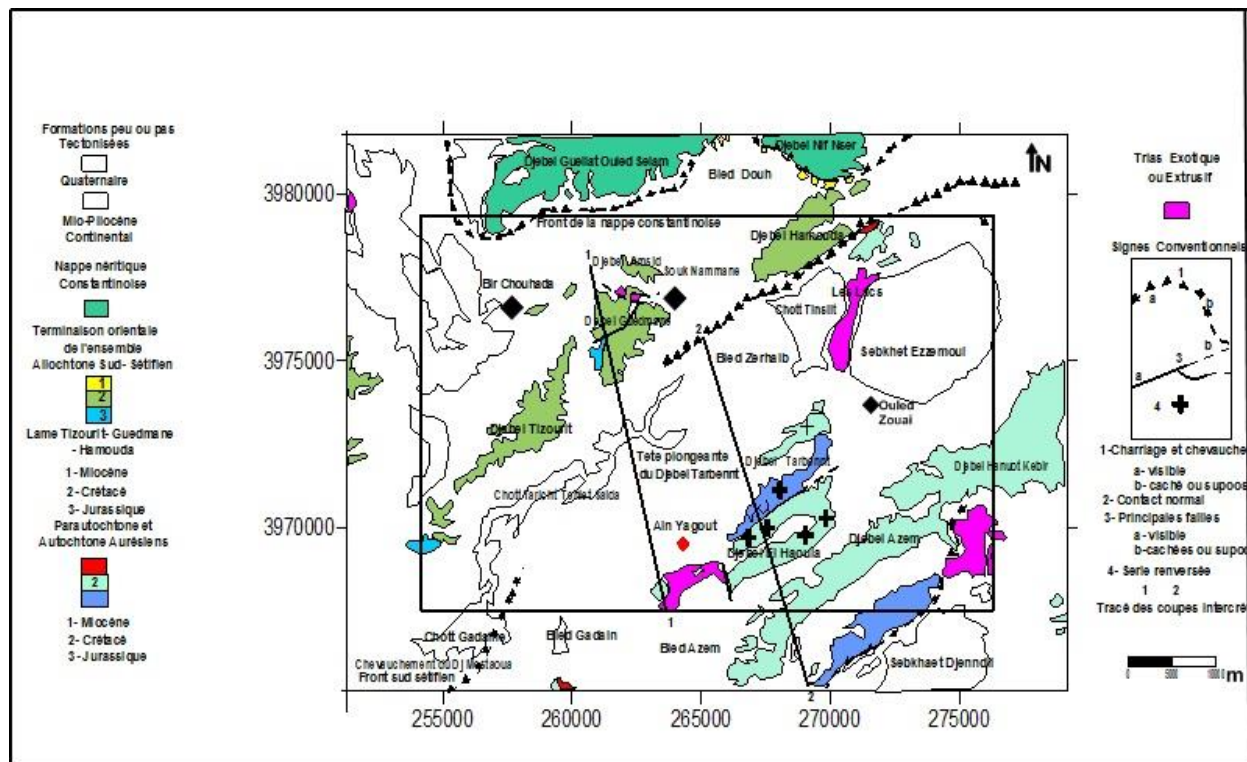


Figure 06 : Schéma structural (feuille d’Ain Yaghout 1/50000).

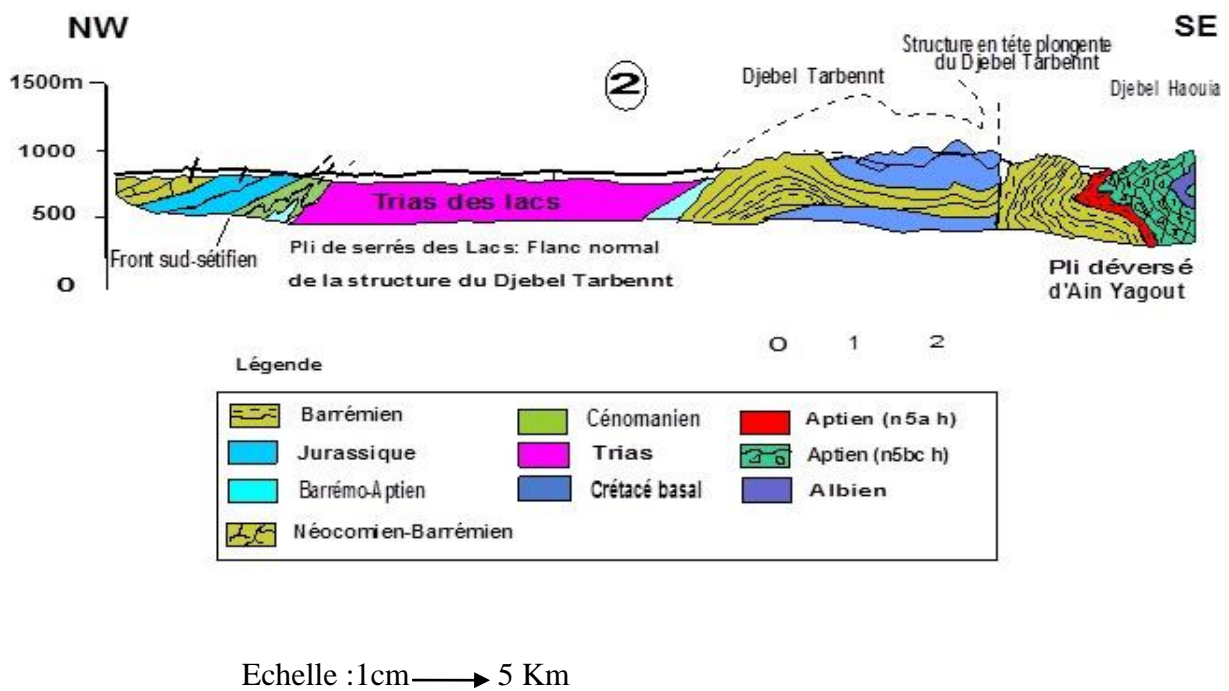
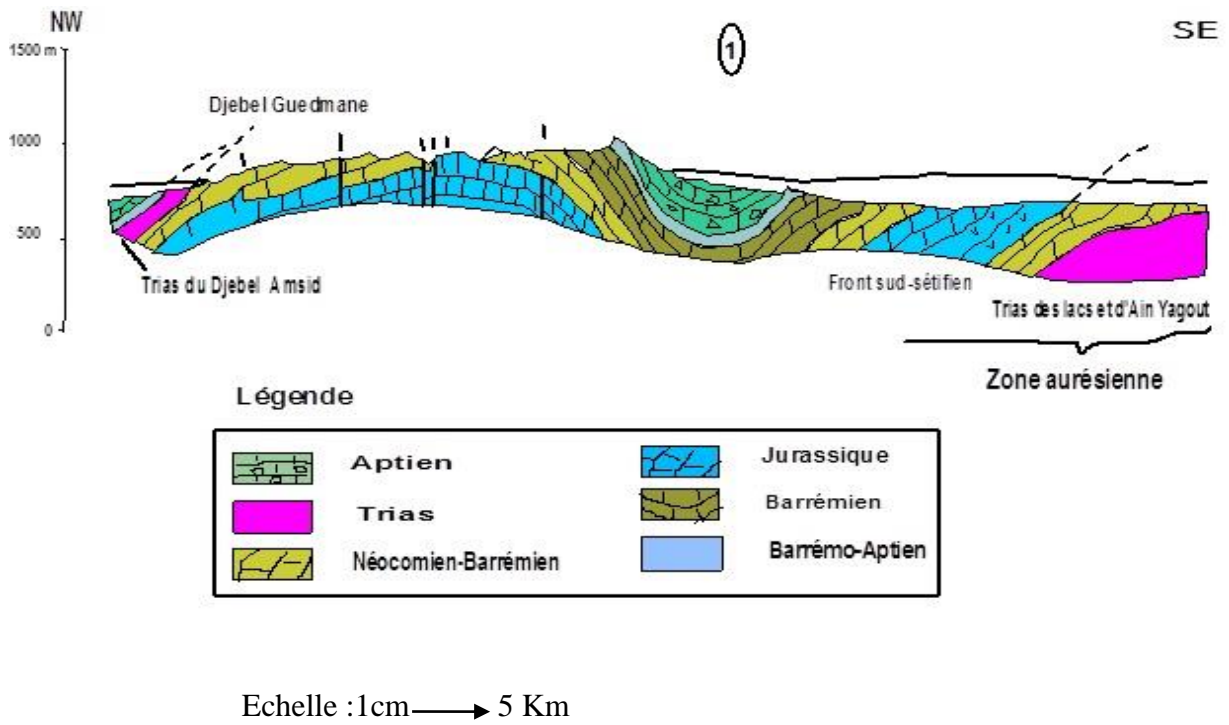


Figure 07: Extrait de la coupe géologique interprétative de (Ain Yaghout N°146) (SONATRACH, 1977).

II.4.1. Principales Phases Tectoniques :

L'histoire tectonique est caractérisée par deux phases principales :

a- La phase Atlasique:

Elle se manifeste dès la fin du Crétacé supérieur et atteint son paroxysme entre le Lutétien supérieur et le Miocène inférieur. C'est une phase priabonienne durant laquelle il y a un plissement des formations avec apparition d'anticlinaux et de synclinaux orientés SW-NE et NSE. Elle a conduit à l'apparition des premières nappes de charriage dans la zone septentrionale, formant ainsi, le domaine allochtone Sud Setifien.

b- La phase Alpine:

Cette phase majeure est surtout dominée par "la phase tortonienne" qui déforme la chaîne plissée probablement, elle affecte essentiellement le domaine parautochtone en créant de nouvelles nappes dans l'avant pays et conduit à l'apparition des plis emboîtés (plis de largeurs déca kilométriques, déformés en plan par des torsions simples, des décrochements cumulatifs ou par la combinaison de ces deux phénomènes. Elle est également responsable de grands cisaillements et de la genèse de structures en baïonnettes).

L'accumulation des sédiments plio-quatérnaires, rarement déformés, correspond à un comblement de relief dans le domaine des hautes plaines constantinoises et du pied des Aurès. Après le Tortonien supérieur deux phases successives de distension affectent l'édifice des nappes tortonienne en le plissant et en le faillant intensément, créant ainsi les reliefs actuels. Notons enfin que la phase de distension a dû s'accompagner de la mise en phase du Trias en relation avec les failles, ainsi que sous formes de diapir, alors que la phase de compression se traduit par des plis amples de directions NW-SE et NE-SW, et de pendage relativement faible.

II.4.2. Tectonique : deux groupes se distinguent :

- **Tectonique cassante** : Concerne les roches compactes, comme les dolomies et les calcaires, elle joue deux rôles importants :
 - Donne naissance aux fissures qui seront élargies par les eaux météoriques ce qui amène à la formation du Karst.
 - Donne naissance aux grands accidents (failles) qui vont jouer le rôle de drains d'eau en profondeur.

Cette tectonique est rencontrée dans la plaine de Bir Chouhada et Souk Namaane sous forme de horst et graben.

- **Tectonique souple** : Ce style concerne les roches incompetentes telles que les marnes et les marno-calcaires puisqu'elles donnent à ces roches des formes anticlinales et synclinales.

II.5. Formations aquifères :

A l'issue de la synthèse lithologique, nous pouvons, sur la base des informations relatives à la nature lithologique des terrains et des coupes de forages, distinguer les formations susceptibles d'être aquifères. Dans notre secteur d'étude on note la présence des ensembles réservoirs suivants:

▪ Les formations de recouvrement :

D'âge Mio quaternaire, formées de conglomérats, d'alluvions et de calcaires lacustres, ces formations constituent un ensemble réservoir important qui repose par endroit directement sur l'ensemble réservoir des dépôts carbonatés du Jurassique et du Crétacé inférieur. Les deux ensembles sont en plusieurs endroits séparés par des niveaux argileux et marneux. Ces derniers constituent le mur du réservoir mio-plio-quaternaire et le toit du réservoir des dépôts carbonatés jurassique et crétacé inférieur.

Cet aquifère est exploité par des puits et des forages peu profonds.

▪ L'ensemble du réservoir des dépôts carbonatés :

Les formations carbonatées de l'ensemble allochtone Sud Setifien telle que les formations du Crétacé inférieur comme l'Aptien (calcaires) et le Barrémien (calcaires et dolomies).

Les formations carbonatées de l'ensemble parautochtone et autochtone Aurésien telles que les formations du Crétacé comme le Cénomaniens, l'Aptien (calcaires) et le Barrémien (calcaires et dolomies). L'épaisseur totale est de 650 m et les formations du Jurassique, telles que celles rencontrées à une profondeur moyenne de 10 m sur les piémonts des massifs, et se trouvent à une grande profondeur au centre de la plaine.

Nous remarquons qu'il s'agit d'un réservoir épais très étendu sous la couverture qui peut jouer un rôle régional. Il comprend des aquifères des deux grands ensembles structuraux, l'allochtone Sud Setifien et le parautochtone et autochtone Aurésien, qui sont en relation avec les aquifères du Néritique Constantinois, soit directement, soit indirectement par les failles tangentielles et orthogonales majeures.

Tableau 01 : Log litho stratigraphique Synthétique.

	Formation	Lithologie	Lieu d’affleurement et l’intérêt hydrogéologique
Quaternaire	Eboulis de pente	Eboulis	Pointe sud du Djebel Hamouda Leur position topographique ne permet de les exploiter.
	Sol de Sebkha		Chotts Tinsilt, sebkhat Ez Zemoul et Taricht Teniet Saida.
	Limons salés périodiquement inondés	Limons	Bordent le Chott Tinsilt et la sebkhat Ez Zemoul.
	Sols salés anciens	Sols hydromorphes salés	
	Terres arables, formations de pente, alluvions anciennes et Quaternaires indéterminées	Limons, sables argiles, marnes, conglomérats, silts et graviers sur lesquels se sont installés des sols bruns.	Ils forment un aquifère qui est exploité par des puits de grand diamètre dans la région de Souk Naamane, Bir Chouhada et Ouled Zouai. Le débit des puits varie en moyenne entre 2 et 4l/s et rares sont les puits qui s’assèchent en étiage.
	Glacis polygéniques	Matériel élastique très fragmenté devenant plus anguleux et plus grossier au voisinage des reliefs.	Au voisinage des grands reliefs crétaqués. Il est peu exploité par des puits artisanaux en raison de la dureté de calcaire. Par contre il est exploité par de nombreux forages au NE de Bir Chouhada.
	Villafranchien		Douar Marouna.
Miocène	Mio-Pliocène continental	Conglomérat souvent mal cimenté jaunâtre ou rose argiles jaunâtres sableuses et calcaires lacustres mal stratifiés rosâtres ou blancs.	Douar Marouna à l’Est de Bir Chouhada et dans les Monts d’Ain Yagout.

Nappe Néritique constantinoise	Aptien.	Calcaires sombres en bancs réguliers de nature micritique.	Mechtat el Hemchir Djebel Guelaat Ouled Sellem.
Ensemble Allochtone Sud- Sétifien	Aptien	Calcaires massifs à patine gris-bleu à Méloïdés.	Djebel Hamouda.
	Barrémien- Aptien	Calcaire compact à cassure blanc marmoréenne.	
	Barrémien	Calcaires roux oolitiques Grés roux Calcaires lumachelliques Calcaires rognonneux intercalations de marnes sableuses ou argileuses grises ou gris-vert.	Djebel Guedmane.
	Néocomien Barrémien	Calcaire dolomitique avec à sa base un ensemble de grosses barres de calcaires roux oolitiques ou graveleux à intercalations de dolomies grises.	Kef Guessaa du Djebel Hamouda Djebel Guedmane.
	Jurassique supérieur	Calcaires massifs fins Calcaires massifs.	Djebel Guedmane Teniet Saïda Djebel Merzguéne.
	Miocène	Conglomérats rubéfiés polygéniques discordants Calcaires gréseux roux glauconieux et phosphatés.	Affleurement adjacent au Trias des Lacs. Sur le bord Nord de la Sebkhât EzZemoul.
Parautochtone et Autochton Aurésien	Céniacien	Marnes grises	Au Nord des Lacs sous les encroûtements villafranchiens ou le Quaternaire.
	Turonien	Marnes Biomicrocrites glauconieuses Calcaires massifs beiges	Au Nord de la Sebkhât Ez Zemoul.
	Cénomaniens supérieur et Turonien basal	Alternances de marnes grises et de calcaires bruns en gros bancs.	Au Nord de sebkhât Ez Zemoul.
	Cénomaniens	Alternances de marnes grises et de calcaires massifs.	Sebkhât Ez Zemoul.
	Albien	Grés gris ou brun clair à inter lits marno-gréseux Alternances de marnes verdâtres et de grés bruns, recouvertes par un niveau de grés ferrugineux un peu noduleux ou bréchoïde Marnes grises.	A la base de la série renversée du Djebel Tarbennt et sur le flanc Nord du pli déversé d'Ain Yagout au Djebel Hanout Kebir.
	Aptien calcaire	Calcaires riches en Miliodés	Arête Nord du Djebel Tarbennt

	Bancs dolomitiques ocre jaune Intercalations d'oosparites bioclastiques brunes.	le Djebel Houia, l'arête nord du Djebel Azem et les premières pentes du Djebel Hanout Kebir. Constituer un Aquifère à perméabilité de fissure qu'il est possible d'exploiter par des forages près des Douars El Hanchir.
Aptien marneux	Marnes de 70 à 80m d'épaisseur avec à la base quelques intercalations gréseuses et de marno-calcaires noduleux.	
Barrémien gréseux	Grès à intercalations dolomitiques ou biosparitiques de 200 à 250m d'épaisseur	Peut être atteint des forages profonds sur le versant Nord du Djebel Tarbenet. Son faciès grésocalcaires permet de supposer un aquifère intéressant.
Barrémien calcaro-dolomitique	Calcaire dolomitiques avec intercalations argileuses ou argilo silteuse et de petits niveaux de grés.	
Crétacé basal	Argile pelitique (800m écrasée et schistosée).	Djebel Tarbennt (au Nord-Est de Ain Yagout) Au Nord du Djebel Tournbait Douar Ouled Eoudjema
Berriasien et Valenginien	Marnes verdâtres à intercalations grésocalcaires micritiques.	Rass Tarbennt.
Jurassique calcaire	Marnes rosées et jaunes qui alternent avec des petits bancs de micrite écrasée (60m) Micrites (50m) Brèches intra-formationnelles.	Flanc Nord de l'anticlinal du Djebel Toumbait.
Jurassique marno-calcaires indifférencié	Calcaires écrasés (50m) Marno-calcaires rosés et jaunes écrasés.	Djebel Tarbennt.
Jurassique moyen	Calcaires à silex à pâte beige ou jaunâtre (40m) Sileux rougeâtres ou verdâtres au sommet Calcaires gris clair à schistosité à la base.	Flanc Nord de l'anticlinal du Djebel Toumbat Djebel Tarbennt
Marnes écrasées	Marnes schistosée	Djebel Tarbennt

	indifférenciées		
	Lias supérieur marneux	Marno-calcaires et des marnes calcaires à débit. Marnes esquilleuses gris clair à schistosité (25m).	Flanc Nord de l'anticlinal du Djebel Toumbait.
	Lias massif calcaro-dolomitique	Calcaire dolomitique sombre (400m) Intercalations de calcaires marmoréens à Algues.	Anticlinal du Djebel Toumbait, les hauteurs du Rass Tarbennt et du Djebel Tarbennt Shir Près d'Ain Yagout.
	Trias Exotique ou Extrusif	Argiles bariolées écrasées, lardées de masses gypseuses bréchiques ophite.	

III. Conclusion :

Les grands massifs montagneux de la région d'étude sont principalement constitués de formations rocheuses à dominante carbonatée et formant une série lithologique continue du Lias au Crétacé. Ces formations ont subi différentes phases de plissement notamment au cours de l'Eocène et qui s'étend jusqu'au Pliocène. Ces plissements ont des axes orientés Nord-Est Sud-Ouest, de même que les failles qui les accompagnent.

Les vastes étendues, rencontrées entre les massifs montagneux, sont constituées par des accumulations en surface de formations postérieures au Crétacé supérieur.

CHAPITRE II

Hydroclimatologie

I. Introduction :

L'étude hydro climatologique permet d'évaluer les éléments climatiques influençant le fonctionnement du système hydrogéologique et permet l'établissement du bilan hydrologique. Les données des paramètres climatiques, principalement la température et les précipitations, ont été collectées à la station climatologique d'Ain Skhouna qui est située à 24 km au Sud de la région d'étude (Tableau 02). Le traitement de ces données s'est effectué pour la période d'observation comprise entre 1998 et 2012.

Tableau 02 : Coordonnées de la station climatologique d'Ain Skhouna.

Station	X (m)	Y(m)	Z(m)	Longitude	Latitude
Ain Skhouna	832,300	274,200	831	6°22'	35°42'

Les données pluviométriques de la station de Bir Chouhada, située en plein centre de la région (Tableau 03), ont servi pour l'étude de l'évolution des précipitations.

Tableau 03 : Coordonnées de la station climatologique de Bir Chouhada.

Station	X (m)	Y (m)	Z (m)	Longitude	Latitude
Bir Chouhada	824,600	294,600	829	6°17'	35°53'

II. Cadre d'étude:

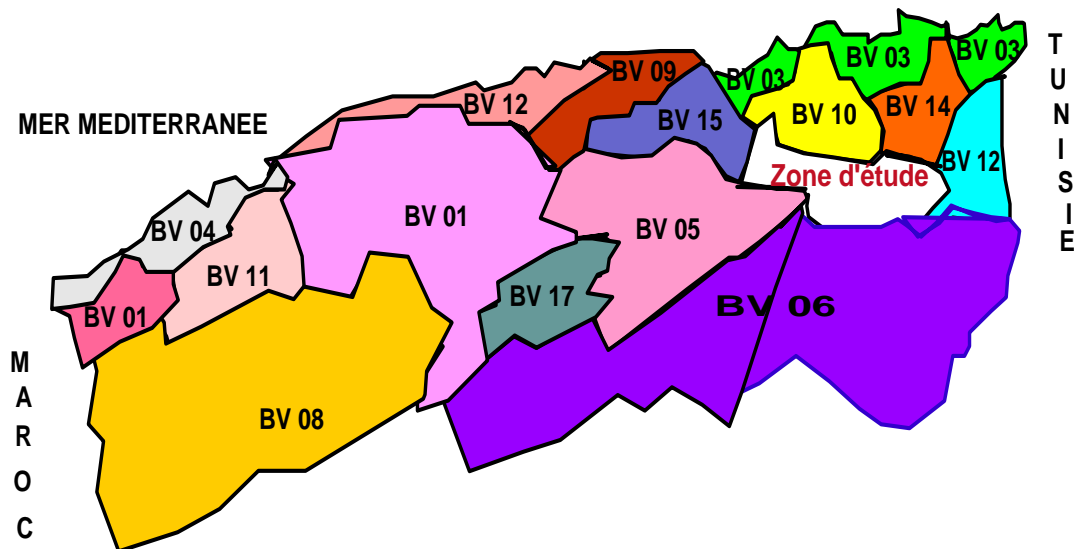


Figure 08 : Répartition des bassins versants.

La carte des bassins hydrologiques montre les limites des grands bassins hydrographiques de l'Algérie. Les régions de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai font partie du bassin versant des hauts plateaux Constantinois N°7, (selon la Codification de l'ANRH). Sa

superficie totale est de 9578 km². Le bassin N° 7 est subdivisée en sept sous bassin, la zone d'étude se localise dans le sous bassin N°3 et couvre une superficie de 530 km². Il est limitée au Nord par les monts des Djebels Taref, Guelaat Ouled Sellam, Guerouaou et au Sud Est par les monts des Djebels Tarbent, Haouia, Hanout el Kébir. Le réseau hydrographique est constitué par des oueds temporaires à l'exemple de l'Oued Ben Zerhaib. C'est un bassin endoréique.

III. Traitement des paramètres hydroclimatologiques :

- **Les précipitations** : station pluviométrique de BIR CHOUHADA (code 070305)
Série récente (1998 - 2012).
- **Les températures** : station climatologique de AIN SKHOUNA (code 0703 nm)
Séries récente (1998 - 2012).

III.1. Les précipitations :

Elles représentent la totalité de la lame d'eau recueillie (pluies, neiges, gelée ou n'importe quelle forme de condensation).

Le traitement des données recueillies a permis de tracer le graphique des hauteurs des précipitations moyennes mensuelles (Figure 09) :

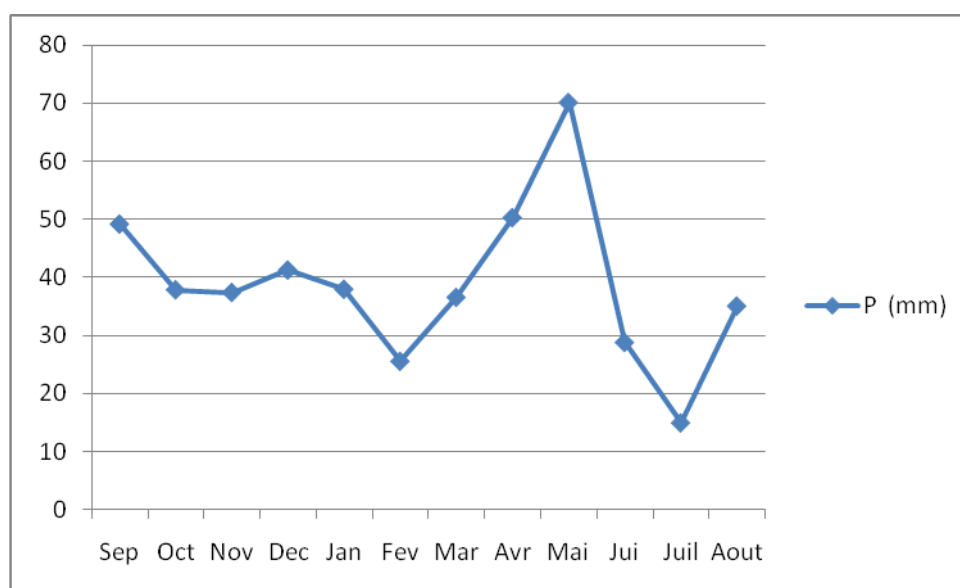


Figure 09 : Variation moyenne mensuelle des précipitations 1998-2012 à la station de Bir Chouhada.

Le mois le plus pluvieux est mai avec 70,1 mm, le mois le plus sec est juillet avec des précipitations de l'ordre de 15 mm. Les précipitations moyennes annuelles pour la station de Bir Chouhada sont de l'ordre de 465,3 mm.

L'année la plus pluvieuse est 2011, avec une moyenne annuelle de 53,69 mm. L'année 2000 reste la plus sèche avec une moyenne annuelle de 26,25 mm.

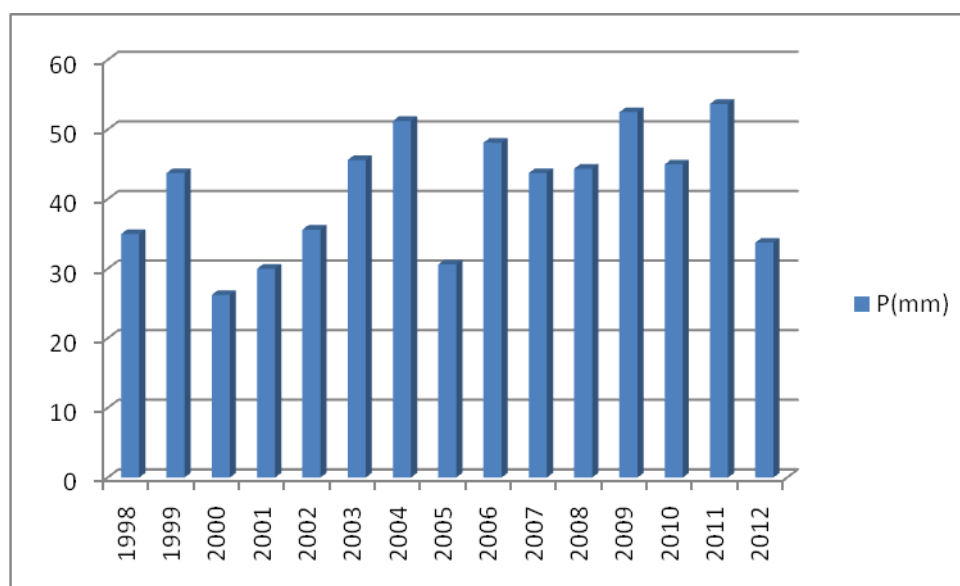


Figure 10 : Variation moyenne annuelle des précipitations 1998-2012 de la station de Bir Chouhada.

- **La répartition des précipitations moyennes mensuelles :**

Le tableau ci-dessous montre une forte variabilité inter mensuelle des précipitations pour la station de Bir Chouhada. Les maximas des précipitations ont lieu en Décembre, Avril et Mai et les minimas sont observés en Juillet.

La saison la plus humide est le printemps avec un pourcentage de 33.64% et la saison sèche est l'été avec un pourcentage de 17.20%.

Tableau 04 : Précipitations moyennes mensuelles (1998-2012).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	TOTAL (mm)
1998-2012	49,37	36,87	36,45	42,85	38,75	24,37	36,35	50,1	70,1	28,85	16,25	35	465,3
Saison	122,69			105,97			156,55			80,05			
	26,36%			22,77%			33,64%			17,20%			

III.2. Les températures :

La température de l'air à une grande influence sur l'évapotranspiration qui favorise le déficit d'écoulement.

Les mesures de la température ont été effectuées à la station d'AIN SKHOUNA sur une période de 15 ans 1998-2012. Le graphique montre la variation mensuelle des températures (Tableau 05 et Figure 11).

Tableau 05 : Températures moyennes mensuelles en (C°) à la station d'Ain Skhouna (1998-2012).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Moy
1998-2012	21,88	17,65	11,88	7,55	6,85	7,23	11,59	14,46	18,95	25,8	27,37	26,98	16,5

Le graphique des températures moyennes mensuelles montre nettement que le mois le plus chaud est le mois de juillet avec 27.37 C°, alors que le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température de 6.85 C° (Figure 04).

