

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD – TLEMCEN

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour L'obtention du Diplôme de

Master en Géologie

Option : Hydrogéologie.

THEME

Etude du système traditionnel d'irrigation au
Sahara, exemple des Foggaras de la région d'Adrar
(Touat)

Présenté par , HIDAOUI AHLAM et LOUANNAS ABDELMONAIM

Devant le jury :

Mr. BOUANANI A.

Université de TLEMCEN Président

Mr.TABET HELAL M. A.

Université de TLEMCEN Encadreur

Mr.BAGHLI A.

Université de TLEMCEN Co-encadreur

M^{me} BABA HAMED K.

Université de TLEMCEN Examinatrice

M^{me} HEBIB F.

Université de TLEMCEN Examinatrice

Soutenu le: 14/06 /2015

Année Universitaire : 2014/2015

Dédicace

Ce travaille est dédié

*à la femme qui m'a donné la force et m'a poussé et encouragé
pour être une étoile dans le ciel quand j'étais une pierre sur*

le sol... à ma mère

que dieu la conserve ;

à mon père après tout les efforts qui a faits et qu'il fait encore et

toujours pour le bien de notre famille,

je lui souhaite une longue et joyeuse vie ;

à mes frères;

Abdelghani, Mohamed, Abdelnour

à ma sœur: Asma

à tout la famille HIDAQUI et OUAFI

à mes oncles et tantes

à tous les amis de l'université Abou Bekr Belkaïd

à mes amis : Hayat, Warda, Khadija, Abdelrahim.

à mon collègue Abdelmounaim

à mes camarades de Master Hydrogéologie

Années promotion 2015.

A la fin je dédie très chaleureusement tous enseignants de l'Université de Abou

bekr belkaïd Tlemcen.

Ahlam

A decorative border of pearls and flowers surrounds the text. A large white rose is in the top right, and several orange and red flowers are scattered throughout the page.

DEDICACE

*Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux
Tout d'abord je tiens à remercier le tout puissant de m'avoir donné
le courage et la patience pour arriver à ce stade afin de réaliser ce
travail que je dédie :*

A ma très chère mère, qui n'a jamais cessé de prier pour moi

A mon très cher père, pour ses encouragements

A mes chers frères: abdsamed, mouhammed, radwan

A mes chers sœurs : Safaya, Ichrak, Yosra,...

A toute ma grande famille : LOUANNAS et HAMOABDO

A mes meilleurs amis : abderrahim, abdellah, abderezzak, hayat...

A mes oncles et tantes

A tout les amis à l'université de Abou Bekr Blkaïd

*A mes camarades de 2eme master Hydrogéologie Années
promotion 2015.*

A mon binôme AHLAM et toute sa famille.

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon prof M^{er}
TABET et tous enseignants de l'Université de Abou bekr
belkaïd Tlemcen*

Abdelmounaim

Remerciment

Avant tout propos, nous remercions Dieu le tout puissant qui donné sagesse et santé afin de réaliser ce modeste travail. Nous tiens à exprimer notre connaissance à toutes les personnes qui ont permis de mener à bien ce travail.

A Monsieur BOUANANI A. qui a bien voulu présider le jury. Nous lui exprimons toute notre gratitude.

Monsieur TABET HELAL M. A. et Monsieur BAGHLI A., nos promoteurs qui nous ont guidé et soutenu tout au long de la réalisation de ce mémoire en nous prodiguant de fructueux conseils et en nous faisant bénéficier de leur savoir et de leur expérience. Leur aide efficace, leur disponibilité à notre égard, leurs orientations régulières et multitudes.

Nous les prions de trouver ici l'expression de notre sincère reconnaissance, de notre profonde gratitude et le témoignage de notre respectueux attachement.

Madame BABA HAMED K. qui a bien voulu accepter de faire partie du jury pour examiner se travail. Nous l'assurons de notre profonde gratitude.

Madame HEBIB F. qui a accepté de faire partie de ce jury et pour avoir accepté d'examiner notre travail, nous tenons à l'en remercier vivement.

Nous remercions en particulier le laboratoire N°25 de l'Université de Tlemcen.

Notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont apporté leurs soutiens, nous citerons en particulier les responsables et ingénieurs des organismes suivants :

- ✎ Ministère des ressources hydriques.*
- ✎ l'ONM d'Alger.*
- ✎ ANRH d'Alger et d'Adrar.*
- ✎ Direction d'observatoire de foggara.*

Nous remercions vivement Mr SLIMANI S. et Mr BENHAMZA M. de nous avoir laissé consulter leurs bibliothèques personnelles.

Juln 2015

ABREVIATIONS :

AEP : Alimentation en eau potable.

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques.

BI : Balance Ionique

CE: conductivité électrique

CI : Continental Intercalaire.

CMA: Concentration Maximal Admissible

CT : Complexe terminal.

ETP : Evapotranspiration Potentiel

ETR : Evapotranspiration Réelle

Hr : humidité relative

IS : Indice De Saturation

JC : Avant Jésus-Christ

KR: Kelly Ratio

MH: Magnesium Hazard

OMS: Organisation Mondiale de La Santé

ONM: Office National De Météorologie.

OSS : Observatoire du Sahara du Sahel.

pH : potentiel Hydrogène

PI : Indice de perméabilité

r : quantité en réaction

SAR : Sodium Adsorption Ratio.

SASS : Système Aquifère Du Sahara Septentrional.

SONATRACH: Société Nationale Pour La Recherche, La Production, Le Transport, La Transformation, Et La Commercialisation Des Hydrocarbures.

TH: la dureté

UNESCO: United Nation Education Science Culture and Organization.

VOCABULAIRE DES FOGGARAS

Adrar : mot d'origine berbère, désigne la montagne ou un ensemble montagneux du Sahara.

Gourara : Région de Timimoun entre Aougrou et Zaouiet Debagh.

Touat : Région d'Adrar entre Tsabit et Reggane.

Tidikelt : Région d'In Salah entre Aoulef et In Salah.

Erg : Dune de sable.

Reg : Surface plane couverte de sable et gravier.

Hamada : Plateau rocheux.

Ksar : Tour, Ensemble de bâtis d'une agglomération.

Afrague : Le brise vent c'est un enchaînement des feuilles du palmier se trouve au milieu du jardin.

Ennfad : galerie drainant, reliant la ligne des puits,

Hassi : puits, visible en surface par les tas de déblais qui le jalonnent.

Aghessro : la partie recouverte de dalles de grès lorsque la galerie émerge à l'air libre

Medjra : quand elle sort de la protection des dalles de grès.

Kasria : La pierre plate percée d'arches calibrée qui commande la répartition de l'eau.

Séguias : petits canaux à la sortie du répartiteur, ou l'eau est conduite dans les parcelles

Madjen : bassin très plat en argile compactée dont la capacité en gros équivalente au volume d'eau délivré en 24 heures.

Guémoun : carrés de culture d'environ 6m²

Chegfa : Outil de mesure du débit de la foggara.

Khamas : Métayer, Qui reçoit le cinquième de la récolte.

Nouba : Débit reçu dans un intervalle de temps.

Habba : Unité de mesure d'eau qui vaut dans la plupart des oasis d'Adrar.

Kirat : Unité de mesure qu'équivalent au 1/24 de Habba.

Kial el-ma : Le mesureur de l'eau; l'opération se fait au moyen d'une planche percée des trous calibrés. Autrefois, on employait une plaque ou forme cylindrique de cuivre trouée.

LISTE DES TABLEAUX :

N°	Titre des tableaux	Page
Tableau 01	la liste des daïras de la wilaya d'Adrar et les communes qui les composent.	8
Tableau 02	répartition des surfaces agricoles dans la wilaya d'Adrar.	9
Tableau 03	Caractéristiques de la station pluviométrique d'Adrar.	23
Tableau 04	Températures moyennes annuelles (1995-2014).	23
Tableau 05	Températures moyennes mensuelles (1995-2010).	24
Tableau 06	Les moyennes mensuelles des précipitations (en mm).	25
Tableau 07	les précipitations et température annuelles.	26
Tableau 08	présente la vitesse des vents dans la station d'Adrar.	26
Tableau 09	Moyennes mensuelles d'ensoleillement.	28
Tableau 10	valeur de l'ETP Calculée en (mm) Selon la méthode de Thornthwaite.	31
Tableau 11	Bilan hydrologique selon la méthode de THORNTHWAITE.	32
Tableau12	Caractéristiques du système aquifère du Sahara septentrional.	35
Tableau 13	Estimation de la recharge du CI (bassin occidental).	37
Tableau 14	Récapitulatif des foggaras de <i>la région d'étude</i> .	50
Tableau 15	Unités de mesure du débit de la foggara d'après (Remini,2008).	55
Tableau 16	Débit des foggaras par commune (année 1998 et 2011).	56
Tableau 17	Résultats des analyses physico-chimiques des eaux étudiées.	60
Tableau 18	calcul des moyennes et écarts-type.	62
Tableau 19	matrice de corrélation des analyses des données physico-chimiques.	62
Tableau 20	Détermination de la minéralisation globale.	64
Tableau 21	classification de l'eau en fonction des conductivités.	64
Tableau 22	calcul des Minéralisations.	64
Tableau 23	Calcul d'erreur sur les analyses chimique.	65
Tableau 24	Formule et faciès chimique des eaux de la nappe du continental intercalaire.	66
Tableau 25	Calcul des rapports caractéristiques.	83
Tableau 26	Indices de saturation des eaux souterraines de la zone étudiée.	84
Tableau 27	Normes Algériennes de potabilité.	85
Tableau28	classification la potabilité des eaux d'après la norme algérienne.	86
Tableau 29	présente la potabilité en fonction de la dureté.	87
Tableau 30	classification de la qualité de l'eau dans la région à partir de la dureté totale.	87
Tableau 31	Résultats du .S.A.R.	88
Tableau 32	la classification de pourcentage de sodium selon Wilcox.	89
Tableau 33	classification des eaux de la région d'étude.	89
Tableau 34	les paramètres des qualités des eaux d'irrigation.	91
Tableau 35	classification des eaux d'irrigations.	92

Liste des figures

N°	Titre de figure	page
Figure 1	La situation géographique de la zone d'étude.	3
Figure 2	carte géomorphologique de la région d'Adrar (Laaboudi , 2009).	4
Figure 3	Bassins-versants du Tademaït.	5
Figure 4	Carte des bassins du Sahara et ruissellement (Dubief, 1953).	6
Figure 5	Carte représentant les 11 daïras de wilaya d'Adrar et leur limites.	8
Figure 6	Les bassins les plus importants de la plate-forme saharienne en Algérie. (Carte SONATRACH).	12
Figure 7	Carte géologique de la région d'étude (Conrad, 1969).	13
Figure 8	Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est Septentrional (Sonatrach, Schlumberger 1990).	14
Figure 9	Coupe lithologique des unités de CI (D'après document Sonatrach)	16
Figure 10	Situation des coupes géologiques dans le bassin Occidental (BEN HAMZA, 2013).	18
Figure 11	Coupes géologiques AA, BB, et CC dans le bassin Occidental (BEN HAMZA, 2010).	19
Figure 12	Situation des profils géologiques dans la région d'étude	19
Figure 13	Profils géologiques A, B et C dans le bassin Occidental (BEN HAMZA , 2013).	20
Figure 14	Profils géologiques D et E dans le bassin occidental (BEN HAMZA, 2013).	21
Figure 15	Variations moyennes annuelles des températures.	24
Figure 16	Variations moyennes mensuelles des températures des périodes 1995- 2014	24
Figure 17	Les moyennes interannuelles des précipitations des périodes 1995-2014.	25
Figure 18	Les moyennes mensuelles des précipitations.	25
Figure 19	Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN de la région d'Adrar.	26
Figure 20	les moyennes mensuelles de la vitesse du vent des périodes des(1995-2014)	27
Figure 21	les moyennes mensuelles d'humidité relative de l'air (Hr %) (1995-2014).	27
Figure 22	Moyennes mensuelles d'ensoleillement durant les périodes (1995-2014).	28
Figure 23	Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DeMARTONE.	29
Figure 24	Position de la région de Touat dans le diagramme d'Emberger	30
Figure 25	Carte des épaisseurs du CI (OSS, 2003b)	35
Figure 26	Carte des ressources en eau souterraines (Continental Intercalaire et Complexe Terminal), (extrait du recueil des communications, 2002)	36
Figure 27	Les sens d'écoulement des eaux de deux systèmes aquifères du Sahara, le CT et le CI.	38
Figure 28	Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional	38
Figure 29	Les âges, en années, des eaux du CI d'après la teneur en C ¹⁴ (OSS, 2003).	39
Figure 30	Carte piézométrique de référence du CI et des directions d'écoulement (OSS, 2005)	40
Figure 31	Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar (Touat)	41
Figure 32	La carte du gradient hydraulique de la région d'étude (BOUTADARA, 2009).	42
Figure 33	Carte de positionnement des foggaras et forages de la zone d'étude sur image satellite (Benhamza, M).	47

Figure 34	vue d'ensemble des éléments de foggara.	49
Figure 35	Evolution de Foggara	51
Figure 36	Système de la répartition par la <i>Kasria</i> .	52
Figure 37	Coupe schématique d'une foggara	53
Figure 38	Kiel El Ma avec son Louh (Boutadara.Y, 2009)	55
Figure 39	Histogramme d'évolution des débits des foggaras par commune (1998-2011).	56
Figure 40	Histogramme de conductivité de chaque station	63
Figure 41	Représentation graphique des eaux du CI sur le diagramme de PIPER.	67
Figure 42	Représentation graphique des eaux du CI sur le diagramme de SCHOELLER-BERKALOF.	68
Figure 43	Représentation graphique des eaux du CI sur le diagramme de SCHOELLER-BERKALOF.	69
Figure 44	Représentation graphique des eaux du CI sur le diagramme de STIFF.	70
Figure 45	Représentation graphique des eaux du CI sur le diagramme de STIFF.	71
Figure 46	Relation Na- Cl	72
Figure 47	Relation Ca-SO ₄	72
Figure 48	Relation Mg-SO ₄	73
Figure 49	Relation CE-TH	73
Figure 50	Carte d'isoteneur de la minéralisation de la région de TOUAT.	75
Figure 51	Carte d'isoteneur de calcium dans la région de TOUAT.	76
Figure 52	Carte isoteneur en Magnésium dans la région de TOUAT	77
Figure 53	Carte d'isoteneur de sodium et potassium dans la région de TOUAT	78
Figure 54	Carte d'isoteneur en chlorure dans la région de TOUAT.	79
Figure 55	Carte d'isoteneur en Bicarbonates dans la région de TOUAT.	80
Figure 56	Carte d'isoteneur en Sulfate Dans la région du TOUAT.	81
Figure 57	Carte d'isoteneur en Nitrites dans la région de TOUAT.	82
Figure 58	Diagramme de Wilcox des eaux de la région Touat.	90
Photo 01	Différente formes de chegfa	54

TABLE DE MATIERE :

	page
Avant propos	
Dédicaces	
Remerciements	
Abréviations	
Vocabulaire des Foggaras	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Table des matières	
Résumé	
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I. Contexte général	2
I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE GENERALE	3
I.1.1. CADRE GEOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE	3
I.2 CADRE GEOMORPHOLOGIQUE	3
a. LA PLAINE :.....	3
b. LA DEPRESSION.....	3
c. LES SEBKHAS :.....	3
d. les Ergs	4
e. Le Reg :.....	4
f - Les terrasses d'apport éolien.....	4
I.3. CADRE HYDROGRAPHIQUE :.....	4
I.3.1. Versant occidental du Tademaït	4
I.3.2. Oueds du versant Meguiden – Gourara	5
I.3.3. Oued Tilia	5
I.3.4. Bassin fermes des Daiets du Tademaït	5
I.3.5. Les Réseau Hydrographique	5
I.4.1 Les type des sols dans le secteur d'étude	6
1. Les sols peu évolués	7
2. les sols halomorphes	7
I.5. CADRE PHYSIQUE	7
I.5.1. Les caractères générale	7
I.5.2. activité de la population	8
a) Agriculture.....	8
b) Commerce.....	9
c) Industrie.....	9
d) Tourisme.....	9
I.6. CONCLUSION.....	9
Chapitre II. GEOLOGIE	
INTRODUCTION	11
II.1 Situation Générale.....	11
II.1.1. Le bassin de Tindouf et de Reggan.....	11
II.1.2. Le bassin de Béchar.....	11
II.1.3. Le bassin d'Ahnet-Timimoun.....	11
II.1.4. La cuvette de Sbaâ.....	11
II.1.5. La synéclise d'Illizi-Ghadamès :.....	11
II.2. CADRE GEOLOGIQUE REGIONALE.....	12
II.3. LA LITHOSTRATIGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE.....	13

II.3.1. Précambrien	13
II.3.2. Paléozoïque.....	14
II.3.2.1. Cambrien.....	14
II.3.2.2. Ordovicien.....	14
II.3.2.3 Silurien.....	14
II.3.2.4. Dévonien.....	15
II.3.2.5. Carbonifère.....	15
II.3.3. Mésozoïque.....	15
II.3.3.1. Crétacé inférieur Continental Intercalaire	15
II.3.3.2. Crétacé supérieur (Crétacé marin).....	15
II.3.4. Le Cénozoïque	16
II.3.4.1. Néogène	16
II.3.4.2. Le Plio-Villafranchien	16
II.3.5. Le Quaternaire	17
III.3.5.1. Villafranchien Supérieur (Quaternaire ancien)	17
II.3.5.2. Le Pléistocène moyen (Quaternaire moyen).....	17
II.3.5.3. L'Holocène (Quaternaire récent).....	17
II.4. Coupes géologiques	17
II.4.1. Profils géologiques.....	19
CONCLUSION.....	21
Chapitre III. HYDROCLIMATOLOGIE	
INTRODUCTION.....	23
III.1 LA TEMPERATURE.....	23
III.1.1 Variations des températures moyennes annuelles.....	23
III.1.2 Variations des températures moyennes mensuelles	24
III.2 LES PRECIPITATIONS	25
III.2.1 Variations interannuelles des précipitations	25
III.2.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations	25
III.2.3 Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN	26
III.3 LE VENT :.....	26
III.4 HUMIDITE RELATIVE DE L' AIR	27
III.5 L'INSOLATION	27
1-Insolation possible	27
2-Insolation effective.....	28
III.6 DETERMINATION DES INDICES CLIMATIQUES	28
III.6.1 Indice d'aridité de DE MARTONNE	28
III.6.2 Climagramme d'Emberger	29
III.7 ÉVAPOTRANSPIRATION	30
III.7.1 Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle)	30
III.7.1.1 D'après la formule de C.W.Thornthwaite	30
III.7.2 Estimation de l'ETR (l'évapotranspiration réelle).....	31
III.7.2.1 ETR selon la formule de Turc :.....	31
III.7.2.2 ETR selon la formule de M. COUTAGNE.....	31
III.8 BILAN HYDRIQUE (méthode de THORNTHWAITE)	32
III.9.CONCLUSION.....	32
CHAPITRE IV. HYDROGEOLOGIE	
IV.1. HYDROGEOLOGIE REGIONALE.....	34
INTRODUCTION	34
V.1.1. Système Aquifère du Sahara Septentrional :.....	34
IV.1.1.1. Formation du Continental Intercalaire (CI).....	34