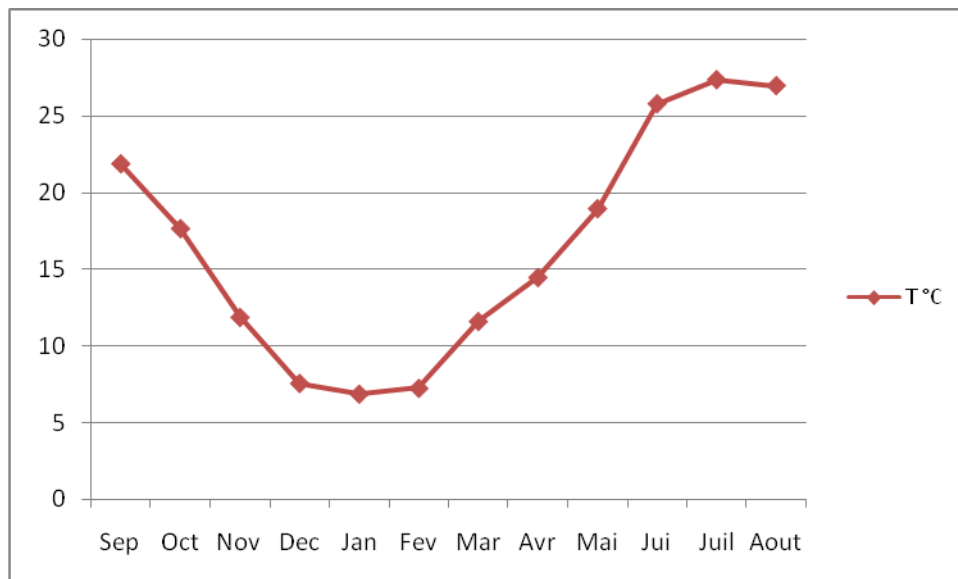


Figure 11 : Variations moyennes mensuelles des températures 1998-2012 de la station Ain Skhouna.

L'année la plus froide est 1998, avec une moyenne annuelle de 15,2°C et l'année 2001 étant la plus chaude avec une moyenne annuelle de 16,55°C (Figure 05).

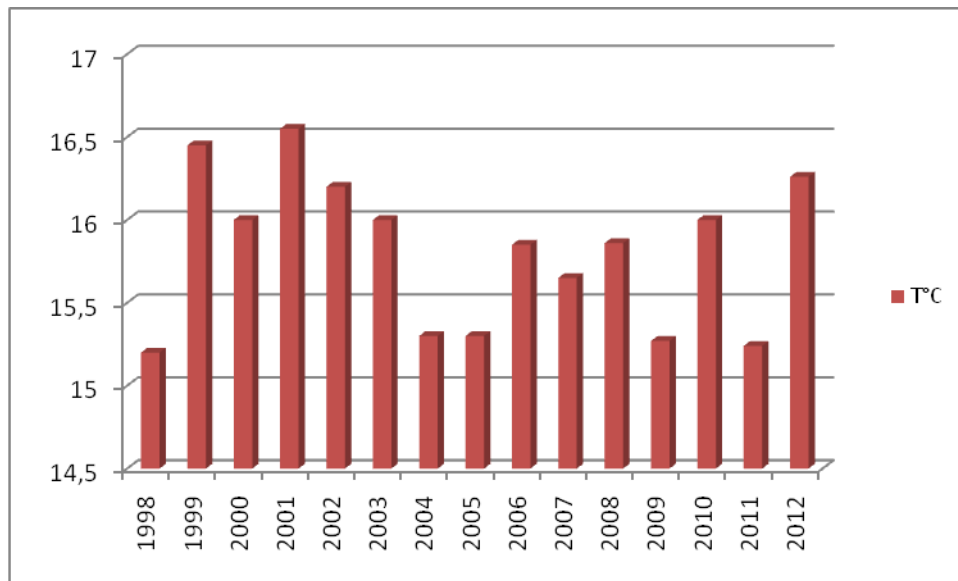


Figure 12 : Variations moyennes annuelles des températures 1998-2012 de la station Ain Skhouna.

III.3 Autres paramètres :

Il y a d'autres indices qui sont susceptibles de donner une approche plus ou moins complète du climat de la région d'étude, et que nous exposerons ci-après.

III.3.1. Indice De MARTONNE ou indice d'aridité :

En 1923, E. DE MARTONNE, se basant sur la distribution des précipitations et des températures, a proposé de classer les stations d'observations selon un indice d'aridité (A):

$$A = P/T + 10 \quad (1)$$

A : Indice d'aridité ou MARTONNE.

P : Précipitations moyennes mensuelles (465,3 mm).

T : Températures moyennes Annuelles (15,8 C°).

$$A = 18,03$$

Suivant les valeurs de (I), **De Martonne** a établi la classification suivante :

$I < 5$: climat hyperaride.

$5 < I < 7,5$: climat désertique.

$7,5 < I < 10$: climat steppique.

$10 < I < 20$: climat semi-aride.

$20 < I < 30$: climat tempéré.

Selon l'indice De MARTONNE les stations qui ont un indice d'aridité compris entre 10-20 sont des stations avec un climat semi - aride.

Indice d'aridité mensuel :

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$I=12P/T +10 \quad (2)$$

I : Indice d'aridité mensuel.

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm.

T : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule (2) a permis de dresser le tableau 06.

Tableau 06 : Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Bir Chouhada et Ain Skhouna.

Mois	I	Etage bioclimatique
Sep	18,51	Semi-aride
Oct	16,44	Semi-aride
Nov	14,4	Semi-aride
Dec	28,23	Tempéré
Jan	27,06	Tempéré
Fev	17,18	Semi-aride
Mar	20,34	Tempéré
Avr	24,72	Tempéré
Mai	29,05	Tempéré
Jui	9,86	Steppique
Juil	4,81	Hyperaride
Aout	11,38	Semi-aride

Selon la classification **De Martonne**, les mois de septembre, octobre, novembre, février et août présentent un climat semi-aride. Les mois de décembre, janvier, mars, avril et mai ont un climat tempéré. Le mois de juin est caractérisé par un climat steppique, alors que le mois de juillet devient hyperaride.

III.3.2. Climagramme de L. EMBERGER :

Pour préciser les conditions climatiques de la région d'étude, nous avons utilisé le Climagramme de L. EMBERGER pour l'étude des climats méditerranéens. Le Climagramme comporte en ordonnée les valeurs du coefficient Q qui sont données par la relation suivante :

$$Q=P \times 2000 / (M+m) (M-m) \quad (3)$$

Q : désigne le coefficient pluviométrique d'Emberger.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm (465,3 mm).

M : moyenne des T maximales du mois le plus chaud (27.37 C°).

m : moyenne des T minimales du mois le plus froid (6.85 C°).

La superposition des deux paramètres Q et T (min) sur l'abaque de L.EMBERGER, permet la description du climat : c'est un climat semi-aride à hiver tempéré.

Q=49.12

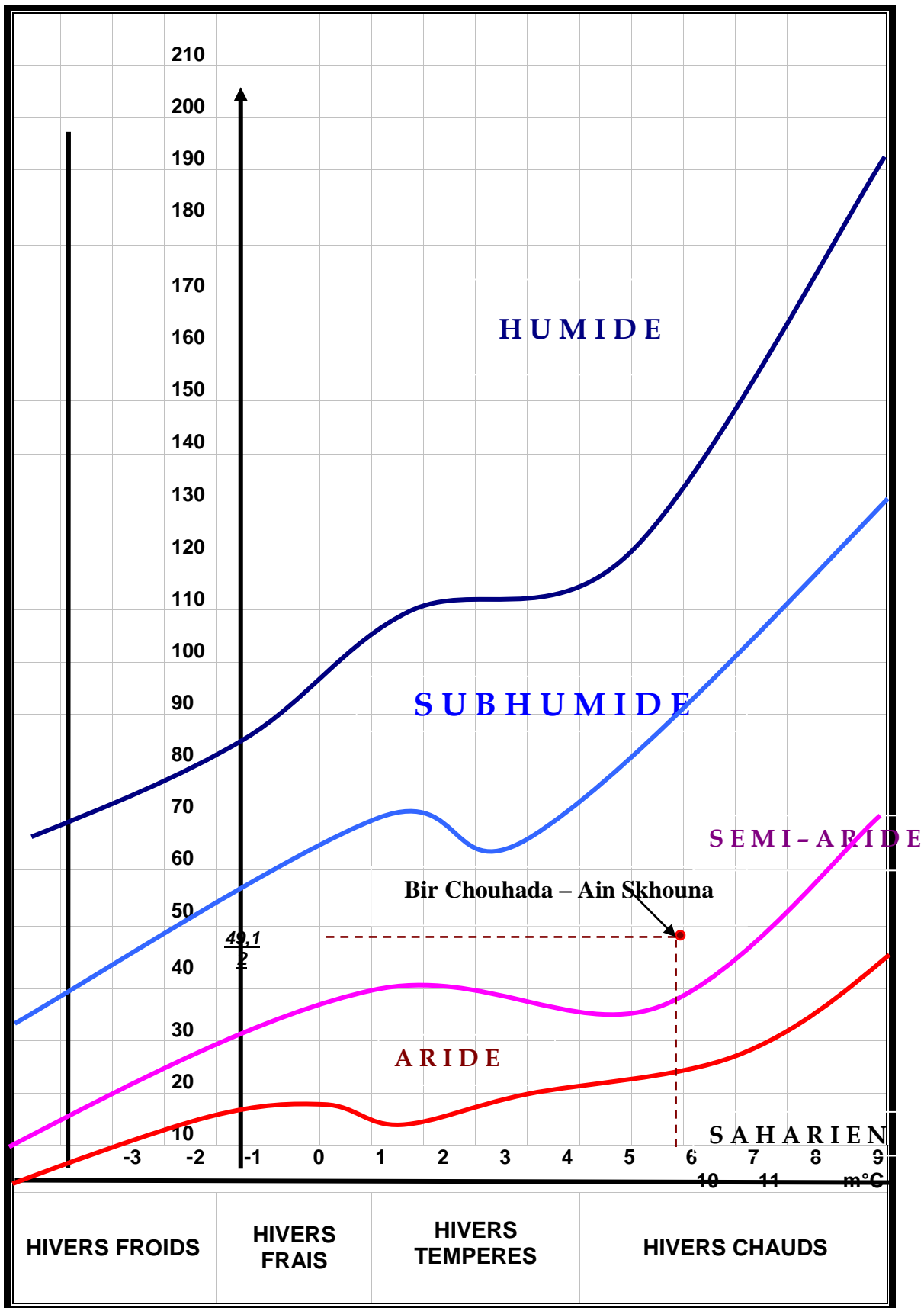


Figure 13 : Diagramme Climagramme L. EMBERGER

III.3.3. Indice de Paul Moral :

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C. L'indice est calculé selon la formule suivante :

$$IM = P / (T^2 - 10T + 200) \quad (4)$$

Si $IM < 1$ on a climat sec et si $IM > 1$ on a climat humide.

Pour

$$P = 465,3 \text{ mm}$$

$$T = 15,8 \text{ °C}$$

Ce qui donne

$$IM = 1,5$$

On peut dire que le climat de la zone d'étude est à la limite du climat sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride.

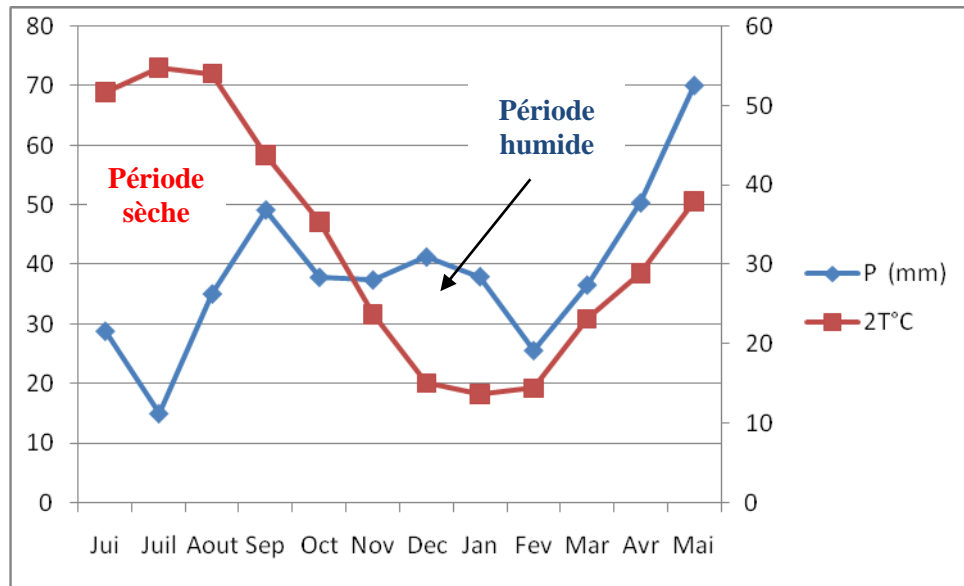
IV. Relation Température– Pluies :

IV.1. Diagramme Ombro-thérométrique de GAUSSEN et BAGNOULS :

Selon la définition de GAUSSEN et BAGNOULS, une période sèche est celle pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température du même mois : $P \leq 2 T$.

Cette relation, permet d'établir un diagramme Ombrothermique, sur lequel les précipitations sont portées sur une échelle double des températures. Le graphe obtenu à partir des données des deux stations (AIN SKHOUNA et BIR CHOUHADA) met en évidence une période sèche, cette dernière qui s'étale du mois de juin jusqu'au mois octobre (5 mois) et une période humide débutant au mois de novembre qui se termine au mois de mai.

La connaissance de cette période à une grande importance pour déterminer la période déficitaire en eaux, pendant cette période, il faut prévoir des besoins en eaux pour l'irrigation.



**Figure 14 : Diagramme Ombrothermique de H.Gaussen et F.Begaouls
Station de Bir Chouhada et Ain Skhouna.**

IV. 2. Méthode d’EUVERT (humidité du sol) :

Le rapport P / T établi mensuellement, permet de connaître l’évolution de l’humidité du sol.

Il permet également de définir trois (03) types de régime :

- a- Régime très sec où le rapport P/T est inférieur à 1.
- b- Régime sec où le rapport P/T est compris entre 1 et 2.
- c- Régime humide où le rapport P/T est supérieur à 3.

Selon le tableau ci-dessous, il en ressort que la période sèche s’étale d’Avril à Novembre. Ce résultat est plus proche de celui déterminé par Gaussen et Bagnouls.

Tableau 07: Humidité du Sol

Mois	Sep	Oct	Nov	DEC	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	ANN
P mm	49,2	37,9	37,45	41,3	38	25,6	36,6	50,4	70,1	28,85	15	35,1	465,3
T C°	21,88	17,65	11,86	7,55	6,85	7,23	11,59	14,46	18,95	25,8	27,37	26,98	16,5
P/T	2,14	2,04	3,15	7,89	5,54	3,54	3,15	3,48	3,69	1,11	0,54	1,3	
	SUB-SEC		HUMIDE							SEC	TRES SEC	SEC	

IV.3. Calcul l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement :

L'évapotranspiration est la somme de toutes les pertes par transpiration de l'eau en vapeur, résultante de deux phénomènes : l'un est physique c'est l'évaporation et l'autre est biologique c'est la transpiration. Donc l'ETR est toujours inférieure ou égale à l'ETP.

Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre :

a. Méthode de Turc :

Cette formule est applicable à tous les climats. Elle est en fonction des précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles. Elle s'exprime comme suit :

$$\text{ETR} = P / \sqrt{0.9 + p^2 / L^2} \quad (5)$$

P : Précipitations moyennes annuelles (465,3 mm).

T : Température moyenne annuelle (15.8 C°).

L : paramètre dépend de la température.

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3.$$

$$\text{ETR} = 392,9 \text{ mm.}$$

b. Formule de Coutagne :

Coutagne a établi une relation permettant de calculer le déficit d'écoulement ; elle fait intervenir les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles. Elle s'écrit de la façon suivante :

$$\text{ETR} = D = P - \lambda P^2 \quad (6)$$

D : Déficit d'écoulement Annuel.

P : Précipitations moyennes annuelles.

T : Températures moyennes annuelles.

$$\lambda = 1 / 0.8 + 0.14 T.$$

Cette formule n'est applicable que lorsque : $1 / 8\lambda \leq P \leq 1 / 2\lambda$.

Le calcul à partir de l'équation précédente a donné $\lambda = 0.33$.

Donc $0.36 \leq P \leq 1.74$, la formule est applicable :

$$\text{ETR} = D = 0.4653 \text{ m} - 0.0714 \text{ m.}$$

$$\text{ETR} = 393,86 \text{ mm soit } 84.64 \% \text{ des précipitations.}$$

c. Méthode de VERDEIL :

Comme WUND, VERDEIL a établi lui même un abaque permettant de calculer le déficit d'écoulement qui a donné : **ETR = 393 mm.**

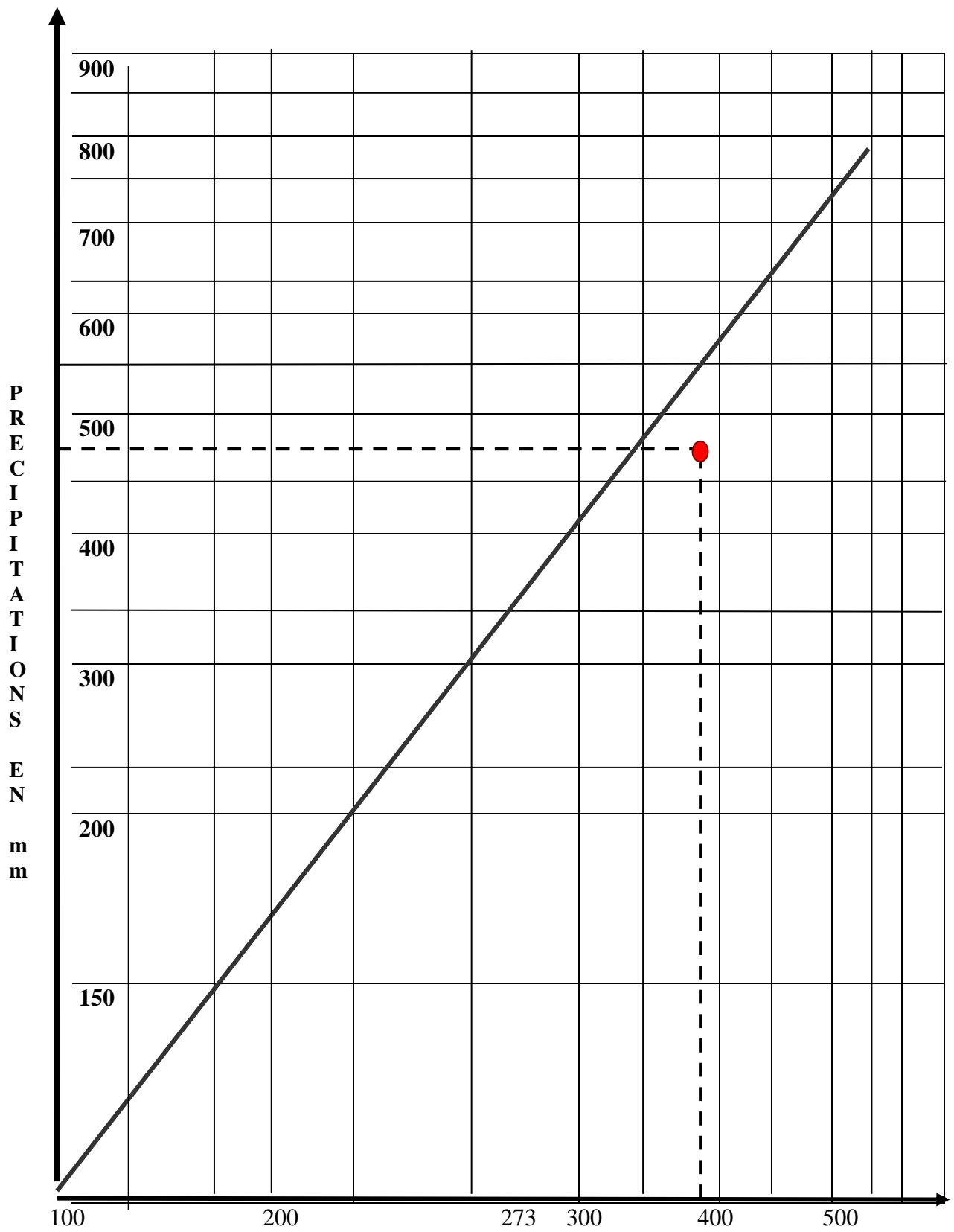


Figure 15 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (P.VERDEIL 1909/1988).

d. Méthode de THORNTHWAITE :

L'ETP selon G.W. THORNTHWAITE, représente la quantité d'eau qui sera évaporée, transpirée, si la réserve en eau était suffisante pour compenser les apports maximaux. Pour calculer l'ETP, on a utilisé les données de la station d'AIN SKHOUNA pendant la période 1998 – 2012 (Figure 08 et Tableau 08).

Se basant sur des expériences réalisées sur divers climats semi humides et semi arides, Thornthwaite propose la détermination de l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme suit :

$$\text{ETP mm} = 16 (10. t / I)^a \quad (7)$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad \text{ou, } i = (t / 5)^{1.514} \quad \text{et } a = 0.016. I + 0.5.$$

On a calculé pour chaque mois l'indice i et on a pu tracer le tableau suivant :

Tableau 08 : Indice mensuel (i) et ETP (mm)

MOIS	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	TOTAL
P mm	49,2	37,9	37,45	41,3	38	25,6	36,6	50,4	70,1	28,85	15	35,1	
T C°	21,88	17,65	11,86	7,55	6,85	7,23	11,59	14,46	18,95	25,8	27,37	26,98	
i	9.34	6.75	3.69	1.86	1.61	1.74	3.57	4.96	6.58	11.99	13.11	12.83	78,03
ETP mm	96,22	66,20	33,15	15,10	12,75	14,01	31,84	46,80	74,92	128,17	142,05	138,54	800

$$I = \sum_1^{12} i \quad \rightarrow \quad I = 78.03$$

$$a = 0.016. I + 0.5 \quad \rightarrow \quad a = 1.74.$$

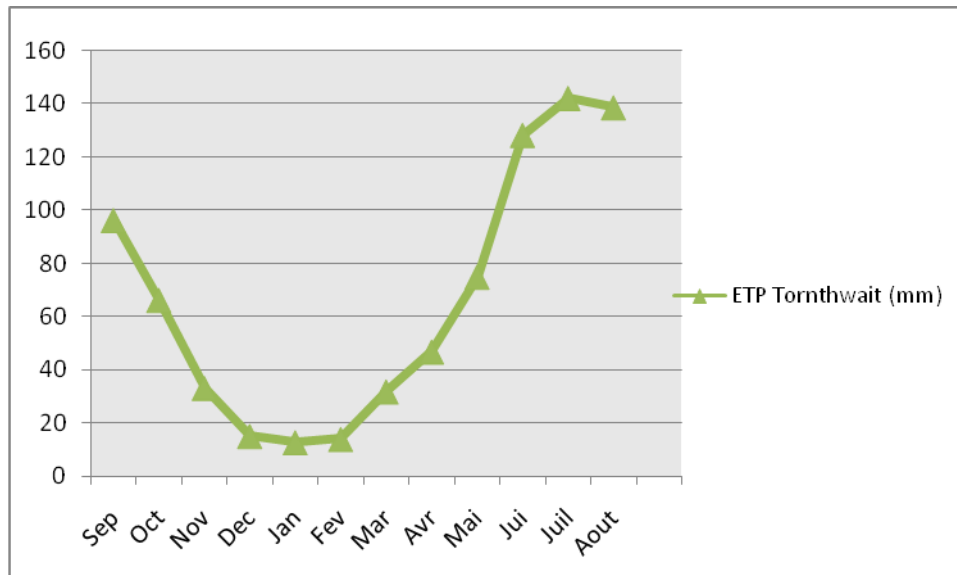


Figure 16 : L'ETP estimée par la méthode de Thornthwaite.

IV.4. L'évapotranspiration réelle ou ETR :

L'évapotranspiration réelle ou ETR représente la quantité d'eau évaporée ou transpirée réellement, soit par le sol, soit par les surfaces libres, soit par la végétation dans les conditions naturelles.

Lorsque les précipitations sont supérieures à l'ETP, l'évapotranspiration réelle (ETR) serait égale à l'ETP.

Le surplus d'eau disponible sera emmagasiné dans le sol jusqu'à ce que soit atteinte la capacité de rétention. Au delà il y aura un excédent.

Lorsque les précipitations sont inférieures à l'ETP, deux cas peuvent se présenter :

- Aussi longtemps que la réserve utile (RFU) sera capable de combler la différence entre les précipitations et ETP, l'ETR sera égale à l'ETP.
- Au de là l'ETR sera égale à P, il y aura apparition du déficit agricole (DA).

D'après Thornthwaite le bilan hydrologique mensuel peut être établi avec l'intégration des précipitations (P) et ETP pour estimer les paramètres suivants :

- L'évapotranspiration réelle ETR.
- La réserve facilement utilisable RFU.
- Le déficit agricole DA.
- L'excédent (water surplus) EX.

L'application numérique a donné → **ETP = 800 mm**

Tableau 09 : Bilan Hydrique pour la période 1998-2012 selon la formule de C.W. Thornthwaite.

	T°C	IT	CL	ETPC	P	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
	(mm)											
S	21,9	9,3	1,03	99,4	49,2	37,9	37,5	0,0	0,0	49,2	50,2	0,0
O	17,7	6,8	0,97	64,1	37,9	-26,2	-0,4	0,0	0,0	37,9	26,2	0,0
N	11,9	3,7	0,86	28,2	37,45	9,3	0,3	9,3	9,3	28,2	0,0	0,0
D	7,55	1,9	0,81	12,0	41,3	29,3	2,5	29,3	38,6	12,0	0,0	0,0
J	6,85	1,6	0,87	10,8	38	27,2	2,5	27,2	65,8	10,8	0,0	0,0
F	7,23	1,7	0,85	11,6	25,6	14,0	1,2	14,0	79,8	11,6	0,0	0,0
M	11,6	3,6	1,03	32,4	36,6	4,2	0,1	4,2	84,0	32,4	0,0	0,0
A	14,5	5,0	1,10	51,1	50,4	-0,7	0,0	-0,7	83,3	51,1	0,0	0,0
M	19	7,5	1,21	90,6	70,1	-20,5	-0,2	-20,5	62,8	90,6	0,0	0,0
J	25,8	12,0	1,22	157,4	28,85	-128,6	-0,8	-62,8	0,0	91,7	65,7	0,0
J	27,4	13,1	1,24	177,6	15	-162,6	-0,9	0,0	0,0	15,0	162,6	0,0
A	27	12,8	1,16	162,0	33,1	-128,9	-0,8	0,0	0,0	33,1	128,9	0,0
Annuel	16,5	79,0		897,1	463,5	-345,5				463,5	433,6	0,0

• **Interprétation des résultats fournis par le tableau de CW.Thornthwaite :**

Nous constatons qu'à partir du mois de décembre les précipitations sont supérieures à l'ETP.

La RFU atteint son maximum aux mois de décembre, janvier, février, mars, avril et mai avec un excédent de 75,6 mm durant toute l'année.

A partir du mois de juin nous enregistrons un déficit agricole de 65,7 mm et qui atteint son maximum en juillet avec 162.6 mm. L'ETR est égale à 463,5 mm.

Enfin le déficit est de 433.6 mm et la période sèche commence au mois de mai et se poursuit jusqu'au mois de novembre (Tableau 09 et Figure 17).

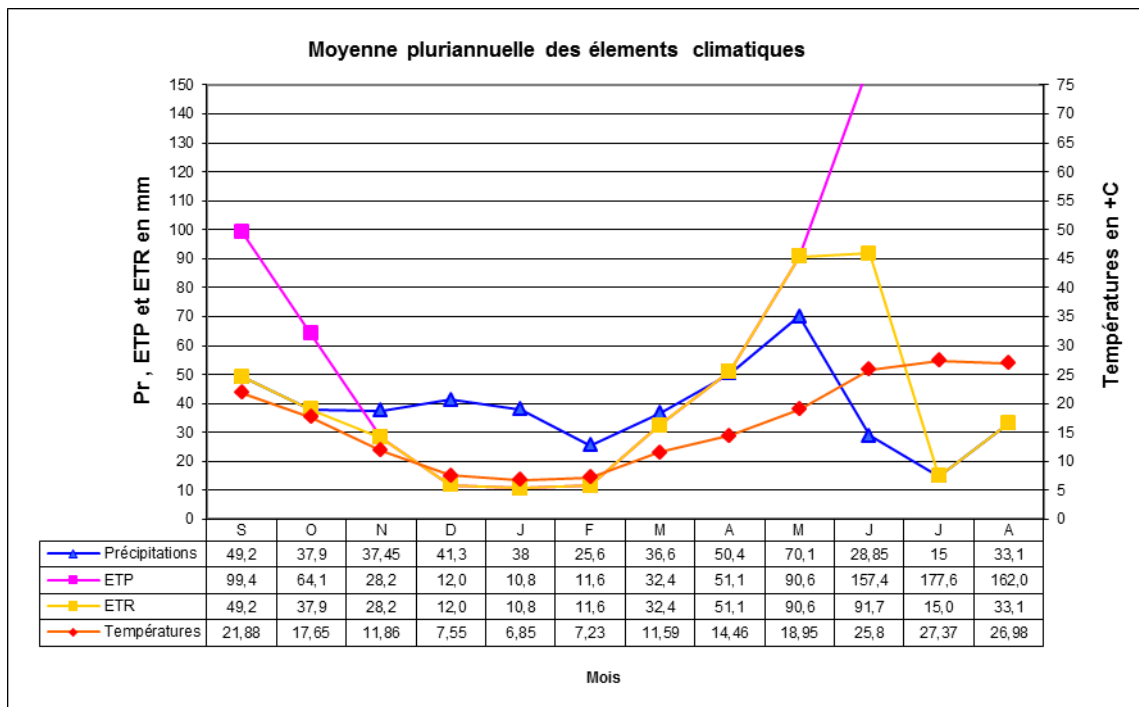


Figure 17 : Bilan hydrologique à la station de Bir Chouhada par la méthode de Thornthwaite pour la période 1998 -2012.