IV.2 LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE DANS LA REGION D'ADRAR.....	36
IV.2.1. Alimentation du Continental Intercalaire (CI)	36
IV.2.2. Caractéristiques des eaux	39
IV.3. PIEZOMETRIE ET GRADIENT HYDRAULIQUE.....	39
IV.3.1. La piézométrie du système aquifère du CI	39
IV.3.2. Carte piézométrique de la zone d'étude.....	40
IV.3.3. Gradient hydraulique.....	42
IV.4. PARAMETRE HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE C.I.....	43
IV.4.1. Transmissivité T.....	43
IV.4.2. Coefficient d'Emmagasinement S	43
IV.5. CONCLUSION	43
CHAPITRE V.SYSTEME DE CAPTAGE TRADITIONNEL–FOGGARA	
INTRODUCTION:.....	45
V.1. APERÇU GENERALE HISTORIQUE SUR LE SYSTEME FOGGARA	45
V.2. DEFINITION DE FOGGARA.....	45
V.3. DEFERENTS TYPES DES FOGGARAS	46
3.1. Foggara de continental intercalaire.....	46
3.1. Foggara de continental intercalaire.....	46
3.3. Foggaras des alluvions quaternaires.....	46
V.4. Situation géographique des foggaras	46
V.5. Répartition des foggaras.....	47
V.6. Les éléments d'une Foggara.....	47
V.6.1. Le captage	47
a. La galerie.....	47
b. Les puits « Hassi ».....	48
c. L'Aghisrou.....	48
d. Canal Principal « Majra » :.....	48
V.6.2. La distribution	48
a. Peigne Répartiteur « Kasria »	48
b. Rigole « Seguia ».....	49
c. Bassin « Le Madjen »	49
V.7.L' EVOLUTION DES FOGGARAS.....	50
VI.8. La répartition des eaux de foggara.....	52
V.9. LES FACTEURS INFLUENÇANT SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA FOGGARA	52
a. La pente	52
b. La forme de la galerie	53
c. Le rabattement :.....	53
d. La position du point d'intersection (B) :.....	53
V.10. TECHNIQUES ET ORGANISATION DE LA MESURE DES EAUX. DE LA FOGGARA	53
V.10.2.Outil de mesure.....	54
V.10.3. Unité de mesure :.....	54
V.10.4. Méthodes de mesure de la quantité d'eau :.....	55
V.10.5. Évolution des débits foggara :.....	56
V.10.6. Facteurs influençant le débit : -.....	56
V.10.6. 1.Naturels :.....	57

a. La sécheresse.....	57
b. l'ensablement :.....	57
V.10.6.2. Humains:.....	57
a. Le manque d'entretien.....	57
b. L'influence des forages.....	57
V.11. Les solutions pour améliorer et sauvegarder les débits des foggaras.....	58
Conclusion.....	58
Chapitre VI. HYDROCHIMIE	
INTRODUCTION	60
VI .1. Méthodes et stratégie de travail.....	60
1. Prélèvements.....	60
2. Mesures in situ.....	60
3. Analyse des éléments chimiques.....	61
VI .2. Paramètres organoleptiques.....	61
VI .2.1. Couleur	61
VI .2.2. Odeur.....	61
VI.2.3. Goût	61
VI.3. Analyse statistique des données physico –chimiques :.....	61
3.1 Paramètre représentatifs :	62
3.2 ACP.....	62
VI .4. Etude des caractéristiques physico-chimiques :.....	63
4.1. Les caractéristiques physiques :.....	63
a. La température :	63
b. Potentiel Hydrogène (pH)	63
c. La Conductivité (EC):.....	63
d. La minéralisation.....	64
e. La dureté (TH).....	65
4.2 Les paramètres chimiques.....	65
4.2.1 Balance Ionique.....	65
4.2.2 Les faciès chimiques.....	66
A. Classification de PIPER.....	66
B. Classification de SCHOELLER-BERKALOFF.....	67
C .Diagramme de Stiff.....	70
4.2.4 Relation chimiques	71
a- Sodium-Chlorure (Na-Cl):	71
b- Sulfate-Calcium (SO ₄ -Ca):	72
c- Magnesium - Sulfate (Mg- SO ₄):	73
d. Conductivité – Dureté (EC-TH).....	73
4.3.1. Les cations.....	73
4.3.1.1. Le Calcium (Ca ²⁺) :.....	73
4.3.1.2. Le Magnésium (Mg ²⁺) :	74
4.3.1.3. Le Sodium (Na ⁺) et le Potassium (K ⁺) :	74
4.3.2. Les anions:.....	74
4.3.2.1. Les Chlorures (Cl ⁻) :.....	74
4.3.2.2. Les Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) :	74
4.3.2.3. Les Sulfates (SO ₄ ²⁻) :	74
4.3.2.4. Les Nitrate (NO ₃ ⁻) :	74
VI.4. Etude des valeurs relatives :.....	82
VI.4.1. Etude des rapports caractéristiques.....	82
4.1.1. Le rapport rSO ₄ ²⁻ / rCl ⁻	83

4.1.2. Le rapport $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl}^-$	83
4.1.3. Le rapport $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Mg}^{2+}$	83
VI.4.2. Indices de saturation	83
IV.5. Potabilité chimique des eaux :	85
IV.5.1. Les normes de potabilité :	85
IV.5.2 Classification des eaux selon la dureté	86
VI.6. Critères des eaux d'irrigation :	87
6.1. Sodium Adsorption Ratio (SAR) :	87
6.2. Le pourcentage de sodium (classification de WILCOX)	88
6.3. Les indices de qualité des eaux d'irrigations :	90
a. Indice de perméabilité	90
b. Magnésium Hazard :	90
c. Kell'y Ratio	90
d. Chlorure	90
e. Nitrate	91
Conclusion	92
CONCLUSION GENERALE	95
Recommandations	96
Référence bibliographiques	
Annexes	

Résumé

La région d'Adrar est caractérisée par un système de captage traditionnel qu'on appelle « la foggara » qui est la plus efficace alternative que l'homme a trouvée, dans le désert, pour compenser le manque d'eau.

Le but de cette étude est de présenter les principales caractéristiques géologique, hydrogéologique et hydrochimique de la nappe du Continental Intercalaire dans la région du Touat. Cette nappe est appelée aussi nappe de l'Albien. Elle est contenue dans la formation gréseuse-argileuse du Crétacé inférieur. Du point de vue chimique ces eaux sont très minéralisées et excessivement dures, avec de fortes teneurs en chlorures, sulfates et en sodium. Les résultats ont montré que les eaux souterraines que la qualité est médiocre du point de vue de la potabilité. Elles ne présentent généralement pas de risque d'alcalinisation mais un risque élevé de salinisation pour les sols. Le faciès chloruré sodique est prédominant.

La foggara est menacée d'extinction (dégradation, tarissement, détérioration de la qualité des eaux, etc.) à cause de problèmes locaux et régionaux liés principalement à l'exploitation et à la gestion des eaux, ce qui nécessite une meilleure vision pour une gestion rationnelle de cette ressource afin d'assurer un développement durable. Pour cela, plusieurs recommandations sont proposées.

Mots-clé : Continental Intercalaire, Foggaras, Hydrogéologie, Hydrochimie, Touat, Zone Aride, Salinité, Palmeraie.

Abstract

The Adrar region is characterized by a traditional water collection system called "foggaras" which is the most effective alternative that the man found in the desert to compensate the water scarcity.

The purpose of this study is to present the main geological, hydrogeological and hydrochemical characteristics of the water table in the Continental Intercalaire in the Touat region. This layer is also called Albien aquifer. It is held in the Lower Cretaceous sandy-clay formation. From a chemical point of view these waters are highly mineralized and excessively harsh, with high concentrations of chlorides, sulfates and sodium. The results show that the groundwater quality is poor from the potability point of view. Generally, there is no alkalization risk but we have a higher risk for soil salinization. The sodium chloride facies is the most important.

The foggara is threatened with extinction (degradation, depletion, deterioration of water quality etc.) due to local and regional problems mainly related to the operation and management of water, which requires a better view in the management of this resource to ensure a sustainable development. For that, several recommendations are proposed.

Keywords: Continental Intercalaire, Foggaras, Hydrogeology, Hydrochemistry, Touat, Arid Area, Salinity, Palm Grove.

ملخص

تتميز أدرار بنظام السقي التقليدي المسمى بالفقارة الذي يعتبر أنجع طريقة ابتكرها الرجل الصحراوي لمكافحة ندرة المياه.

الهدف من هذه الدراسة هو تقديم الخصائص الجيولوجية, الهيدروجيولوجية و الهيدروكيميائية الرئيسية للمياه الجوفية لل Continental Intercalaire في منطقة توات وهي محتواة في التشكيلات الصخرية للعصر الكرييتاسي السفلي والذي يتكون أساسا من المزيج من تشكيلات الطبقة الرملية الطينية كما ومن الناحية الهيدروكيميائية تظهر هذه المياه درجة كبيرة من التشبع بالعناصر المعدنية ودرجة صلابة عالية وتتميز بمستويات عالية من الكلوريدات, الكبريتات ومن الصوديوم كما أنها تصنف من ناحية استعمالها للشرب كمياه رديئة النوعية على العموم وفي نفس الوقت تشكل نسبة خطر مرتفعة فيما يخص ملوحة التربة كما تعتبر سحنة الكلوريد-الصوديوم الغالبة.

أصبحت الفقارة مهددة بالاندثار (تقهقر, انخفاض نسبة المياه, إفساد نوعية المياه.. الخ) الذي خلف مشاكل محلية وإقليمية حيث أنها ترتبط خاصة بتسيير واستغلال المياه. هذا ما ولد الجانب العقلاني للتنمية المستدامة.

ولأجل هذا تم اقتراح بعض التوصيات.

الكلمات المفتاحية: Continental Intercalaire, الفقارة, الهيدروجيولوجيا, الهيدروكيميائية, توات, المنطقة الجافة, الملوحة, الواحة.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

” وَ جَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ الْحَيِّ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ ”

”ET NOUS AVONS FAIT DE L'EAU TOUTE CHOSE VIVANTE ”

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Le Sahara Algérien est l'un des plus grands déserts du monde (avec 2 millions de km²), il y a quelques millions d'années la faune et la flore y étaient riche et variées, les falaises de Tassilis et les parois rocheuses de la Saoura en témoignent.

Le changement du climat et la désertification de plus en plus intense a mené la population qui vit dans cette région soit à émigrer vers les régions les plus humides, soit à s'adapter au nouveau mode de vie.

Cette adaptation était liée aux moyens disponibles pour l'exploitation de l'eau. Et c'est grâce aussi aux techniques de l'hydraulique traditionnelles et leur organisation sociale que cette population s'est adaptée dans ces zones arides à savoir les Foggaras.

La Wilaya d'Adrar a connu ces dernières années une croissance démographique rapide, suivi d'une activité humaine importante qui couvre presque tous les domaines Agricoles, Industriels et Touristiques, en parallèle, les besoins en eau ont augmenté, le recours à l'utilisation des nouvelles techniques de captage et d'exploitation des eaux profondes pour subvenir à la demande croissante sur l'eau, l'exode des agriculteurs vers les grands périmètres de mise en valeur, la limite géologique, le rabattement de la nappe du Continentale Intercalaire, le manque d'entretien de la foggara, condamne la pérennité du système de captage traditionnel « foggara » et par conséquent tout le système oasien en général.(Benhamza, 2013).

Afin de répondre à ces préoccupations et d'atteindre nos objectifs, cette étude est orientée sur les axes suivants :

- ❖ Une introduction générale qui présente la problématique et les objectifs du travail ;
- ❖ Un chapitre "généralité" qui cerne la situation géographique et les caractéristiques physiques de la région d'étude (relief et hydrographie, et le contexte socioéconomique).
- ❖ Le chapitre "géologie" expose les caractéristiques géologiques de la région ;
- ❖ Le chapitre "hydroclimatologique" regroupe une étude des différents paramètres climatiques, tels que le type de climat, les précipitations, les températures, l'évaporation etc...
- ❖ Le chapitre "hydrogéologie" a été consacré aux caractéristiques hydrogéologiques (piézométrie et paramètres hydrodynamiques de la nappe).
- ❖ Le chapitre Foggaras, il présente cette technique de captage, son historique et origine, son évolution, et l'évolution des foggaras dans le temps et des recommandations pour résoudre les problèmes qui menace cette technique.
- ❖ Le chapitre "hydrochimie" présentant l'évolution et la répartition des éléments chimiques, ainsi que la détermination des différents polluants qui peuvent exister dans les eaux souterraines, l'évolution des paramètres chimiques en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines, l'aptitude aussi des eaux des foggaras à l'irrigation.

CHAPITRE I

CONTEXTE GENERAL

I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE GENERAL : (figure 1)

La wilaya d'Adrar est située dans le Sud-Ouest de l'Algérie ; elle s'étend selon les coordonnées géographiques :

- entre les longitudes 0°30` Est et 0°30` à l'Ouest
- entre les latitudes 26°30` et 28°30` au Nord
- et une altitude moyenne de 222m.

Elle est limitée géomorphologiquement au Nord par le Grand Erg Occidental, au Sud par le plateau de Tanezrouft, à l'Est par le plateau de Tademaït et à l'Ouest par l'Erg Chech. Elle est répartie entre quatre régions sahariennes naturelles représentées par :

1. **Gourara** : Son centre administratif est la daïra de Timimoune, cette région regroupe tout les palmerais et les ksars de cette daïra.
2. **Touat** : Elle se prolonge du Brinkane jusqu'à Reggane; c'est la plus vaste des régions, et la plus intéressante, car elle contient un grand nombre de foggaras.
3. **Tidikelt** : Cette région se prolonge d'Aoulef à Ain Saleh qui est le centre de la région
4. **Tanezrouft** : région de Bordj Badji Mokhtar.

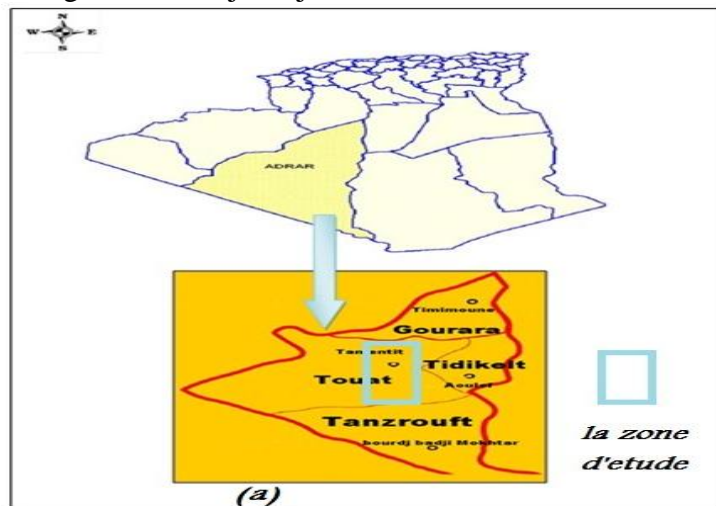


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude.

I.2 CADRE GEOMORPHOLOGIQUE : (figure 02)

La région d'Adrar fait partie d'une grande zone allongée, sensiblement orientée N-S. Elle renferme différents traits géomorphologiques distincts, qui sont :

a- la plaine

C'est une vaste plaine (plateau), limitée vers l'Est par le plateau de Tademaït et vers l'Ouest par la dépression de Touat et se caractérise par une altitude maximale de l'ordre de 300m au pied du plateau de Tademaït, une pente faible de l'ordre de 0.1% à 0.2% et un pendage vers le Sud-Ouest et l'Ouest.

b - la dépression

La dépression se trouve le long de l'extrémité Ouest de la plaine et se caractérise par une largeur moyenne de l'ordre de 5 Km à 10 km, par exemple la dépression de Touat.

c - les sebkhas

Les sebkhas sont des successions de petites sebkhas, généralement non communicantes, qui marquent la limite occidentale de la dépression et constitue l'exutoire naturel des eaux de la nappe aquifère.

Exemple : sebkha de Tamentit.

d - les ergs

Toutes les nuances existent entre le simple voile sableux et les dunes massives constituées en ergs. L'erg Chech est la forme d'accumulation sableuse la plus massive à l'ouest de la région.

Les autres ergs abritent une végétation éphémère, ces ergs sont formés artificiellement par des obstacles (*affrègue*) contre la progression du sable, comme les Ergs d'Ikkis et de Tillouline.

e - Le Reg

C'est des grandes superficies plates composée de roaille et gravier en général. Il est d'âge quaternaire, on peut trouver des sables d'âge Crétacé inférieur. Exemple le Reg de Tanezrouft.

f - Les terrasses d'apport éolien

D'après la nature des roches et la force la vitesse du vent (agent érosif), les terrasses sont classées selon leur importance. Dans la région de Touat elles se sont formées au cours du Quaternaire.

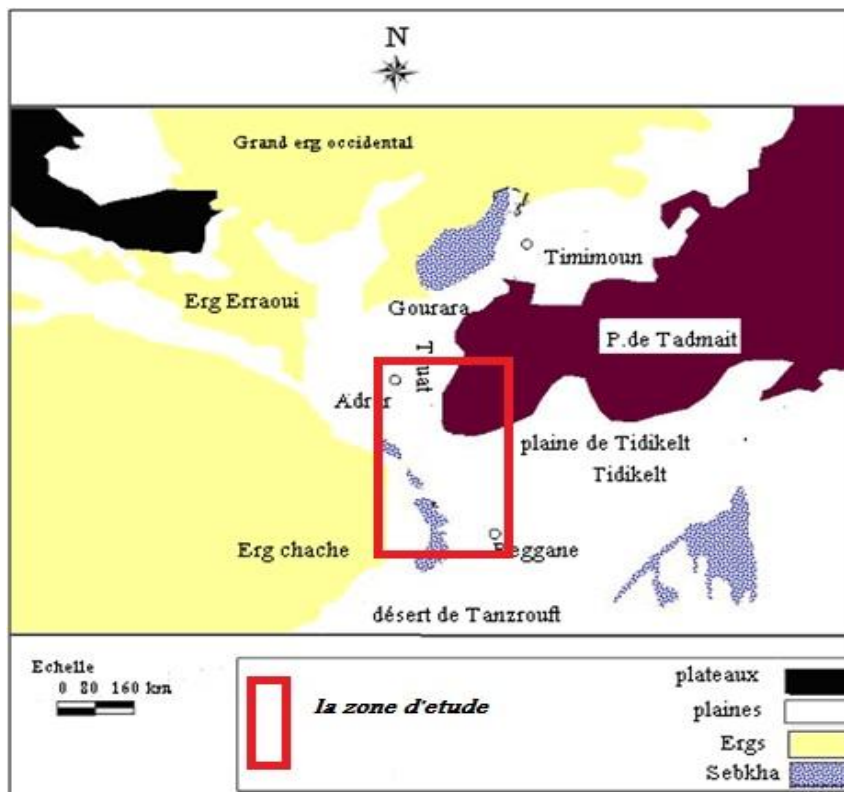


Figure 2 : carte géomorphologique de la région d'Adrar (LAABOUDI, 2009)

I.3. CADRE HYDROGRAPHIQUE

I.3.1. Versant occidental du Tademaït

Une ligne de partage des eaux bien marquée peut être tracée à travers le plateau du Tademaït. Elle sépare un bassin versant occidental d'un bassin versant oriental, que l'on peut rattacher aux bassins versants du Sahara occidental. Dans l'occidental on peut distinguer:

- au Nord, le versant des Oueds Mzaourou et El Berreg,
- à l'Ouest, le versant Meguiden-Gourara groupant l'ensemble des petits oueds descendant du premier rebord occidental du plateau,

- au Sud, le versant de l'Oued Tilia,
- au centre et à l'Est, un ensemble de petits bassins fermés centrés, du Nord au Sud, sur les daïas (DUBIEF, 1953).

I.3.2. Oueds du versant Meguiden-Gourara :

Ces oueds sont réduits, actuellement, à leurs vallées supérieures, fort courtes. Ils descendent du premier contrefort occidental du Tademaït qui culmine entre 500 et 600 m et se perdent dans les daïas et les regs du Meguiden et du Gourara qui bordent le pied de la falaise. Les oueds de Meguiden ont été en crue en mars 1943 et octobre 1945 (DUBIEF, 1953).

I.3.3. Oued Tilia :

L'Oued Tilia a son origine sur le versant occidental du Jebel Aglal, vers 600 m d'altitude. Il descend assez rapidement de 300 m pour gagner les regs du Touat oriental. Il se perdait jadis dans la sebkha du Touat au niveau de Zaouïet Kounta. Ses affluents, l'In Belbel, le Matiourag, l'En Nezoua, l'Abiod, sont encore actifs. Tous ces Oueds ont été en crue en octobre et décembre 1951, ainsi qu'en janvier 1952.

I.3.4. Bassins fermés des Daïas du Tademaït :

Ces petits bassins fermés occupent une vaste gouttière allongée, NE-SW, du S de la région d'El Goléa au Touat. Elle est bordée à l'Ouest par le premier ressaut du Tademaït, à l'Est, par la falaise du plateau terminal. Elle est ainsi partagée en deux parties inégales, un tiers au NE et deux tiers au SW. Actuellement, les daïas peuvent encore être en eau de temps à autre. Des crues de leurs collecteurs ont été signalées (DUBIEF, 1953).

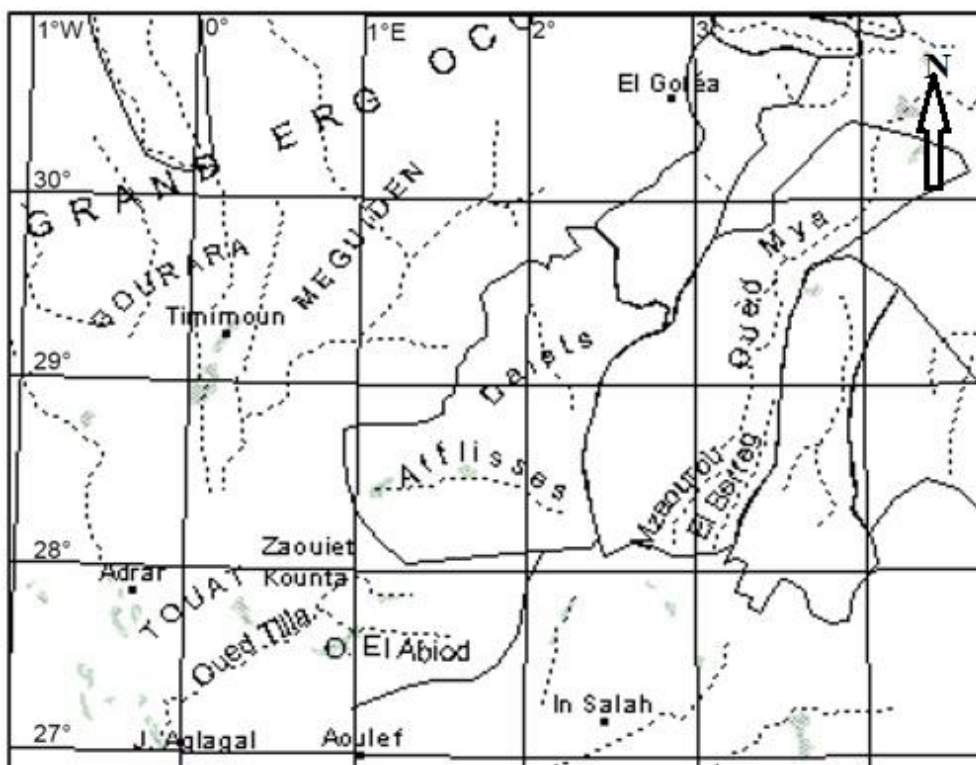


Figure 3. Bassins-versants du Tademaït.

I.3.5. Les réseaux hydrographiques

C'est au Villafranchien supérieur que s'organise dans son ensemble le grand réseau hydrographique du Sahara algérien, dont les vestiges plus ou moins dégradés ont été conservés jusqu'à l'époque actuelle (CONRAD, 1969).