IV.5. Calcul du ruissellement (R) et de l’infiltration (I) :

En 1961, M.T. TIXERON et BERKALOFF ont donné une relation permettant de calculer le ruissellement à partir des précipitations moyennes annuelles et de l'évapotranspiration potentielle calculée selon la méthode de TORNTHWAITE :

$$R = P^3 / 3(ETP)^2 \tag{8}$$

R : Ruissellement en mm.

P : Précipitations Moyennes Mensuelles. (465,3 mm).

ETP : Evapotranspiration Potentielle en mm (799,75 mm).

L'application numérique de cette formule a donné : **R = 52,64 mm**

La valeur du ruissellement est de l'ordre de 52,64 mm, ce qui correspond à 11,31 % des précipitations moyennes annuelles.

IV.6. Essai du bilan hydrologique :

L'équation représentative du bilan peut s'annoncer sous la forme suivante :

$$I = EX - R \quad (9)$$

EX (mm) : excédent

R : Ruissellement de surface (mm).

I: Infiltration (mm).

$$I = 75,6 \text{ mm} - 52,64 \text{ mm} = \mathbf{22,96 \text{ mm.}}$$

Tableau 10 : Valeurs des éléments du bilan hydrique

Précipitation (P)		Evapotranspiration réelle (ETR)		Ruissèlement (R)		Infiltration (I)	
(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%
465,3	100	390,88	83,8	52,64	11,31	22,96	4,93

V. Conclusion :

Au terme de ce chapitre, il apparaît que la région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride avec un hiver frais et un été sec.

- Les précipitations moyennes annuelles dans la région de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai sont de l'ordre de **463,5 mm**. Nous avons observé une irrégularité intermensuelle des précipitations. Le mois le plus pluvieux est mai avec 70,1 mm. Le mois le plus sec est juillet avec 15 mm.
- La température moyenne annuelle est de l'ordre de **16.5 C°** avec une basse température en hiver de 6.85 C° surtout en janvier et une forte température de l'ordre de 27.37 C° l'été au mois de juillet.
- Le déficit des précipitations est de **433.6 mm**, et commence à se faire sentir au mois de juin et se prolonge jusqu'au mois de novembre.
- La lame d'eau ruisselée, est de l'ordre de **52.64 mm**, soit 11.31 % des précipitations moyennes annuelles.
- L'infiltration calculée est relativement faible avec **22.96 mm**, due probablement à la nature des terrains et à la morphologie de l'ensemble de la région.

Généralement, la zone d'étude est caractérisée par un climat semi - aride avec une période sèche qui débute à la fin mai jusqu'à octobre. Pendant cette période, l'irrigation des terres devient nécessaire pour les cultures, car le déficit en eau se fait réellement sentir.

CHAPITRE III

Caractéristiques physiques et hydrogéologiques

Partie I : Caractéristiques physiques des aquifères

I. Introduction:

L'étude de la structure et de la géométrie des aquifères définis ci-dessus se fera par l'interprétation des résultats de l'étude géophysique et des colonnes stratigraphiques des forages.

Cette synthèse des travaux géophysiques est établie dans le but de connaître la structure et la géométrie des ensembles géologiques connus pour leurs caractéristiques aquifères. De plus, nous tenterons par l'interprétation des données des forages récents de préciser la cohérence des résultats géo électriques avec ceux des coupes lithologiques. Il s'agit là, du seul élément d'information, à défaut des données brutes des SEV, que nous pouvons exploiter pour tenter de réinterpréter cette étude géophysique.

En effet, une étude par prospection géophysique a été effectuée dans la haute plaine de Bir Chouhada et Souk Naamane; elle a été réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique suite à la demande de la direction de l'hydraulique et de l'équipement rural où deux prospections électriques ont été réalisées:

- La première en 1961 et concerne l'étude structurale par prospection électrique de la haute plaine de Levasseur et Rouget de l'Isle (sur les flancs Nord de Djebel Guedmane.)
- La deuxième en 1969 et couvre la partie sud de Djebel Guedmane et Tizourit afin de prospecter les chotts Gaine et Saboune et la plaine d'El Madher.

II. Prospection électrique de la haute plaine de Bir Chouhada(Levasseur) et Souk Naamane (Rouget de l'Isle) :

La superficie de la zone prospectée est d'environ 120 km². Elle comporte 219 sondages électriques avec une longueur de ligne AB atteignant 8000 m. Le programme initial comporté l'exécution de 7 profils de sondages électriques dans la zone de Bir Chouhada et de 5 profils dans la zone de Souk Naamane avec un profile intercalaire et d'autres prolongés, de manière a réunir les deux zones. Généralement, ils sont désignés par les lettres A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N et P. l'azimut est en général Nord 163 grades Est avec un espacement variant de 1000 m à 1500 m. Sur chaque profil, les sondages électriques sont équidistants d'environ 500 m et parfois de 1000 m.

Le but de cette prospection est de déterminer l'allure du toit des calcaires et des dolomies du Crétacé inférieur sous le Crétacé supérieur marneux, le Tertiaire marin et le Mio Pliocène continental.

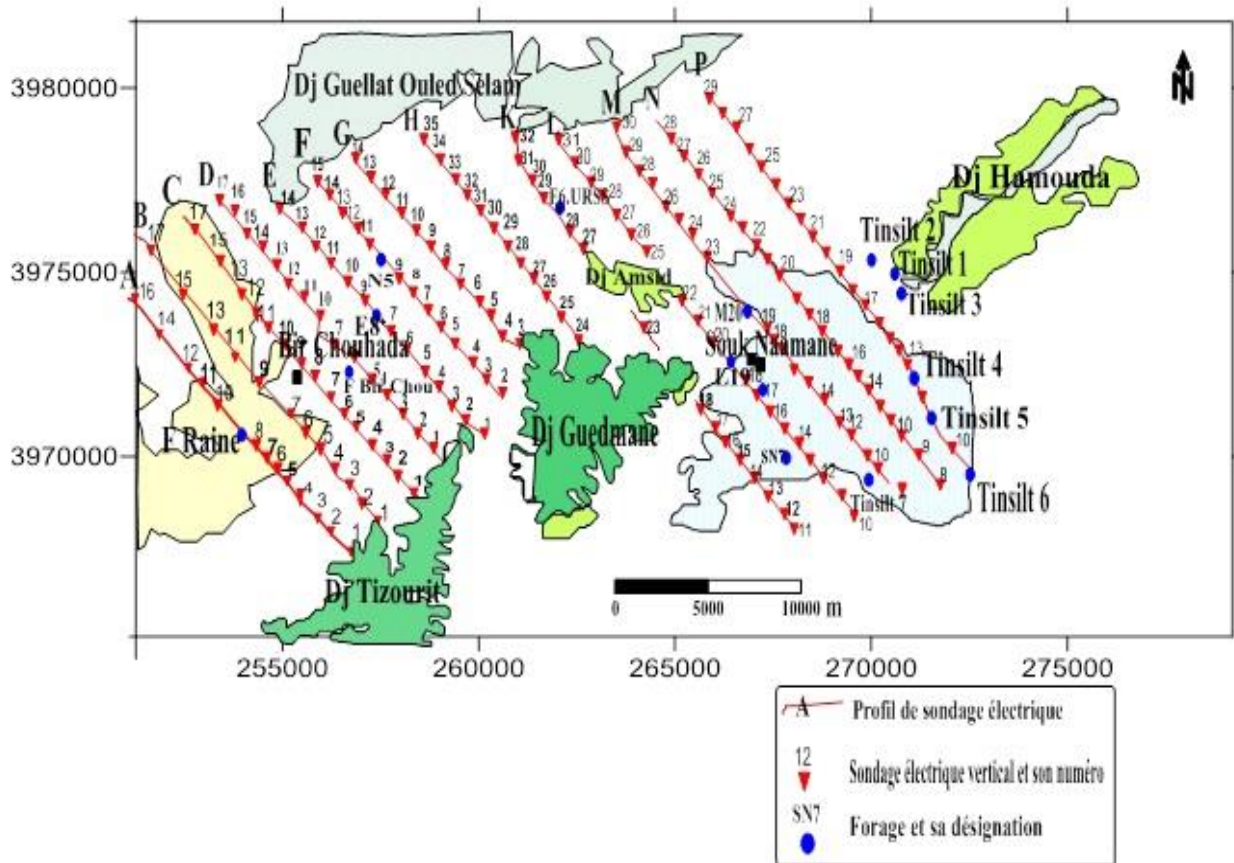


Figure 18 : Carte de situation des sondages électriques dans la région de Bir Chouhada -Souk Naamane (D'après CGG (1970)).

II.1. Les sondages électriques d'étalonnage :

Sept sondages électriques d'étalonnage ont été exécutés à l'endroit des forages existants. Ces sondages ont permis de comparer les formations existantes et leur résistivité en $\Omega.m$.

Les caractéristiques de ces forages sont compilées dans le tableau suivant:

Tableau 11 : Caractéristiques lithologiques des forages utilisés pour les sondages étalons.

Forages	X (m)	Y (m)	Formation captée
Tinsilt N2	837.25	296.6	Mio-Plio-Quaternaire
TinsiltN3	837.9	295.8	Mio-Plio-Quaternaire et Crétacé inférieur
Bir Chouhada N1	824.9	294.27	Crétacé inférieur
Tinsilt N4	838.5	293.35	Mio-Plio-Quaternaire et Crétacé supérieur
TinsiltN5	838.85	292.3	Mio-Plio-Quaternaire
Tinsilt N6	839.6	291.4	Mio-Plio-Quaternaire
TinsiltN7	837.2	291.4	Mio-Plio-Quaternaire et Crétacé inférieur

Les sondages électriques étalons réalisés au voisinage de ces forages ont permis une corrélation entre les données géo électriques et lithologiques.

Comme le montrent les tableaux suivants:

Tableau 12 : Etalonnage au voisinage du forage Tinsilt N°3.

Profondeur en (m)	Nature lithologique	Résistivité en ohm.m
0-9.50	Argile et galets	30
9.5-23	Calcaire	>100
23-38	Grés	>100
38-66	Marnes et marno-calcaires	<100
66-73	Calcaire marneux	100

Tableau 13 : Etalonnage au voisinage du forage Bir Chouhada N°1.

Profondeur en (m)	Nature lithologique	Résistivité en ohm.m
0-16	Terres et argiles	45
16-40	Marnes et calcaires lacustres	20
40-57	Calcaire sub-récifal	100

Tableau 14 : Etalonnage au voisinage des forages Tinsilt N° 5, 6 et 7.

Forages	Nature lithologique	Résistivité en ohm-m
Tinsilt N°5 et 6	Calcaires lacustres (eau chargée à 4g/l)	15
Tinsilt N°7	Calcaires lacustres (eau douce)	40

Les forages Tinsilt N°3 et Bir Chouhada N°1 sont les seuls à atteindre les calcaires du Crétacé inférieur respectivement à 9.50 m et 39.60 m.

Le forage Tinsilt N°4 a atteint les marnes noires du Crétacé supérieur à 152 m de profondeur après avoir traversé des marnes sableuses contenant de minces niveaux de conglomérats et de calcaires lacustres du Mio-Pliocène.

Le forage Tinsilt N°5, 6 et 7 ont été arrêtés respectivement à 100, 92, 30 et 98 m de profondeur sans avoir atteint la base du Mio-Pliocène.

Le forage Tinsilt N°2 de 103,50 m de profondeur a atteint les marnes du Miocène inférieur marin, masquées par une brèche calcaire à ciment marneux.

D'autre part, le forage de Bir Raiane a été arrêté à 180 m dans des marnes gypseuses du Miocène supérieur ou du Pliocène représentant un faciès évaporitique.

II.2. Utilisation et exploitation des données de forages récents :

Les logs lithologiques des forages récents ont été projetés sur les coupes géo électriques. Cette corrélation nous a permis de discuter la validité de l'étude sur toute la région. Les forages utilisés sont au nombre de 7 et leurs caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Caractéristiques des nouveaux forages.

Forages	X (m)	Y (m)	Prof (m)	Année réelle	Formation captée
L19	833.2	294.8	80	1988	Mio-Plio-Quaternaire
M20	833.7	296.4	60	1990	Mio-Plio-Quaternaire
E8	825.5	295.4	150	1993	Mio-Plio-Quaternaire et Crétacé inférieur
F6.URSS	829.7	297.7	99	1965	Mio-Plio-Quaternaire et Crétacé inférieur
SN.7	835.2	292.5	130	1983	Mio-Plio-Quaternaire
N5	825.6	296.7	105	1965	Mio-Plio-Quaternaire
SN.7.URSS	834.4	293.5	180	1967	Mio-Plio-Quaternaire

A la lecture des coupes lithologiques des forages, il convient alors d'attribuer les valeurs de résistivités suivantes :

Tableau 16 : Étalonnages à partir des forages nouveaux.

Forages	Nature lithologique	Sondages correspondants	Résistivité en ohm-m
L19	5-80 m : conglomérats à éléments calcaires	L19	25
M20	8-37 m : conglomérats à éléments calcaires 37-150 m : calcaires lacustres	M20	30 15
E8	00-18 m : Argiles, graviers et calcaires. 35-150 m : calcaires (Crétacé inférieur).	E8	30 100
F6.URSS	00-18 m : Argiles, poudingues et gravies 18-99 m : Calcaires fissurés et intercalations marneuses	K29 K28	80
SN.7	00-22 m : argiles et marnes 22-130 m : marnes et calcaires	L14	10 30
N5	00-32 m : argiles, débris de calcaires et calcaires 32-105 m : calcaires fissurées	F10	20 100
SN.7.URSS	00-17 m : argile 17-180 m : marnes et bancs de calcaires.	L17	10 40

II.3. Présentation et interprétation des résultats de la prospection électrique selon les données des forages récents :

Il a été déduit ce qui suit :

- Le substratum résistant, correspondant au Crétacé inférieur, n'a été atteint qu'au voisinage des affleurements et à de faibles profondeurs au voisinage de Draa El Guebli et au pied des djebels Tizourit, Guedmane, Amsid et Snobra, où le substratum n'est pas profond.

- La résistivité réelle du Crétacé supérieur et du Miocène n'a pu être déterminée avec précision en raison de la similitude des faciès marneux.
- Le remplissage continental Mio-Pliocène peut présenter des récessivités variables liées non seulement aux variations de faciès mais également à la teneur en sels dissous.
- L'exploitation des données récentes des forages et leur report sur les coupes géo électriques montre une bonne corrélation entre les données électriques et géologiques.

II.4. Présentation et interprétation des coupes géoélectriques :

L'interprétation des coupes des sondages électriques permet de synthétiser les éléments suivants :

- La plupart des diagrammes des SEV situés au voisinage de Draa El Gueblia et au pied des djebels Tizourit, Guedmane, Amsid et Snobra sont comparables aux diagrammes correspondants aux forages Tinsilt N° 3 et Bir Chouhada N°1.
- Les diagrammes de tous les SEV situés vers l'extrémité sud-est des profils K, L, M, N et P. ainsi que de certains SEV situés vers l'extrémité nord-ouest des profils N et P, sont comparables aux diagrammes correspondants aux forages Tinsilt N°4, 5, 6 et 7.
- Les diagrammes des SEV des profils A, B et C, situés au Nord-Ouest des SEV A4, B4, et C4, sont tous comparables au diagramme étalon A9, de Bir Raiane.
- Les diagrammes des autres SEV présentent tous une remontée finale plus ou moins tardive avec un recouvrement dont la résistivité peut varier de 5 à 30 ohm.m. Ils sont repartis vers la partie nord-ouest des profils E, F, G, H, K, L et M.
- La résistivité du remplissage de la fosse située à l'Ouest du profil D atteint une valeur très basse 1.5ohm.m et l'horizon résistant sous-jacent présente une remontée très accentuée à l'aplomb des SE A8 et A9.
- Nous retrouvons du remplissage à 9 ohm-m sur les profils G et H dont la partie médiane paraît effondrée avec une apparition brusque d'un horizon résistant masqué par les terrains superficiels, ainsi que du remplissage à 7ohm-m sur la partie nord-est des profils F, G, N et P.

- Les zones où le substratum est peu profond se retrouvent dans la partie médiane des profils D, C, et E, sur une grande partie du profil F, en plusieurs points des profils K, L et M, ainsi qu'au SEV P16, à l'extrémité du Djebel Snobra.

La couverture présente toujours une résistivité égale ou supérieure à 10 ohm.m sauf au SEV P16 où nous notons une valeur extrêmement basse de 0.5 ohm.m dans la tranche des premiers mètres.

Enfin l'analyse des données lithostratigraphiques récentes des forages et leur report sur les coupes géo électriques montre une bonne corrélation entre les données électriques et géo électriques.

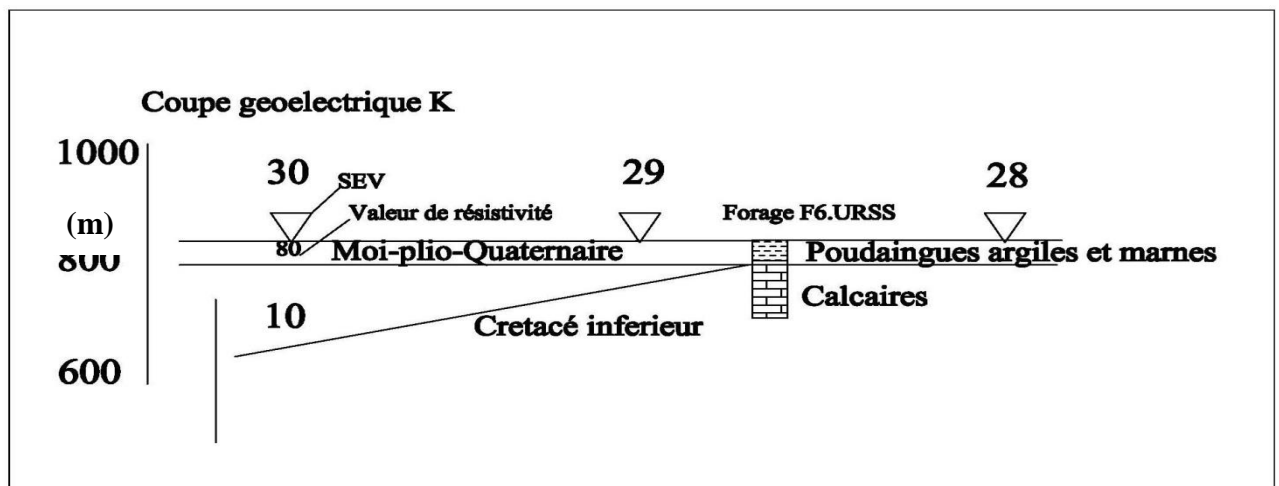


Figure 19 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques.

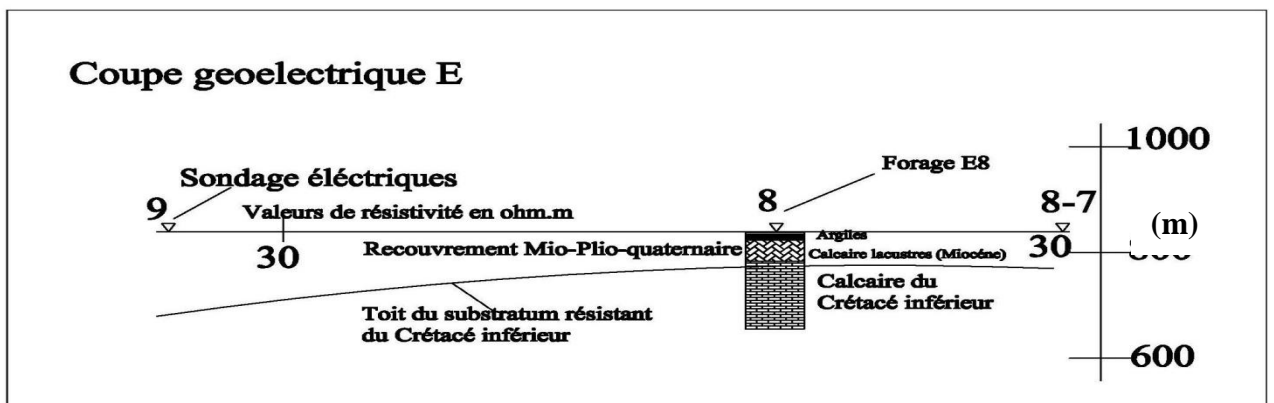


Figure 20 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques.

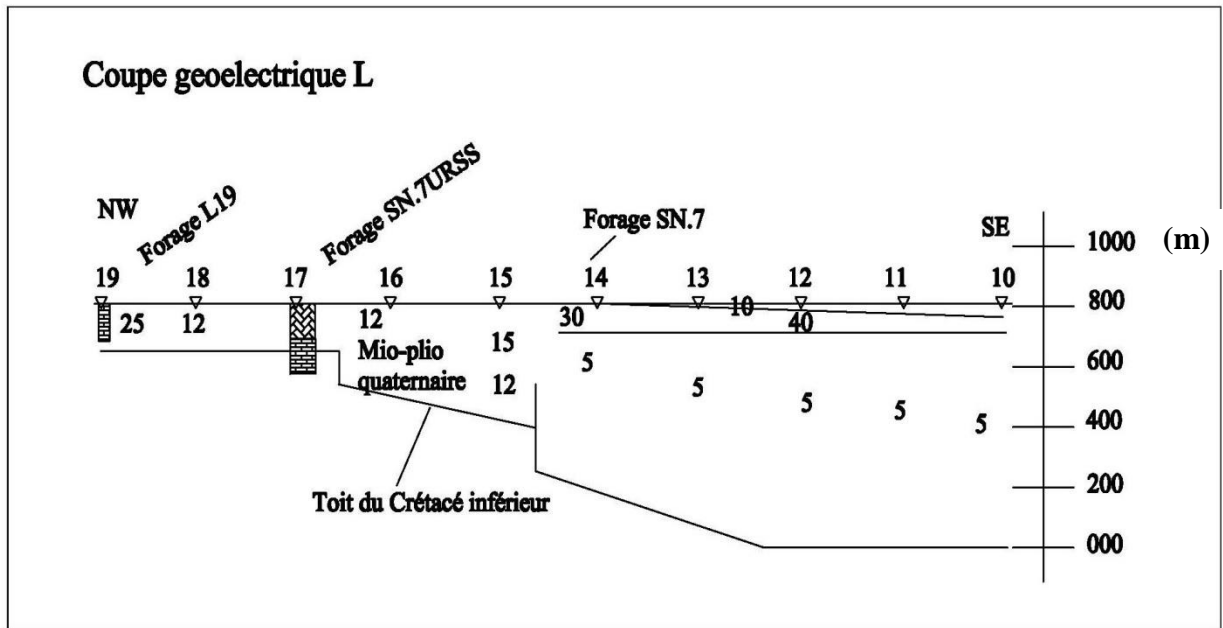


Figure 21 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques.

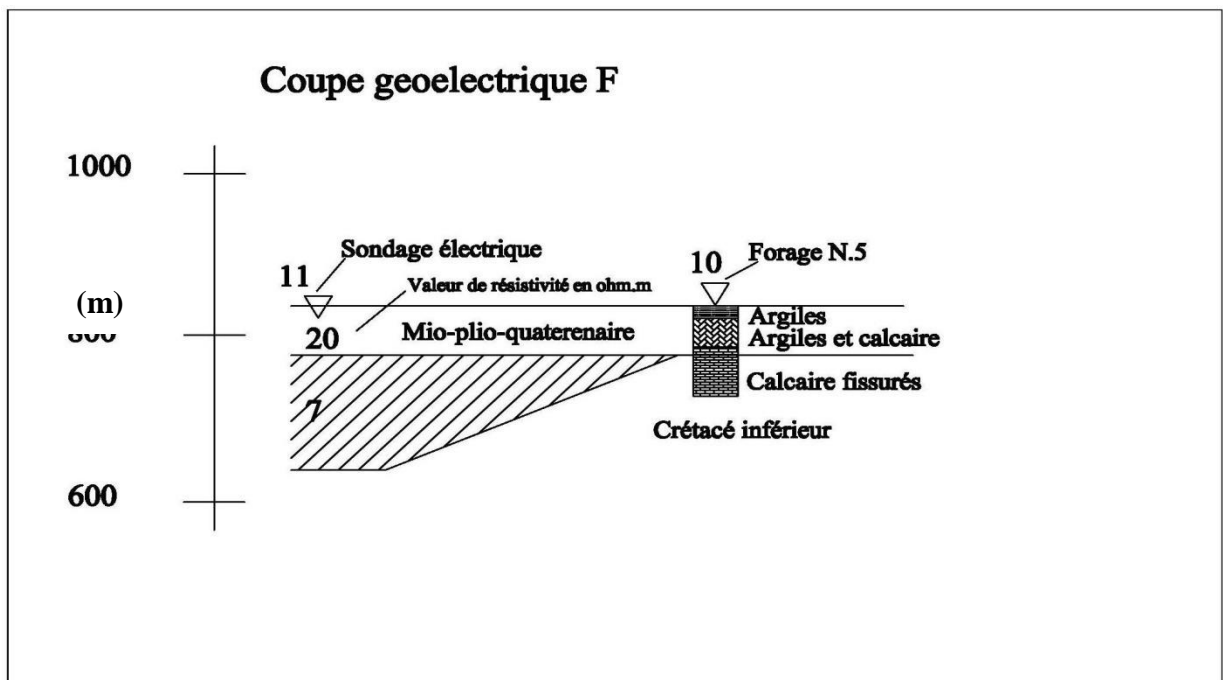


Figure 22 : Corrélation entre les données géo-électriques et lithologiques.

III. Résultats obtenus d'un point de vue hydrogéologique :

III.1. La Nappe des calcaires du Crétacé inférieur :

La série de Djebel Guedmane qui porte le numéro N° 10221 dans le permis d'Ain Beida, qui va du Malm à l'Aptien, est entièrement calcaire et dolomitique. Elle ne comporte aucun banc marneux. Elle est particulièrement puissante (620 m) et affleure sur une grande partie dans les hautes plaines (Djebel Guedmane, Djebel Amsid, Djebel Tizourit, Djebel Hamouda). Les potentialités hydrodynamiques de cette nappe sont confirmées par les forages actuels de Bir Chouhada E8 (30 l/s), Souk Naamane K18 (20 l/s).

En outre, il y a lieu de retenir que le degré élevé de fissuration des calcaires du Crétacé inférieur pourrait être lié à la proximité des grands accidents transversaux et longitudinaux qui ont affectés la région.

De ce fait, les mêmes résultats sont obtenus, en plaçant nos forages aux endroits indiqués auparavant sur la carte.

III.2. La nappe des calcaires lacustres du Mio-Pliocène :

Les calcaires lacustres d'âge mio-pliocène affleurent surtout dans la région est de Bir Chouhada, sur une grande superficie. La nappe peut être en charge, comme au Nord Est du chott Tinsilt. Les calcaires lacustres peuvent être détectés par la prospection géophysique lorsqu'ils sont suffisamment résistants, comme dans les sondages électriques N5 et N6. Dans la zone sud-ouest du chott Tinsilt, les calcaires du Crétacé sont profonds, ce qui donne à la nappe des calcaires lacustres un rôle crucial pour l'exploitation dans cette zone.

Les forages réalisés par l'ANRH – DRE en 1990 au Sud-Ouest de la commune de Bir Chouhada, ont montrés l'intérêt attendu de cette nappe, un premier forage, à 6 km de Bir Chouhada a donné 17 l/s et un deuxième dans les mêmes formations a donné un débit de 5.5 l/s. L'épaisseur de l'aquifère est comprise entre 37 m et 41 m.

Partie II : Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères

IV. Introduction :

Les cartes piézométriques, établies principalement avec des données sur les niveaux piézométriques, représentent à une date et à une période donnée la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques dans une nappe donnée. Elles représentent également les conditions aux limites hydrodynamiques. Il est évident que, le régime naturel des eaux souterraines peut être perturbé par la surexploitation des ouvrages de captages (forages et puits) qui constituent une source d'épuisement et de diminution. C'est ce que nous allons confirmer par l'étude hydrogéologique de la nappe de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai. La région d'étude englobe 35 points d'eau, la moitié de ces points d'eau répartis dans la commune de Souk Naamane. Ce nombre représente environ 49.37% des puits de la zone d'étude.

IV. Les formations aquifères :

D'après les études géophysique et géologique nous distinguons les formations aquifères suivantes :

IV.1. L'aquifère du Mio-Plio- Quaternaire:

A l'Ouest du chott Tinsilt, où le Crétacé inférieur est enfoui sous de puissantes séries marneuses conductrices, la nappe des calcaires lacustres pourrait être sollicitée au droit par des forages profonds. Leur exploitation permettrait de soustraire d'importants débits drainés vers les chotts, à condition de ne pas trop abaisser le niveau de la nappe dans la plaine de Souk Naamane et d'inverser l'écoulement des eaux des chotts. Cet aquifère peut également être exploité dans la partie occidentale de la plaine, dont l'eau, douce, se déverse dans la plaine de Bir Chouhada. Dans cette région le Miocène affleure largement notamment au Nord et au Nord-Ouest de Bir Chouhada.

Le Quaternaire qui recouvre pratiquement toute la plaine et les piémonts des reliefs est très exploité par de nombreux puits d'une profondeur moyenne variant de 20 et 45 m.

Ces puits utilisés pour la plupart dans l'irrigation des terres agricoles permettent de soustraire un débit moyen de 2 l/s.

IV.2. L'aquifère Karstique carbonaté du Crétacé inférieur :

En bordure des affleurements du crétacé inférieur et dans les zones, où le substratum résistant n'est pas profond (plaine de Bir Chouhada), le remplissage est constitué uniquement par des marnes, des calcaires lacustres et des conglomérats appartenant au Mio-Pliocène

continental. Notons que les calcaires lacustres paraissent très bien développés au Sud- Est de Souk Naamane.