Dans la région d'étude les réseaux hydrographiques sont rares par rapport à la région de Béchar, elle est représentée par l'Oued Messaoud qui est la continuité d'Oued Saoura vers le

Nord ; ce dernier drainé à partir de l'Atlas Saharien et l'Oued Tilia et ses affluents qui drainent le plateau de Tademaït vers le Sud-Est au niveau de Zaouïet Kounta à partir de Baamer vers Reggane. À l'extrémité orientale de la dépression de Touat, on remarque un réseau hydrographique intense, constitué par des petits ravins distincts qui drainent le plateau de Tademaït.

Nous pouvons dire que le drainage de ces réseaux est irrégulier dans la région d'étude.

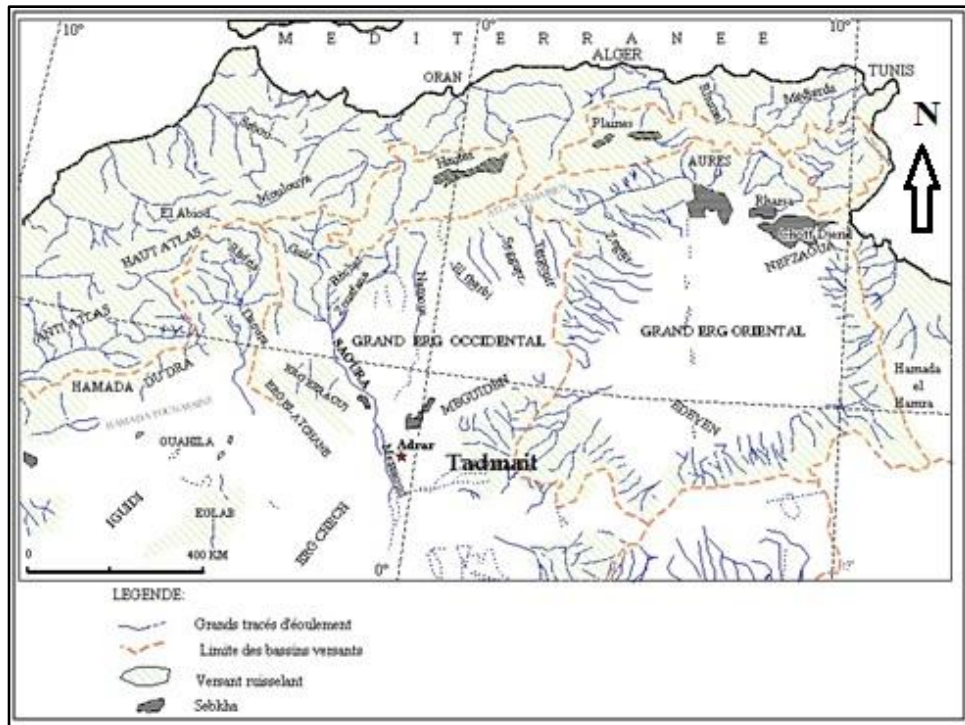


Figure 4. Carte hydrographique des bassins du Sahara (DUBIEF J., 1953.)

I.4. L'ETUDE DE SOL

Les analyses du sol ont été effectuées par le laboratoire de l'Institut National des Recherches Agricoles d'Adrar (INRAA) en 2006 et l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Adrar) en 2003. Au niveau de ce dernier, la classification des sols est essentiellement basée sur les caractères morphogénétiques et fortement inspirée de la classification française.

Les normes de cette classification ont été légèrement modifiées pour représenter les sols de cette région saharienne, et ce pour le critère de salinité, car ces sols auraient tous été classés dans la seule classe des sols halomorphes, vu la salinité généralisée de ces sols. La salinité n'a été considérée que comme caractéristique secondaire, réversible dans ces sols sableux, très perméables.

Aussi, la salinité n'apparaît comme caractère principal, au niveau de la classe des sols halomorphes, que pour les sols très salés, ayant un horizon supérieur de salinité $> 25 \text{ m}\bar{O}/\text{cm}$. La salinité inférieure à $4 \text{ m}\bar{O}$ caractérise le sous-groupe modal, et celle de 4 à $25 \text{ m}\bar{O}/\text{cm}$ le sous-groupe à caractère halomorphe.

I.4.1. Les types des sols dans le secteur d'étude

A partir de l'étude des caractères morphologiques des sols ainsi que leurs analyses physicochimiques on peut définir deux classes de sols :

1. Sols peu évolués

2. Sols halomorphes

1. Les sols peu évolués

Les sols de cette classe sont caractérisés par leur évolution qui n'est jamais suffisante pour que de véritables horizons soient différenciés. Avec une altération chimique très faible, le sol est constitué essentiellement de fragments de roches mères grossières et fines.

Ces sols présentent généralement des formations grésocalcaires plus ou moins compactes et caillouteuses, reposant sur un niveau argileux rougeâtre dont l'épaisseur augmente avec la profondeur, ils sont constitués d'un recouvrement graveleux, caillouteux et des sables éoliens (en surface). Les résultats analytiques ont montré que les sols ont une perméabilité élevée en surface et en profondeur avec des valeurs supérieures à 9cm/h jusqu'à 55 cm/h constituant des niveaux très perméables.

- Leur texture est généralement sableuse ou sablo-limoneuse avec la présence de gypse parfois qui leur confère une pseudo-texture.
- La structure est particulière.
- La compacité est faible.
- la couleur est brun-jaunâtre à brun-rougeâtre.
- Le pH varie de 7.8 à 8.4.
- La réaction du milieu est alcaline.
- Le gypse se présente sous forme de petits cristaux ou par de nombreuses tâches blanchâtres.
- Les teneurs en calcaire total et actif varient selon les profils entre 6 et 30 % pour le total et 4 à 12 pour l'actif.

2. les sols halomorphes

Ces sols ont une forte salinité, variant de (25 à 57mmhos/cm). Cette salinité a pour origine, des roches parentales assez faible pour les grès, mais forte pour les argiles, car ces accumulations de sels se sont produites pendant des périodes anciennes, où le niveau de eau souterraines était élevé par rapport à la surface où il y avait une forte évaporation. Le type de salinité est variable indépendamment de la profondeur et du degré de salinité des horizons, et est essentiellement chloruré et sulfaté.

I.5. CADRE PHYSIQUE

I.5.1. Les caractères généraux

La wilaya est caractérisée par :

- superficie 427300 km².
- Population 431 270 habitants (estimation 2010)
- La densité de population est de 1.01 habitant / km².
- Code de wilaya 01.
- Le nombre de daïras 11.
- Le nombre de municipalités 28.
- le nombre de ksour s'élève à 294.

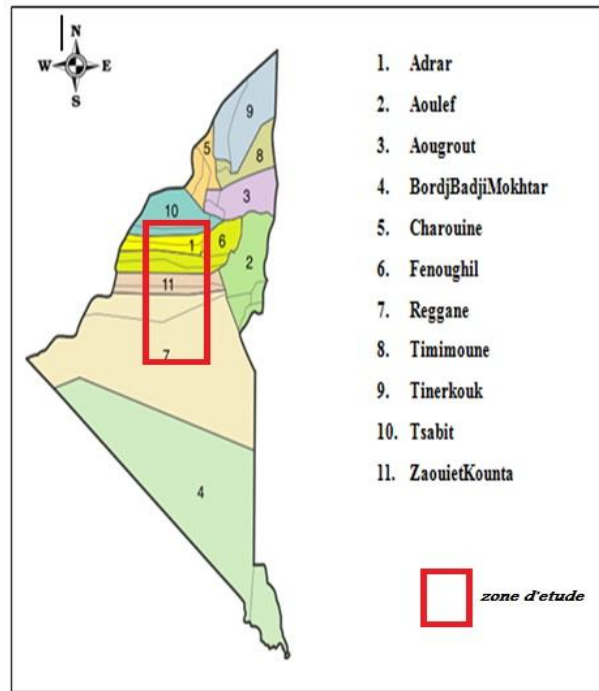


Figure 5. Carte représentant les daïras de wilaya d'Adrar.

Tableau 1. La liste des daïras de la wilaya d'Adrar et les communes qui les composent.

Daïra	N° de communes	Communes
Adrar	3	Adrar, Bouda, Ouled Ahmed, Timmi.
Aoulef	4	Akabli, Aoulef, Tamekten, Tit.
Aougrou	3	Aougrou, Deldoul, Metarfa.
Bordj Badji Mokhtar	2	Bordj Badji Mokhtar, Timiaouine.
Charouine	3	Charouine, Ouled Aissa, Talmine.
Fenoughil	3	Fenoughil, Tamantit, Tamest.
Reggane	2	Reggane, Sali.
Timimoun	2	Ouled Said, Timimoun.
Tinerkoug	2	Ksar Kaddour, Tinerkoug.
Tsabit	2	Sebaa, Tsabit.
Zaouiet Kounta	2	In Zghmir, Zaouiet Kounta.

I.5.2. activité de la population

a) Agriculture

Adrar est une ville à vocation agricole caractérisée par les oasis palmeraies et son système d'irrigation traditionnelle 'Foggara', et quelques nouvelles extensions d'une agriculture moderne. Ce système de culture oasien est tourné autour des plantations de palmiers, associés ou non à d'autres cultures : céréalières, vivrières telles les légumineuses, fourragères et maraîchères. Le tableau 2 représente la répartition des surfaces agricoles dans la wilaya d'Adrar (NEDJAH N. *et al.* modifié).

Tableau 2. Répartition des surfaces agricoles dans la wilaya d'Adrar.

Désignation	Surface en ha
Superficie agricole totale	337 650
Superficie utilisée	32 272
Superficie irriguée	23 814
Par gravite	18 814
Par aspiration	2 742
Par goutte a goutte	2 258

Les ressources en eau utilisées dans le domaine agricole sont :

- Les foggaras au nombre de 918 et d'un débit total de 3680 L/s.
- Les forages au nombre de 529 et d'un débit total de 9120 L/s.
- Les puits au nombre de 4898 et d'un débit total de 9820 L/s.

Ce bref aperçu montre que les forages, bien que leur nombre soit limité, ont un débit élevé. Par contre les foggaras sont la ressource en eau dont le débit par unité est le plus faible (0.25 L/s par foggara en moyenne).

b) Commerce

La wilaya d'Adrar est caractérisée par un commerce de transit (troc) avec les pays d'Afrique sub-saharienne, où sont échangés plusieurs produits agricoles comme les dattes, le tabac, etc., contre de nombreux produits d'élevage tels que les bovins et les chameaux.

c) Industrie

La région d'Adrar a connu ces dernières années une dynamique industrielle accélérée avec la découverte des gisements de gaz et de pétrole, elle est devenue un pôle industriel avec la réalisation de la raffinerie de Sbaâ, s'ajoutant à plusieurs petites usines (briqueterie, minoterie, etc.).

d) Tourisme

La wilaya d'Adrar se caractérise comme toutes les wilayas du grand Sud par une grande activité touristique surtout durant les périodes de festivals.

Le tourisme est une attraction en raison de la présence de plusieurs sites archéologiques, les plus importants sont les grands palais de Timimoune, Tamantit etc., mais l'investissement dans le tourisme est encore faible.

I.6. CONCLUSION

La région d'Adrar est à une altitude proche de 222 m, elle fait partie du Bas Sahara recouvert au nord par le Grand Erg Occidental, et au Sud par le plateau de Tanezrouft, à l'Est par le plateau de Tademaït. Administrativement, elle couvre une superficie de 427300 km², sa population est de 431 270 habitants (estimation 2010).

La principale activité est la culture du palmier dattier, mais il y a aussi l'artisanat, le tourisme, une petite industrie et le raffinage d'hydrocarbures (région de Sbaa). Cette région, est caractérisée par un système d'alimentation et de fonctionnement très ancien appelé Foggara, ce système est important pour l'agriculture de la région.

CHAPITRE II

CADRE GÉOLOGIQUE

INTRODUCTION

L'histoire géologique de l'Algérie s'inscrit dans une longue évolution géodynamique. Dans son état actuel, l'Afrique du Nord correspond à une zone ayant subi plusieurs phases de déformation et de sédimentation depuis le Précambrien. La géologie de la partie septentrionale de l'Algérie est marquée par l'empreinte de l'orogénèse alpine (domaines tellien et atlasique). Le linéament majeur du pays correspond à la flexure sud-atlasique qui sépare l'Algérie alpine au Nord de la plate-forme saharienne au Sud, constituée pour l'essentiel de terrains du Précambrien et du Paléozoïque. Cette plate-forme a peu évolué depuis la fin du Paléozoïque et correspond à un domaine cratonique relativement stable (FABRE, 1976 et RIES, 2003).

Le but de l'étude géologique c'est la détermination de la lithologie de l'aquifère du continental intercalaire (CI) dans la région d'étude.

II.1 SITUATION GENERALE

La zone d'étude fait partie de la grande plateforme saharienne, située au Sud de l'Algérie elle appartient au Craton Nord Africain. Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au paléozoïque en plusieurs bassins (figure 6), on distingue de l'Ouest à Est :

II.1.1 Le bassin de Tindouf et de Reggane : qui sont situés sur les bordures Nord et Nord-Est du bouclier Reguibat. La couverture sédimentaire atteindrait 8000m dans le bassin de Tindouf et 6500 m dans celui de Reggane.

II.1.2 Le bassin de Béchar : est limité au Nord par le Haut Atlas, au Sud et à l'Ouest par la chaîne d'Ougarta. Sa couverture sédimentaire atteindrait 8000m.

II.1.3 Le bassin d'Ahnet-Timimoun : est limité au Nord par le haut fond d'Oued Namous, à l'Ouest par la chaîne d'Ougarta, au Sud par le bouclier Touareg et à l'Est par la dorsale d'Idjerane-Mزاب. La couverture serait en moyenne de 4000m.

II.1.4 La cuvette de Sbaâ : qui occupe la partie Sud-Ouest du bassin de Timimoune, correspond à un étroit sillon (60 km) d'orientation NW-SE qui borde les flancs nord-est des monts d'Ougarta. L'épaisseur des sédiments est relativement peu importante par rapport au reste du bassin de Timimoune (8000 m), puisqu'elle est comprise entre 2500 et 3000 m.

II.1.5 La synclise d'Illizi-Ghadamès : est limitée à l'ouest par la dorsale d'Amguid-El Biod et à l'Est par le môle de Tihemboka et les confins tuniso-libyens. Dans le bassin de Ghadamès, la couverture sédimentaire est supérieure à 6000 m.

Les épaisseurs des séries (1000 à 8000 m), leur nature, les déformations tectoniques et la subsidence, ont modelé la Plate-forme Saharienne en un certain nombre de bassins répartis dans la province occidentale, la province orientale et la province triasique.

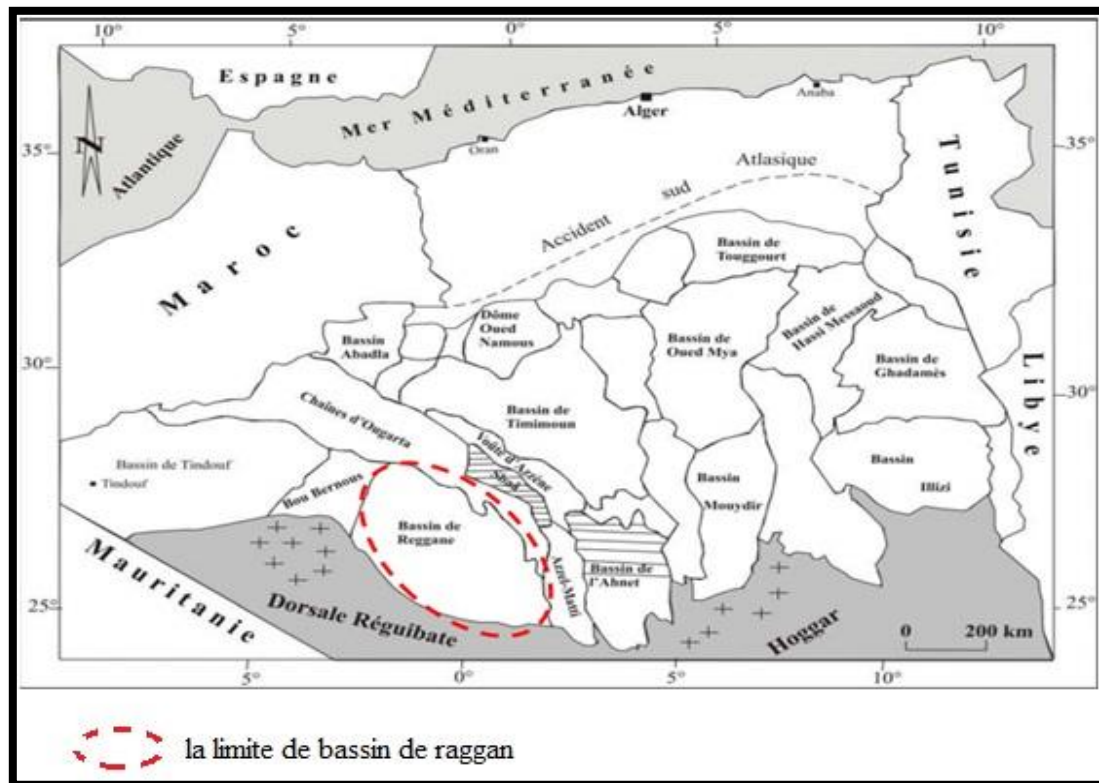


Figure 6. Les bassins les plus importants de la plate-forme saharienne en Algérie.
(Carte SONATRACH)

II.2 CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

L'analyse des données (carte géologique, logs de forage) a permis de répertorier une vingtaine d'étages stratigraphiques traversés. Certains ont été regroupés pour permettre une corrélation plus aisée des formations géologiques. Les étages datés du Primaire et les formations du socle, sont regroupés sous le nom de Paléozoïque, les séries datées du Lias au Malm ont été regroupées sous le Jurassique, les formations du Crétacé inférieur datées du Berriasien à l'Albien ont été regroupées sous le terme «Continental Intercalaire C. I.». Le terme Complexe Terminal «C. T.» désigne les formations datées du Sénonien au Mio-Pliocène. Ces regroupements ont permis de retenir une échelle stratigraphique allant du Quaternaire au Paléozoïque (bassin occidental, 2005).

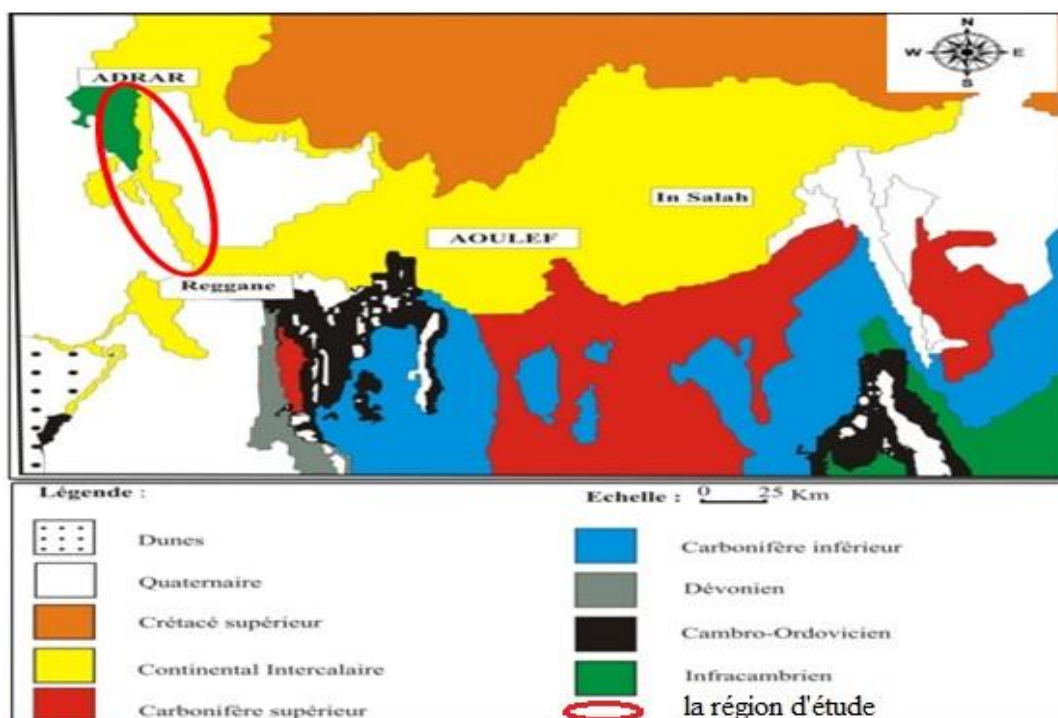


Figure 7. Carte géologique de la région d'étude (Conrad, 1969).

II.3 LA LITHOSTRATIGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE

II.3.1 Précambrien

Il est représenté par un matériel volcano-détritique dit « série verte » composé d'une alternance de grauweekes à débris de roches et conglomérat à galets de socle (quartzite, gneiss, granite).

La coupe suivante (Figure 8) représente la lithostratigraphie du bassin occidental (Sonatrach et Schlumberger2001).

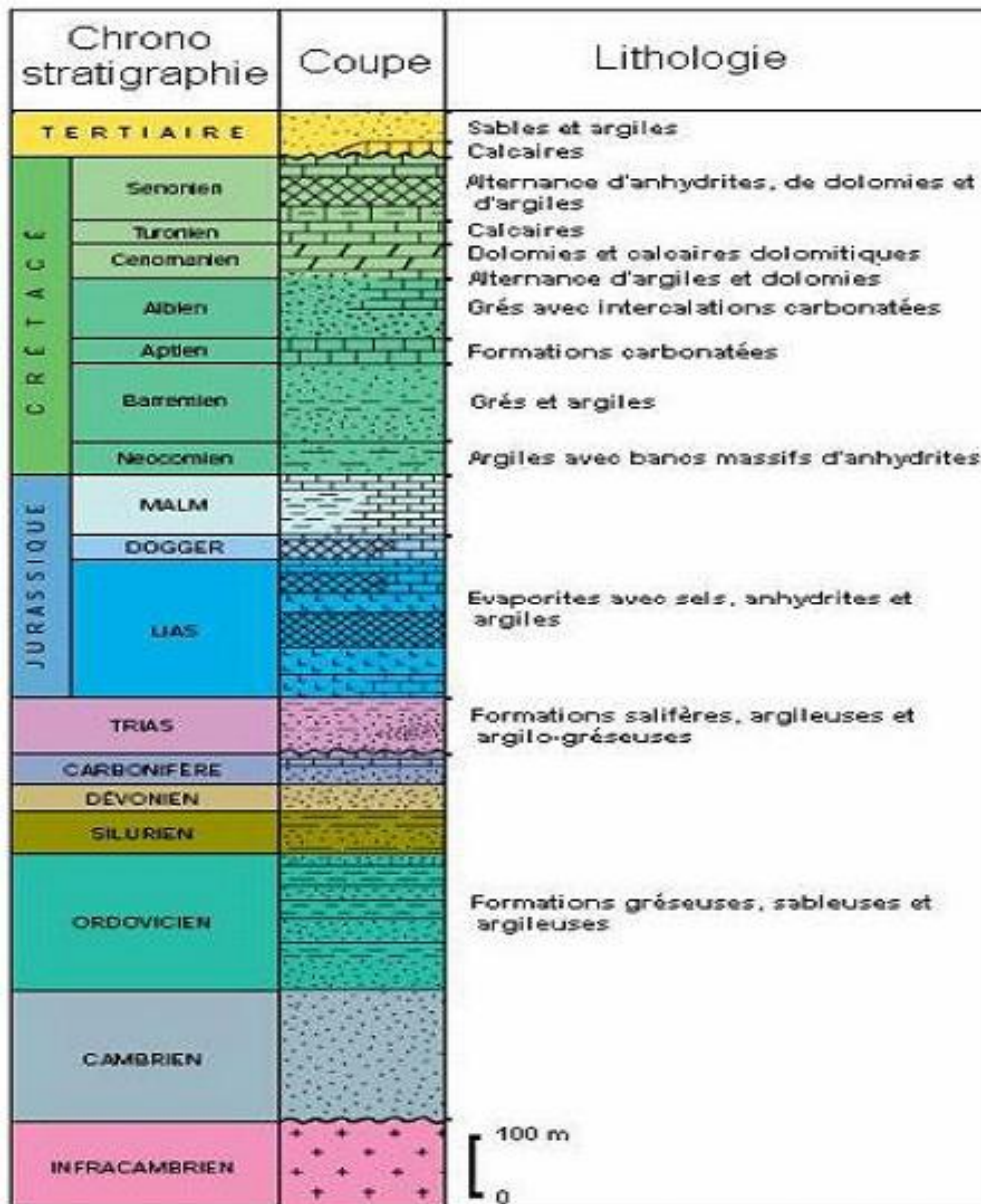


Figure 8. Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est Septentrional (Sonatrach, Schlumberger 1990).

II.3.2 Paléozoïque

Il est caractérisé par un substratum imperméable, transgressif sur le socle précambrien.

II.3.2.1 Cambrien

Les dépôts cambriens sont en discordance sur le socle précambrien et les majorités de ces éléments sont grossiers, moyens à fins ; quartzites, grès et parfois des conglomérats, son épaisseur varie d'une région à l'autre.

II.3.2.2 Ordovicien :

Les formations ordoviciennes constituent un objectif pétrolier de choix en raison de l'importance du développement des réservoirs gréseux. C'est pour cette raison qu'elles ont été traversées par de nombreux forages dans l'ensemble des bassins sédimentaires du Sud-Ouest algérien. Leur épaisseur peut atteindre 1900 m, donc c'est une surface transgressive.

II.3.2.3 Silurien :

Il repose en concordance sur les dépôts précédents. Il est constitué par des dépôts terrigènes qui sont représentés par des Argiles noirs à Graptolites, Argiles à passées gréseuses et carbonatées, on note que cette période est relativement courte.

II.3.2.4 Dévonien

Le Dévonien inférieur se présente dans le Touat et Gourara par des formations de calcaire et des grès affleurant essentiellement dans la région du Zaouïet Kounta.

Dans le Tademaït, le Dévonien moyen est représenté par des couches argilo-calcaire (formation d'Erg Chebbi) qui reposent directement sur les argiles siluriennes dans la région de Aïn Belbe.

II.3.2.5 Carbonifère

Le Carbonifère correspond au cycle sédimentaire paléozoïque, les sédiments sont divers, de marin profond jusqu'à continental :

❖ **Carbonifère inférieur** : il est subdivisé en un ensemble argilo-gréseux tournaisien surmonté d'une formation argileuse puis argilo-carbonatée datée du Viséen. Ce dépôt est marin avec la présence des évaporites.

❖ **Carbonifère moyen** : il correspond à la "formation d'Azzel Matti" qui est caractérisée par des dépôts lacustres renfermant exclusivement des ostracodes ; au Bashkierien, d'après CONRAD (1984).

"Formation rouge de Aïn Echbibi" constitué par des grès fluviatiles grossiers à laminations obliques avec quelques passées marins au Moscovien.

II.3.3 Mésozoïque

Il couvre la grande partie de la région d'étude Touat. Les terrains mésozoïques reposent en discordance angulaire sur les terrains primaires (Paléozoïque). Au Nord de la région de Reggane, il est recoupé parfois par des dykes et silts de dolérites attribuées.

II.3.3.1 Crétacé inférieur Continental Intercalaire

Dans le Gourara, le Touat et le Tidikelt, le Continental Intercalaire est daté du Crétacé inférieur, grâce à des découvertes paléontologiques assez nombreuses (DE Lapparent, 1960). Il existe une lacune très importante, allant du Permien au Jurassique supérieur, entre le Continental post-tassilien, plissé, d'âge Stéphanien (Bonnet et al., 1960) et les assises continentales fossilifères, qui forment le plateau de Tidikelt. La pénélplanation de toute la série précambrienne et paléozoïque se réalise pendant cette période et des phénomènes d'altération remarquables précèdent le dépôt du Continental Intercalaire (Figure 9).

Le Continental Intercalaire de cette région est divisé en quatre horizons constants, d'âge Crétacé inférieur (Lapparent, 1947). Ces horizons sont sans doute les équivalents latéraux de la « série du Djoua » :

- A la base, une unité A, formée de 25 à 300 m d'argiles rouges, de grès roses et blancs, de grès rouges à stratification entrecroisée et à lentilles de graviers et dragées de quartz. C'est dans les lits de graviers que l'on rencontre les restes de poissons et de reptiles.
- Au-dessus, l'ensemble B, formé par une dalle de grès-quartzite, de 1 à 2 m d'épaisseur, très constante, surmontant un conglomérat à bois silicifiés, parfois à troncs d'arbres silicifiés et à ossements de reptiles. Ce niveau forme la surface des plateaux qui se suivent de Timimoun à In-Salah en passant par Adrar, Reggane et Aoulef.
- Ensuite, l'ensemble C est formé par une deuxième série argileuse, de 40 à 100 m de puissance, qui admet des intercalations de grès à dragées « kerboub ».
- Enfin, l'ensemble D comprend 60 à 125 m d'argiles rouges à bancs gréseux. Cette assise est remarquable à El-Goléa où les « argiles d'El-Goléa » alternent avec quelques bancs calcaires (CONRAD, 1969).

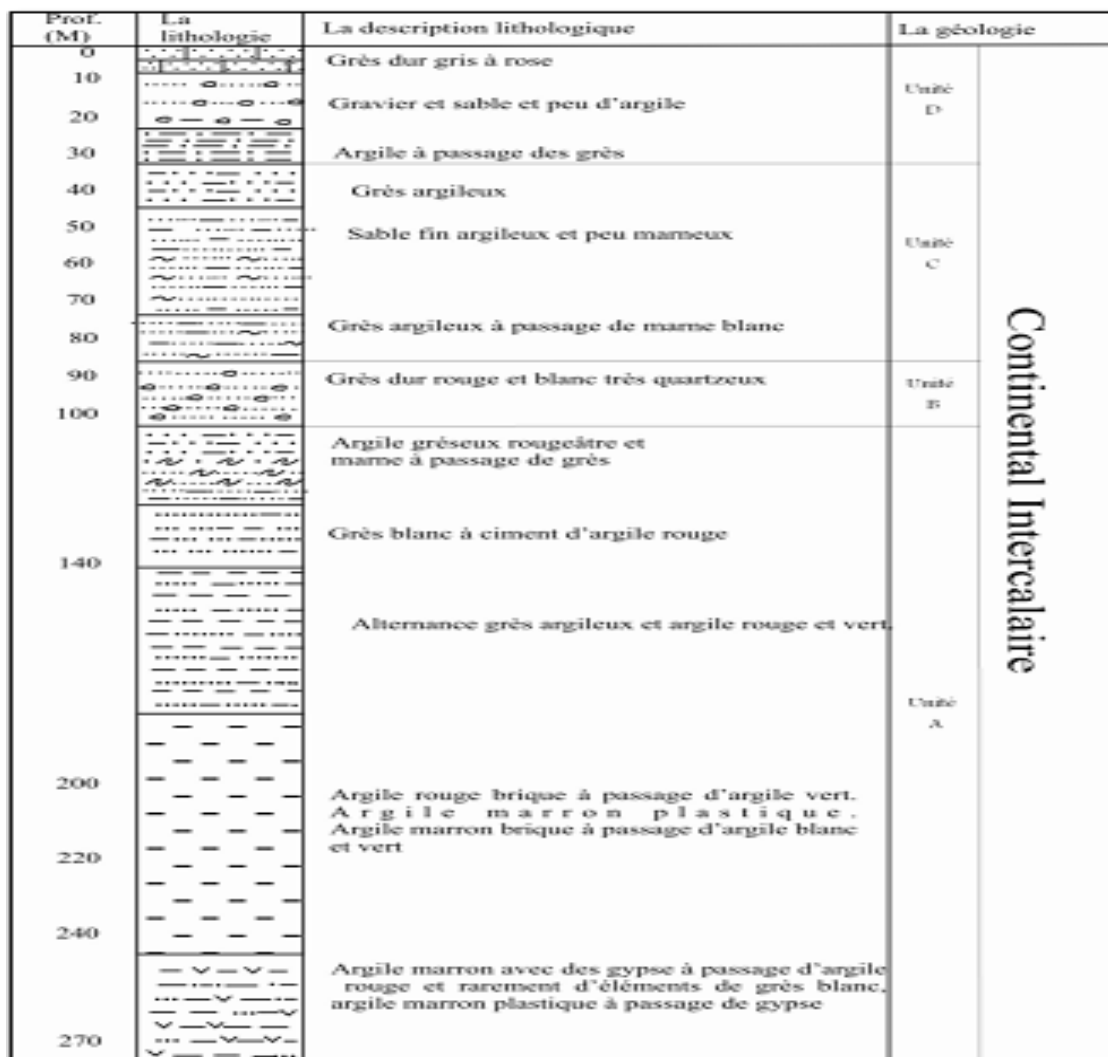


Figure 9. Coupe lithologique des unités du CI (D'après le document de Sonatrach)

II.3.3.2. Le Crétacé supérieur (Crétacé marin)

Il représente les dernières grandes transgressions marines. Il recouvre la partie orientale de la région d'étude. Il est présenté par le plateau de Tademaït, constitué généralement par : une double dalle calcaire dure surmontant des argiles et des grès rouges, de calcaires plus ou moins dolomitiques parfois pétris de coquilles marines.

II.3.4 Le Cénozoïque

II.3.4.1 Néogène

Il est représenté dans la bordure orientale de l'Erg, la Hamada de Tiouririne, emboîtée dans le Continental Intercalaire, a une dalle semblable à celle de la Hamada Hamra, avec à la base une calcaréo-dolomitique, argileuse, gréseuse, coiffée par une dalle calcaire dolomitique massive et fortement silicifiée.

II.3.4.2 Le Plio-Villafranchien

En suivant la piste Meyendorff, on atteint le pointement paléozoïque d'El-Ahmar, au Sud-Ouest du quel on retrouve le faciès également lacustre matérialisé par des argilites vertes, à poissons (entre Kalouche et Sali) et forme la base du Plio-Villafranchien. Des filonnets de gypse, vraisemblablement d'origine secondaire, se trouvent dans ces argilites.

II.3.5 Le Quaternaire

III.3.5.1 Villafranchien Supérieur (Quaternaire ancien)

C'est au Villafranchien supérieur que s'organise dans son ensemble le grand réseau hydrographique du Sahara algérien. C'est à cette époque que les écoulements canalisés présentent leur intensité maximale, et que les réseaux fluviaux endoréiques qui s'étaient individualisés au Plio-Villafranchien, ont la plus grande extension géographique.

Une petite hamada se développe aux environs de Lahmer, au milieu de la dépression du Touat. Les dépôts sont très réduits, conglomératiques ; ce dernier caractère est dû à la proximité des affleurements précambriens de Lahmer et de la Zaouïa Sidi Abdelkader.

La petite hamada est constituée de 2 m de conglomérat à éléments de grès arkosiques, mal roulés, pris dans un ciment argilo-gréseux, surmontés par une dalle également conglomératique, à ciment calcaire, d'environ 2 m de puissance. Le Continental Intercalaire remonte en gradins, sur lesquels sont implantées les palmeraies, et ferme la dépression du Touat à l'Est.

II.3.5.2 Le Pléistocène moyen (Quaternaire moyen)

Le retour à des conditions climatiques subarides, pendant une longue période, a permis la réorganisation du réseau hydrographique ancien et le dépôt de sédiments fluviaux et lacustres, qui sont dans l'ensemble modestes et plus étroitement localisés dans les vallées que par le passé.

Pendant cette période, s'est élaboré un glaciaire emboîté dans le glaciaire villafranchien ; des encroûtements calcaires ou des cuirassements ferrugineux se sont formés sans atteindre l'ampleur de ceux du Villafranchien supérieur.

II.3.5.3 L'Holocène (Quaternaire récent)

La mise en évidence de cette période humide date des premières explorations sahariennes. L'abondance de l'outillage néolithique, celle des gravures rupestres, et les témoins d'anciens sols marécageux ont depuis longtemps attiré l'attention des voyageurs sur cette époque, géologiquement très proche.

Dans la région de Touat et à l'Est de la palmeraie de Bouali, un ensemble de tufs et de sols marécageux, datés de l'époque holocène indique le niveau d'émergence naturelle de la nappe du Continental Intercalaire, pendant le néolithique humide.

II.4 COUPES GEOLOGIQUES

Les coupes AA, BB et CC (figure 11) ont été retenues pour illustrer la géométrie et la disposition structurale des différentes couches géologiques de la zone d'étude et notamment les formations du Continental Intercalaire qui constitue l'objectif de notre étude.

Ces coupes montrent que le Continental Intercalaire affleure au niveau de la zone d'étude, il est peu épais dans les régions d'Adrar et In Salah, alors qu'il plonge sous la couverture du Crétacé supérieur du plateau de Tademaït où il atteint son maximum au niveau de la vallée de Oued Righ au Nord Est de la nappe du CI.

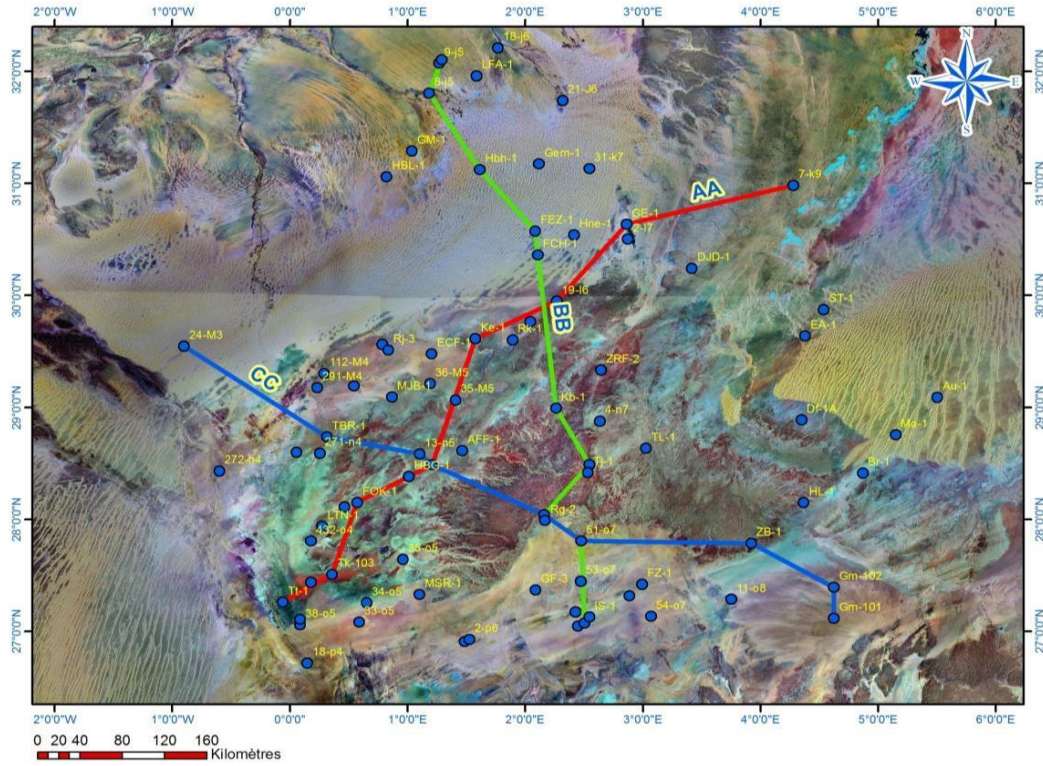
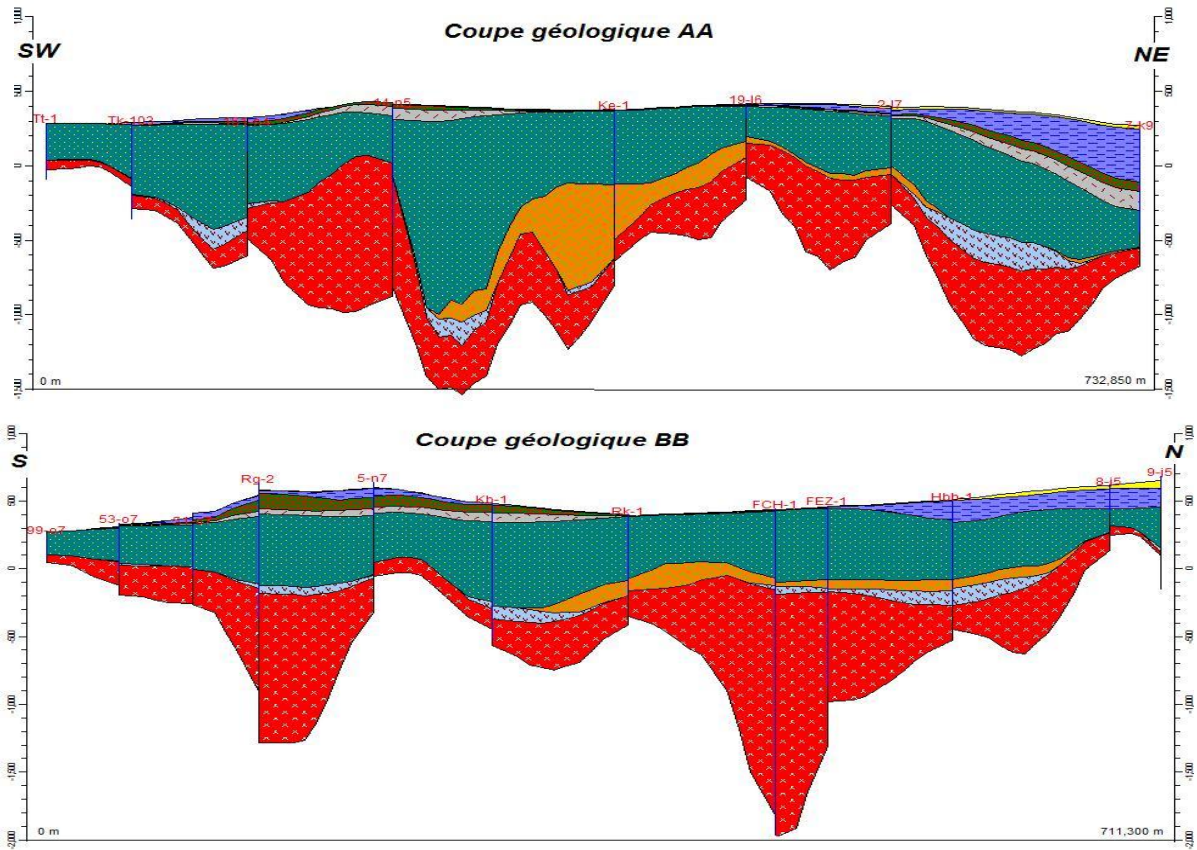


Figure 10 .Situation des coupes géologiques dans le bassin Occidental (BEN HAMZA, 2013).