Cet aquifère a fourni des débits très variables allant de quelques litres par secondes à plus de 18 l/s surtout quand les forages sont implantés au voisinage d'un réseau de fractures intenses.

La productivité de cet aquifère est intimement liée à son degré de fissuration. De plus cet aquifère, renferme une nappe caractérisée par des eaux douces comparativement aux eaux des aquifères quaternaires et miocènes .

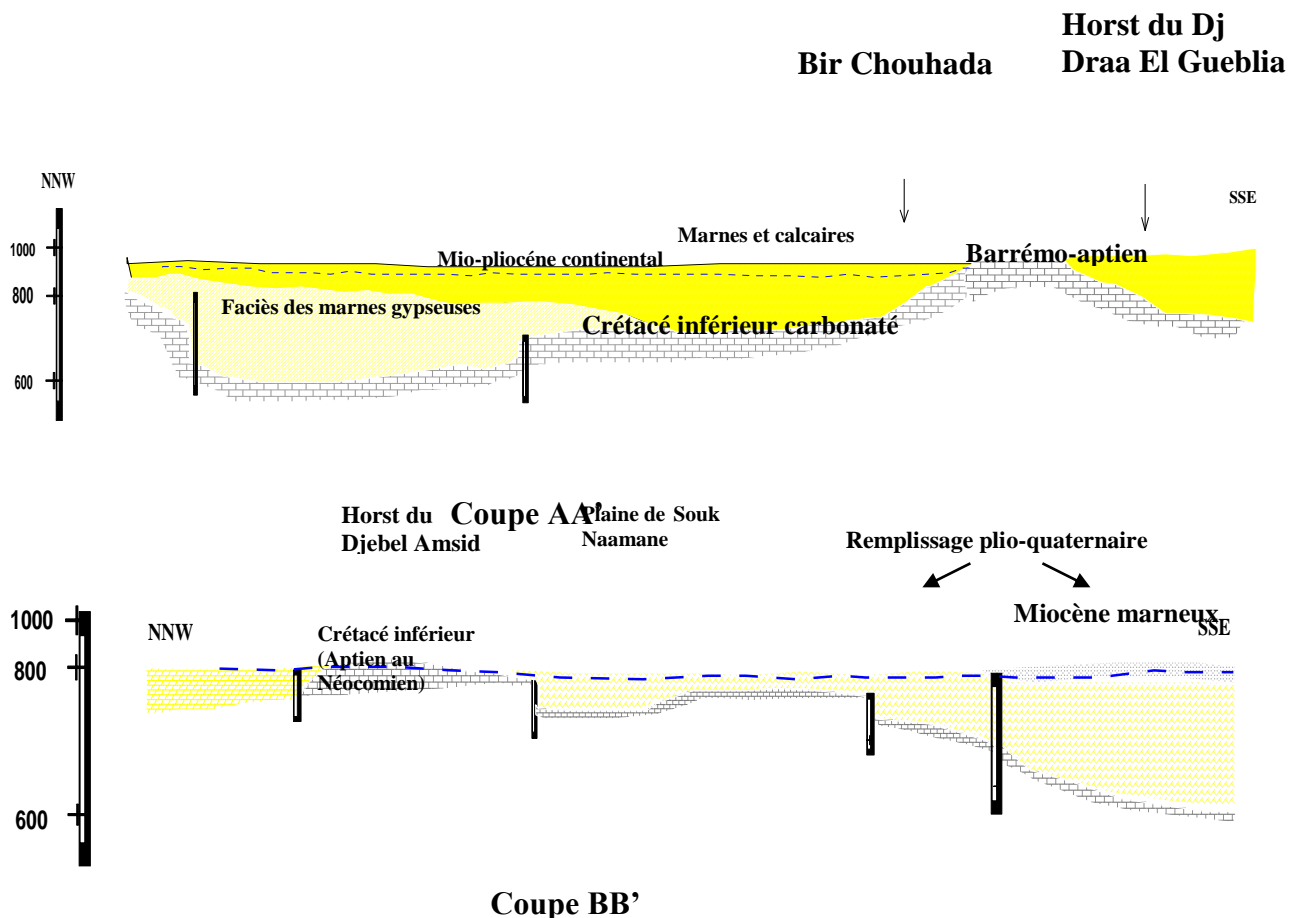


Figure 23 : Coupe hydrogéologiques synthétiques.

V. Piézométrie:

V.1. Inventaire des points d'eau :

Dans la présente étude, 35 points d'eau ont été recensés. La plupart des puits ont une faible profondeur mais un grand diamètre et ont été creusés mécaniquement. Par contre ceux situés à proximité des bordures, sont plus profonds.

Il est à noter que certains puits sont abandonnés et pourraient constituer des sources de pollution de la nappe.

Un réseau de points de mesure et d'échantillonnage représentatif de toute la nappe a été utilisé pour l'établissement des cartes piézométrique et hydrogéochimique (Figure 24).

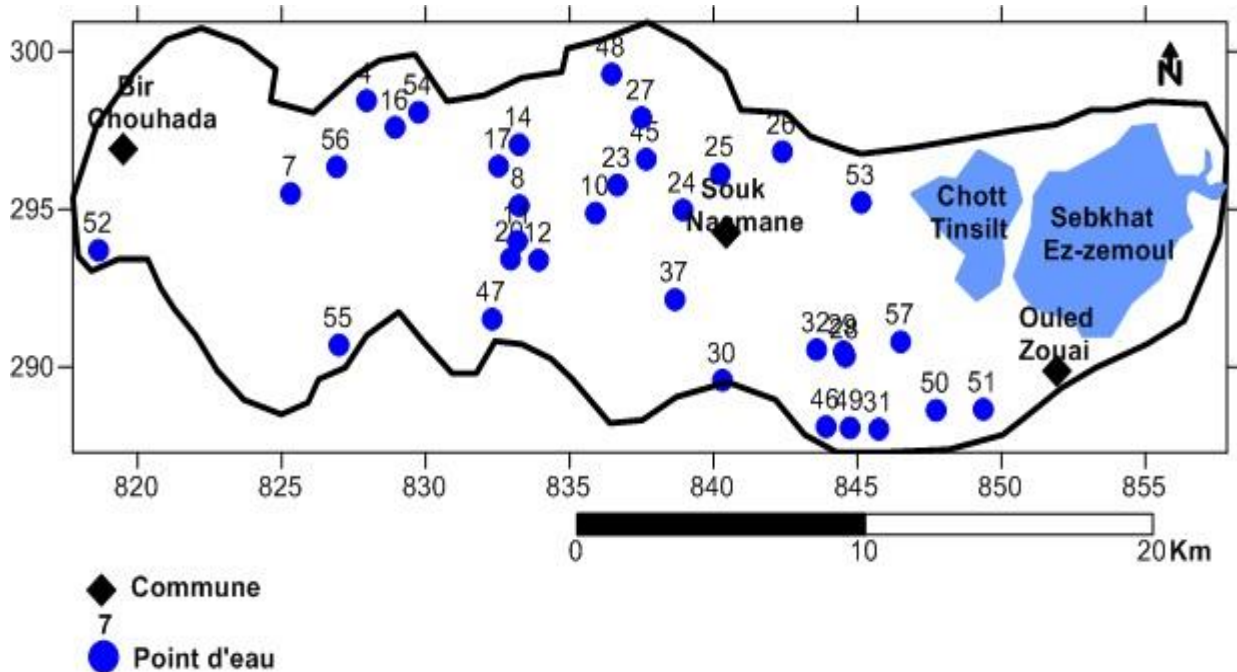


Figure 24 : Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.

V.2. Evolution de la piézométrie :

L'analyse des cartes piézométriques permet de définir l'écoulement souterrain et de localiser les zones d'alimentation et de sorties des eaux de la nappe aquifère des calcaires et de déterminer le gradient hydraulique qui est un paramètre important dans l'estimation des apports latéraux.

L'établissement cartes piézométriques, des périodes de hautes et basses eaux, respectivement des mois de juin et octobre, pour l'année 2014, s'est réalisé par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 13 (Golden software, 2016).

Elles montrent que l'allure générale des courbes ne varie qu'assez peu d'une campagne à l'autre. Les axes de drainage principaux, mis en évidence, sont localisés au pied des massifs calcaires du Crétacé inférieur et en bordure des calcaires lacustres Miocène à l'ouest de Bir Chouhada. D'autre part, un axe de drainage traverse la plaine d'Ouest en Est entre Bir Chouhada et Souk Nammane .

L'observation de la morphologie des cartes piézométriques des hautes eaux (Juin 2014) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, de l'Ouest vers l'Est (Figure 25).

Au Bir Chouhada l'écoulement souterrain se fait suivant une direction Ouest-Est.

Au Nord de souk Nammane, les écoulements se font du Nord-ouest ou affleurement les terrains aquifères du Crétacé inférieur vers le Sud-est.

Au niveau de Ouled Zouai, la direction de l'écoulement est sud nord (vers les deux chotts).

Dans cette région, les deux chotts (Tinsilt et sebkhat Ez-Zmoul) constitue aussi l'exutoire de la nappe.

L'examen des cartes piézométriques correspond à la période des basses eaux (Octobre 2014) ne révèle aucun changement que ce soit de la morphologie ou de l'allure des courbes piézométriques, traduisant ainsi le même régime d'écoulement (figure 26).

Dans la plupart de la plaine, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique faible, de l'ordre de 0.002.

Au l'extrémité Nord de Souk Naamane et aux bordures, les courbes hydro-iso-hypses, sont moyennement serrées, et le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,005. On note la présence d'une dépression de la surface piézométriques au niveau du forage F5, et F1 dans la partie Nord-Est et au Sud-Est au niveau d'un puits, ce qui est dû certainement à une exploitation intensive.

V.3. Battement de la nappe :

La comparaison de la piézométrie entre la période de basses eaux et celle de hautes eaux a permis de dresser une carte de battement de la nappe pour les années 2014. (Figures 27).

La carte de battement 2014 a montré que les fluctuations en bordures de nappe et peuvent atteindre 2 m. Au niveau de Souk Naamane et à Ouled Zouai, celles-ci varient entre 0,2 et 2 m (Figures 27).

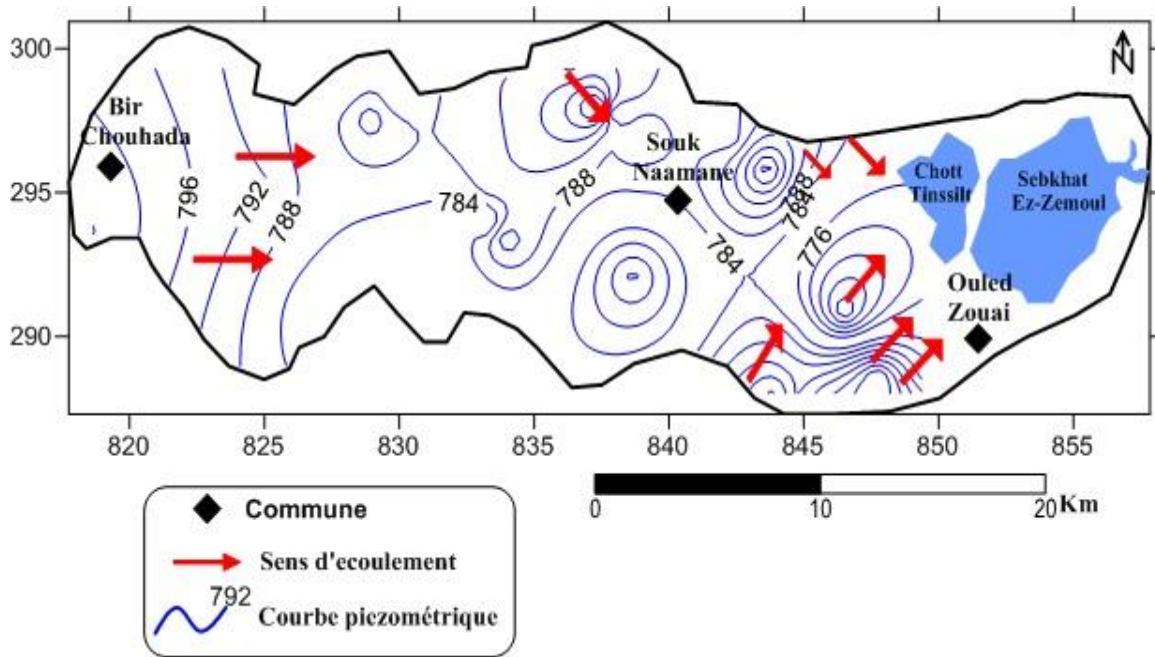


Figure 25 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire (Juin 2014).

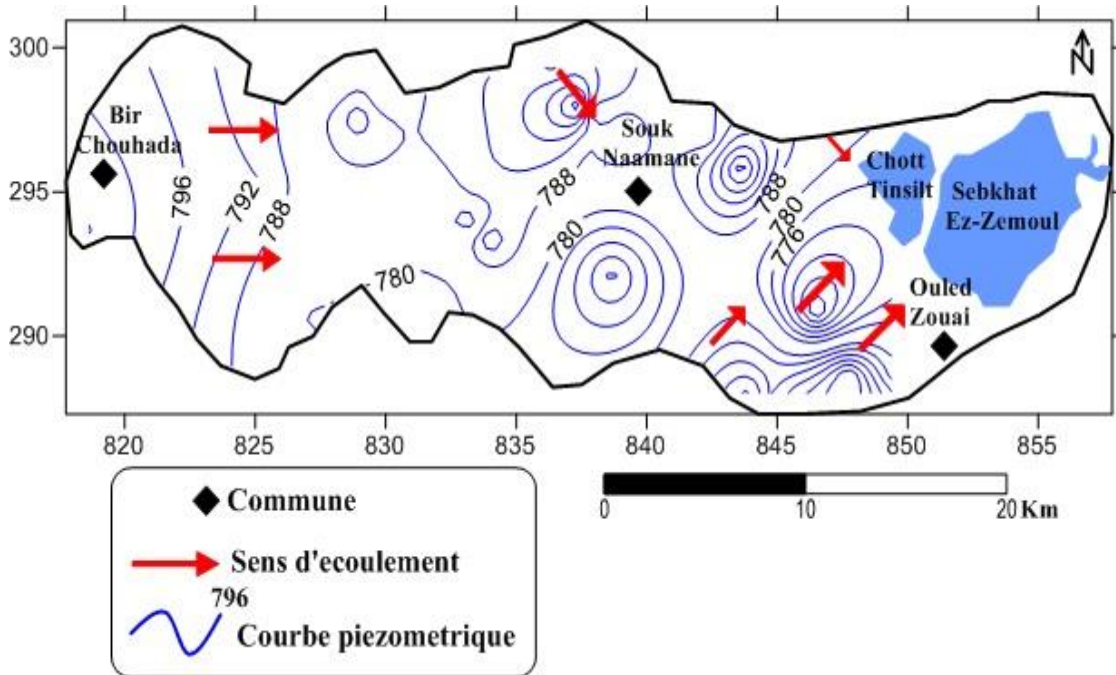


Figure 26 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire (Octobre 2014).

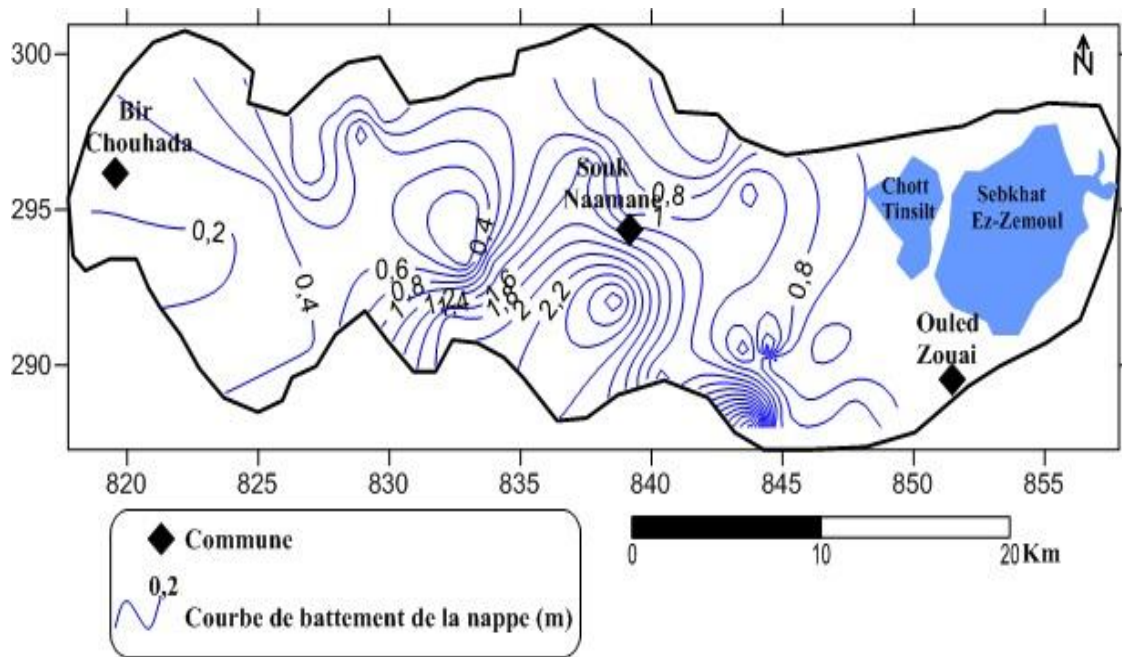


Figure 27 : Carte de battement de la nappe Moi-Plio-Quaternaire en (m) durant l'année 2014.

VI. Conditions aux limites :

L'alimentation de la nappe superficielle par les massifs carbonatés du Crétacés inférieur qui délimitent la nappe au Nord de Souk Naamane et de Bir Chouhada et au sud-est dans la région de Ouled Zouai est bien marquée. En effet, les isopièzes sont parallèles aux affleurements des reliefs du Djebel Taref, du Djebel Guelat Ouled Salem et plus au Nord-est de Djebel Hammouda.

Au Nord-ouest de Bir Chouhada les isopièzes montrent une alimentation à partir des calcaires lacustres du Miocène qui y affleurent largement. Par ailleurs, les horsts crétacés qui surgissent dans la plaine à l'Ouest de Souk Naamane (Djebel Guedmane et Amsid) participent également à cet apport. Au sud-est, ce sont également les mêmes terrains carbonatés du Crétacé inférieur qui alimentent la nappe de la plaine d'Ouled Zouai à partir des reliefs du Djebel Tarbent. A cette alimentation s'ajoute l'infiltration des eaux des précipitations.

VII. Détermination des paramètres hydrodynamiques :

Dans le but de déterminer la transmissivité et la perméabilité, nous avons utilisé les résultats des essais de débits de 22 puits et forages. Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de **C.E.Jacob** (1950).

Cette étude est basée sur les données fournies par les essais de pompage effectués dans les puits et forages qui se trouvent dans la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai.

La détermination de la perméabilité a été faite en se basant sur la transmissivité et l'épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère. Cette dernière a été estimée en se basant sur les profils géoélectriques et les colonnes lithostratigraphiques des forages.

L'application de la relation suivante a permis la détermination de la perméabilité, dont les résultats sont consignés dans le tableau 17.

$$\mathbf{K=T/e} \qquad \qquad \qquad \mathbf{(10)}$$

Où

K : perméabilité (m/s) ;

T : transmissivité (m²/s) ;

e : épaisseur de la couche mouillée aquifère (m).

Tableau 17 : Détermination des paramètres hydrodynamiques.

Points d'eau	Q (l/s)	Δ (m)	T (m ² /s). 10 ⁻³	K (m/s) .10 ⁻⁴
16	3	1,3	0,42	0,052
28	4	0,15	4,4	0,67
48	2	0,4	0,9	0,045
23	3,8	1,22	0,53	0,063
10	2	0,41	0,86	0,083
7	3	1,1	0,5	0,048
14	6	0,23	5,1	0,66
27	3	0,65	0,83	0,06
26	3,5	1,12	0,56	0,072
25	6	1,3	0,82	0,08
4	3	1	0,54	0,037
51	6	0,17	6,47	0,51
50	3	0,08	6,75	0,49
53	3	0,26	2,22	0,2
54	6,3	4,5	0,25	0,06
55	12	6,7	0,34	0,04
56	15	0,65	3,63	0,36

VII.1. Répartition spatiale de la perméabilité :

La perméabilité est directement liée à la transmissivité. L'analyse de la carte réalisée a montré que la zone de forte perméabilité se situe dans la zone de Ouled Zouai où elle peut aller jusqu'à $0,65 \times 10^{-4}$ m/s. Par contre, dans la zone de Souk Naamane, les valeurs sont moyennes et varient entre $0,05$ et $0,35 \times 10^{-4}$ m/s. Les faibles valeurs sont observées dans la partie Ouest de la plaine (à Bir Chouhada) (Figure .28).

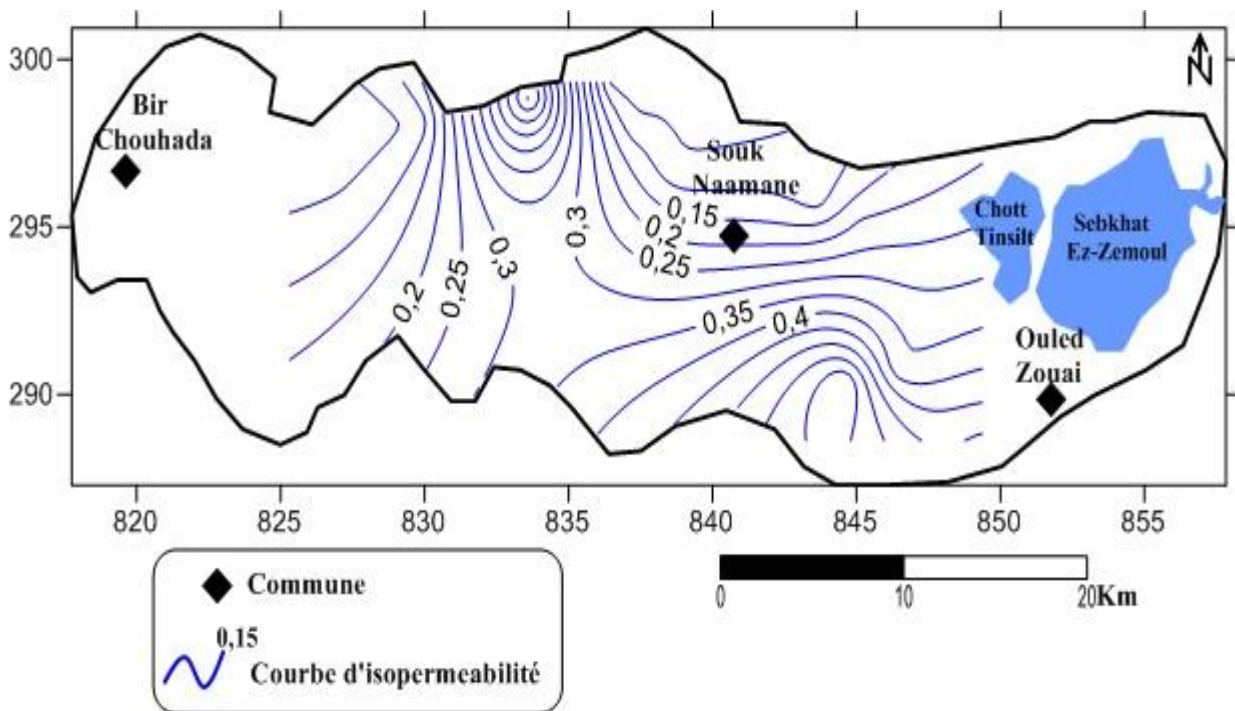


Figure 28 : Carte de répartition de la perméabilité de la nappe Moi-Plio-Quaternaire en (10^{-4}) m/s.

VII.2. Répartition spatiale de la transmissivité :

L'analyse de la carte de transmissivité (Figure.29), nous laisse remarquer certaines variations, nous distinguons des endroits de fortes transmissivités et d'autres à faibles transmissivités. Dans la zone de Ouled Zouai et au centre de Souk Naamane, les valeurs sont fortes, de l'ordre de $6,7 \times 10^{-3}$ et 2×10^{-3} m²/s, ce qui est confirmé par l'étude géophysique indiquant la présence de conglomérats et des éléments de calcaires. Par contre, dans la zone de Bir Chouhada et aux bordures de la plaine, on note des valeurs moyennes à faibles qui varient entre $0,2$ et 10^{-3} m²/s, ce qui est expliqué par la présence des argiles, marnes et des éléments plus fins.

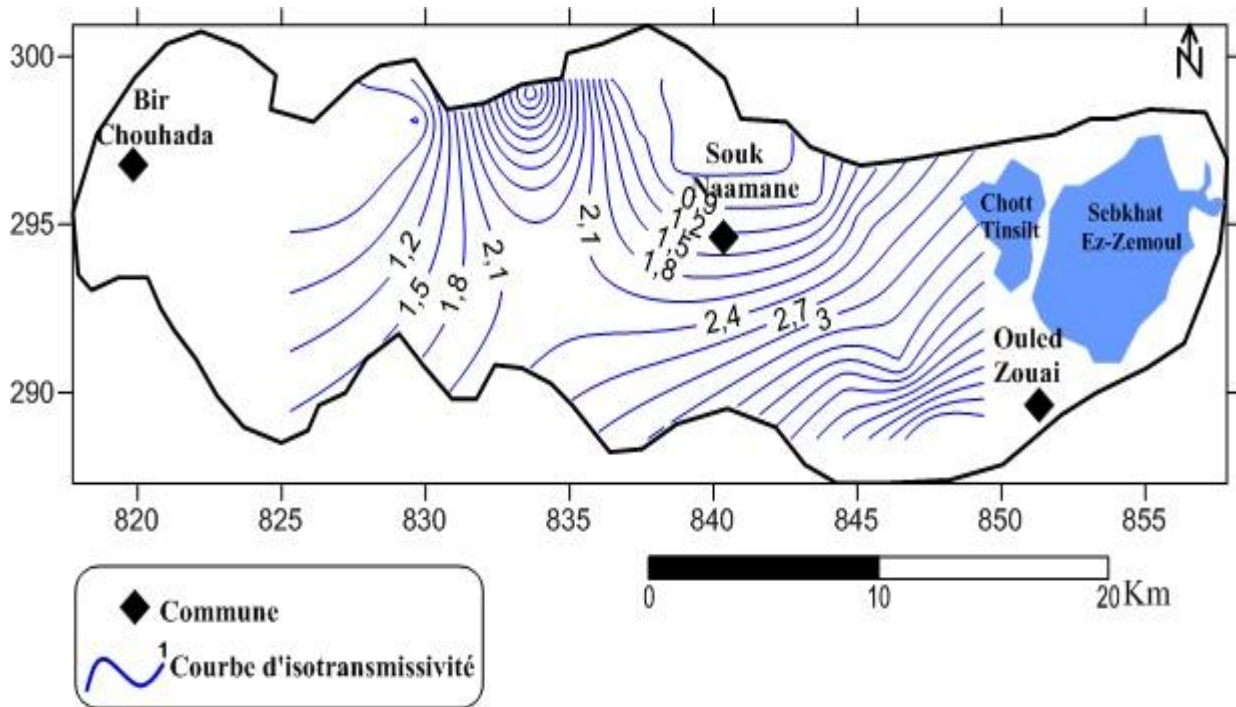


Figure 29 : Carte de répartition de la transmissivité de la nappe Moi-Plio-Quaternaire en $(10^{-3}) \text{ m}^2/\text{s}$.

VIII. Bilan du système aquifère :

a- Entrée = alimentation du système aquifère :

Compte tenu de sa situation géographique et climatique, la nappe libre est alimentée par des précipitations efficaces (PE) qui égalent la différence entre les précipitations tombées (P) et l'ETR.

Dans la région de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai, avec 465 mm de hauteur de précipitations annuelle, soit $2280 \text{ hm}^3/\text{an}$, les précipitations efficaces moyennes annuelles sont de $330 \text{ hm}^3/\text{an}$.

Précipitations efficaces = précipitations – évapotranspiration réelle

$$330 \text{ hm}^3/\text{an} = 2280 \text{ hm}^3/\text{an} - 1950 \text{ hm}^3/\text{an}.$$

b. Sortie : fuites du système aquifère

La précipitation efficace sera répartie, à la surface du sol, en deux fractions, fixes, conventionnelles inégales.

- Le ruissellement (R) qui alimente l'écoulement de surface Q_s collecté par le réseau hydrographique du bassin versant. Dans la région d'étude $Q_s=263,2 \text{ hm}^3/\text{an}$.

- l'infiltration (I), quantité d'eau franchissant la surface du sol et qui entretient l'écoulement souterrain (Qw) ; soit pour la zone d'étude $I=114,8 \text{ hm}^3/\text{an}$.
- le pompage. Selon l'organisme qui gère la distribution de l'eau potable aux citoyens (DHW d'Oum El Bouaghi), le débit d'exploitation est de $5,69 \text{ hm}^3/\text{an}$.

Le total des entrées et sorties est respectivement ; $330 \text{ hm}^3/\text{an}$ et $383,69 \text{ hm}^3/\text{an}$; il en résulte donc une différence négative de l'ordre de $53,69 \text{ hm}^3/\text{an}$.

c- Bilan

Le bilan révèle que les entrées du système sont inférieures aux sorties, ce qui est dû essentiellement à une perte par l'ETR, dans un climat steppique à tendance semi-aride en été.

IX. Conclusion :

Au terme de ce chapitre nous pouvons dire que :

L'interprétation des deux études géophysiques, effectuées dans la plaine de Bir Chouhada-Souk Naaman, ont apporté des informations concernant l'ensemble des aquifères mio-plio-quaternaire et crétacé-jurassique.

Les formations de remplissage mio-plio-quaternaire correspondant aux conglomérats, calcaires lacustres, marnes et argiles, ont des épaisseurs très importantes.

Les formations carbonatées du Crétacé et du Jurassique constituent l'aquifère profond, il est facilement exploité près des massifs et aux plages des horsts.

Des failles, dont le rejet peut excéder 100 m, longent les plateformes peu profondes situées en avant des affleurements calcaires au Nord et au Sud de la haute plaine de Bir Chouhada, ainsi que la bordure méridionale des deux horsts décelés sous la haute plaine.