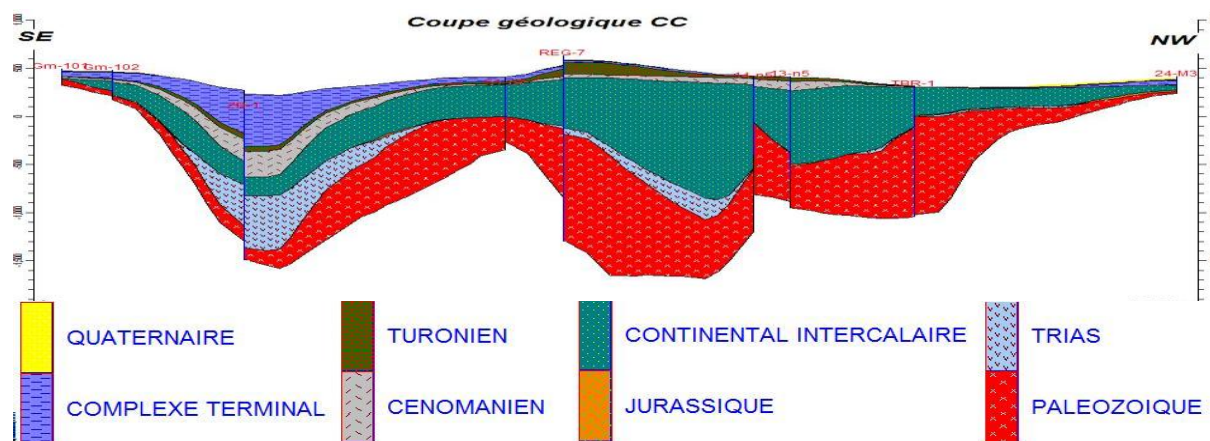


Figure 11. Coupes géologiques AA, BB et CC dans le bassin occidental. (BEN HAMZA, 2013).

II.4.1 Profils géologiques

Les profils géologiques A, B et C (Figure 13) partent de la région d'étude vers le Nord, l'Est et le centre du bassin, ils montrent l'affleurement de la nappe du Continental Intercalaire dans la partie Sud Ouest du bassin et qu'elle repose directement sur des formations paléozoïques, ainsi que son plongement vers l'Est sous la couverture du Crétacé supérieur, vers le Nord le Continental Intercalaire affleure jusqu'à la limite des dépôts quaternaires de l'Erg Occidental où il est recouvert par les dunes de l'Erg.

Les profils géologiques D et E (Figure 14) sont orientés Nord et Nord-Ouest vers le Sud-Est, ils montrent que le Continental Intercalaire plonge du Nord vers l'Est sous le Complexe Terminal.

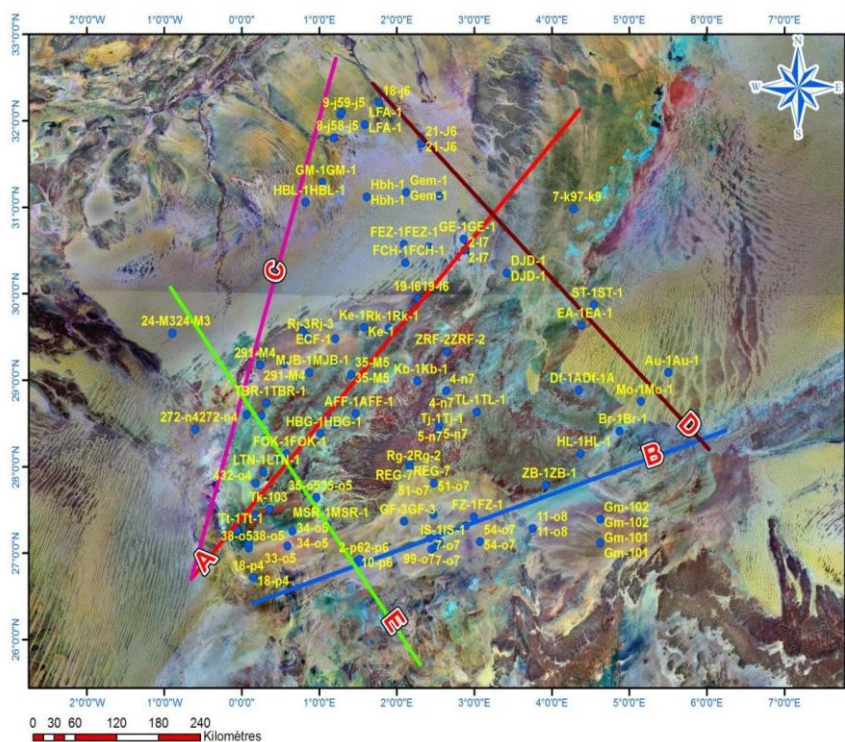


Figure 12. Situation des profils géologiques dans la région d'étude (BEN HAMZA, 2013).

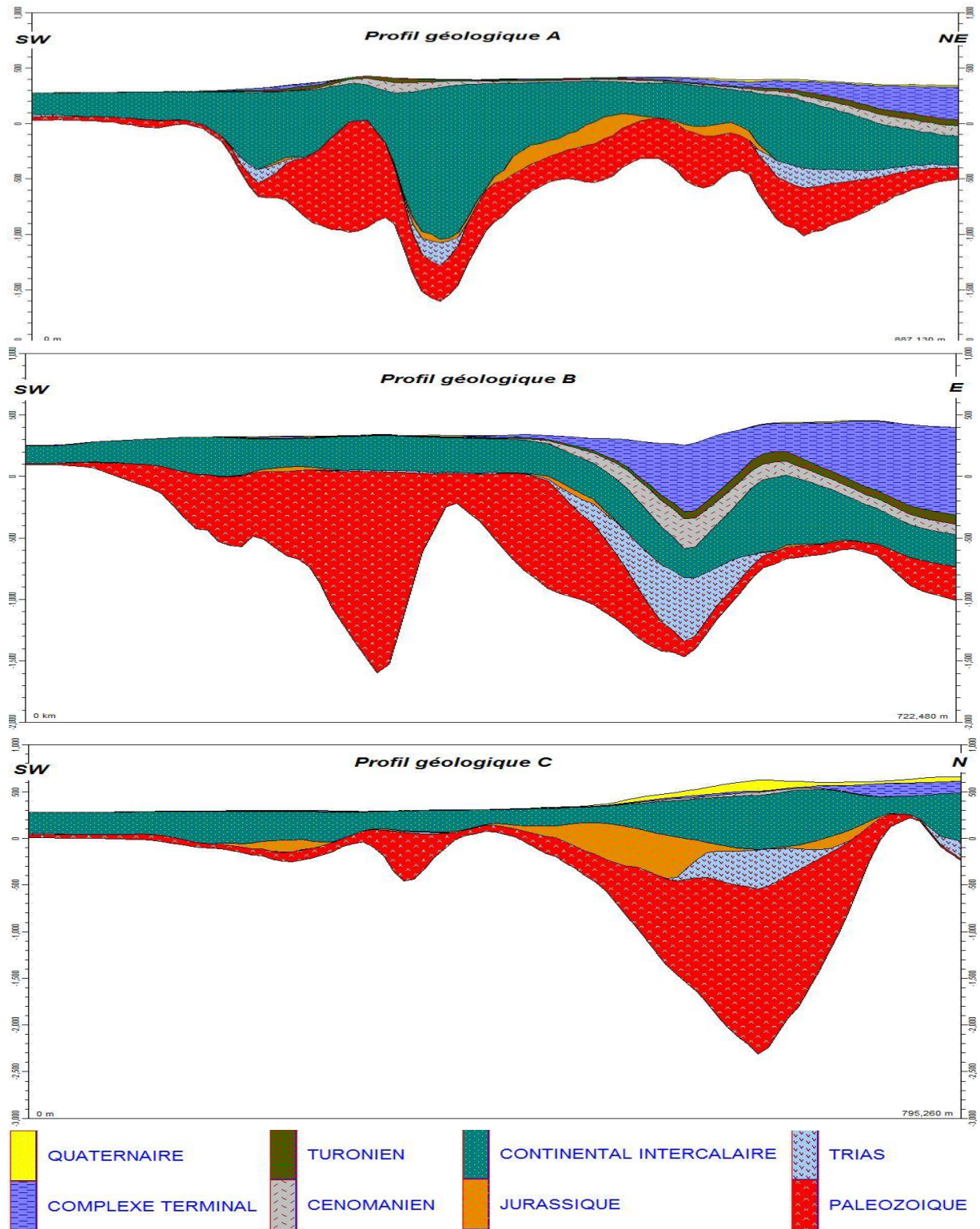


Figure 13. Profils géologiques A, B et C dans le bassin Occidental (BEN HAMZA ,2013).

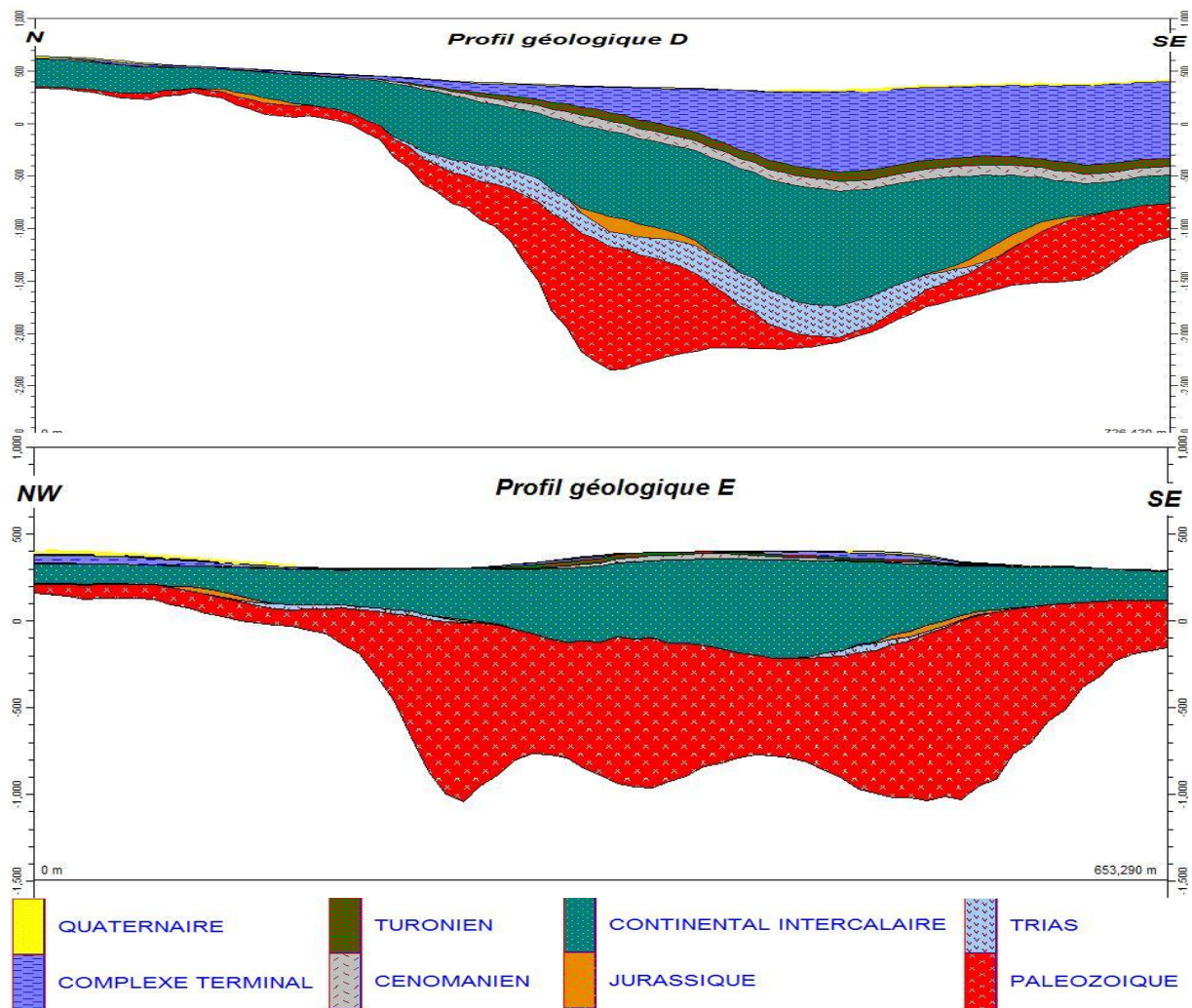


Figure 14. Profils géologiques D et E dans le bassin occidental (BEN HAMZA, 2013).

CONCLUSION

Notre but dans cette étude est d'apporter des confirmations sur le comportement hydrogéologique des formations de la région d'étude. Elle nous a permis de mettre en avant :

- Les formations du Crétacé inférieur (Continental Intercalaire) qui affleurent largement dans notre région. Elles sont constituées essentiellement d'un faciès gréseux argileux (grès, argiles, sables et graviers à divers proportions). Ces formations renferment une importante nappe libre, qui constitue la principale ressource en eau de la willaya d'Adrar.
- Le CI affleure de Timimoun à In Salah et plonge sous le recouvrement cénozoïque du plateau de Tademaït.
 - La consultation des cartes, l'analyse des coupes et profils géologiques, réalisée dans le cadre de cette étude montre que l'épaisseur de la nappe du Continental Intercalaire est de l'ordre 200 à 300 m au maximum dans la région d'étude et que cette zone représente la limite Sud Ouest de la nappe du Continental Intercalaire, par la ligne allant d'Adrar à Reggane.

CHAPITRE III
HYDROCLIMATOLOGIQUE

INTRODUCTION

Le climat de la région d'Adrar (Touat) est un climat particulièrement contrasté; elle est caractérisée par un climat sec et aride. L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. Ces paramètres hydro-climatiques ont une grande importance pour toute étude hydrogéologique; car, ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères.

Les objectifs des analyses climatologiques (vitesse du vent, P, ETP, T°C, Hr, etc.) permettent de :

- Donnent une idée précise sur le climat qui caractérise la région étudiée
- Envisagent les types d'agriculture que l'on peut adapter et leurs besoins en eau.
- donnent un schéma global sur le mode de fonctionnement hydrologique du système aquifère.

Les données utilisées se rapportent à la période allant de 1995 à 2014, soit 19 années d'observations. Cette station météorologique est localisée à 15 km à l'Est de la ville d'Adrar (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques de la station pluviométrique d'Adrar.

Station	Code	X	Y	Z	Années d'observation
Adrar	13-01-16	0°10'W	27°50'N	279	1994-2014

III.1 LA TEMPERATURE

La température est un facteur important qui conditionne l'hydro-climatologie d'une région. Pour notre étude nous avons pu disposer des données moyennes mensuelles et annuelles de la station d'Adrar qui sont représentées dans le tableau ci-dessous.

On distingue deux saisons :

- Une saison chaude qui s'étend de mai jusqu'à septembre. Nous devons signaler qu'en aout les températures deviennent insupportables.
- Une saison froide caractérisée par des nuits hivernales très froides. C'est la saison de germination des plantes, elle s'étend d'octobre à avril. La variation brusque de la température est due à l'influence des caractéristiques géographiques et les masses d'air tropical continental.

III.1.1 Variations des températures moyennes annuelles

La figure 15 et le tableau 04 ci-dessous présente la répartition des températures, moyenne minimale (T°C min), moyenne annuelle (T°C moy), ainsi que la moyenne maximale (T°C max) pour une série de 20 ans d'observation.

Tableau 04 : Températures moyennes annuelles (1995-2014) :

Année	T°C max	T°C moy	T°C min	Année	T°C max	T°C moy	T°C min
1994-1995	33,33	25,55	17,2	2004-2005	34,53	26,48	17,93
1995-1996	33,41	25,69	17,48	2005-2006	33,06	26,2	17,72
1996-1997	33,16	25,49	17,37	2006-2007	34,21	26,05	17,18
1997-1998	33,6	25,65	17,38	2007-2008	33,7	25,91	17,59
1998-1999	33,72	25,93	18,13	2008-2009	33,63	25,88	17,53
1999-2000	33,58	25,61	16,84	2009-2010	35,28	27,37	18,81
2000-2001	34,89	26,84	17,61	2010-2011	33,4	25,5	17,7
2001-2002	34,28	26,38	17,73	2011-2012	33,4	25,4	17,3
2002-2003	33,88	26,06	17,6	2012-2013	33,7	25,6	17,4
2003-2004	33,41	25,52	16,97	2013-2014	34,4	26,3	18,2

source : station métrologique d'Adrar

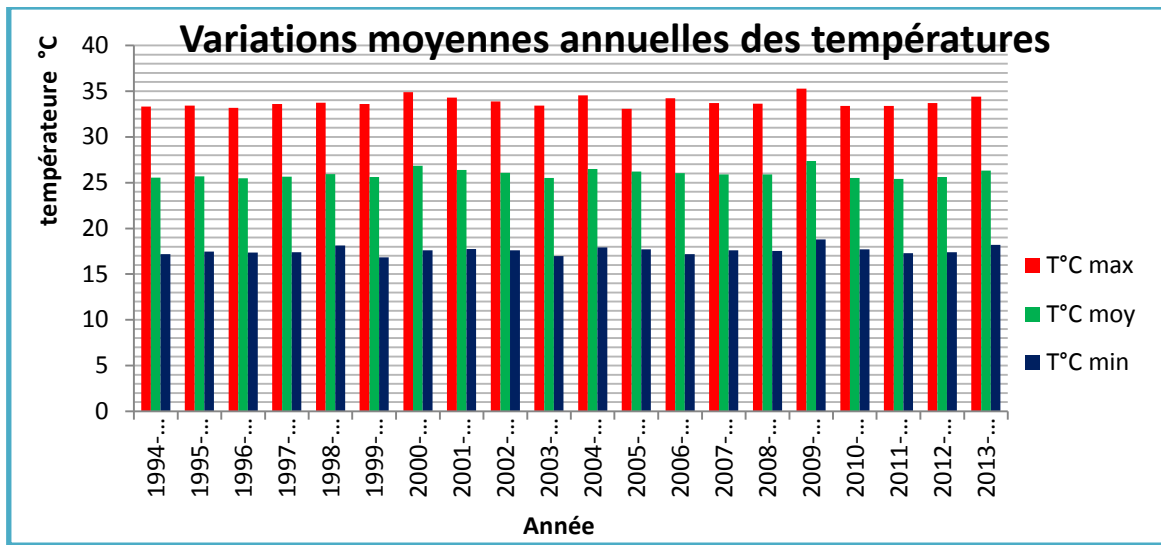


Figure 15 Variations moyennes annuelles des températures.

L'analyse des données de la température moyenne annuelle montre que l'année la plus chaude est l'année 2010 avec une température moyenne annuelle de 27.37°C et que l'année la plus froide est l'année 2000 avec une température moyenne annuelle de 25.61°C, la température moyenne interannuelle est de 24,42°C.

III.1.2 Variations des températures moyennes mensuelles

Tableau 05 : Températures moyennes mensuelles (1995-2010):

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T °C	32	25	17	13	12	15	20	24	28	34	37	36

Source : station métrologique d'Adrar

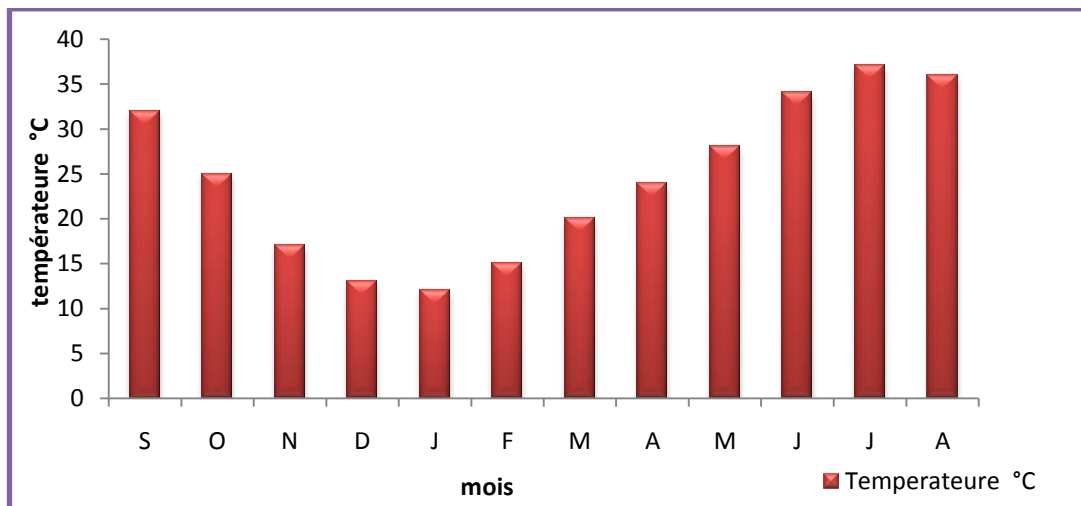


Figure 16 Variations moyennes mensuelles des températures.

L'analyse de l'histogramme des températures moyennes mensuelles (Figure 16) montre que le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température moyenne de l'ordre de 37°C, alors que le mois le plus froid c'est le mois de Janvier avec une température moyenne de l'ordre de 12°C, la température moyenne mensuelle est de l'ordre de 24.42°C.

III.2 LES PRECIPITATIONS

III.2.1 Variations interannuelles des précipitations

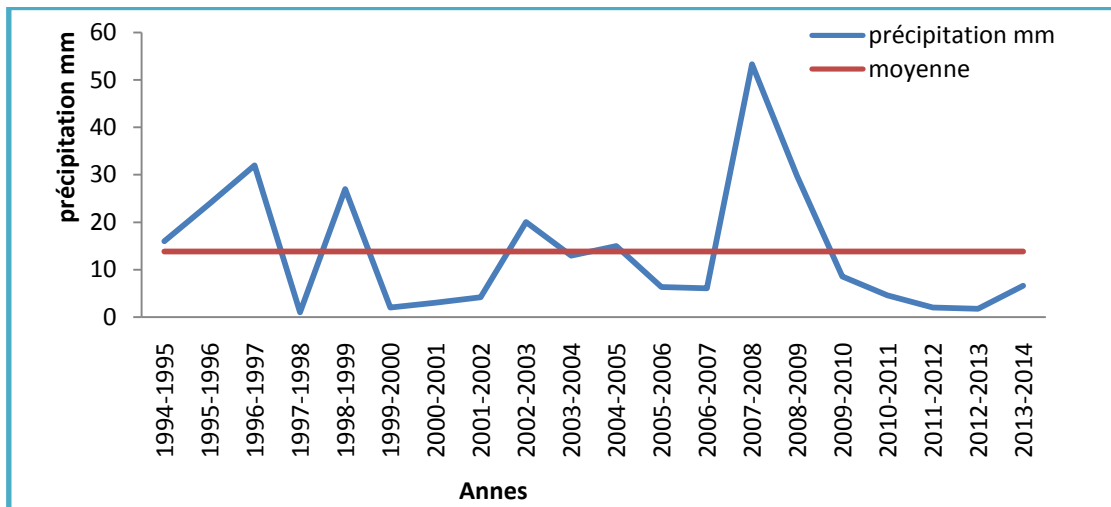


Figure 17. Les moyennes interannuelles des précipitations.

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 20 ans (1995-2014), montre que l'année 2008 est la plus arrosée avec des précipitations moyennes de l'ordre de 53,33 mm/an et que l'année 1998 est la plus sèche avec des précipitations moyennes de l'ordre de 1,02 mm/an, les précipitations moyenne interannuelles sont de 11,90 mm/an (Figure 17).

III.2.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations

Tableau 06. Les moyennes mensuelles des précipitations (en mm)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Précipitations	0,1	0	0,7	0,9	5,4	0,4	2,3	1,7	0,1	0,1	0	0,2

source : station métrologique d'Adrar

D'après la Figure 18 on remarque que la période la plus pluvieuse est celle de l'hiver (nulle en octobre, les précipitations ont un maximum, 5.4 mm, en Janvier). L'irrégularité des pluies et leur soudaineté font que les crues de l'hiver, caractéristiques du climat saharien, ces dernières contribuent beaucoup à la recharge de la nappe. L'été est le plus sec et les précipitations sont nulles en juillet.

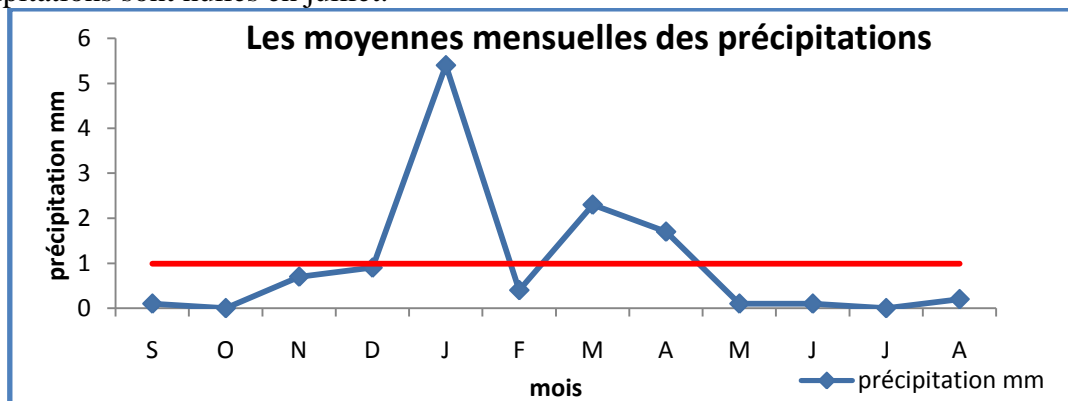


Figure 18. Les moyennes mensuelles des précipitations.

Les précipitations sont très irrégulières d'une année à une autre. Cette situation s'expliquerait par l'éloignement de la région de la mer et par une masse d'air tropicale se caractérisant par la haute température qui emmène le plus souvent des vents violents, du sirocco avec quelques précipitations enregistrées au début d'Automne et en été.

III.2.3 Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN

Un mois sec est défini, selon Bagnouls et Gaussen (1953, 1957) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T$). Ainsi, on constate que la saison sèche s'étale sur plusieurs mois consécutifs. Le diagramme de Gaussen (figure 19) permet de mettre en évidence une saison sèche qui s'étale sur tous les mois de l'année. Donc le bilan hydrologique dans notre région d'étude est déficitaire durant toute l'année.

Tableau 07 les précipitations et température annuelles.

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Température (°C)	32	25	17	13	12	15	20	24	28	34	37	36
précipitations (mm)	0,1	0	0,7	0,9	5,4	0,4	2,3	1,7	0,1	0,1	0	0,2

source : station métrologique d'Adrar

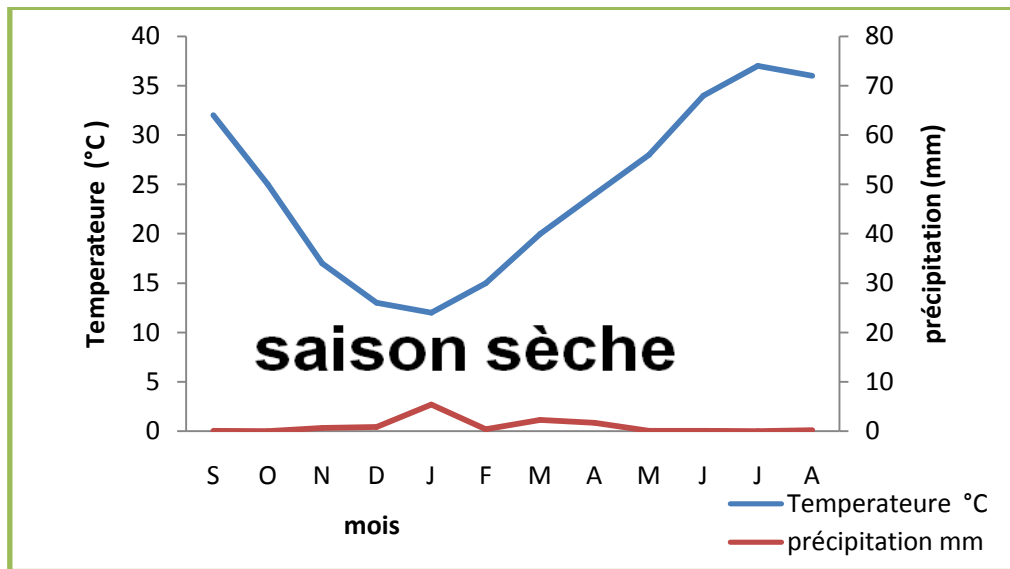


Figure 19: Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN de la région d'Adrar

III.3 LE VENT

Notre zone d'étude est l'une des régions les plus exposées au vent dans le Sahara algérien. Ces vents sont particulièrement violents. Le tableau 08 et la Figure 20 représente les moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistré durant la période 1991 à 2010.

Tableau 08 : présente la vitesse des vents dans la station d'Adrar (OMS).

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	MOY
vitesse du vent m/s	5,6	5,5	5,3	4,8	5,7	5,6	6,6	6,3	6	5,5	5,8	5,6	5,7

Source : station métrologique d'Adrar

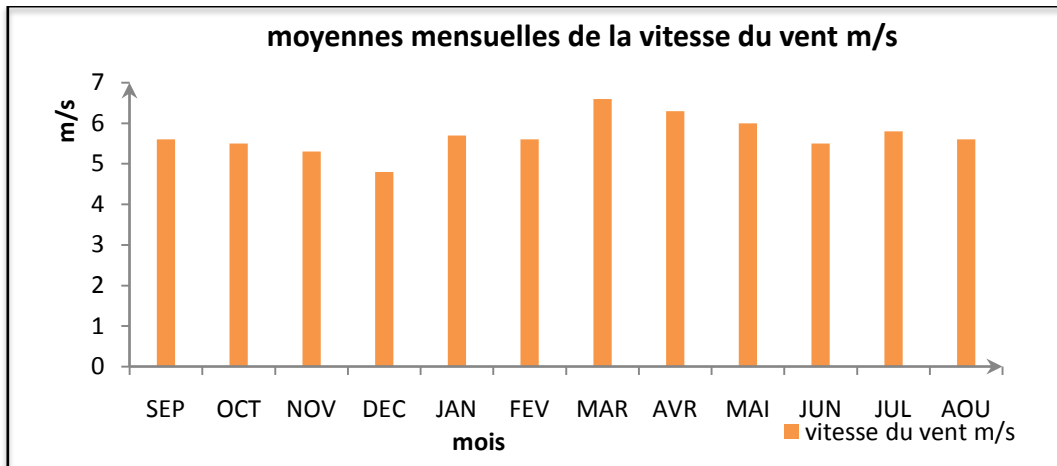


Figure 20: les moyennes mensuelles de la vitesse du vent

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques du climat. On relève que les vents sont fréquents durant toute l'année. C'est durant la saison du printemps (Mars-Avril) que se manifestent violemment les tempêtes de sable. Des vitesses supérieures à 20 m/s (72km/h) sont observées dans la région. La direction des vents dominants est Nord-Est et Nord, sauf en juillet et Août où elle est Est et Nord-Est avec une fréquence de 25% pour le Nord-est et 16% pour le secteur Nord. En été, les vents sont chauds et secs.

III.4 HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

La moyenne annuelle de l'humidité dans la région de Touat ne dépasse guère 27.25 %. Les moyennes mensuelles de l'humidité sont au-dessous de la médiane (50 %). Les fortes valeurs de l'humidité sont enregistrées durant la saison d'hiver et la valeur maximale moyenne enregistrée est celle du mois de janvier qui est de l'ordre de 48%. Les faibles valeurs caractérisant la saison la plus chaude où l'on trouve que l'humidité relative de l'air ne dépasse pas les 25 % et la valeur minimale moyenne est celle du mois de juillet qui est de l'ordre de 15 %.

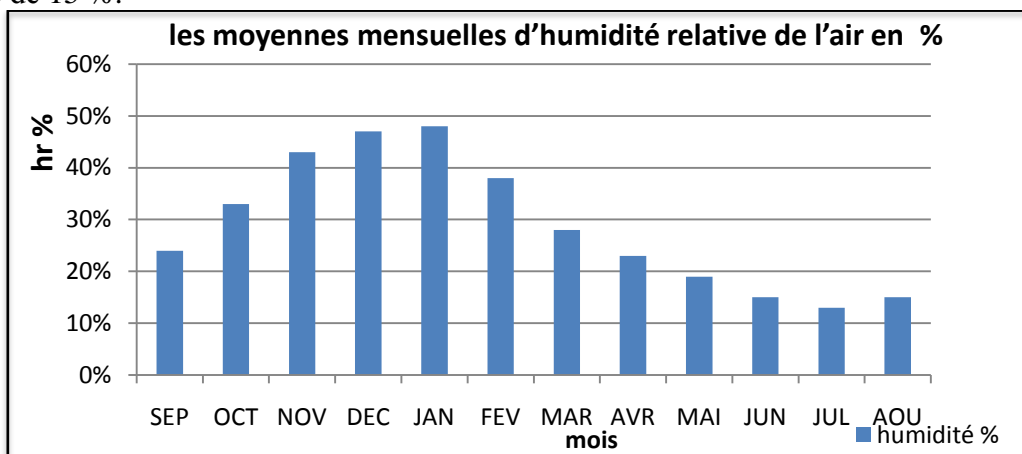


Figure 21: les moyennes mensuelles d'humidité relative de l'air (hr %)

III.5 L'ENSOLEILLEMENT

C'est la période durant laquelle le soleil a brillé sur le sol, notons qu'il existe deux expressions de l'insolation

1- L'ensoleillement possible : c'est la période possible durant laquelle le soleil pourra briller on suppose que le ciel est dégagé, elle se base sur les calculs astronomique durant le jour.

2- L'insolation effectif : c'est la période durant laquelle le soleil a brillé sur le sol, elle est mesurée par l'héliographe.

Tableau 09 : Moyennes mensuelles d'insolation (1991-2010).

MOIS	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU
insolation heures/j	9,4	9,1	9	8,6	8,4	9,4	9,3	9,6	10,6	11,1	10,9	10,1

source : station météorologique d'Adrar

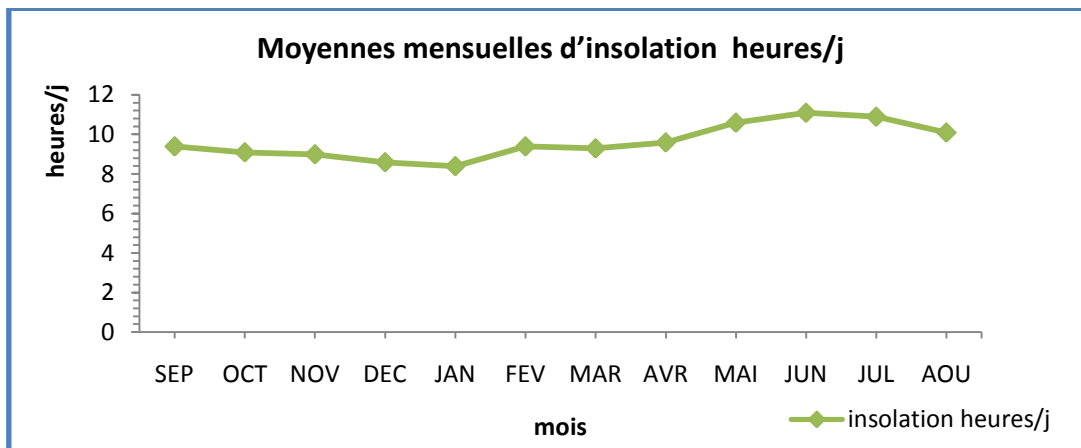


Figure 22: Moyennes mensuelles d'insolation

D'après le graphe (Figure 22), l'insolation journalière est supérieure à 8 h/j pendant toute l'année. Ces valeurs montrent une augmentation de l'insolation de 8,4 h/j au mois de janvier jusqu'à 11,1 h/j au mois de juin. L'insolation est faible pendant les mois froids et forte durant les mois chauds. L'insolation est importante dans la région de Touat puisqu'elle excède 9 heures par jour pendant plus de 10 mois de l'année.

III.6 DETERMINATION DES INDICES CLIMATIQUES

III.6.1 Indice d'aridité de De Martonne

Cet indice dépend essentiellement des précipitations moyennes mensuelles en (mm) et la température annuelle en (°C), en appliquant la formule suivante :

Avec :
$$I = P / (T^{\circ} + 10)$$

I : Indice d'aridité.

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

Dans le cas de la station d'Adrar, on a : $I = 11,90 / (24,42 + 10) = 0,35$

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

$I < 5$Climat hyper -aride

$5 < I < 7,5$Climat désertique

$7,5 < I < 10$Climat steppique

$10 < I < 20$Climat semi-aride

$20 < I < 30$Climat tempéré

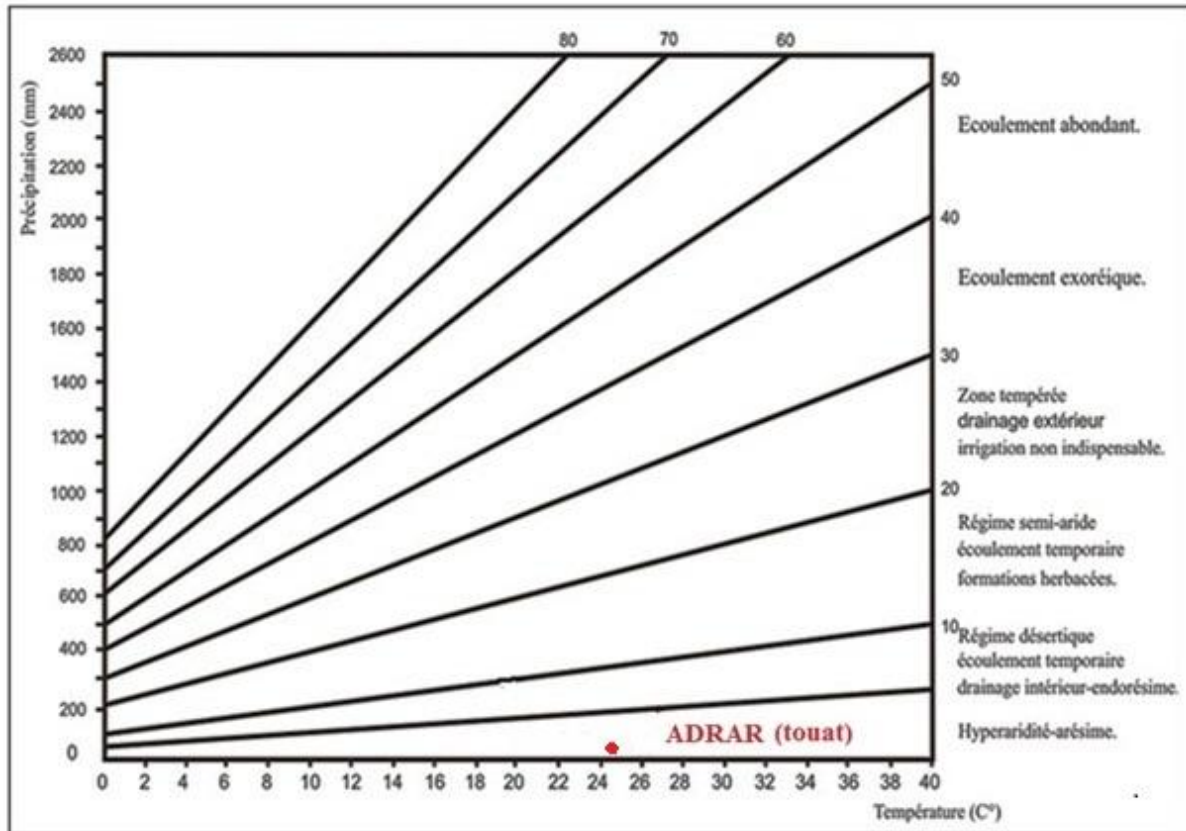


Figure 23 : Abaque de l'Indice d'aridité annuel De MARTONE.

D'après l'indice d'aridité De MARTONE, on peut dire que notre région d'étude se caractérise par un climat hyper aride $I < 5$, Figure 23 montre la position de notre région.

III.6.2 Climagramme d'Emberger

Cet indice permet de déterminer l'étage bioclimatique de la zone étudiée, deux paramètres sont pris en considération :

- la pluviométrie moyenne annuelle (P) ;
- la température : la moyenne des maxima du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima du mois le plus froid (m).

La formule d'Emberger est la suivante :

Avec :

$$Q_2 = \frac{p}{\frac{(M+m)}{2}(M-m)} * 1000$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud (en degré Kelvin)

m : moyenne des minima du mois le plus froid (en degré Kelvin)

P = 11,90 mm M= 310°K m = 285°K Ce qui donne : $Q_2 = 1.6$

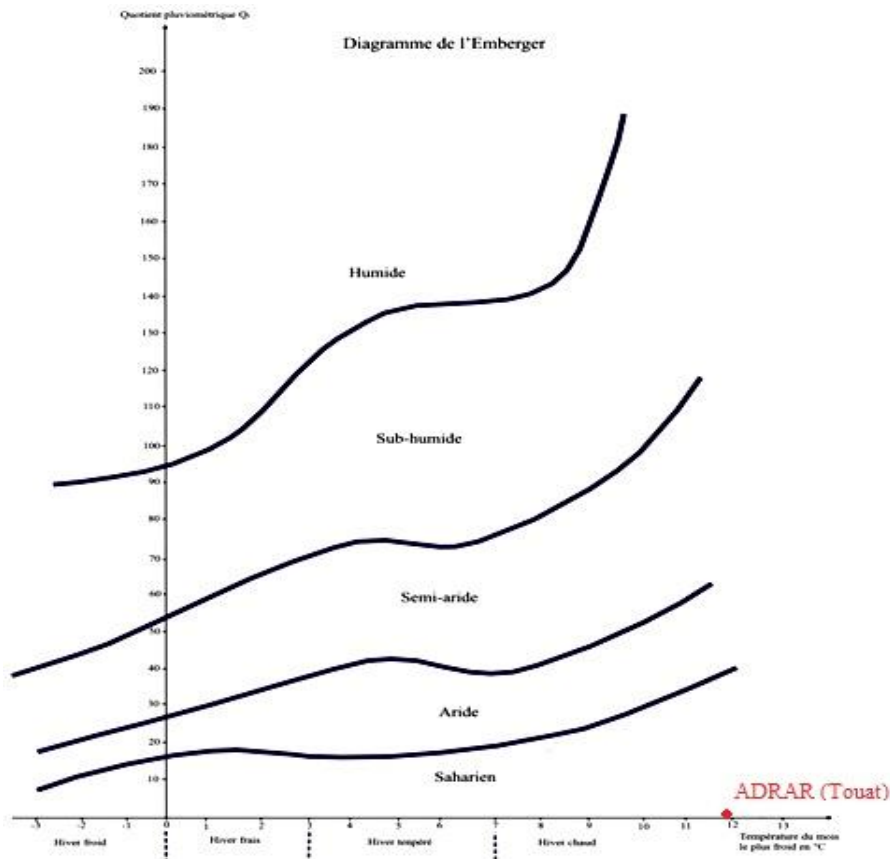


Figure 24 : Position de la région de Touat dans le diagramme d'Emberger

Selon le diagramme pluviométrique d'Emberger (Figure 24), le coefficient d'Emberger égal à 1.6 situe la région de Touat dans l'étage bioclimatique saharien.