Enfin nous tenons à rappeler l'un des principaux résultats de cette synthèse géophysique se caractérise par une meilleure illustration de la structure et la détermination de la géométrie des ensembles aquifères exploitables dans la plaine de Bir Chouhada et Souk Naamane.

Notre contribution a permis aussi par le biais de l'interprétation des données récentes des forages et leur report sur les coupes géo électriques de montrer une bonne corrélation entre les données électriques et géologiques.

L'étude hydrogéologique a permis de connaître deux aquifères ; l'un Plio-Mio-Quaternaire dont les niveaux superficiels sont connus par les puits et les niveaux profonds par les forages ; l'autre Crétacé Inférieur et Jurassique supérieur.

L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait soit directement sur les formations poreuses, soit indirectement au long des piémonts des massifs environnants et aussi par les aquifères carbonatés au niveau des failles.

L'écoulement se fait principalement dans deux sens du Sud-Ouest vers le Nord-Est, ou d'Ouest vers l'Est avec un gradient hydraulique variable allant de 0.002 à 0.005, le niveau le plus bas de cette nappe superficielle est représenté par les chotts (Tinsilt, Ez Zemoul).

Les fluctuations saisonnières de la surface piézométrique connaissent une augmentation aux bordures pour atteindre 2 m. Au centre et à Ouled Zouai, elles oscillent entre 0.1 et 2 m.

Ces fluctuations sont soumises aux caractéristiques climatiques de la région : faible pluviométrie d'une part et forte évaporation d'autre part.

En période des basses eaux le plan d'eau a baissé de 0,5 m à 2 m à Ouled Zouai et de 2,5 m à 4 m en bordures.

Les valeurs les plus importantes de la perméabilité et de la transmissivité se localisent au centre de la plaine et au sud-est, et les plus faibles en bordures et à l'Ouest de la plaine.

CHAPITRE VI

Evaluation quantitative et qualitative des réserves d'eaux souterraines

Partie I : Evaluation qualitative des réserves d'eaux

I- Introduction :

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement des formations géologiques traversées et du temps de séjour. Le chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques (Ca^{+2} , HCO_3^-) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial (Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^-) et des éléments d'origine biologique (NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+).

L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai et ses variations dans l'espace et dans le temps, afin de voir l'état du système vis-à-vis de la pollution.

L'étude se base principalement sur les informations d'une campagne de prélèvement répartis sur le terrain. Comme la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai est à vocation agricole, un intérêt particulier sera accordé à cet effet.

II. Echantillonnage et analyse hydrochimique :

Les échantillons ont été collectés à travers toute la zone d'étude afin de mieux représenter la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de la nappe aquifère (figure 30).

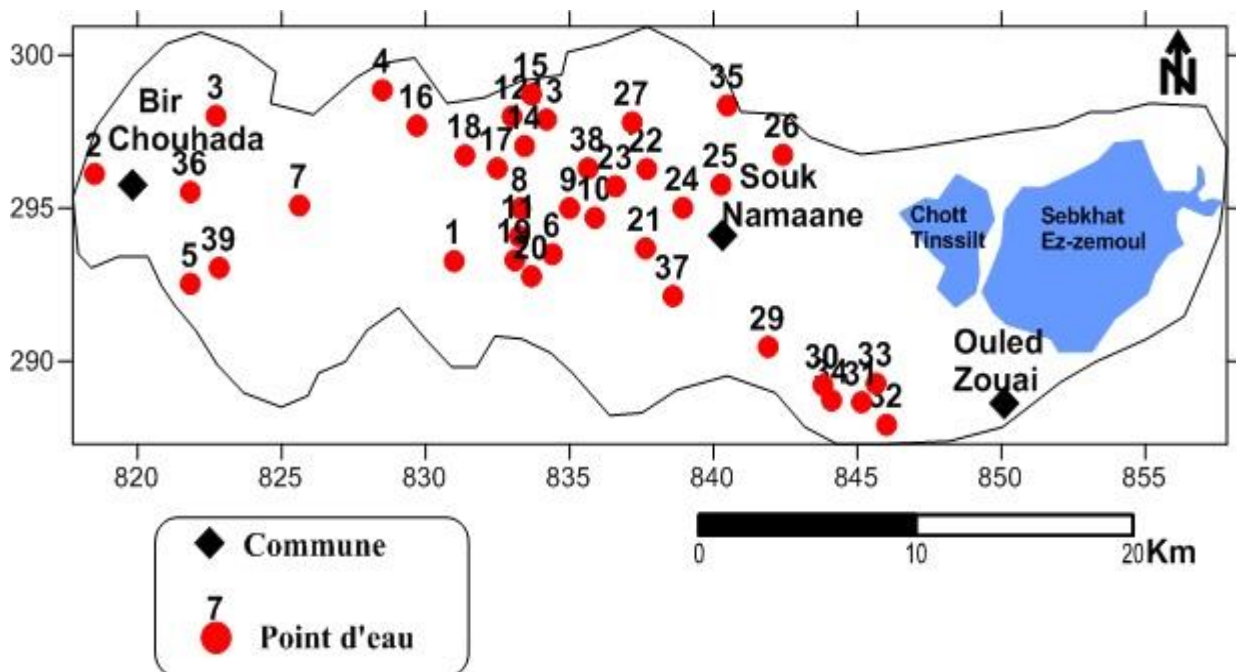


Figure 30 : Carte des points d'eau échantillonnés.

III. Description sommaires des paramètres physico chimiques :

III.1. Paramètres physiques :

III.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les mesures du pH montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité. Pendant la période des hautes eaux le pH varie entre 6.85 et 8.1, alors qu'en période de basses eaux, les valeurs oscillent entre 6.8 et 8.4, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles.

III.1.2. La conductivité électrique (CE):

Elle dépend de la présence des espèces ioniques contenues dans l'eau. Les valeurs mesurées ont été ramenées à 25°C. Les valeurs de la conductivité électrique montrent que la plupart des puits dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux, surtout pendant la période de basses eaux. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 9000 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), Ce paramètre augmente généralement de l'Ouest vers l'Est, notamment dans la région d'Ouled Zouai, autour de Sebkhath Zemoul et du Chott Tinsilt.

III.2. Les éléments chimiques majeurs :

III.2 .1. Le calcium (Ca^{2+}) :

La totalité des points de prélèvement présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 649.20 mg/l sont observées à l'Est de la nappe avec une moyenne de 280,22 mg/l.

Les valeurs de l'écart-type sont relativement importantes, ce qui traduit une grande variation des teneurs, car l'ion Ca^{2+} provient de deux origines naturelles différentes qui sont :

La dissolution des formations carbonatées d'âge crétacé et la dissolution des formations gypses et de calcaires.

III.2. 2. Le magnésium (Mg^{2+}) :

Les valeurs du magnésium varient de 7.2 mg/l à Bir Chouhada à 86.2 mg/l à Ouled Zouai avec une valeur moyenne de 24.77 mg/l. Les variations de concentration sont faibles, les valeurs de l'écart type le confirment (13,5 mg/l).

III.2. 3. Le sodium (Na^+) :

Le sodium présente également de valeurs moyennes à forte allant de 70 mg/l à l'Ouest, et 425.8 mg/l à l'Est près des chotts, avec une valeur moyenne de 208.78 mg/l. Les variations de concentration sont fortes, les valeurs de l'écart type le confirment (95.41 mg/l).

III.2. 4. Le potassium (K^+):

Les valeurs de potassium sont basses, de l'ordre de 2.8 mg/l à Bir Chouhada et la partie centrale de Souk Naamane. Les valeurs les plus élevées sont observées à Ouled Zouai et à la partie est de Souk Naamane avec un maximum de 14,3 mg/l, pour une moyenne de 6.96 mg/l.

III.2.5. Les chlorures (Cl^-):

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution. Les teneurs enregistrées, pendant toute la période d'observation, montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l. On signale que 85 % des puits dépassent cette norme. Le taux des chlorures est très élevé à l'Est de Souk Naamane et Ouled Zouai 1086 mg/l, mais moindre à Bir Chouhada où il ne varie qu'entre 201 et 350 mg/l, avec une moyenne de 512,30 mg/l.

III.2.6. Les sulfates (SO_4^{2-}):

Les plus fortes teneurs en sulfates sont enregistrées à l'Est de Souk Naamane et Ouled Zouai avec un maximum de 680 mg/l, avec une moyenne de 275 mg/l, suite au phénomène d'évaporation alors que les plus faibles valeurs sont enregistrées à Bir Chouhada avec un minimum de 53.83 mg/l.

III.2.7. Les bicarbonates (HCO_3^-):

Les teneurs de bicarbonates (HCO_3^-) sont enregistrées pendant la période des hautes eaux et des basses eaux avec une moyenne de 198,51 mg/l et un maximum de 370.1 mg/l se trouve à l'Est de la région d'étude (Ouled Zouai). Les concentrations varient faiblement (écart type : 44,75 mg/l).

IV. Détermination des principaux facies hydrochimiques :

Suivant :

$Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ les cations présentent l'ordre des concentrations les plus fortes au plus faibles. Parfois, le sodium est plus important comme dans les eaux des points 13, 14, 15, 16, 20, 21, 23, 24, 26, 28, 29 et 36, où il domine les autres cations ($Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$). Le potassium a toujours la concentration la plus faible.

Pour ce qui concerne les anions, les chlorures sont largement les ions dominants, et ils représentent plus de 50% de la charge anionique dissoute. Ils sont particulièrement élevés aux points d'eau 21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 et 37, près des deux chotts, avec une

concentration plus de 600 mg/l. Les anions se présentent dans l'ordre suivant : $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$. Les chlorures, sulfates et bicarbonates sont presque toujours modérés dans la région ouest de la plaine.

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et la classification des ions (formule ionique), les faciès sont représentés dans le tableau 18:

Tableau 18 : Faciès chimiques des eaux souterraines de la plaine d'étude.

Campagne d'échantillonnage	Faciès chimique			
	Bicarbonaté calcique (%)	Chloruré calcique (%)	Chloruré sodique (%)	Sulfaté calcique (%)
Juin 2014	7,69	41,02	30,76	20,51

Sur toute la période d'observation, nous remarquons que la répartition des différents faciès dépendait de la lithologie et de l'hydrodynamisme de la nappe aquifère. Le faciès bicarbonaté calcique apparaît surtout près des reliefs crétacés au Nord de Souk Naamane et à l'Est de Bir Chouhada et tire son origine des formations carbonatées bordant la nappe. Le faciès chloruré-calcique et sodique est important et se répand dans la zone centrale et à l'Est de Souk Naamane et dans la région d'Ouled Zouai. Il s'explique par la présence des formations alluvionnaires salées du Mio-Plio-Quaternaire et des marnes gypsifères.

Les eaux sulfatées calciques qui ne s'observent qu'à l'extrême nord de Souk Naamane à proximité des Djebel Guellat Ouled Selam et Hamouda : les formations carbonatées d'âge crétacé y sont présentes.

IV.1. Représentation graphique des faciès hydrochimiques :

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil indispensable. Pour atteindre cet objectif, nous avons eu recours au diagramme de Piper et à celui de Schoeller-Berkaloff. L'établissement de ces diagrammes a été fait en utilisant le logiciel **Diagrammes**, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon).

IV.1.1. Diagramme de PIPER : Les faciès sont représentés sur le diagramme de Piper (figure 31).

IV.1.1.1. Période de Juin 2014 :

D'après les figures 31, nous remarquons que l'ensemble des nuages de points ne présente pas de dominance anionique ou cationique. Nous signalons cependant la présence d'un faciès

chloruré calcique, relativement dominant, et un faciès sulfaté calcique moyen et bicarbonaté calcique faible (18% et 10,5%) des puits. Ces deux derniers sont dus à l'alimentation par les bordures. La présence du sodium s'explique par les marnes gypsifères d'âge triasique qui constituent le substratum de la nappe.

Les puits qui se situent à l'Est et dans la zone centrale de la plaine présentent un état différent, avec des anions chlorurés dominants, alors que les cations calciques marquent la totalité des échantillons et sont secondés par les cations sodiques. Ceci révèle la dominance de deux faciès hydrochimiques : chloruré-calcique, chloruré-sodique avec l'apparition de sous faciès hydrochimique : sulfaté-calcique et bicarbonaté calcique.

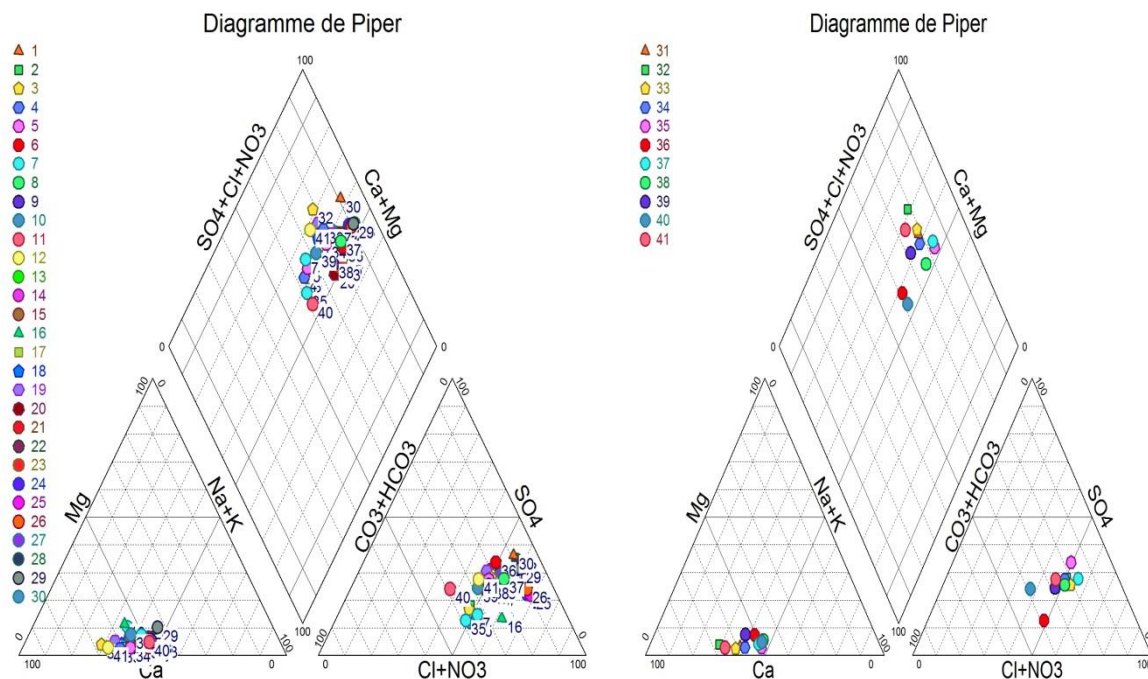


Figure 31 : Diagramme de Piper des eaux souterraines dans la plaine (Juin 2014).

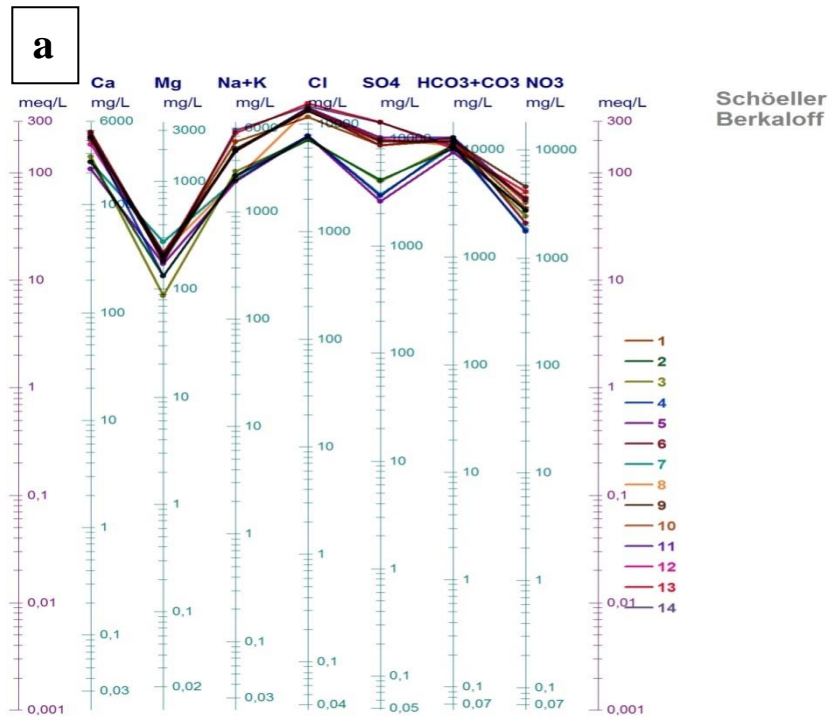
IV.1.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF :

IV.1.2.1. Période de juin 2014 (figures 32 a, b, c) :

La plupart des puits ont acquis le faciès chloruré calcique. Les concentrations sont relativement fortes par rapport aux campagnes précédentes.

Au centre et à l'Est de la nappe, ces teneurs deviennent plus importantes. Les points d'eau 29, 30, 31, 32 et 33, qui se situent près des chotts, sont fortement minéralisés et leur eau atteint des concentrations maximales, ce qui laisse à penser à un rôle important de l'évaporation.

Les figures 32 (a. b .c) montrent que les eaux souterraines ont acquis plusieurs faciès chimiques. Tels que les faciès chlorurés calcique, chloruré sodique, bicarbonaté calcique et sulfaté calcique. Les eaux des puits, ayant un faciès chloruré calcique, ont des concentrations élevées.



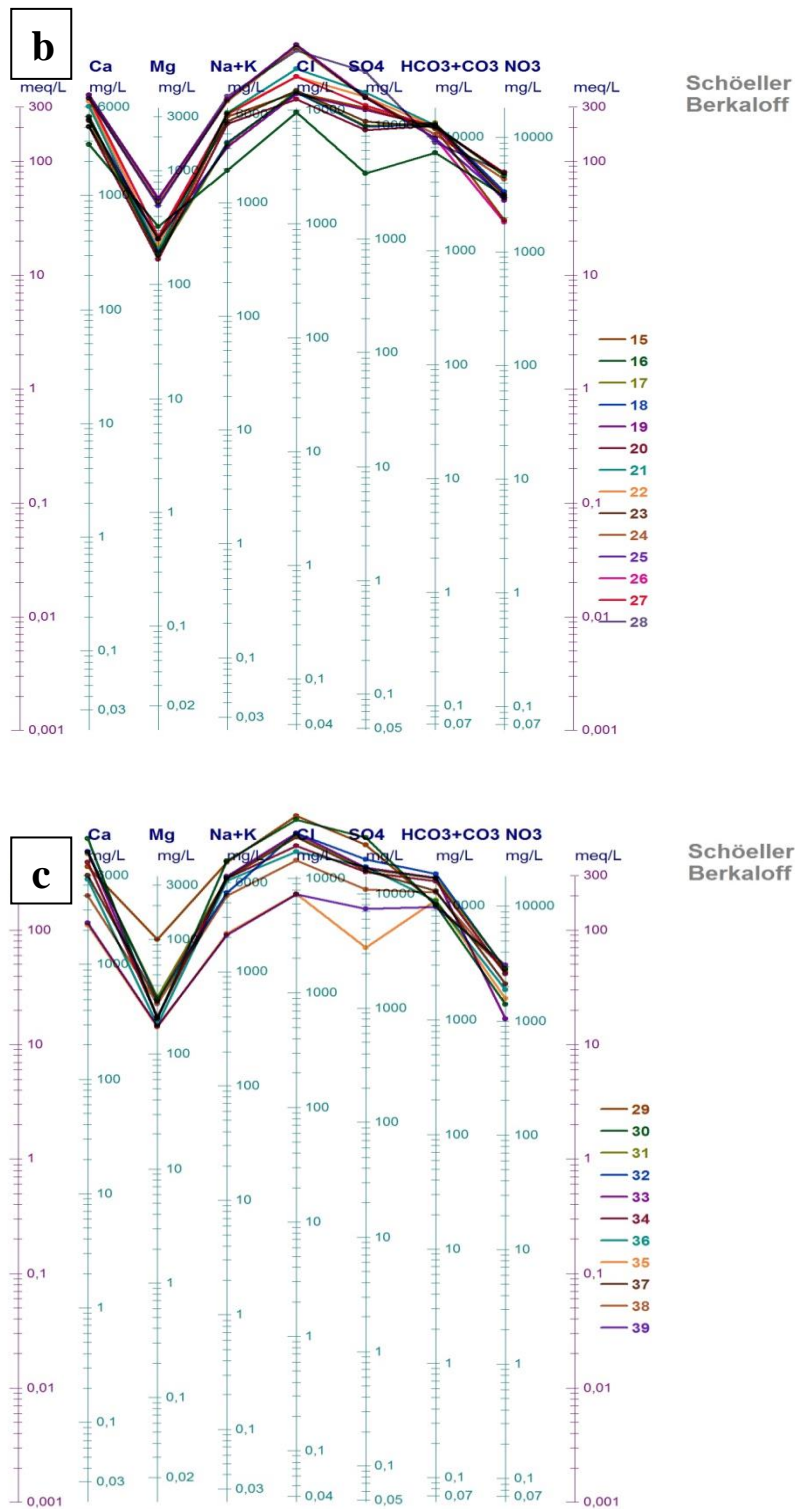


Figure 32 (a, b, c) : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF (Juin 2014).

IV.1.3. Répartition des faciès chimiques :

L'examen de la carte de répartition des faciès chimiques (Figure 33) des eaux souterraines de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai montre l'influence de la

lithologie des formations sur le type de faciès. En effet, les formations carbonatées du Crétacé bordant la nappe sont à l'origine du faciès bicarbonaté-calcique.

Les faciès chlorurés calcique et sodique apparaissent également sur la majeure partie de la nappe où l'aquifère des calcaires lacustres renferment du gypse salifère diffus.

Quant au faciès sulfaté calcique, qui se développe au Nord de Souk Naamane, provient des formations évaporitiques.

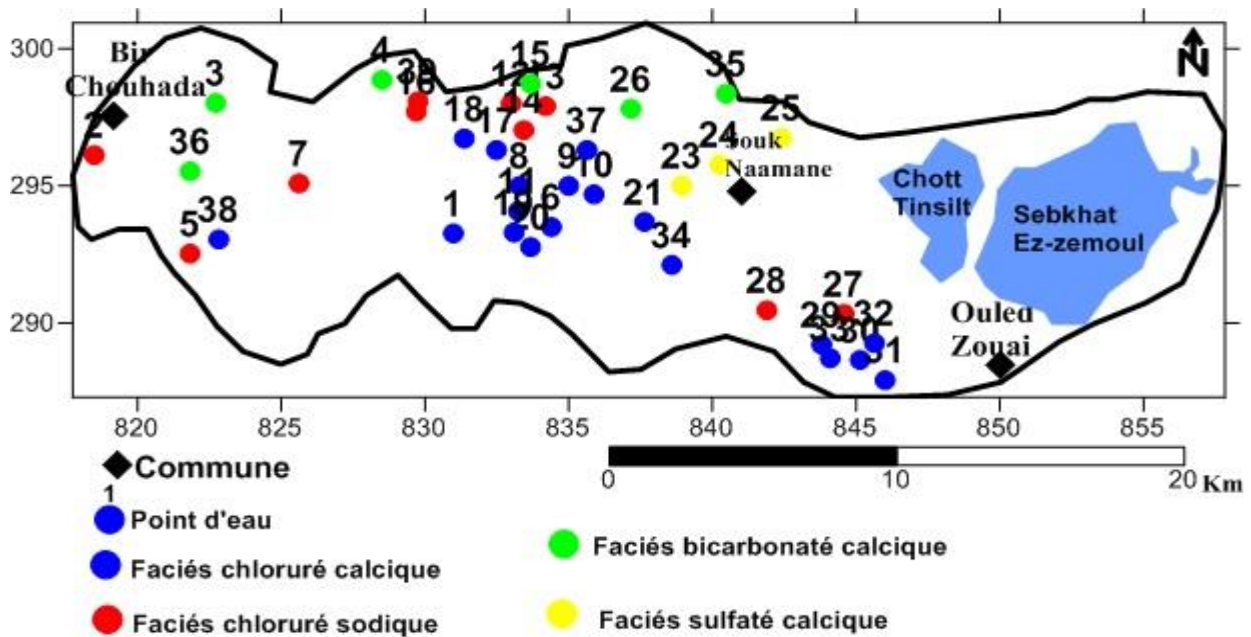


Figure 33 : Carte de répartition spatiale des faciès chimiques.

V. Cartographie hydrochimique :

L'outil cartographique reste un outil très appréciable dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque ou d'un polluant. Les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques sont cartographiés, ils montrent une évolution significative durant toute la période d'observation. Les deux campagnes des mois de juin et d'octobre 2014 ont montré des teneurs maximales en sels dissous, c'est pourquoi nous les avons prises pour illustrer la variation spatiale des éléments chimiques.

La cartographie hydrochimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 13 (Golden software, 2013).

V.1. Les chlorures (figures 34) :

L'observation des cartes des chlorures montre que les teneurs varient entre 230 et 1086 mg/l.

Les argiles et les alluvions du dépôt de remplissage Mio-Plio-Quaternaire et les dépôts salifères, constituent l'origine de ces chlorures.

Le rapprochement des valeurs des concentrations durant les deux périodes des hautes et basses eaux est dû à l'effet du lessivage et de l'évaporation. L'affleurement de la roche mère en surface favorise le premier phénomène et la faible profondeur de la surface piézométrique favorise le second.

A l'Est et de la plaine, nous avons enregistré des concentrations importantes en chlorures (1080 mg/l), nous pensons qu'ils tirent leur origine d'un pointement triasique gypsifère affleurant près de deux chotts (Tinsilt et Ez Zemoul).

Il est à signaler que l'évolution de la teneur en chlorures se fait suivant deux axes : le premier selon le sens de l'écoulement des eaux souterraines, c'est-à-dire selon une direction Ouest-Est, et le second à partir des bordures vers l'Est de la plaine.

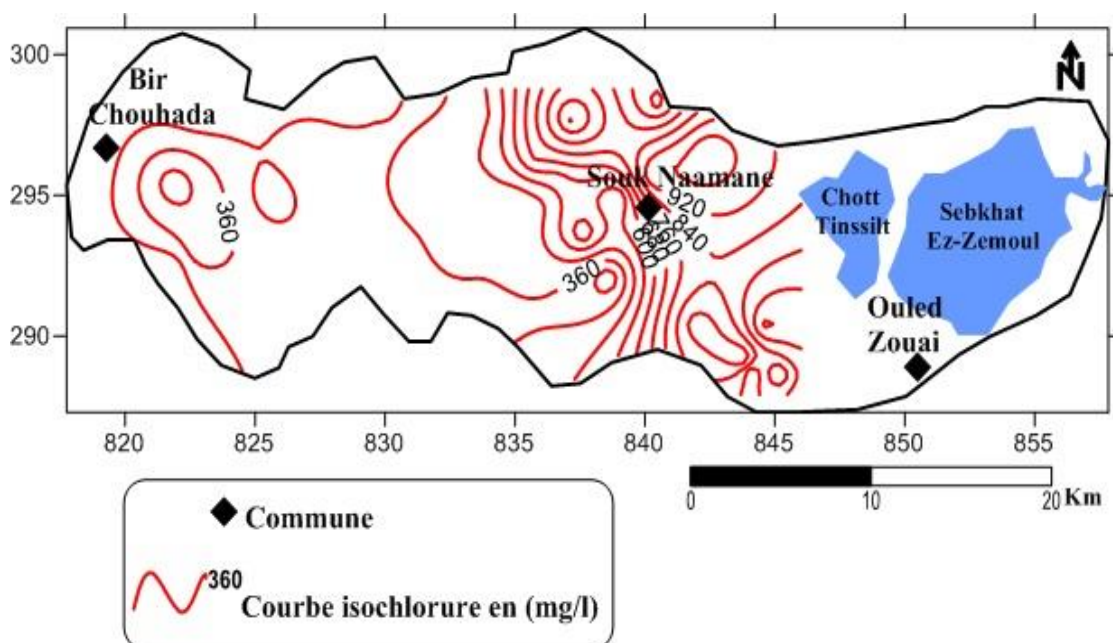


Figure 34 : Carte de chlorure des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014).

V.2. Les bicarbonates (figures 35) :

Les concentrations oscillent entre 115 et 370 mg/l. Nous notons que pour quelques points, les valeurs maximales sont rencontrées au niveau des bordures, ceci est dû à la dissolution des formations carbonatées. Les fortes concentrations sont enregistrées pendant la période des hautes eaux (juin 2014) par rapport à celle de la période des basses eaux (octobre 2014) ce qui

est dû à la dissolution des calcaires en bicarbonates par les pluies acides. Il est à noter que les teneurs en bicarbonates diminuent dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines.

V.3. Les sulfates (figures 36) :

Les concentrations, en général, oscillent entre 58 et 680 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées durant la période des basses eaux, au centre et à l'Est de la nappe. Elles sont dues à l'évaporation, car la surface piézométrique se trouve à une faible profondeur. Des teneurs remarquables ont été observées pendant la période des hautes eaux, sous l'effet d'une part, à la dissolution des gypses qui sont contenus dans les marnes, et d'autres parts au lessivage des dépôts évaporitiques, provenant des Djebel Hamouda et Guedmane.

Les plus faibles concentrations sont constatées à l'Ouest de la nappe.

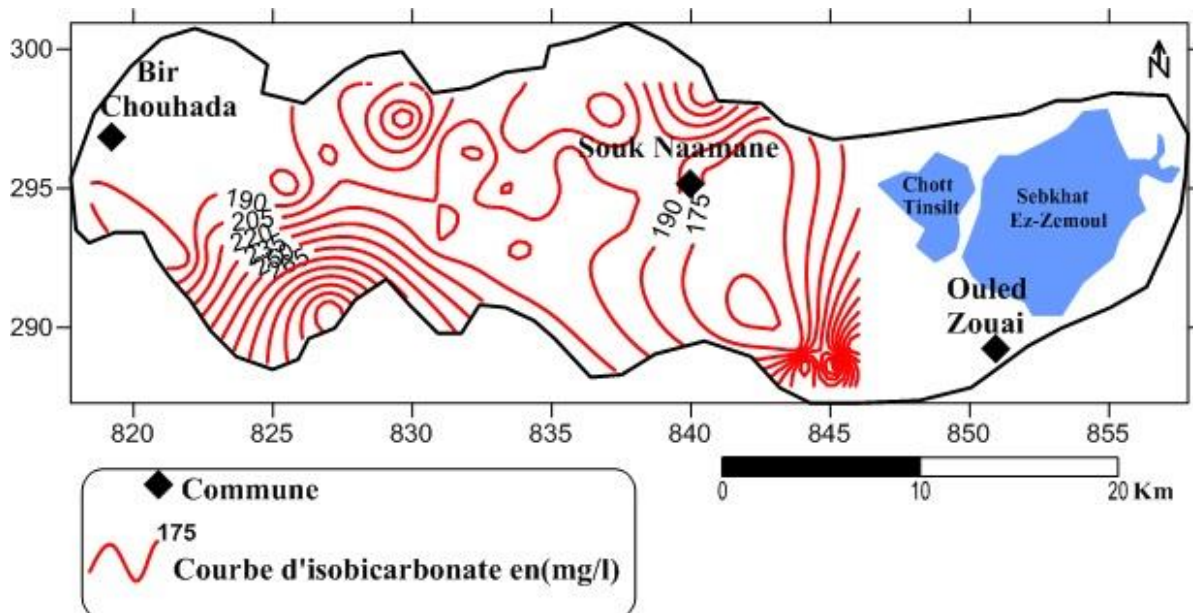


Figure 35 : Carte de bicarbonate des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014).

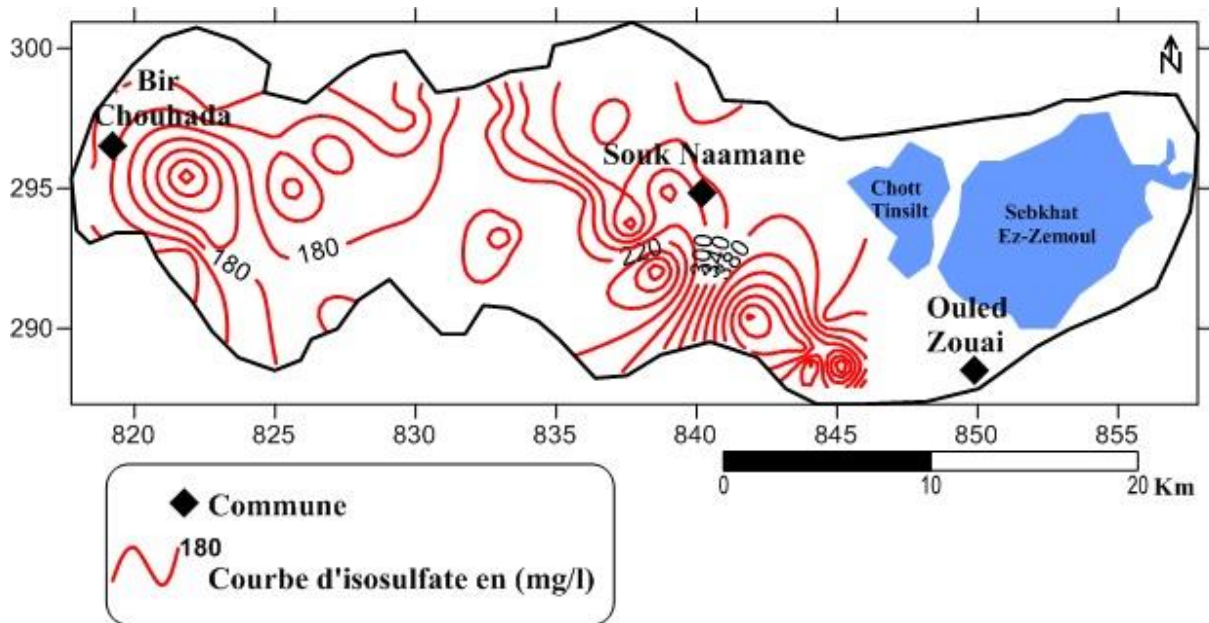


Figure 36 : Carte des sulfates des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014).

V.4. Le calcium (figures 37) :

Les concentrations oscillent en général entre 110 et 650 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles à l'Ouest de la nappe par rapport aux autres régions, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées de bordures. Nous remarquons que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au centre et à l'Est, nous pensons qu'elles résultent de la dissolution des formations de gypses et de calcaires et des dépôts évaporitiques provenant des Djebels Guedmane et Hamouda. La variation des teneurs en calcium est semblable à celle des chlorures, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré-calcique. Nous remarquons que les fortes concentrations coïncident avec la période des basses eaux, ce qui nous laisse penser que l'élévation des concentrations est due au phénomène d'évaporation.

V.5. Le sodium (figures 38) :

Les concentrations varient entre 75 et 425 mg/l. L'observation des deux cartes montre que les concentrations sont importantes dans la zone centrale et à l'Est de la plaine pendant la période des basses eaux, à cause de l'effet de l'évaporation, car la surface piézométrique n'est pas profonde.

L'origine du sodium provient de la dissolution des formations gypso-salifères d'âge triasique, qui constituent le substratum de la nappe alluviale dans la région située au Sud et à l'Est des deux chotts, où les évaporites affleurent.

Les faibles concentrations se localisent à l'Ouest de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées. Les argiles du Crétacé, qui se trouve dans la nappe, peuvent donner du sodium par échange de base en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^{+} .

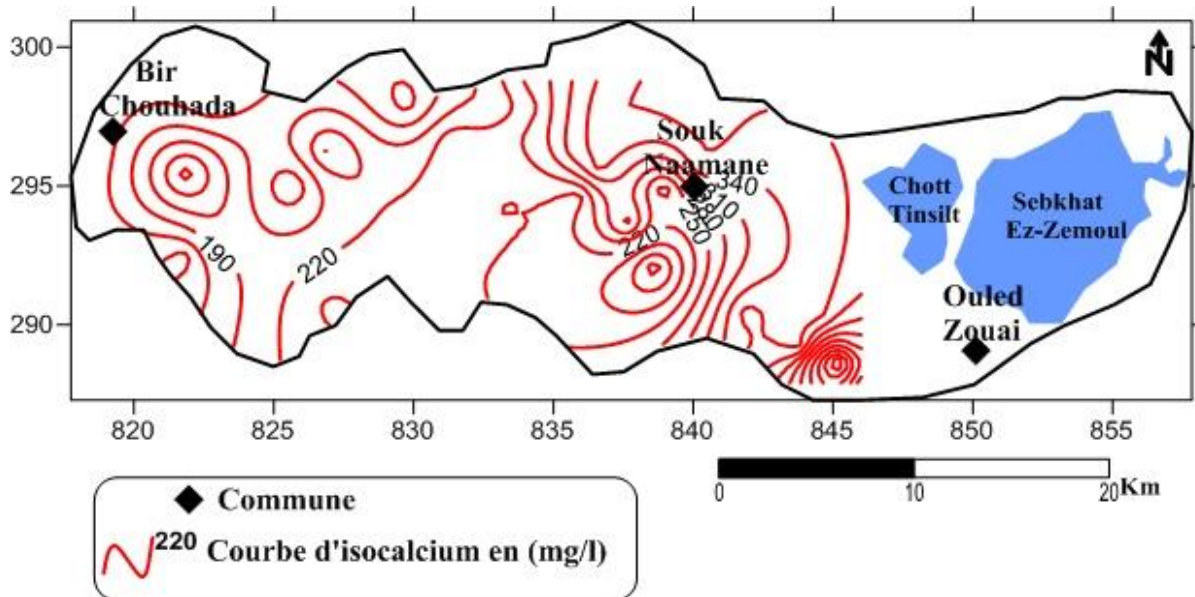


Figure 37 : Carte de calcium des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014).

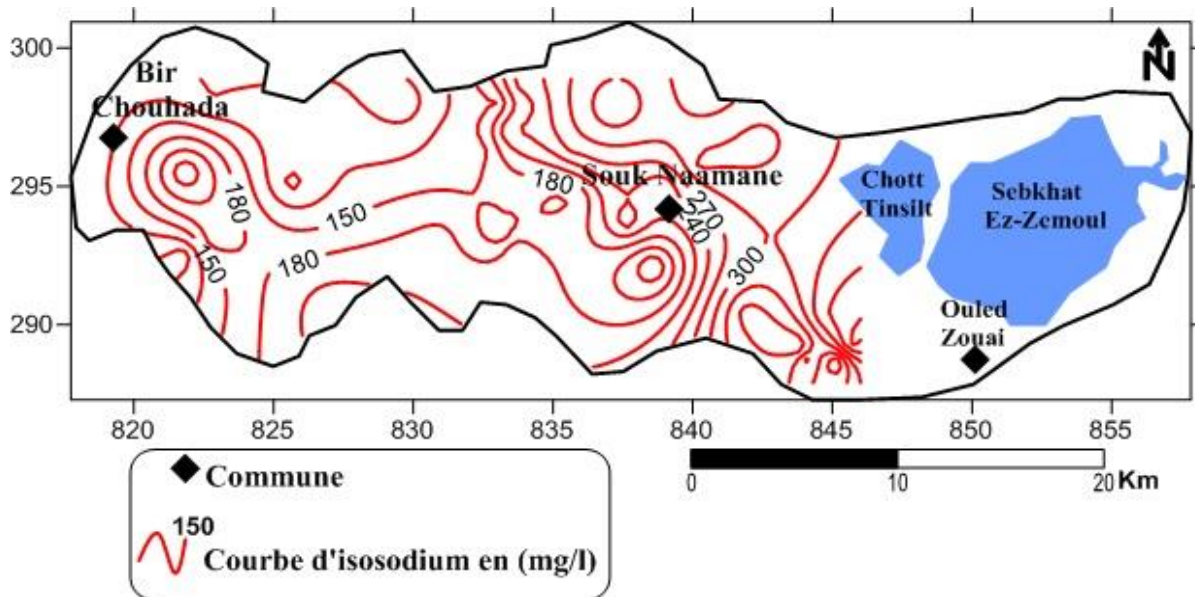


Figure 38 : Carte de sodium des eaux souterraines de la plaine (Juin 2014).

VI. Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines :

L'analyse des données chimiques à l'aide de la cartographie a pu donner une idée sur le mécanisme du chimisme des eaux souterraines de la nappe aquifère.

L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est très remarquable : les calcaires ont donné le faciès bicarbonaté calcique, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir des bordures calcaires.

Les marnes sont gypsifères, ainsi que les dépôts triasiques, sont à l'origine des faciès chloruré calcique, chloruré-sodique et sulfaté-calcique, par les phénomènes de lessivage et d'évaporation.

Les conditions hydrodynamiques de la nappe ont favorisé l'acquisition de ces faciès :

La surface piézométrique n'est pas assez profonde ce qui augmente l'effet de l'évaporation. Pendant la période des hautes eaux, les précipitations provoquent la dissolution des calcaires de bordures et le lessivage des dépôts de remplissage.

Les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction W-E et se chargent progressivement au fur et à mesure de leur déplacement vers la zone d'accumulation, ce qui explique les fortes teneurs observées dans cette région.

Quelques éléments chimiques ont des origines différentes telles que le calcium et le sodium. Ces faciès se sont-ils stabilisés ou évoluent-ils vers d'autres tendances ?

Ces éléments chimiques ont-ils la même évolution dans le temps et dans l'espace ?

Pour répondre à ces questions, une étude détaillée s'impose pour mettre en relief l'origine, l'évolution et l'influence de chaque élément sur l'acquisition des faciès. La réalisation d'une telle étude se basera sur les propriétés de chaque élément chimique et les outils statistiques.

VI.1. Facies caractéristiques :

A partir de la représentation graphique des faciès chimiques par les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff, nous constatons la dominance de quatre (4) faciès : le chloruré calcique, le chloruré-sodique, le sulfaté-calcique et le bicarbonaté-calcique. Ceci est vérifié par les teneurs dominantes des ions suivants : Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^- et SO_4^{2-} . Les deux diagrammes (figures 39A et 39B) utilisent les rapports $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ et $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ (les valeurs sont exprimés en meq/l). L'interprétation de ces deux diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en 4 pôles indiquant les 4 faciès, qui caractérisent la nappe. Nous notons l'absence des faciès bicarbonaté sodique et sulfaté sodique.

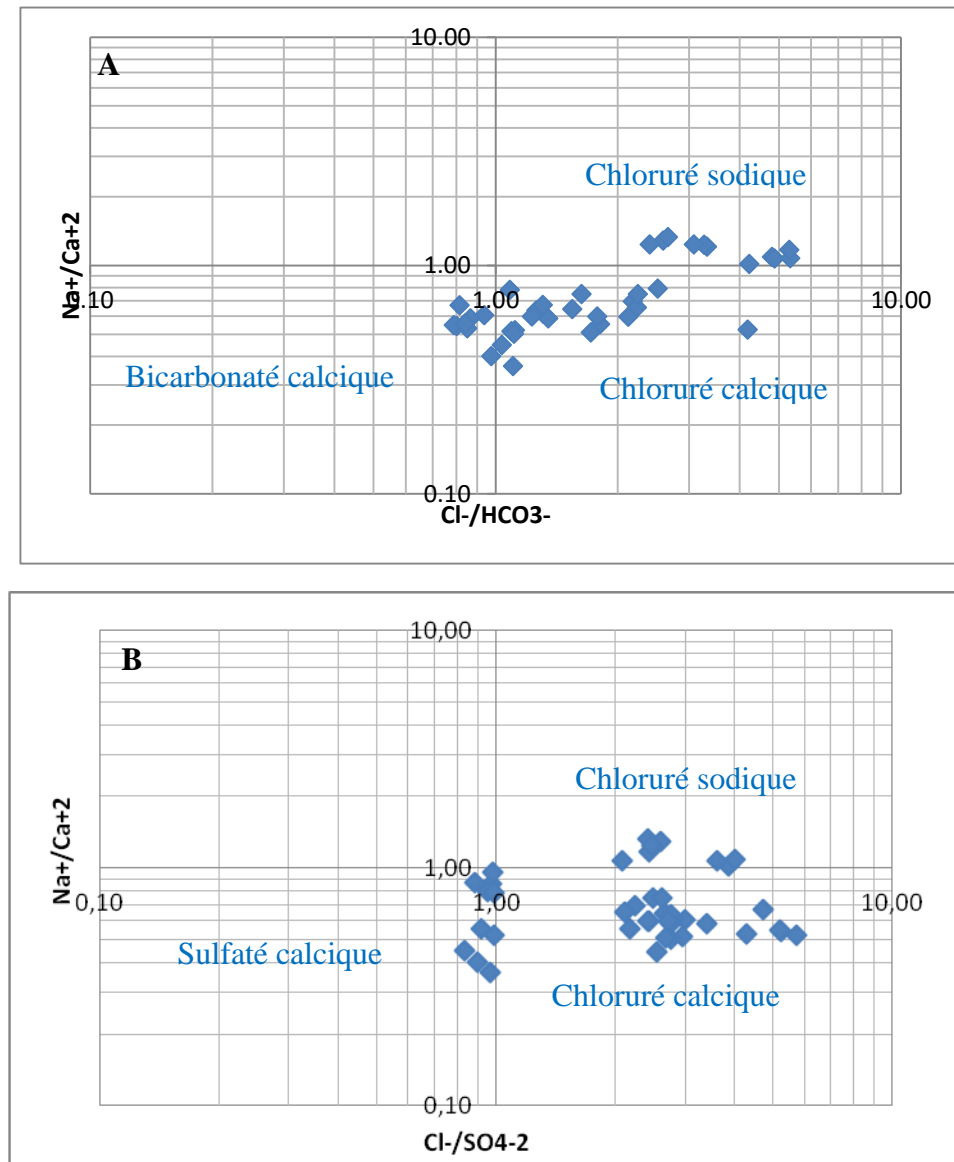


Figure 39 (A, B) : Evolution et distribution des faciès chimiques.

VI.2. Origine des éléments chimiques :

Les analyses chimiques ont concerné les points d'eau relevés durant les différentes campagnes d'échantillonnage.

VI.2.1. Les éléments Ca^{+2} , SO_4^{2-} et HCO_3^- :

Le calcium est en relation avec les deux éléments chimiques - bicarbonates et sulfates qui proviennent soit des calcaires soit du gypse.

La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates montre un ensemble qui se positionne sur la droite, indiquant l'origine carbonatée des ions de calcium

par la dissolution des formations carbonatées d'âge crétacé qui affleurent sur les reliefs des Djebels Guedmane, Guellat Ouled Selam et Hamouda.

Par contre les autres points présentent un excès en Ca^{2+} , provenant de la mise en solution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou du CaCO_3 (calcaires).

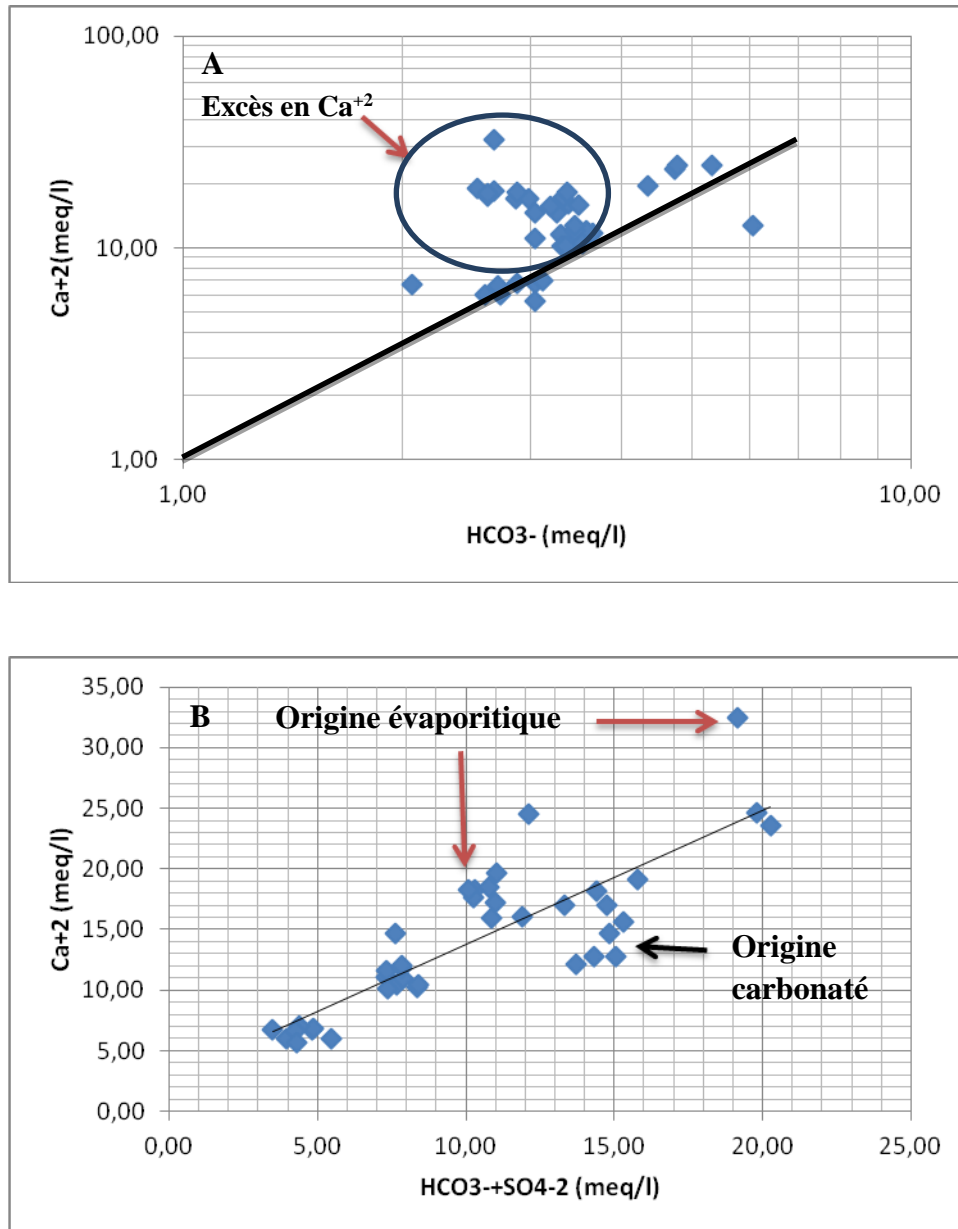


Figure 40 (A, B) : Détermination l'origine de calcium.

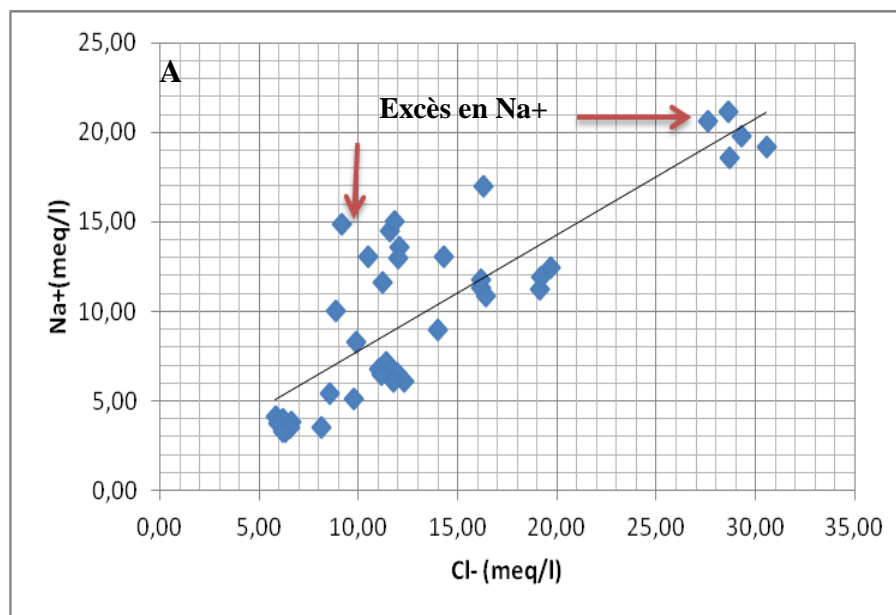
VI.2.2. Les éléments Na^+ , Cl^- :

Dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na^+ et Cl^- est attribuée à la dissolution de l'halite, incluse dans les formations triasiques. Cependant, les chlorures comme le sodium peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

La représentation graphique de l'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- (figure 41A) a montré un excès des teneurs en Na^+ , qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodium (autre que l'halite).

L'augmentation des teneurs en Na^+ qui a accompagné les faibles teneurs en Cl^- est due au phénomène d'échange de base (figure 41B), car les argiles du substratum peuvent libérer des ions Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+} .

Les fortes teneurs en Na^+ qui ont accompagné celles élevées du Cl^- , sont attribuées à la dissolution de l'halite contenue dans les formations carbonatées d'âge crétacé, qui affleurent sur les de Djebel Guedmane, Guellat Ouled Selam et Hamouda. Ce diagramme a confirmé un excès de Ca^{2+} par rapport à Na^+ .



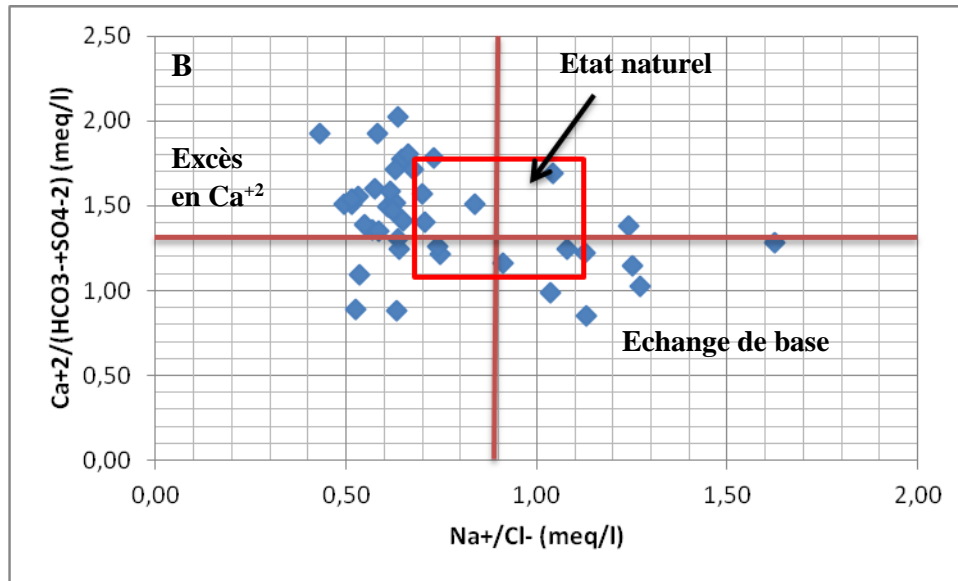
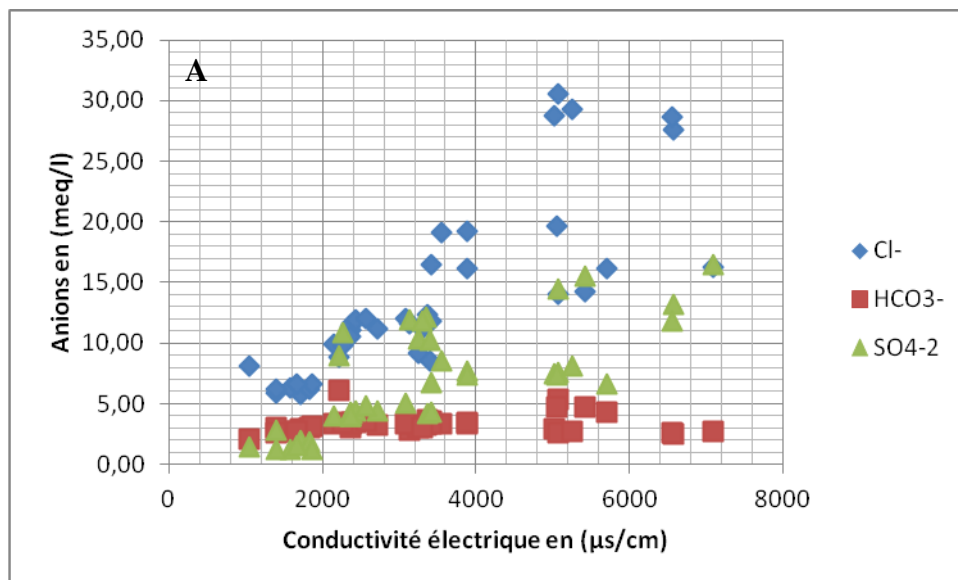


Figure 41 (A, B) : Détermination l'origine de sodium.

VI.2.3. Les éléments HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^- :

Après avoir fait le point sur les origines des cations, on a essayé de représenter l'évolution des anions en fonction de la conductivité. L'interprétation de la figure 42A montre que la conductivité électrique évolue plus avec les chlorures et les sulfates qu'avec les bicarbonates, ce qui indique une influence prépondérante des formations salifères.



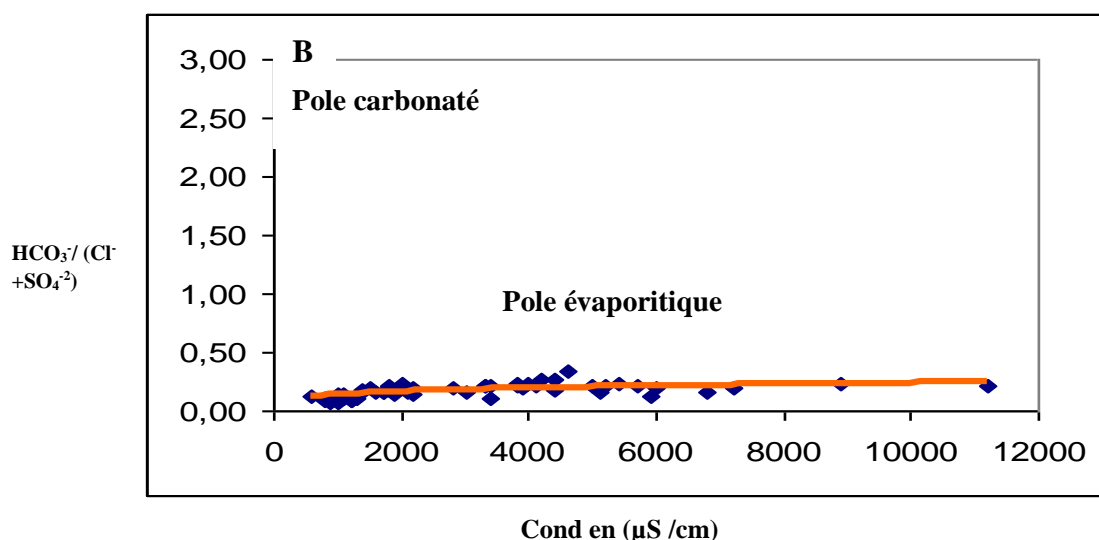


Figure 42 (A, B): Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

L'examen de la relation $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ permet d'observer les facteurs qui influencent la variation de la conductivité des eaux (Figure 42B).

Nous constatons ainsi une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité électrique, deux pôles sont observés :

L'un est caractérisé par une dominance des ions HCO_3^- et des conductivités inférieures à $2000 \mu\text{S/cm}$, il englobe 40% des points d'eau localisés au Nord-Est de Souk Naamane près des terrains de bordure crétacés et dans la région de Bir Chouhada, où la nappe est sollicitée par les captages, situés surtout dans les terrains des calcaires vacuolaires du Miocène.

L'autre représente le pôle évaporitique avec une dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités ($>2000 \mu\text{S/cm}$) et rassemble plus de 60% des points d'eaux. Ces eaux localisées au Nord de Souk Naamane, à Ouled Zouai et à l'Ouest du chott Tinsilt.