III.7 ÉVAPOTRANSPIRATION

III.7.1 Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle)

L'ETP est la quantité d'eau qui serait évaporée et/ou transpirée à partir d'une surface, si l'eau disponible à l'évapotranspiration est suffisante.

Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de calculer l'ETP, à partir de quatre paramètres fondamentaux : la température, déficit d'écoulement, le vent et la durée d'insolation.

En tenant compte des données disponibles, on se base sur la méthode de THORNTHWAITE dans le calcul de ce paramètre.

III.7.1.1 D'après la formule de Thornthwaite

Le développement de la formule de Thornthwaite donne la formule suivante :

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

Avec :

ETPc : évapotranspiration potentielle corrigée en (mm).

T : température moyenne du mois en (°C).

$I = \sum i$ et $i = (t/5)^{1.514}$ i: indice thermique

$a = (1.6.I/100) + 0.5$

K : coefficient de correction en fonction de la latitude

Tableau 10 : valeur de l'ETP Calculée en (mm) Selon la méthode de Thornthwaite.

MOIS	T (°C)	P (mm)	I	ETP calculée	K	ETP Corrigée
SEP	32,00	0,10	16,62	154,69	1,02	157,78
OCT	25,00	0,00	11,44	79,04	0,99	78,25
NOV	17,00	0,70	6,38	27,69	0,9	24,92
DEC	13,00	0,90	4,25	13,35	0,9	12,02
JAN	12,00	5,40	3,73	10,74	0,92	9,88
FEV	15,00	0,40	5,28	19,7	0,88	17,34
MAR	20,00	2,30	8,16	43,08	1,03	44,37
AVR	24,00	1,70	10,75	70,73	1,07	75,68
MAI	28,00	0,10	13,58	107,58	1,16	124,79
JUN	34,00	0,10	18,21	182,42	1,15	209,78
JUL	37,00	0,00	20,7	229,6	1,18	270,93
AOU	36,00	0,20	19,86	213,11	1,13	240,81
Année	24,42	11,90	138,96	95,9775	/	1266,56

III.7.2 Estimation de l'ETR (l'évapotranspiration réelle)

L'ETR est la quantité d'eau évaporée effectivement par le sol et les surfaces d'eau libre ou transpirée par les végétaux. On peut la calculer à l'aide de plusieurs formules telles que:

- la méthode de TURC
- la méthode de COUTAGNE
- la méthode de THORNTHWAITE. (bilan hydrique)

III.7.2.1 ETR selon la formule de TURC : $ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$

Avec : $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

ETR : Évapotranspiration Réelle (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

L : paramètre arbitraire lié à la température.

T : température moyenne annuelle (°C).

$$L = 1638.3 \quad ETR = 12, 14 \text{ (mm /an)}$$

III.7.2.2 ETR selon la formule de COUTAGNE

Qui s'écrit de la manière suivante :

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

Avec : $\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$

D : Évapotranspiration Réelle m/an.

P : précipitation moyenne annuelle en mètre (P=0.0119 m).

T : température moyenne annuelle en °C (T=24.42°C).

Cette formule n'est valable que pour les valeurs de (P) comprise entre : $1/8\lambda$ et $1/2\lambda$

Avec : $\lambda = 0.24, 1/8\lambda = 0.52, 1/2\lambda = 2.08$

Donc, la formule de Coutagne n'est pas applicable car la valeur de P n'est pas comprise entre $1/8\lambda$ et $1/2\lambda$

III.8 BILAN HYDRIQUE (méthode de THORNTHWAITE)

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU). Le bilan d'eau de THORNTHWAITE fait intervenir d'une part l'évapotranspiration potentielle et d'autre part la pluviométrie (P).

Le principe de cette méthode est basé sur 2 cas :

1^{er} cas : si $P > ETP$ \longrightarrow L'ETR est égale à l'ETP.

Et l'excédent des précipitations sur l'ETP est stocké dans le sol, il forme l'humidité pour THORNTHWAITE, la saturation est atteinte lorsque les réserves superficielles cumulées atteignent la valeur de la réserve utile.

2^{ème} cas : si $P < ETP$ \longrightarrow dans ce cas il puisera des réserves du sol

Jusqu'à ce que l'ETR soit égale à la pluviométrie.

Une fois le stock est épuisé $ETR = P$.

Tableau 11 : Bilan hydrologique selon la méthode de THORNTHWAITE.

MOIS	P (mm)	T (°C)	ETP Corrigé	variation de la réserve	RU	ETR	DA	EX
SEP	0,10	32,00	157,78	-157,68	0	0,10	157,68	0
OCT	0,00	25,00	78,25	-78,25	0	0,00	78,25	0
NOV	0,70	17,00	24,92	-24,22	0	0,70	24,22	0
DEC	0,90	13,00	12,02	-11,12	0	0,90	11,12	0
JAN	5,40	12,00	9,88	-4,48	0	5,40	4,48	0
FEV	0,40	15,00	17,34	-16,94	0	0,40	16,94	0
MAR	2,30	20,00	44,37	-42,07	0	2,30	42,07	0
AVR	1,70	24,00	75,68	-73,98	0	1,70	73,98	0
MAI	0,10	28,00	124,79	-124,69	0	0,10	124,69	0
JUN	0,10	34,00	209,78	-209,68	0	0,10	209,68	0
JUL	0,00	37,00	270,93	-270,93	0	0,00	270,93	0
AOU	0,20	36,00	240,81	-240,61	0	0,20	240,61	0
Année	11,90	24,42	1266,56	/	0	11,90	1254,66	0

Pour vérifier le bilan, on a :

$$P = ETR + EX = 11,90 + 0 = 11,90 \text{ mm.}$$

$$ETP = ETR + Da = 11,90 + 1254,66 = 1266,56 \text{ mm.}$$

A partir de tableau 11 on remarque que le bilan est déficitaire avec un déficit agricole de 1266,56 mm et un excédant nul.

III.9. CONCLUSION

La région d'étude est caractérisée par un climat saharien de type hyper aride. Les précipitations annuelles sont très faibles, de l'ordre 11,90 mm, et ne constituent que 0.94% du volume total de l'évapotranspiration potentielle. La température moyenne mensuelle est très élevée durant toute l'année, et elle est de 24,42°C.

CHAPITRE IV

HYDROGÉOLOGIQUE

IV.1 HYDROGEOLOGIE REGIONALE

INTRODUCTION

Les besoins en eau sont en continuelle augmentation afin d'assurer la survie et le développement des peuples ; par conséquent, l'eau devient avec le temps de plus en plus précieuse.

La prospection pétrolière au XX^{ème} siècle est à l'origine de la découverte d'un gigantesque système hydraulique au Sahara qui est le système aquifère du Sahara septentrional (SASS). Ce système aquifère formé par les nappes aquifères du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal s'étend dans sa plus grande partie dans le territoire saharien algérien.

Le système aquifère du Sahara septentrional est partagé entre l'Algérie, Tunisie et la Libye. Il est subdivisé en trois sous bassins :

- le bassin du Grand Erg Occidental à l'Ouest.
- le bassin du Grand Erg Oriental au centre.
- le plateau de la Hamada El Hamra à l'Est.

Notre région d'étude fait partie du bassin du Grand l'Erg Occidental, qui englobe dans sa majeure partie la nappe du Continental Intercalaire (CI), cette dernière désigne dans l'histoire stratigraphique, un épisode continental intercalé entre deux cycles sédimentaires marins (Kilian, 1931) :

- à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne,
- au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultat de la transgression cénomaniennne.

V.1.1 SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL

Il couvre une grande extension régionale. Sa superficie totale couvre plus d'un million de km² (soit 700 000 km² en Algérie, 80 000 km² en Tunisie et 250 000 km² en Libye, (Figure 26). Ce système aquifère présente une configuration géométrique et géologique complexe, il désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes (ZAGHTOU, 2011).

IV.1.1.1 Formation du Continental Intercalaire (CI) :

c'est la plus étendue et la plus profonde, elle est limitée au Nord par l'Atlas saharien, à l'Ouest par l'axe Béchar Reggane et au Sud par l'axe Reggane-Aïn Amenas. A l'Est, il se prolonge au-delà des frontières algéro-libyenne et algéro-tunisienne. (figures 25 et 26).

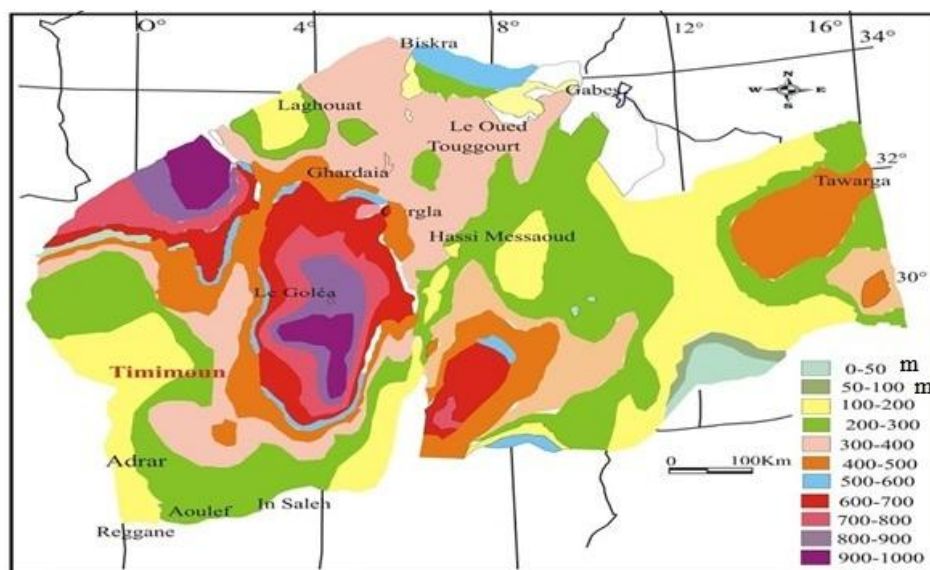


Figure 25 : Carte des épaisseurs du CI (OSS, 2003b)

Le confinement des aquifères n'est pas toujours continu. En effet, les deux aquifères peuvent être en contact sur une distance de quelques kilomètres puis être isolés par une éponte (couche non aquifère) sur le reste du dépôt. Dans ce contexte, les variations des pressions liées à l'exploitation d'un aquifère peuvent générer des transferts entre les deux aquifères.

Tableau 12 : Caractéristiques du système aquifère du Sahara septentrional.

SASS	Superficie	1.000.000 km ²
	Réserves théorique	60.000 Milliard de m ³
	Recharge théorique	1 Milliard de m ³ /an
	Complexe Terminal	Recharge : 600 Mm ³ /an Toit/Sol* : 100 à 400 m Salinité : 2 à 5 g/L
	Continental Intercalaire	Recharge : 300 Mm ³ /an Toit/Sol* : 50 à 2300 m > 800m sur 60% du réservoir Epaisseur utile : 50-1000m Salinité : 1 à 4,5 g/L Température : 25°C à 70°C.

*: Il semble qu'il s'agisse de l'épaisseur totale

Source (OSS, 2003)

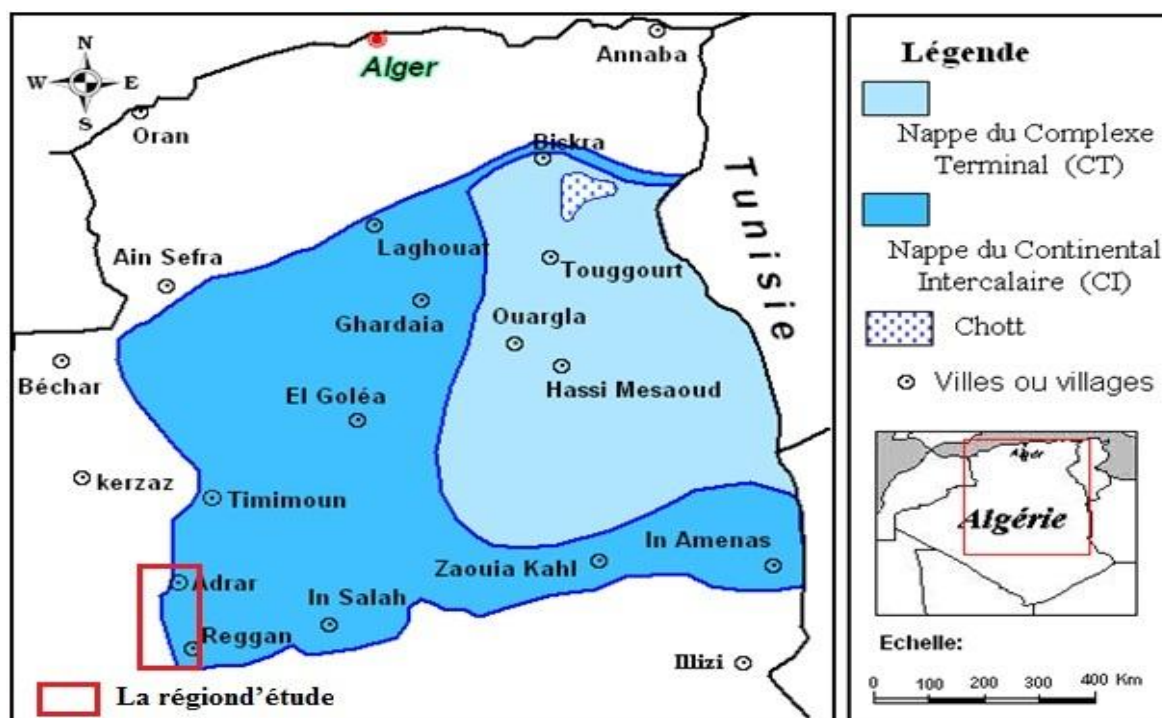


Figure 26 : Carte des ressources en eau souterraines (Continental Intercalaire et Complexe Terminal), (extrait de recueil des communications, 2002).

IV.2 LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE DANS LA REGION D'ADRAR

Les configurations géométrique et géologique des aquifères profonds sont complexes, comprenant souvent plusieurs formations aquifères, dans ce cas on utilise le terme de « système aquifère ». Notre région d'étude est située dans la partie avale (affleurements des formations du Continental Intercalaire) de l'aquifère où la nappe est libre, alors que la partie amont est confinée, ce qui induit des comportements hydrodynamiques et géochimiques différents.

Cet ensemble comprend majoritairement les formations continentales gréso-argileuses du Crétacé inférieur, qui affleurent largement dans la région de Touat. Il repose directement en discordance sur les formations marines du Paléozoïque. (OSS, 2003)

L'étude des coupes lithologiques et des logs des forages (Figure 28) dans notre région d'étude montre également que :

- le Continental Intercalaire n'est pas formé uniquement de sables et de grès, mais on y trouve également des sables argileux, des argiles sableuses, ainsi que des argiles franches.
- La structure en cuvette du CI dans le bassin du SASS présente une alternance de couches perméables, semi-perméables ou imperméables.
- les exutoires naturels de la nappe du CI dans la zone d'étude sont les sebkhass, qui occupent les fonds des dépressions. Tandis que les exutoires artificiels sont les foggaras, les puits et les forages.

IV.2.1 Alimentation du Continental Intercalaire (CI)

Pour rappel, c'est au Villafranchien supérieur que s'organise dans son ensemble le grand réseau hydrographique du Sahara algérien. C'est à cette époque que les écoulements canalisés présentent leur intensité maximale, et que les réseaux fluviaux endoréiques qui s'étaient individualisés au Plio-Villafranchien, ont la plus grande extension géographique. Le retour à des conditions climatiques subarides, pendant une longue période, a permis la réorganisation du réseau hydrographique ancien et le dépôt de sédiments fluviaux et lacustres, qui sont dans l'ensemble modestes et plus étroitement localisés dans les vallées que par le passé.

Le Continental Intercalaire s'est chargé au cours de ces périodes pluviales. Actuellement, il reçoit une faible recharge, surtout à partir du piémont de l'Atlas saharien (figure 30) : la quantité d'eau tombant annuellement sur les affleurements du Crétacé inférieur continental est estimée à 2,5 milliards m^3/an . Mais, il est difficile d'appliquer à ces formations un coefficient d'infiltration, les conditions climatiques (hauteur de pluies faibles et évaporation intense), étant très différentes de celles des régions où ces coefficients ont pu être expérimentés. Le volume d'eau emmagasiné dans le CI, évalué à 50 000 milliard m^3 correspondant, en théorie, à un débit fictif continu de 1000 m^3/s pendant 2000 ans. (HADJ FATEH L. et ROUAS D., 2013)

L'estimation de la recharge du Continental Intercalaire a fait l'objet de plusieurs études, les principales sont résumées dans le tableau 13. Ces estimations sont surestimées dans les anciens travaux mais elles ont été corrigées par la suite dans les travaux de l'OSS (2003) qui sont les plus proches de la réalité.

Tableau 13 : Estimation de la recharge du CI (bassin occidental)

Etude	Estimation de la recharge		
CORNET (1961)	23 m^3/s		
BURGEAP (1963)	l'Atlas saharien	4 m^3/s	12.5 m^3/s
	la Hamada sud oranaise et le Grand Erg Occidental	8 m^3/s	
	le Tademaït	0,5 m^3/s	
GEOPETROLE(1964)	l'Atlas saharien	4.5 m^3/s	14 m^3/s
	la Hamada sud oranaise et le grand Erg Occidental	8.9 m^3/s	
	le Tademaït	0.3 m^3/s	
ERESS (1972)	l'Atlas saharien	2.03 m^3/s	5.58 m^3/s
	Grand Erg Occidental	3.55 m^3/s	
OSS (2003) calage du Modèle SASS	7.54 m^3/s		

Source (OSS, 2005)

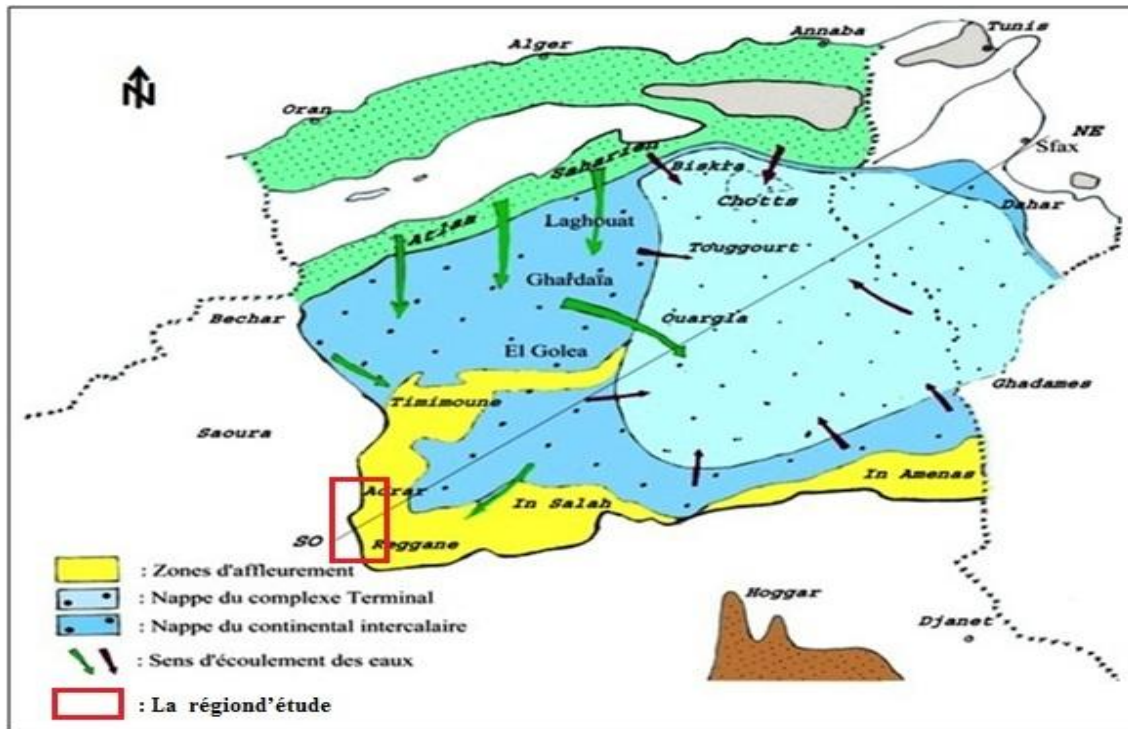


Figure 27. Les sens d'écoulement des eaux de deux systèmes aquifères du Sahara, le CT et le CI.