Les valeurs faibles de la conductivité ($2000 \mu\text{S/cm}$) s'observent dans les régions éloignées des affleurements des évaporites du Trias et sont liées aux ions bicarbonates. Par contre, lorsqu'elles dépassent $2000 \mu\text{S/cm}$, la conductivité devient liée plus aux ions évaporitiques (Cl^- et SO_4^{2-}).

VI.2.4. Les éléments SO_4^{-2} , Cl^- :

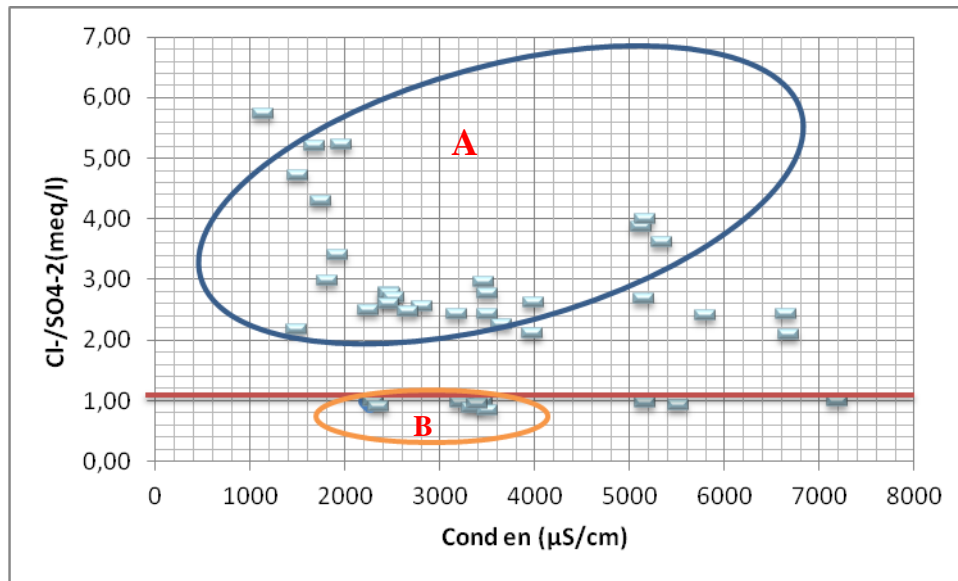


Figure 43 : Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique.

Le rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{-2}$ montre que la majorité des points d'eau supérieurs à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl^- par rapport à SO_4^{-2} , ce qui confirme la dominance du faciès chloruré calcique et sodique (figure 43). Quelques points d'eau présentent des valeurs du rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{-2}$) inférieures à 1, indiquant une origine gypsifère et évaporitiques (figure 43).

VII. Aptitude des eaux à l'irrigation :

VII.I. Introduction :

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones semi-arides, où cette ressource est rare ou inexistante, il est fait appel aux eaux souterraines.

Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation et d'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes, nous avons recensé deux séries d'effets de la salinité (M. De FORGES, 1972) : les uns portent sur les végétaux, les autres sur le sol. En effet, ces sels causent des changements de la perméabilité et de l'aération du sol d'une part, et d'autre part ils provoquent des perturbations du métabolisme des plantes et du processus osmotiques de ces dernières.

Comme la région de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai est à vocation agricole et les risques de salinisation des sols se font sentir, une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire, car cette région se caractérise par une faible pluviométrie, une forte évaporation et une eau souterraine trop chargée en chlorures et en sulfates.

Les risques qu'encourt cette plaine imposent une bonne connaissance des régimes hydriques et salins afin de pouvoir assurer une durabilité d'utilisation des ressources en eau et des sols.

Dans la présente approche, l'estimation de quelques paramètres de salinité en rapport avec l'usage agricole pour les quatre campagnes saisonnières a été établie.

VII.2. Classification des eaux par la méthode de Richards :

Après avoir reporté tous les points d'eau de campagne sur le diagramme de Richards (voir figures 44), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR, nous avons dégagé cinq classes :

Les classes C3S2 et C3S3 renferment des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée. La classe C3-S2 représente les puits qui se situent à l'Ouest de la plaine et dans la région de Bir Chouhada. Elle représente 9.34 % des puits des quatre campagnes, alors que la classe C3-S3 représente un pourcentage de 11.76 % ;

Les classes C4-S2, C4-S3 et C4-S4 représentent les eaux médiocres à mauvaises fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. La majorité des puits, appartenant à la classe C4-S4 et C4-S3, se situent entre Souk Naamane et Ouled Zouai et représentent 64,58% et 11,83% respectivement des points d'eau analysés. La classe C4S2 est d'une sodicité moins importante que celle de la classe précédente. Nous la rencontrons dans la région centrale de Souk Naamane et au Sud-Est de la plaine, avec un pourcentage de 2.47 %.

Les eaux de la nappe aquifère de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai présentent, en général, les mêmes qualités pour l'irrigation au cours de toute la période

d'observation (Tableau 19). La dégradation observée est due au gypse et aux argiles d'une part, et l'effet de l'évaporation d'autre part (augmentation des concentrations).

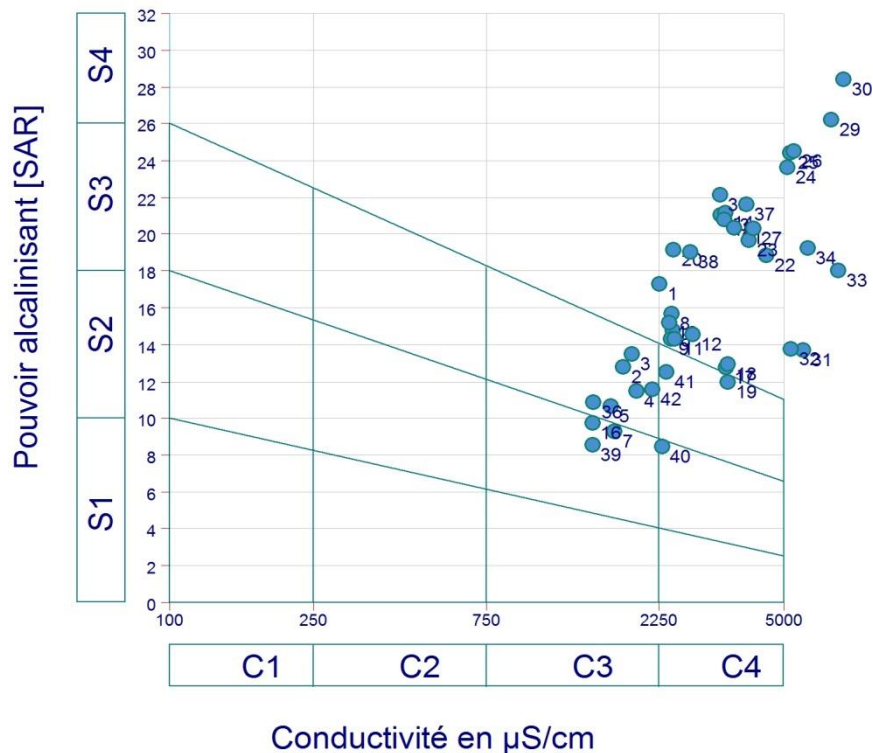


Figure 44: Diagramme de Richards pour Juin 2014.

Nous observons que la majorité des eaux se situent dans la classe C4-S2, C4-S3, C3-S1 qui définit une eau de salinité très élevée (C4) qui ne convient pas à l'irrigation en conditions ordinaires. Ces eaux ne peuvent être utilisées que pour l'irrigation des sols perméables avec un bon drainage. A défaut de ces critères l'eau présente un danger d'alcalisation des sols à textures fines. Seules les plantes tolérantes aux sels (tabacs, coton, orge, artichaut et dattiers) peuvent être cultivées.

Tableau 19 : Evolution des classes d'irrigation selon Richards.

Classes	Juin 2014
C3S2	9,75%
C3S3	12,19%
C4S2	00%
C4S3	12,19%
C4S4	65,87%

VII.2.1. Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon Richards :

Dans le but de mettre en relief l'effet de la lithologie sur l'aptitude des eaux à l'irrigation, nous avons cartographié la qualité des eaux à l'irrigation de la campagne du mois de juin 2014, qui englobe le maximum de puits. La répartition de l'aptitude à l'irrigation fait apparaître trois classes (figure 45) :

Admissible (C3-S2): Elle se localise dans la région de Bir Chouhada à l'Ouest de la nappe et représente les eaux de moyenne minéralisation, qui sont issues des formations carbonatées de bordures.

Médiocre (C3-S3, C4-S2): Elles englobent, généralement les eaux moyennement minéralisées avec des risques de salinisation moyens.

Mauvaise (C4-S3, C4-S4) : Cette classe se caractérise par les eaux de forte minéralisation, Présentant des risques de salinisation des sols importants, mais à alcalisation moyenne.

Nous la rencontrons au centre et à l'Est de la plaine.

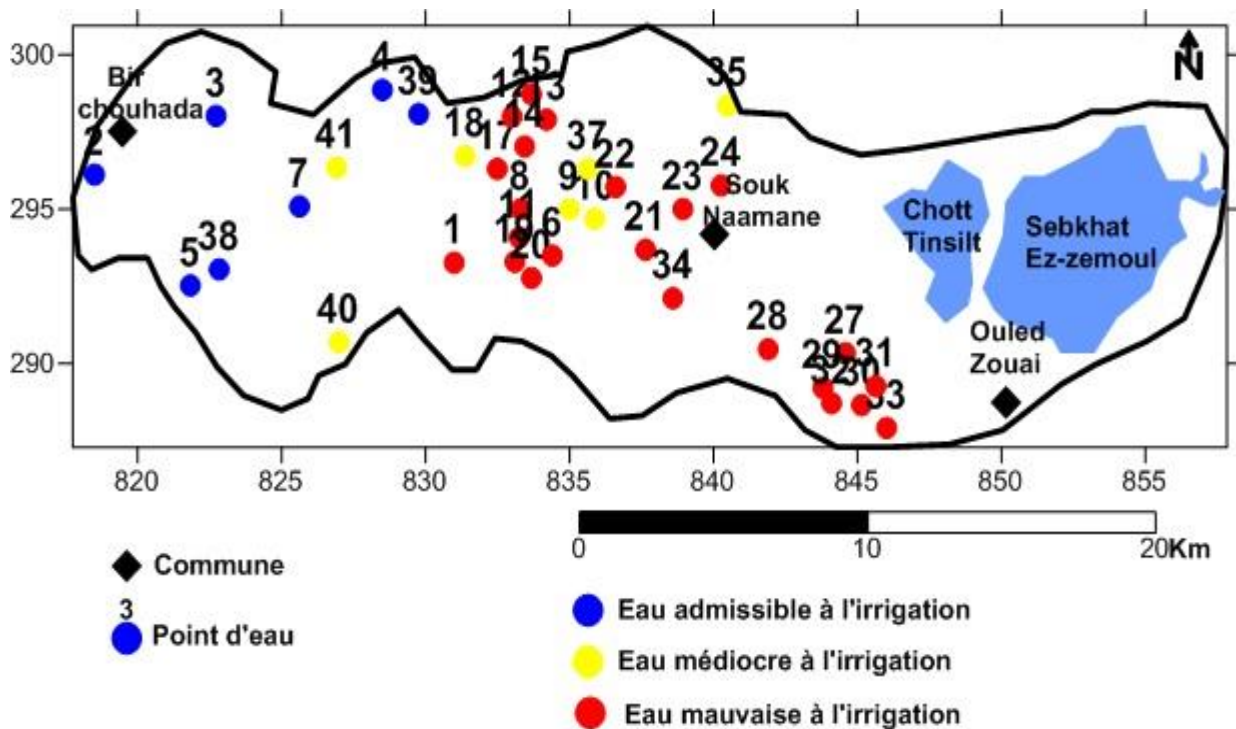


Figure 45 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Richards (Juin 2014).

VII.3. Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation (Figure 46). Le %Na⁺ est défini par la relation :

$$\text{Na}^+ \% = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) \quad (14)$$

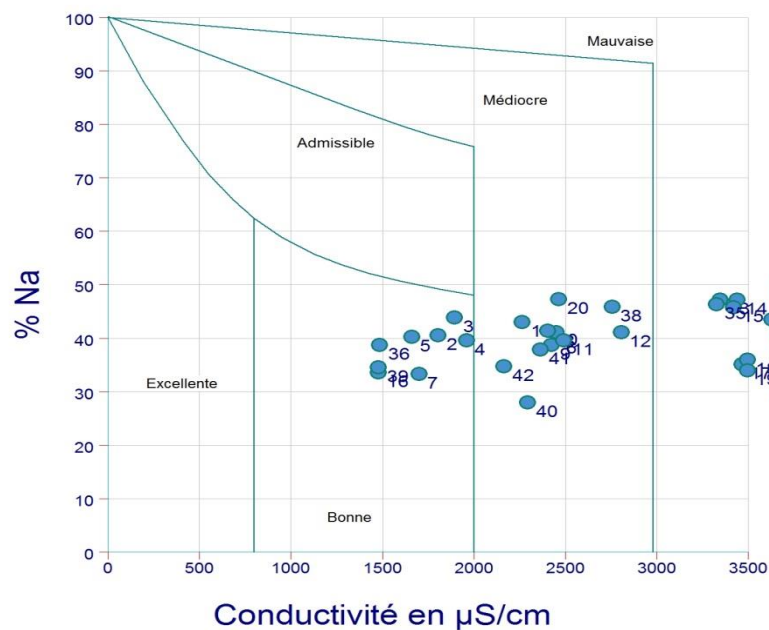


Figure 46 : Diagramme de Wilcox pour Juin 2014.

Les diagrammes couvrant toute la période d'observation montrent que les eaux souterraines de la nappe de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai selon la classification de Wilcox, appartiennent aux trois classes : Bonne, Médiocre et Mauvaise (Tableau 20).

Tableau 20 : Evolution des classes d'irrigation selon Wilcox.

	Juin 2014
Bonne	19,51%
Médiocre	26,82%
Mauvaise	53,66%

La classe Bonne regroupe les eaux qui sont faiblement minéralisées et se rencontre dans les régions de Bir Chouhada ;

La classe Médiocre regroupe les eaux plus minéralisées que celles des classes précédentes, elle se manifeste au centre et à l'Est de Bir Chouhada.

La classe Mauvaise regroupe les eaux qui se situent au centre et à l'Est de la plaine. Elle est la plus répandue dans la nappe (53.31 %).

Nous constatons que les eaux souterraines subissent une dégradation selon le sens de l'écoulement, montrant ainsi l'effet de la lithologie sur leur qualité (figure 47).

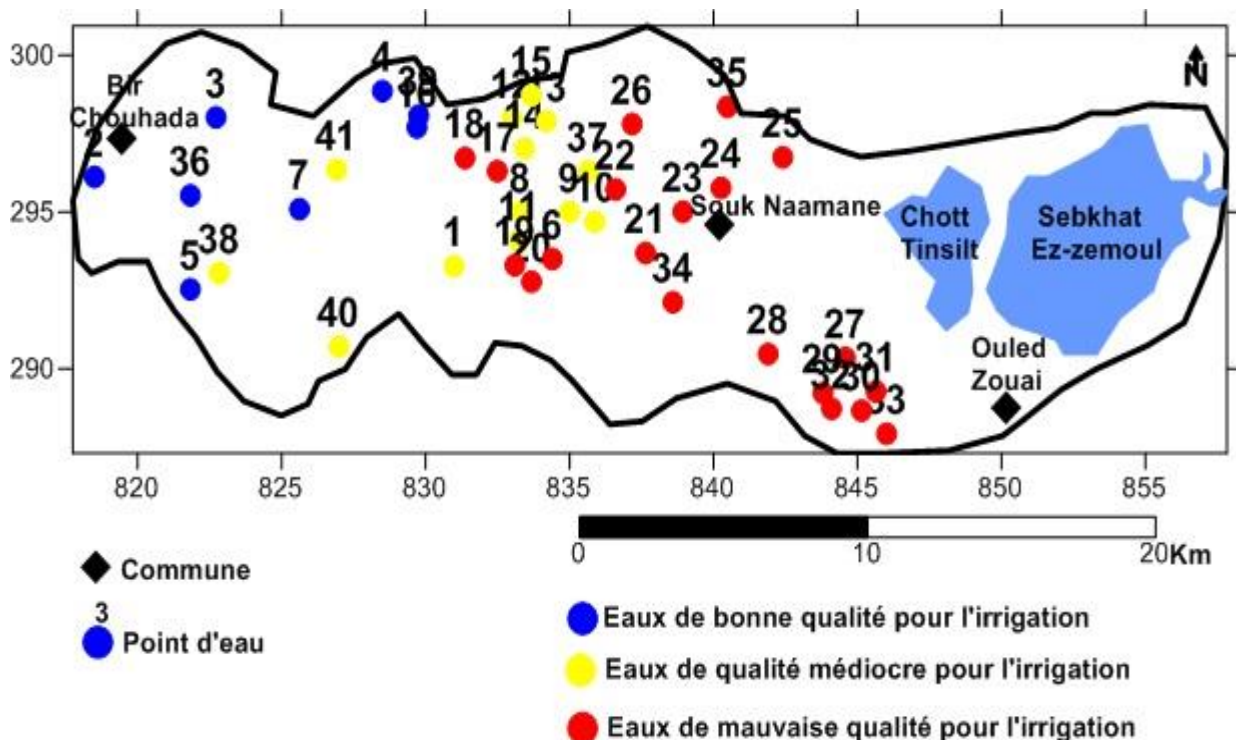


Figure 47 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation dans la région d'étude selon la classification de Wilcox (Juin 2014).

En examinant les deux cartes d'aptitude des eaux à l'irrigation établies à l'aide des deux méthodes de Richards et Wilcox, nous remarquons qu'elles présentent presque la même distribution de la qualité. En effet, la classe 'admissible', donnée par la première méthode, correspond à celles 'bonne', donnée par la deuxième méthode. La classe 'médiocre' et 'mauvaise' est déterminée par les deux classifications.

VIII. Pollution des eaux :

VIII.1. Les principales sources de pollution :

Durant nos sorties sur terrain, on a pu faire un inventaire des différentes sources de pollution, qui se résument comme suit:

- L'élevage des animaux (ovins, bovins et volailles) ;
- Les cultures maraîchère et céréalière, qui utilisent d'importantes quantités de fertilisants sous forme de fumier ;
- Les rejets urbains, qui déversent des eaux usées domestiques dans la plaine, sans traitement préalable ;
- Les décharges ménagères sauvages.

VIII. 2. Etude l'évolution de teneurs de nitrates :

VIII.1.2. Répartition spatiale générale :

La répartition des teneurs en nitrates dans la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai est liée aux facteurs polluants signalés précédemment, et en particulier à l'activité agricole et à la nature lithologique de la couche superficielle.

La cartographie des concentrations (figure 48) montre que la zone de grande perméabilité (5,5.10-5.m/s), qui se trouve à proximité de Souk Naamane et Ouled Zouai, est beaucoup plus exposée à la pollution, car les ions des nitrates s'infiltrent rapidement et on y enregistre des teneurs dépassant 80 mg/l. Au contraire, celle de faible perméabilité se situe à côté de Bir Chouhada et aux bordures des reliefs, où les teneurs enregistrées sont faibles et ne dépassent pas 35 mg/l, car le toit argileux protège la nappe. Les faibles teneurs en nitrates dans cette zone peuvent s'expliquer par le mélange des eaux récentes issues des formations carbonatées avec celles de la nappe d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Durant la période d'observation, 56 % des puits ont présenté une teneur dépassant les normes de l'OMS.

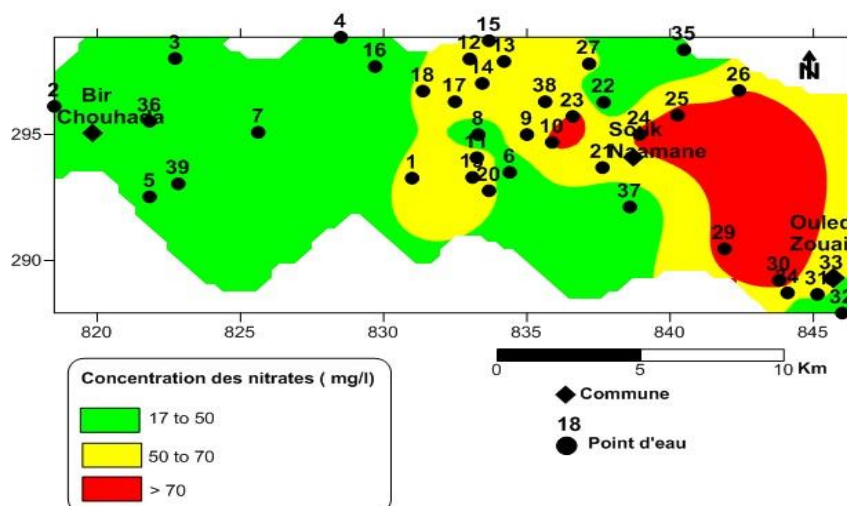


Figure 48 : Carte des nitrates en (mg /l) dans la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pour la période de juin 2014.

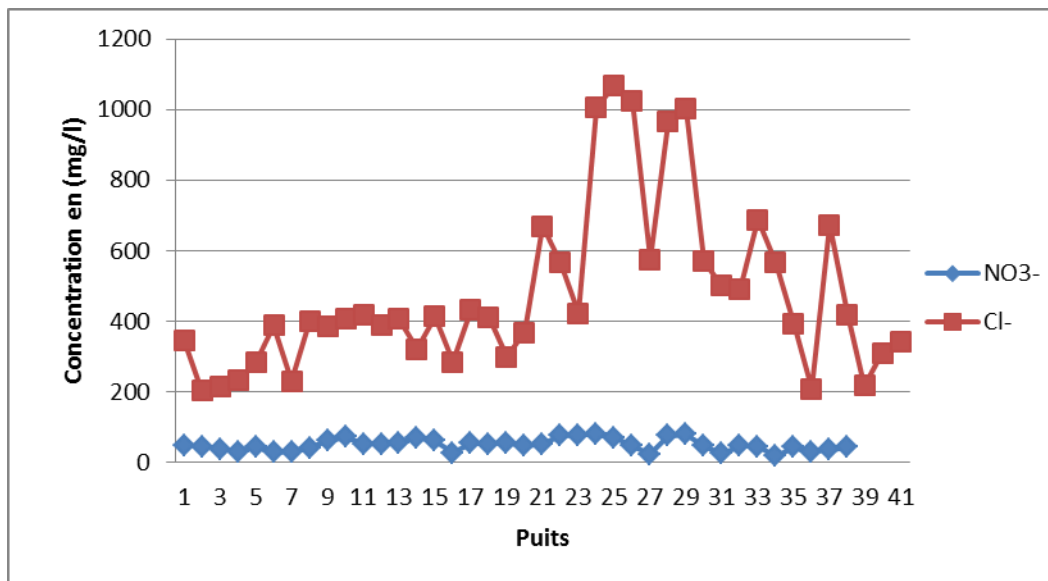


Figure 50 : Concentration des nitrates et des chlorures de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014.

VIII.5. Les phosphates :

Le phosphore est nécessaire à la croissance des plantes. Il est présent dans le sol sous la forme de phosphates : soit dissous dans l'eau, soit fixé sur les particules du sol, soit dans les minéraux ou encore sous forme organique.

Au fur et à mesure que les racines prélèvent les phosphates dissous dans l'eau, les molécules fixées sont progressivement libérées.

L'évolution des phosphates est semblable à celle des nitrates (figure 51). En effet, l'examen des cartes des phosphatés a montré une certaine ressemblance avec celle des nitrates, ce qui laisse penser que leur origine est anthropique résultant ainsi de l'activité agricole et non pas d'une origine naturelle.

Les teneurs en phosphates enregistrées varient de 0.11 mg/l à 0.4 mg/l, elles sont inférieures à la norme de potabilité (figures 51, 52).

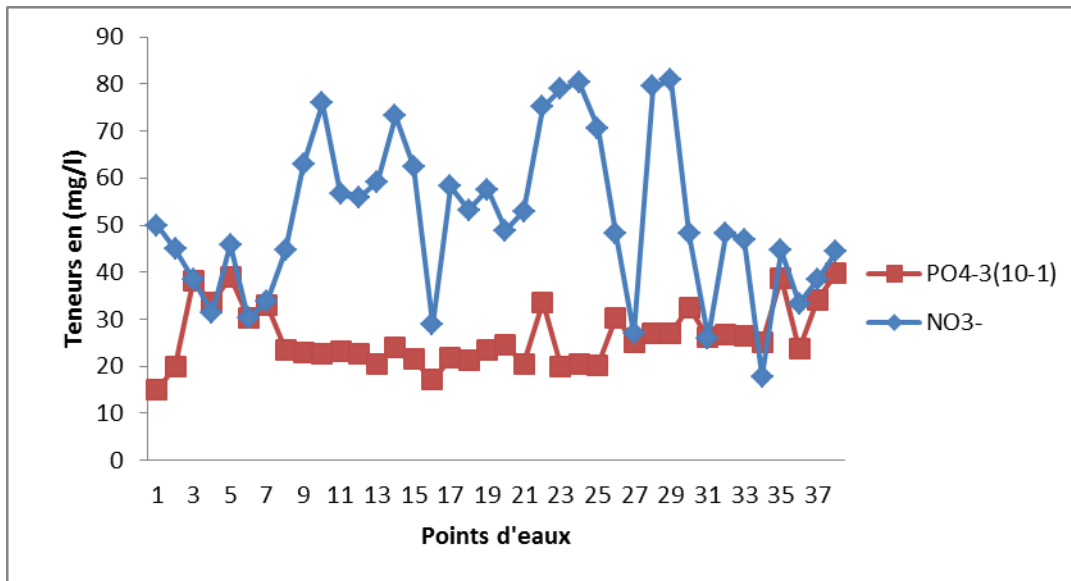


Figure 51 : Corrélation des teneurs de nitrate avec celles des phosphates de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014.

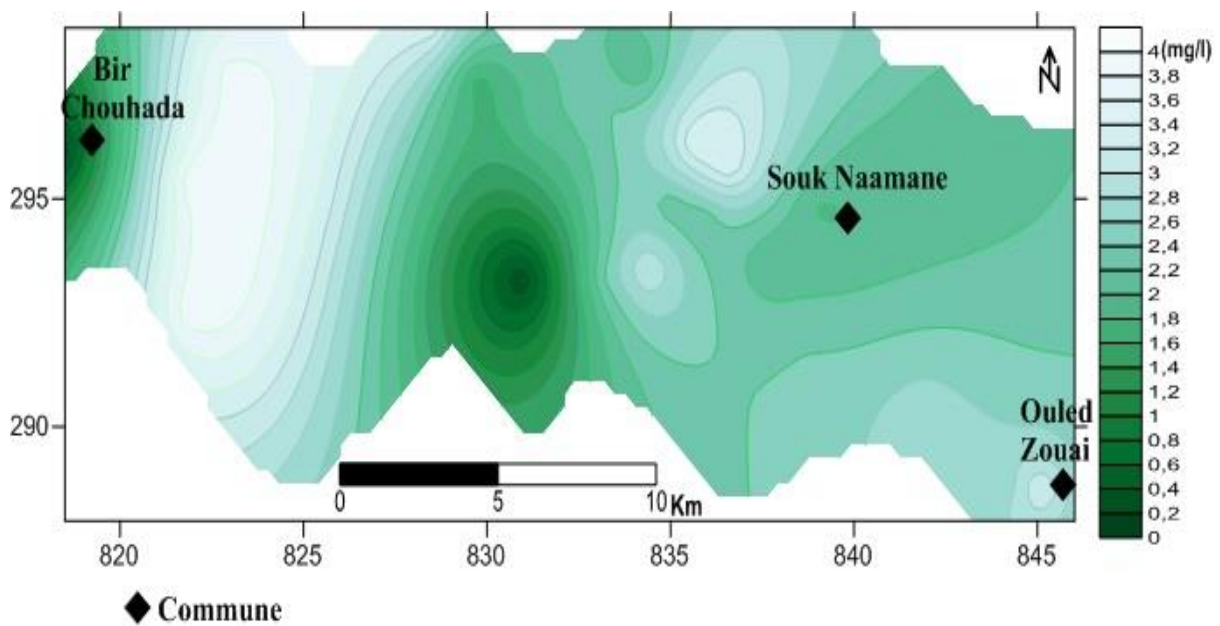


Figure 52: Carte des phosphates de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai pendant la période du Juin 2014.

Partie II : Evaluation quantitative des réserves d'eaux**IX. Aperçu théorique sur l'évaluation de réserve et ressource en eau souterraine :****IX.1. Notion de réserve et ressource en eau :**

La différence entre le concept de réserve et de ressource ne doit prêter à aucune équivoque. La réserve en eau souterraine est la quantité ou le volume d'eau gravitaire emmagasinée dans l'aquifères à une date donnée ou stocker au cours d'une période moyenne annuelle, dans une tranche d'aquifères délimitée. Elle résulte de la fonction capacitive du réservoir aquifère. Evaluée en unité de volume, elle est exprimée en hm^3 . La ressource en eau est la quantité ou le volume d'eau pouvant être extrait d'un domaine circonscrit pendant une période donnée compte tenu de critères hydrodynamique et hydrochimique de l'aquifères et est exprimée en termes de débit (m^3/an).

IX.2. Catégorie de réserves en eau souterraine :

La catégorie de réserve en eau souterraine est définie par le volume d'eau gravitaire stocké au cours d'une durée moyenne dans une tranche d'aquifères délimitée.

Reserve totale de l'aquifères :

C'est la quantité d'eau gravitaire contenue dans le volume d'un système aquifères défini par ces conditions aux limites ; à la base par le substratum, la limite supérieure est le toit imperméable pour aquifères à nappe captive et la surface piézométrique maximale moyenne pour celui à nappe libre. Elle est exprimée en m^3 ou m^3/Km^2 .

Réserve permanente :

C'est le volume d'eau non renouvelé dans les conditions naturelles d'alimentation.

Dans le cas d'une nappe libre, elle est limitée par la surface piézométrique minimale moyenne et pour les nappes captives, la réserve permanente est très peu différenciée de la réserve totale.

Réserve régulatrice des aquifères à nappe libre :

C'est le volume d'eau gravitaire contenu dans la zone de fluctuation de la surface piézométrique d'un aquifères à nappe libre. Elle est déterminée par référence à une période définie (hauteur de fluctuation annuelle ou moyenne annuelle).

IX.3. Méthode d'évaluation de la réserve en eau souterraine :

IX.3.1. Principe d'évaluation :

La réserve en eau souterraine, W est estimée différemment selon que l'on considère un aquifères à nappe libre ou captive. Elle est évaluée par traitement d'un couple de données à savoir :

Le volume V , de la tranche d'aquifères considérée (réservoir saturé) ;

La porosité efficace (n_e) des aquifères à nappe libre, ou le coefficient d'emmagasinement des aquifères à nappe captive S .

La réserve s'exprime alors par le produit :

$W = V \cdot n_e$ dans le cas d'une nappe libre

$W = V \cdot S$ dans le cas d'une nappe captive

IX. 3.2. Renouvellement de réserve en eau souterraine :

La réserve en eau souterraine est essentiellement renouvelée par les apports de l'infiltration efficace. En régime naturel, cette alimentation compense les sorties dues à l'écoulement souterraine (Q_w), étant donné que la différence de réserve ΔW , est constante. Classiquement, deux paramètres sont définis : le taux de renouvellement et la durée de renouvellement.

Le taux de renouvellement représente la fraction de la réserve totale renouvelée en une moyenne, il est défini comme le rapport de l'alimentation efficace moyenne annuelle (I) exprimée en volume, à la réserve totale moyenne W_M . Il est donné en pourcentage.

La durée de renouvellement est la durée théorique nécessaire pour que le volume cumulé de l'alimentation de l'aquifères, soit égal à sa réserve totale.

IX.3.3. Evaluation quantitative de la réserve et la ressource en eau souterraine :

Pour évaluer la ressource en eau souterraines nous avons procédé la méthode de la cartographie de l'aquifères. Cette méthode est basée sur l'examen et l'interprétation des cartes structurales, piézométriques et coupes hydrogéologiques de l'aquifère. Ces cartes sont établies par la synthèse de données des études ayant trait à la géologie, à la géophysique.

IX.4. Réserve totale de la nappe :

Nous avons estimé le volume total du réservoir sur la base de la coupe hydrogéologique et la carte isopache (DHW Oum-El-Bouaghi) de la nappe superficielle de la région d'étude, que nous avons dressé à partir des données des sondages géoélectriques et les logs stratigraphiques.

On a calculée la surface comprise entre deux courbes isopaches. Le produit de la surface ainsi obtenue par la puissance moyenne des deux courbes isopaches permet de déduire le volume aquifère correspondant, soit un volume de 2441,35 hm³ (Tableau 21).

Tableau 21 : Estimation du volume total de la nappe et de la réserve totale.

Intervalles des Epaisseurs	Epaisseur Moyenne (m)	Superficie (m ² 10 ⁶)	Volume (m ² 10 ⁶)	Niveau d'eau moyen	Volume non sature	Volume sature
<50	25	26.6	709.1028			
50 - 1	75	300.3	8005.57			
100 - 1	125	33	879.714			
150 - 2	175	21	559.818	20.65	8363.25	2441,35
200 - 2	225	5.8	154.61			
250 - 3	275	13	346.56			
300 - 3	325	3.8	101.27			
350 - 4	375	1.8	47.97			
		Total : 405	Total 10804.602			

Le volume de la roche réservoir totale de la nappe obtenu par la combinaison des résultats de la carte isopache et la coupe hydrogéologique et celle des profondeurs des niveaux statiques des hautes eaux (Juin 2014) est égale à 244,13 hm³ (Tableau 22).

La réserve en eau totale W_t , contenue dans ce volume du terrain aquifère avec une porosité efficace de 15%, est donnée par l'expression suivante :

$$W_t = V_t * n_e$$

W_t : réserve totale (hm³)

V_t : volume de la nappe

n_e : porosité efficace

$$W_t = 2441,35 * 0,1 = 244,13 \text{ hm}^3$$

IX.5. Réserve permanente (Wp) :

La réserve permanente Wp, est estimée par le même procédé que celui utilisé pour la détermination de la réserve totale Wt ; seulement on ne tient compte cette fois-ci que des mesures du niveau statique des basses eaux octobre 2014.

$$W_p = V_p \cdot n_e$$

Wp : La réserve permanente (hm³)

Vp : le volume du réservoir aquifère en période d'été

ne : porosité efficace

La réserve en eau permanente **Wp= 227,93 hm³**

Tableau 22 : Estimation du volume total de la nappe et de la réserve permanente.

Intervalles des Epaisseurs	Epaisseur Moyenne (m)	Superficie (m ² 10 ⁶)	Volume (m ² 10 ⁶)	Niveau d'eau moyen	Volume non sature	Volume sature
< 50	25	26.6	709.1028			
50-100	75	300.3	8005.57			
100-150	125	33	879.714			
150-200	175	21	559.818	21.05	8525.25	2279,35
200-250	225	5.8	154.61			
250-300	275	13	346.56			
300-250	325	3.8	101.27			
350-400	375	1.8	47.97			
		Total : 405	Total 10804.602			

IX.6. Réserve exploitables ou renouvelables :

Cette réserve est estimée par deux méthodes à savoir :

La méthode hydrologique

La méthode cartographique (carte de fluctuation de la nappe)

IX.6.1. Méthode hydrologique :

La recharge de la nappe s'effectue par l'infiltration directe des eaux de précipitation.

Donc : $W_R = V_i + A_p$; $V_i = I * S$; Avec :

W_R : réserve régulatrice (hm^3)

V_i : volume d'eau infiltré (hm^3)

A_p : apport d'eau latérale (hm^3)

I : infiltration (mm)

S : superficie du sous bassin versant (405 Km^2)

Le calcul de l'infiltration a été traité au chapitre hydroclimatologie. Les résultats donnent une infiltration de l'ordre de 4,93% pour une précipitation moyenne annuelle de 465,3 mm.

Le tableau N° donne le bilan hydrique de la station hydrométrique de la zone d'étude.

Tableau 23 : Bilan hydrique globale de la région d'étude.

Station	Ain Skhouna (Bir Chouhada)
P (mm)	465,3
Lame d'eau ruisselé Le (mm)	52,64
Infiltration (mm)	22,96
ETR (mm)	390,88
Déficit d'écoulement D (mm)	241,62

Ces valeurs du bilan d'écoulement superficiel retenues à la station de Ain Skhouna qu'à partir d'une précipitation de 465,3 mm/an durant la période 1998/2012, on a une lame d'eau écoulé de l'ordre 52,64 mm sont de taux de 11,31%, une valeur très faible para port à la lame d'eau précipitée. Le déficit d'écoulement 241,62 mm traduit une forte évapotranspiration de l'ordre de 51,92 % des précipitations.

A l'échelle du bassin versant dont l'étendue est de 765 Km^2 , le volume d'eau infiltré est de 18 hm^3 . A l'échelle de la plaine, dont l'étendue est de 405 Km^2 , le volume d'eau infiltré est 10

hm³. Ainsi nous constatons que les apports par infiltration directe, à la nappe représentent 55,55% des réserves actuelles évaluées à partir de la carte iso-battement de la nappe et qui donne un volume de 8 hm³. Le reste des apports est assuré par l'alimentation de la nappe à partir des bassins avoisinants et par les eaux de la nappe karstique.

IX.6.2. Méthode cartographique (carte de fluctuation) :

Le calcul du volume de la réserve régulatrice de la nappe libre est obtenu par la carte en courbe d'égale hauteur de fluctuation (iso battement) pour l'année 2014. Les résultats sont portés dans le tableau ci-après (Tableau 24).

En utilisant la formule suivante pour calculer le volume de la réserve régulatrice :

$$W_R = V_R * n_e$$

W_R : réserve régulatrice (hm³)

V_R : volume de tranche correspondante à la fluctuation

n_e : porosité efficace

Tableau 24 : calcul du volume de la réserve régulatrice de la nappe (2014).

Courbe d'iso battement	Puissance moyenne par tranche	Surface 10 ⁶ m ²	Volume 10 ⁶ m ³
	V_R	S	W_R
0 - 0.2	0.1	23.29	2.329
0.1-0.3	0.2	22.81	4.562
0.3-0.5	0.4	141.11	56.444
0.4-0.6	0.5	23.23	11.615
0.6 – 0.8	0.7	139.69	97.783
0.9 – 0.7	0.8	22.57	18.056
0.8 – 1.2	1	23.53	23.53
		Total : 405	Total : 214.319

La réserve régulatrice calculée par la carte en courbes d'égale hauteur de fluctuation pour l'année 2014, compte tenu d'une porosité utile $n_e=10\%$, est égale à $21,4 \text{ hm}^3$.

IX.6.3. Calcul du taux de renouvellement :

Le taux de renouvellement de la réserve en eau souterraine de la nappe est donné par l'expression suivante : **Taux de renouvellement = Q_w/W_M**

Pour $Q_w = 21.4 \text{ hm}^3$ et $W_t = 244.13 \text{ hm}^3$, le taux de renouvellement est égal à **0.087 %**.

Durée de renouvellement = $W_t / Q_w = 11 \text{ ans}$.

Les résultats des paramètres de renouvellement de la réserve en eau souterraine, comparés aux valeurs caractéristiques des paramètres de renouvellement données par G. Bodelle et J Margat et G Castany (0,08% près de 0,1), confirme d'une réserve d'alimentation actuelle avec une fonction régulatrice grande.

Les résultats de l'évaluation numérique des différents types des réserves en eau souterraine (totale, permanente et régulatrice) de la nappe de la région d'étude, obtenue par les méthodes hydrologiques et cartographiques sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 25 : récapitulatif des résultats de l'évaluation numérique des différentes réserves en eau souterraines.

		Valeurs en hm^3	Volume hm^3/Km^2
Réserves en eau souterraine	Réserve totale (W_t)	244,13	0,6
	Réserves permanentes (W_p)	227,93	0,56
	Réserves régulatrices (W_R)	21.4	0.052
	Débits extraits	16	0,04

X. Conclusion :

L'étude qualitative des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai permet de dire que :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de quatre faciès dominants, qui sont le chloruré calcique, le chloruré sodique, le sulfaté calcique et le bicarbonaté calcique.

La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques.

L'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales de la plaine, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité. Ce bilan a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et gypsifères a montré que les premiers ont tendance à précipiter avant les seconds, ce qui permet aux éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses d'acquérir des teneurs importantes.

La classification de Richards et celle de Wilcox ont prouvé la dégradation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

Les résultats obtenus de la réserve régulatrice ($21,4 \text{ hm}^3$) obtenues par le dépouillement de la carte de fluctuation de la nappe libre sont inférieures à celles qui sont déduites de la différence entre la réserve totale et permanente.

Par ailleurs, l'exploitation de la nappe pour les besoins en AEP et en irrigation représentée par les débits extraits (16 hm^3) est inférieure à la réserve régulatrice. Ces paramètres du bilan de la nappe permet en outre de conclure que la ressource en eau n'est pas totalement exploitable en raison de la salinité élevée qui caractérise les ressources en eau souterraine.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

La présente étude, qui a porté sur la nappe Mio Plio Quaternaire de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai, située au Nord-Est de l'Algérie, a abouti aux conclusions suivantes:

L'étude géologique de cette plaine a permis de mettre en évidence l'existence de deux ensembles réservoirs :

L'un poreux englobe différentes formations du Mio-Plio-Quaternaire, des alluvions anciennes et récentes, des conglomérats et des calcaires lacustres mal stratifiés. Il se présente en de vastes étendues au niveau des plaines de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai.

L'autre englobe la série calcaire et calcaro-dolomitique d'âge crétacé et jurassique probable, au niveau des massifs carbonatés essentiellement Djebel Guedmane, Djebel Tizourit, Djebel Amsid, Djebel Hamouda.

La plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai est soumise à un climat méditerranéen de type semi-aride, avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec, avec des précipitations annuelles de l'ordre de 463,5 mm. La température moyenne interannuelle est de 16,5°C. Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite a révélé que l'ETR est de l'ordre de 463,5 mm et que l'infiltration ne représente que 4.93 % de ces dernières. Le ruissellement ne bénéficie également que de 11.31 % de ces précipitations.

L'étude hydrogéologique a permis de confirmer ce qui a été déterminé par l'étude géologique et que nous sommes en face de deux formations aquifères principales ; il s'agit des calcaires et calcaires dolomitiques du Crétacé et Jurassique qui forment un aquifère à perméabilité de fissure et offre la possibilité d'existence de drains karstiques et des formations fluvio-lacustres du Mio-Plio-Quaternaire constituant un aquifère.

D'après les coupes géologiques, nous constatons que les nappes peuvent être intercalées par des niveaux argileux.

L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait par l'infiltration efficace, soit le long des piémonts des massifs environnants et aussi par les aquifères carbonatés au niveau des failles.

L'écoulement se fait principalement dans les deux sens, du Sud-Ouest vers le Nord-Est, ou d'Ouest vers l'Est avec un gradient hydraulique variable allant de 0.002

à 0.005, le niveau le plus bas de cette nappe superficielle est représenté par les chotts (Tinsilt, Ez Zemoul).

Les valeurs les plus importantes de la perméabilité et de la transmissivité se localisent au centre de la plaine et au Sud-Est, et les plus faibles en bordure et à l'Ouest de la plaine.

L'étude hydrogéochimique a été réalisée afin de caractériser le faciès chimique et la qualité des eaux souterraines et le temps de séjour des eaux souterraines.

Plusieurs modes et outils d'interprétation ont été utilisés (cartographie, diagrammes, statistiques, informatique, etc.), qui ont montré que :

- la plaine de Bir Chouhada est caractérisée par des eaux chargées et moyennement potables.
- la zone marécageuse est caractérisée par des eaux très chargées, influencées par la présence des chotts et les formations triasiques et sont donc de mauvaise qualité.
- Plusieurs faciès chimiques apparaissent dont les plus dominants sont chloruré-sodique et chloruré calcique. Cela est dû à la dissolution des formations évaporitiques et au lessivage des terrains gypso-salifères.
- La répartition spatiale des éléments chimiques a confirmé que l'origine de ces faciès est fortement liée à la nature lithologique de la nappe. La dissolution des formations carbonatées et évaporitiques est à l'origine de cette distribution.
- l'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales de la plaine, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport aux ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité.

Ce bilan a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe.

La classification de Richards et celle de Wilcox ont prouvé la dégradation de la qualité des eaux pour l'irrigation.

Quant à l'aspect environnemental, les investigations sur les sources de pollution de la plaine de Bir Chouhada, Souk Naamane et Ouled Zouai ont fait apparaître une forte contamination de celle-ci par des nutriments d'origine agricole et par les rejets domestiques, qui sont déversés sans aucun traitement préalable, ce qui a contribué à la dégradation de leur qualité.

La nature lithologique de la couche vadose et celle de la couche aquifère ont favorisé la contamination de cette dernière et influencé la répartition des nitrates dans l'espace ;

Il est à noter que l'effet de la contamination naturelle, marquée par le taux de salinité élevée avec de fortes concentrations en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

Cette étude expose clairement le problème de la gestion des ressources en eau et la protection des eaux souterraines contre la pollution dans les régions semi-arides.

Les résultats obtenus de la réserve régulatrice ($21,4 \text{ hm}^3$) obtenues par le dépouillement de la carte de fluctuation de la nappe libre sont inférieures à celles qui sont déduites de la différence entre la réserve totale et permanente.

Par ailleurs, l'exploitation de la nappe pour les besoins en AEP et en irrigation représentée par les débits extraits (16 hm^3) est inférieure à la réserve régulatrice. Ces paramètres du bilan de la nappe permet en outre de conclure que la ressource en eau n'est pas totalement exploitable en raison de la salinité élevée qui caractérise les ressources en eau souterraine.

Recommandation :

Au vu des différents problèmes qui ont été soulevés et qui ont été étudiés nous proposons les recommandations suivantes :

- Il est nécessaire d'installer un réseau de piézomètres pour l'observation du niveau d'eau dans les nappes et d'évaluer les fluctuations de la surface piézométrique. Afin d'évaluer les ressources et les réserves des nappes.
- Poursuivre les observations des différents paramètres climatiques et hydrométriques.
- Encourager les agriculteurs à améliorer leurs pratiques agricoles, par une utilisation rationnelle des engrais et des pesticides, puisqu'un lien significatif a été établi entre la présence de nitrates dans l'eau des puits et la zone d'agriculture intensive qui est en soi un avertissement.
- Maîtriser le stockage et l'utilisation des matières organiques résultant de l'élevage animal.
- Arrêter le déversement direct des rejets domestiques et industriels au niveau de la région d'étude, en réalisant un traitement préalable des eaux de rejet avant qu'elles n'atteignent les chotts.

- Réaliser une étude d'impact environnemental pour l'emplacement des décharges ménagères dans des endroits où la pollution serait moins importante pour influencer sur la qualité des eaux.
- L'établissement de modèle d'écoulement permettrait de mieux connaître le mécanisme hydrodynamique des eaux souterraines des nappes et un modèle hydrodispersif pour mieux évaluer les mécanismes de transfert de polluants.
- Veiller à une gestion rationnelle des eaux, afin d'éviter la surexploitation intensive et anarchique des eaux souterraines

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Ake, G.E., Dongo, K., Kouadio, B.H., Dibi, B., Saley, M.B. and Biemi, J. (2009), “Contribution of intrinsic vulnerability: Method DRASTIC and GOD on the study of pollution by the Nitrates in Bounoua Region (South East of Ivory Coast)”, *The European Journal of Scientific Research*, Vol. 31 No. 1, pp. 157-171.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H. and Petty, R.H. (1985), “DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings”, (US, USEPA Report 600/02-85/018).
- Ali Mohamed Ali, H. and Ahmed Ragab, A.R. (2011), “Vulnerability of the groundwater in the quaternary aquifer at El Shalal - Kema area, Aswan, Egypt”, *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 6 No. 2, pp. 337-358.
- Amharref, M., Assine, S., Bernoussi, A.S. and Haddouchi, B.Y. (2007), “Vulnerability map to pollution of underground waters, test performed in the plain of GHARB (Maroc)”, *Scientific Magazine of Water*, Vol. 20 No. 2, pp. 185-199.
- A.N.R.H: (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) de Constantine : Coupes stratigraphiques des forages, données climatiques et l'étude géophysiques.
- Attoui, B., Kherci, N. and Bousnoubra, H. (2012), “State of vulnerability to pollution of the big reservoirs of groundwater in the region of Annaba-Bouteldja (NE Algeria)”, *Geographia Technica*, No. 2, pp. 1-13.
- Bartzas, G., Tinivella, F., Medini, L., Zaharaki, D. and Komnitas, K. (2015), “Assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area in north Italy”, *Information processing in agriculture*, Vol. 2 No. 2, pp. 109- 129.
- Bezelgues, S. and Garets, E., with the collaboration of Mardhel, V. and Dorfliger, N. (2002), “Vulnerability map of the underground waters of the large grounds and Marie-Galante (Guadeloupe)”, First Step definition the method to specify the vulnerability, report BRGM -51783 – FR .Orleans.
- BRGM (2007) : “Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2006 : Résultats et interprétation”, Rapport final, pp. 38,39.
- BRGM (1971) : “Applications des méthodes isotopiques et hydrochimiques à l'étude de la nappe Albien de Paris”, Rapport final, pp. 5,6.

- Bolduc, S., Larocque, M. and Prichonnet, G. (2006), “Vulnerability of the underground waters to contamination by the Nitrate in the ponds flooding in the black (Montérégie, Quebec)”, *Scientific Water Review*, Vol. 19 No. 2, pp. 87-99.
- Bricha S, Ounine K, Oulchrir S, El haloui N, Attraissi B. Etude de la qualité physicochimique de la nappe phréatique M’nasra (Maroc)(2007), *Afrique Science*; 03: 391-404.
- Cahier de l’Agence, (Novembre 2000) : Bassin des Hauts Plateaux Constantinois N°5.
- CASTANY G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Ed. Dunod Paris France, pp. 683.
- Ckakraorty, S., Paul, P. and Sikdar P. (2007), “Assessing aquifer vulnerability to arsenic pollution using DRASTIC and GIS of North Bengal Plain: A case study of English Bazar Block, Malda District, West Bengal, India”, *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 7 No. 1, pp. 101- 121.
- Claude C,Edmond C,Antoine Montiel,Brigitte Pignatelli,Cristophe Rosin,Marie-Pierre S-R,Rene S et Michel J (2012), “Risk assesement of chemicals in drining water :Perchlorate and bromate”, *Environment, Risques & Santé* ; 11 :316-321.
- CORNAS S. (2002) : “Guide pratique de l’échantillonnage des eaux souterraines. Société suisse d’hydrogéologie”, 80 pages.
- D.H.W (2004) :(Direction Hydraulique de la Wilaya d’Oum El Bouaghi), “Résultats des essais de pompage, Rapports géophysique, les coupes stratigraphique des forages”.
- D.H.W (2004) :(Direction Hydraulique de la Wilaya d’Oum El Bouaghi), “ Etude Hydrogéologique de la plaine de Bir Chouhada –Souk Naamane-Ouled Zouai (Wilaya d’Oum El Bouaghi) ”.
- Devez Aurelied (2004) : “Caractérisation des risques induits par les activités agricoles sur les écosystèmes aquatiques”, Thèse de doctorat. ENGREF, Centre de Montpellier.231 pages.
- Dibi B, Doumouya I, Koffi K, Soro N, Savane I, Kouame K (2007), “Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution en aquifère confiné selon la méthode

DRASTIC: cas de la région d'Aboisso, Sud-est de la Côte d'Ivoire”, *European Journal of Scientific Research*; 18: 500-513.

- El asslouj J, Kholtei S, El amrani-paaza N, Hilali A (2007), Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*; 20: 309-321.
- England, P. (2009), “Managing urban water in Australia: The planned and the unplanned”, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 20 No. 5, pp. 592 – 608.
- Foster, S. (1987), “Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy”, in *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution*, Proceedings of the international conference in Delft, Netherlands, April 1987, Proceedings and information of the TNO Committee on Hydrological Research, Vol. 38, pp. 69–86.
- Foster, S. (1998), “Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: A critical overview”, in *Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability*, Proceedings of the international conference in London, U.K, 1998, *Geological Society London*, No. 130, pp. 7-22.
- Foster, S., Garduno, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M. and Dumars, C. (2006), “Groundwater quality protection: A guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies”, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Servmar -Serviços Técnicos Ambientais Ltda, Brasil
- Gouaidia, L., Boudoukha, A., Djabri, L and Guefaïfia, O. (2011), “Assessment of the vulnerability of an aquifer in the semi-arid environment and comparison between the applied methods, the case of the aquifer of Meskiana (east of Algeria)”, *Science and Planitaires Changes /Secheresse*, Vol. 22 No. 1, pp. 35-42.
- Gouaidia, Layachi (2008), “Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d’une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-Est Algérien», Thèse de Doctorat Université d’Annaba.
- Hamza, M.H., Added, A., Francés, A., Rodriguez, R., Ajmi, M., and Saadi, A. (2008), “Vulnerability appraisal to potential pollution of the coastal underground waters of

Meltine – Ras Jebel - RafRaf (Tunisian North East) according to the following parameters DRASTIC, SINTACS and SI”, *Scientific Review of Water*, Vol. 21 No. 1, pp. 75-86.

- Huneau Frédéric (2000) : “Fonctionnement hydrogéologique et archives pédoclimatiques d’un aquifère profond méditerranéen, Etude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (Sud-Est de la France) ”, Thèse de doctorat, Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse, pp.67, 68,69.
- Jordana S et Batista E. Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta* (2004); 2: 175-188.
- Kazakis, N. and Voudouris, S.K. (2015), “Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters”, *Journal of Hydrology*, Vol. 525, pp. 13-25.
- Khayat S, Hotzl H, Geyer S, Ali W(2006), “Hydrochemical investigation of groundwater from Pleistocene wells and springs, Jericho area, Palestine”, *Hydrogeology Journal*; 14:192-202.
- Kouassi AM, Yao KA, Ahoussi KE, Seki CL, Yao NA, Kouassi KI (2010), “Apports des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du N’zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d’Ivoire) ”, *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 2010; 4: 1816-1838.
- Krogulec, E. (2013), “Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in a River Valley - assessment, verification and analysis of uncertainty”, *Journal of Earth Science and Climatic Change*, Vol. 4 No. 6, pp. 1-12.
- Martinez-Bastida, J.J., Arauzp, M. and Valladolid, M. (2010), “Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: The risk of nitrate pollution”, *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, pp. 681-698.
- Mébarki.A (1984) : “ Ressources en eau et aménagement en Algérie (le bassin de Kebir Rhumel) ”. Thèse troisième cycle. Université de Nancy II.
- Melooll, A., Boughribal, M. and Boufaïda, M. (2009), “Study of the underground water resources contamination and vulnerability submitted to the Mediterranean weather semi-arid, the example: The coastal plain of Saida, Maroc”, *Science and Planitaires Changes /Secheresse* Vol. 20 No. 2, pp. 150-165.

- Menani, M.R. (2001), “Assessment of the map of vulnerability to pollution of aquifers part of the plain El–Madher, North East of Algeria, according to the DRASTIC method”, *Science and Planitaires Changes /Secheresse*, Vol. 12 No. 2, pp. 95-101.
- Murat, V., Paradis, D., Savard, M.M, Nastev, M., Bourque, E., Hamel, A., Lefebvre, R., and Martel, R. (2003), “Vulnerability of the underground waters of aquifers fracking the sensitivity of the rocks to some factors in the underground waters of aquifers, fracking in the South east of Quebec: Assessment of the following methods DRASTIC and GOD natural resources, Canada, Quebec”, Geologic Commission of Canada, ISSN 1701-4387, N° of catalog M44-2003/D3F-IN, ISBN 0-662-88653-4, 14 p, pp.1-16.
- Napolitano, P and Fabbri, A.G. (1996), “Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS”, in HydroGIS 96: Application of geographical information systems in hydrology and water resources management, Proceedings of Vienna Conference, Vienna, April 1996, *IAHS Publication*, No. 235, pp. 559–566.
- Office de l’eau Réunion (2007) : “ Etude technique : Datation d’échantillons d’eau par des méthodes de géochimie isotopique sur l’Ile de la Réunion(France) ”, Rapport final, pp.27.
- OUANDAOGO/YAMEOGO Suzanne (2008) : “ Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso qualité et vulnérabilité”, Thèse de doctorat, Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse, pp.143 et 175.
- Prasad, R.K., Singh, V., Krishnamacharyulu, S.K.G. and Banerjee, P. (2010), “Application of drastic model and GIS: For assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer”, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 176 No. 1-4, pp. 143-155.
- Rouabhia Abdelkader (2006), “ Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables Miocènes de la plaine d’El Ma Elbaiod Nord-Est Algérien”, Thèse de Doctorat, Université d’Annaba.
- Rouabhia A, E K, Djabri L. L’irrigation et le risque de pollution saline(2010), “Exemple des eaux souterraines de l’aquifère miocène de la plaine d’EL MA EL ABIOD”, *Larhyss Journal*; pp. 08: 55-67.

- Saidi, S., Bouri, S., Bendhia, H. and Anselme, B. (2009), “A GIS-based susceptibility indexing method for irrigation and drinking water management planning: Application to Chebba-Mellouleche Aquifer”, *Tunisia Agricultural Water Management*, Vol. 96 No. 12, pp. 1683-1690.
- Schijven, J.F., Hassniwadeh, S.M. and Husman, A.M. (2010), “Vulnerability of unconfined aquifers to virus contamination”, *Water Research*, Vol. 44 No. 4, pp. 1170-1181.
- Seghir Karima (2008), “Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien) ”, Thèse de Doctorat, Université d’Annaba.
- Singh KP, Malik A, Mohan D, Sinha S (2004) , “Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study”, *Water Resources* 38:3980–3992
- Sinan, M. (2007), “The use of SIG for the comparison of the assessment methods to vulnerability in relation with the underground water to pollution, test performed in the underground water of Haouz de Marrakech (Maroc)”, School Hassania of civil engineering. International workshop about the use of the spatial technics for the continuous development, (Rabat, 25-27 April 2007).
- Sub Division de Souk Naamane (2012), “Etat de la production mensuelle d’eau souterraine, Alimentation en eau potable (Ressource, Réseau d’AEP) ”, Rapport final, pp.5.
- Worrall, F. and Kolpin, D.W. (2004), “Aquifer vulnerability to pesticide pollution-combining soil, land-use and aquifer properties with molecular descriptors”, *Journal of Hydrology*, Vol. 293 No. 1-4, pp. 191-204.
- Xingquan L, Zhang L, Xinwei H(2008), “Use of hydrogeochemistry and environmental isotopes for evaluation of groundwater in Qingshuihe Basin, Northwestern China”, *Hydrogeology Journal*; 16: 335-348.
- Yermani M, Zouari K, Michelot JL, Mamou A, Moumni L (2003), “Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale) ”, *Journal des Sciences Hydrologiques*; 48: 95-108.

- Yidana S, Banoeng-yakubo B, Akabzaa T (2010), “Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta Basin, Ghana”, *Journal of African Earth Sciences*; 58: 220-234.
- ZAIR Nadjat (2017),” Caractéristiques hydrogéologiques des nappes aquifères dans la région d’Oum-El-Bouaghi. Problèmes d’épuisement et de la salinité de leurs eaux. ”, *thèse doctorat en hydrogéologie, université d’Annaba*.

Listes des cartes

- Carte topographique d’Ain Yagout et d’Ain M’lila (1/50000)
- Carte géologiques d’Ain Yagout et d’Ain M’lila (1/200000)

ANNEXES

Détermination de la transmissivité de la nappe :

La détermination de la transmissivité s'est basée sur l'interprétation graphique de l'approximation logarithmique de **C.E.Jacob**.

La transmissivité est déterminée à partir de la pente de la droite obtenue $d = f(\log t)$, pour un cycle logarithmique, par la formule suivante :

$$T = 0,183Q/C \text{ ou}$$

T : transmissivité en (m^2/s)

Q : débit de pompage (m^3/s)

C : pente de la droite.