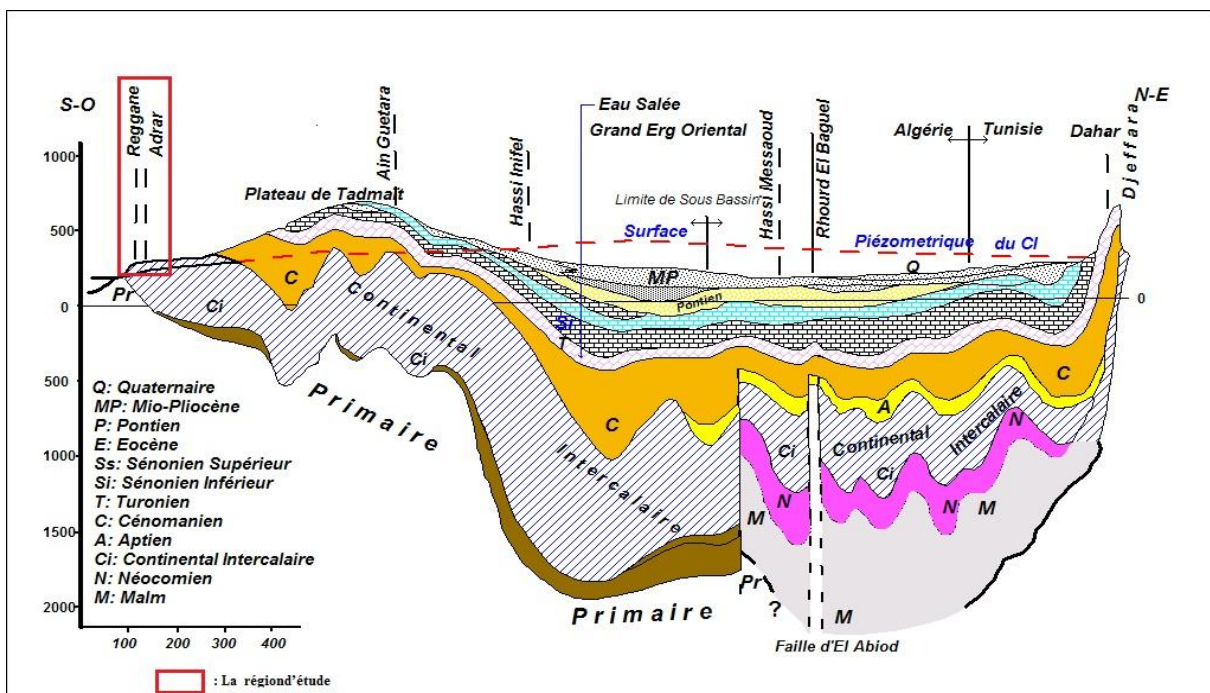


Figure 28: Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional (UNESCO 1972).

IV.2.2. Caractéristiques des eaux

Dans le Bassin Occidental du SASS, les eaux sont toutes jeunes (inférieures à 10000 ans). Tout au long de leur parcours (plus de 500km) de la zone de recharge principale qu'est l'Atlas saharien, vers la zone d'exutoire principale qu'est la vallée du Gourara, de Touat et du Tidikelt, les eaux du Continental Intercalaire continuent de se renouveler tout au long de leur cheminement. Cette observation est en cohérence avec la géologie régionale ; en effet, le CI n'est plus recouvert ici par le Crétacé supérieur et la nappe du CI est à surface libre (BABASY, 2005)

D'après la carte (figure 29) de la teneur en C^{14} , les eaux de notre zone d'étude ont un âge qui varie entre 1000 à 10 000 ans.

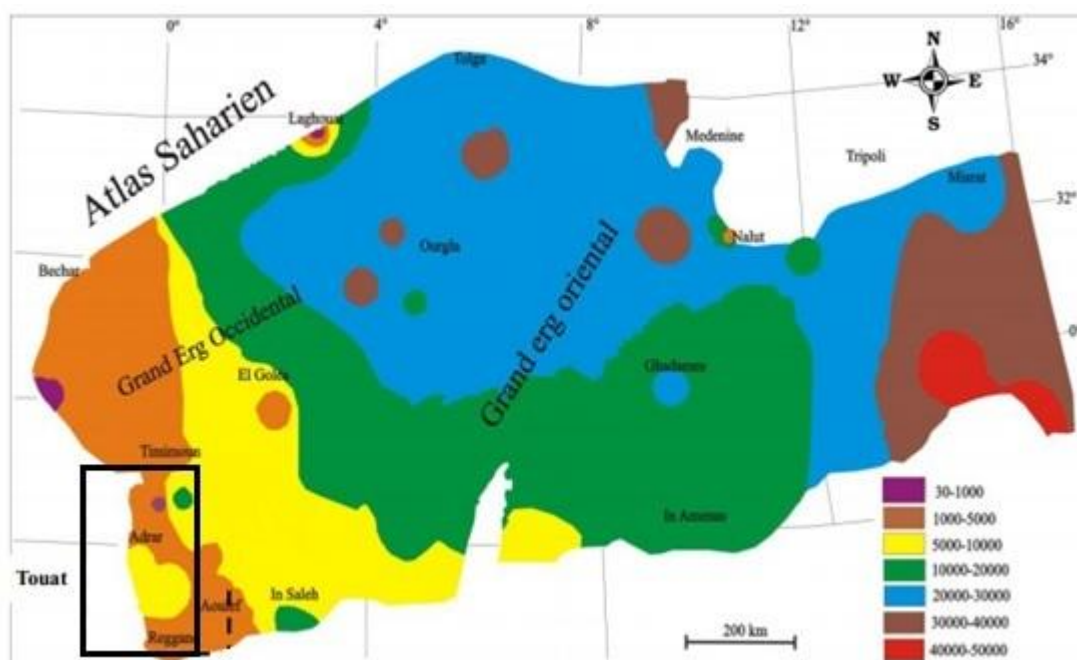


Figure 29: Les âges, en années, des eaux du CI d'après la teneur en C^{14} (OSS, 2003).

IV.3 PIEZOMETRIE ET GRADIENT HYDRAULIQUE

IV.3.1 La piézométrie du système aquifère du CI :

La carte piézométrique est la synthèse essentielle de l'étude hydrogéologique. Elle schématise la morphologie de la surface piézométrique de la nappe et permet d'obtenir des informations importantes sur le sens d'écoulement des eaux souterraines et le comportement hydrodynamique de l'aquifère. L'établissement de cette carte repose sur des mesures piézométriques à une période donnée.

A l'échelle du bassin occidental, la carte piézométrique (figure 30) met en évidence que les écoulements souterrains de la nappe du CI se font de l'Atlas Saharien (zone d'alimentation) vers le Sud et le Sud-Est (vers l'exutoire), avec une pente générale de 0,9 ‰ (350 m pour 400 km).

Les courbes isopièzes, à la terminaison occidentale du plateau de Tademaït, permettent de montrer l'écoulement (axe 6 sur la figure) des eaux pour rejoindre le sillon de Gourara, soit vers Megueden ou vers Timimoun, soit vers le Touat ou vers la trouée de Reggane (UNESCO, 1972).

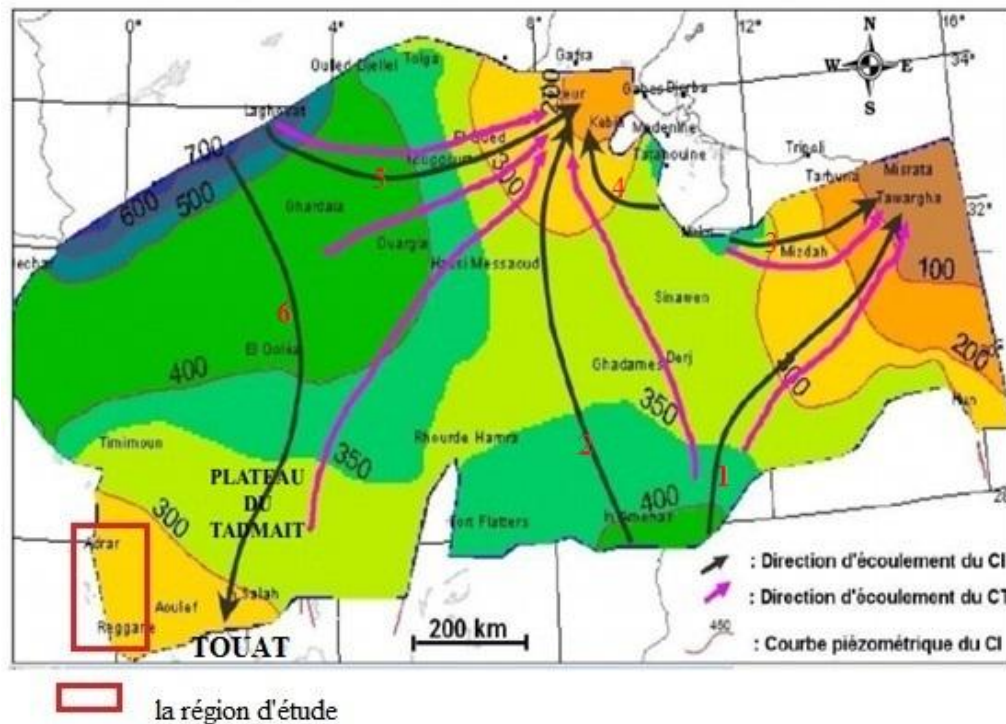


Figure 30 : Carte piézométrique de référence du CI et des directions d'écoulement (OSS, 2005)

IV.3.2 Carte piézométrique de la zone d'étude

Dans la région de Touat les eaux du Continental Intercalaire sont destinées essentiellement à l'AEP et l'irrigation, les profondeurs des forages varient entre (80 et 150m)

La carte piézométrique (Figure 31) a été établie et réalisée à partir des données des puits fournies par l'ANRH d'Adrar dans le but de :

1. Définir le sens de l'écoulement des eaux souterraines.
2. Déterminer les zones de convergences et de divergence.

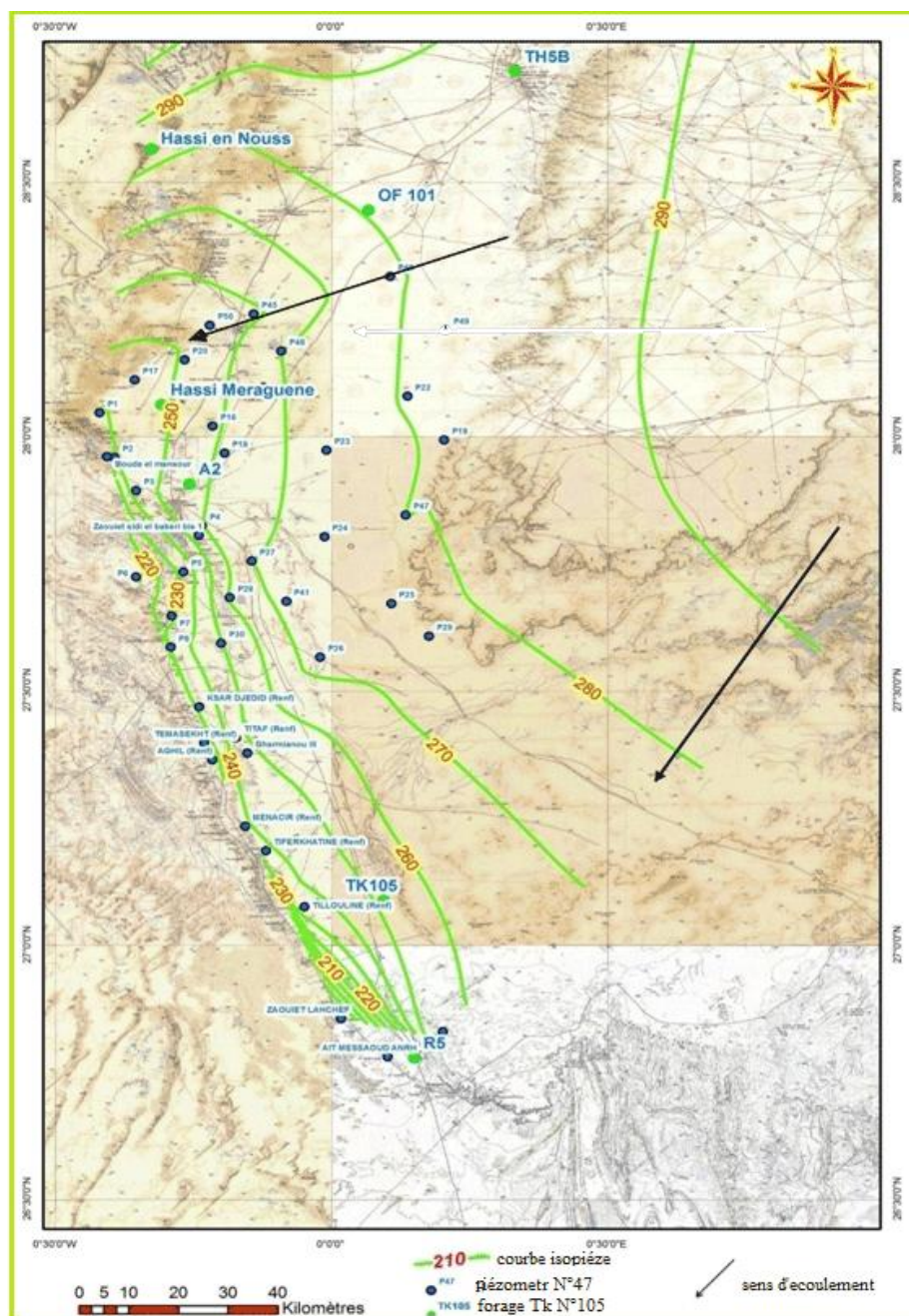


Figure 31 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'étude (BENHAMZA modifié, 2013)

➤ Interprétation :

Tout d'abord, nous signalons que dans le travail BENHAMZA 2013, il est signalé que le rabattement de cette nappe n'est que de 8m sur 36 années (1971-2007). Vu que notre travail n'est qu'à cinq années de ce dernier, nous avons déduit que le rabattement serait très faible ; raison pour laquelle nous n'avons pas jugé utile de dresser ou d'établir une nouvelle carte piézométrique.

A partir de cette carte, nous remarquons qu'il n'y a qu'un seul sens d'écoulement qui est NE-NO (à partir du plateau de Tademaït vers la région de ville d'Adrar). Benhamza (2013) suggère un autre axe d'écoulement E-W qui n'est pas justifié si l'on considère les isopièzes.

L'analyse de la carte montrant qu'au Nord-Est de la région (plateau de Tademaït), on a une zone d'alimentation.

Le resserrement des courbes isopièzes dans la partie Sud (Sali) montre que l'écoulement dans cette partie est prononcé à cause des forages localisés principalement dans les zones de concentrations de captage (par forages et foggaras).

Dans la partie centre, nous remarquons que les courbes isopièzes sont presque parallèles et les lignes de courant divergentes, ce qui donne une ligne de partage des eaux entre les différentes zones de captage Jusqu'à l'erg Chech, cela signifie que l'écoulement dans cette partie est régulier.

IV.3.3. Gradient hydraulique

A partir de la carte isopièze le gradient hydraulique est de l'ordre 0.003 dans la partie Ouest, de 0.0008 au centre et de 0.0003 à l'Est de la région d'étude.

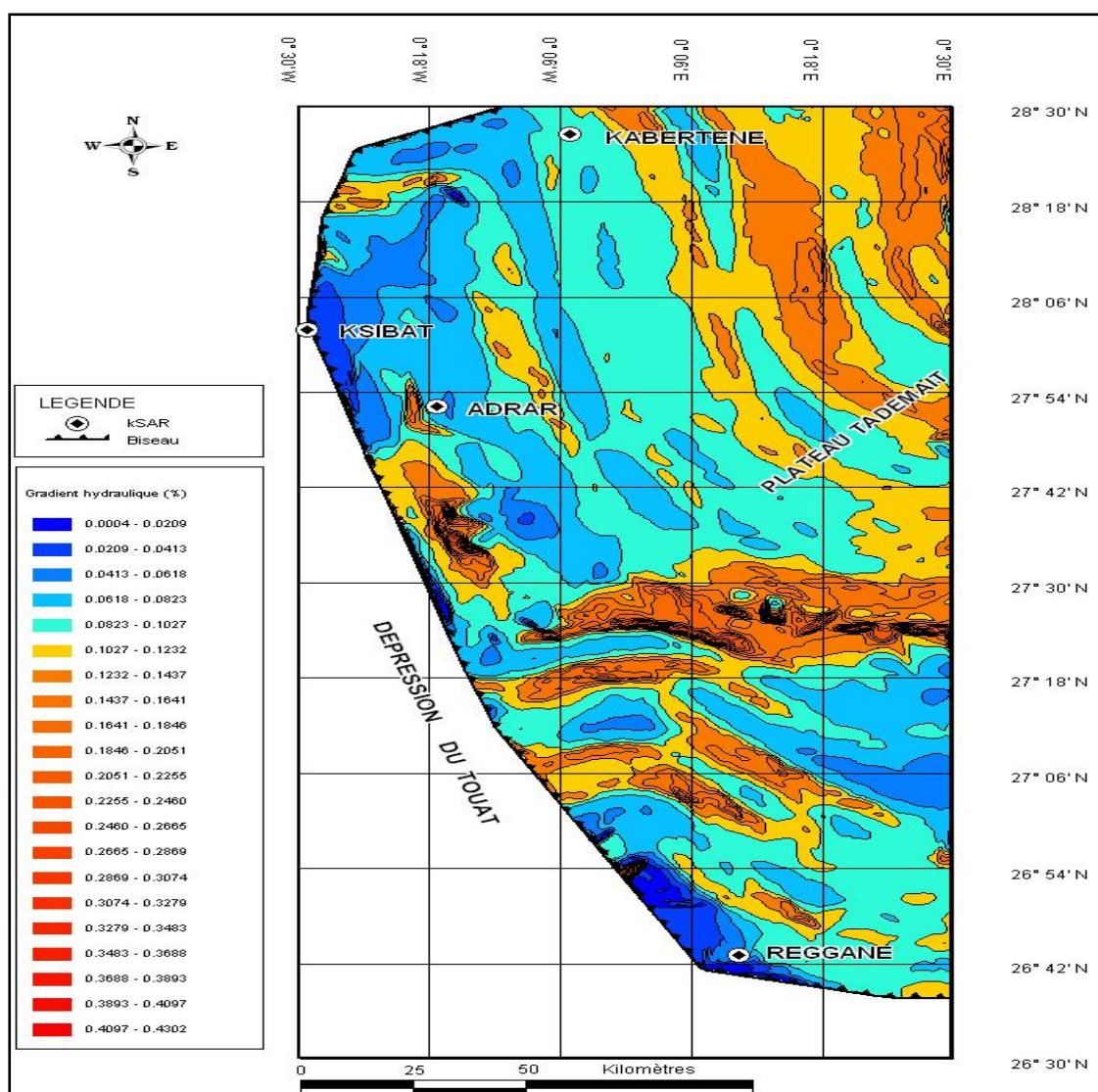


Figure 32: La carte du gradient hydraulique de région d'étude (BOUTADARA, 2009)

La comparaison des valeurs calculées plus haut avec celles de la carte (Figure 32) montre qu'il n'y a pas une grande différence dans le gradient.

Elle est presque négligeable dans la région d'étude.

IV.4 PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE C. I. (BENHAMZA, 2013)

IV.4.1 Transmissivité T

A partir des résultats des essais de pompage réalisé sur les différents forages de la région d'étude, on voit qu'il n'y a pas une grande variation des valeurs de la transmissivité dans le Continentale Intercalaire de l'ordre de 0.01 à 0.08 m²/s, ce qui implique qu'il n'y a pas de changement latéral de faciès notable.

IV.4.2 Coefficient d'Emmagasinement S

Le manque de piézomètres d'observation lors des essais de pompage réalisés dans la région d'étude ne permet pas de calculer le coefficient emmagasinement.

Devant ce cas, nous avons pris les résultats de l'OSS (2002) qui donnent un coefficient emmagasinement de 0.05 dans la partie où la nappe est libre, et entre 0.005 et 0.0004 dans la partie où la nappe est captive.

IV.5. CONCLUSION

La nappe du Continental Intercalaire est une source plus importante de la vie saharienne surtout dans la région de Touat. C'est un aquifère très peu renouvelable à l'échelle humaine. Il n'en reste pas moins évident, que pour des temps géologiques relativement courts (50 000 ans), la recharge a bien lieu. (OSS, 2003).

L'exploitation est très importante soit par les forages (296) ou les foggaras (426) dans la région du Touat alors que l'alimentation de la nappe du Continentale Intercalaire est très faible.

Le Continental Intercalaire dans la région d'étude est caractérisé par une épaisseur qui varie entre 100 et 200 m, Un niveau piézométrique varie (192m à 268m).

Le sens d'écoulement va du plateau de Tademaït (NE-SO) vers la région de Touat (d'ADRAR à REGGANE). Le gradient hydraulique varie de 0 .0004% à 0.4%.

CHAPITRE V
SYSTÈME DE CAPTAGE
TRADITIONNEL-
FOGGARA

CHAPITRE V. LE SYSTEME DE CAPTAGE TRADITIONNEL – FOGGARA

INTRODUCTION

Depuis plusieurs siècles, l'homme du Sahara a pu s'adapter à son milieu désertique, il a pu fertiliser en faveur un milieu aride et contribuer à la création et au développement d'un écosystème agricole malgré les conditions de vie extrêmement hostile que lui impose la nature (température étouffante, faibles apports météoriques, grande intensité du vent...etc.) grâce au génie technique des sociétés oasiennes d'extraction des eaux souterraines appelée la foggara.

V.1. APERÇU GENERAL HISTORIQUE SUR LE SYSTEME FOGGARA

Il semble difficile de situer avec précision la période d'apparition de la Foggara. Selon blot (PNUD, 1986), la Foggara a pris naissance en Iran. La qanât qui alimentait Ibril en Perse, a été construite à la fin du VII ème siècle avant J.C, ce qui atteste de ses origines très lointaines.

Dans le Sahara algérien, les Foggaras auraient été introduites au XIème et XIIème siècle par El Malik El Mansour qui aurait creusé la première Foggara « Hannou » (avec un débit 3.2 l/s) à Tamantit, localité située à 15km d'Adrar (Hassani, 1988). Les Foggaras ont été ensuite développées dans le Touat et Gourara par des tribus arabo-berbères du sud marocain (Mrabtine, Chorfa), en ayant recours à la main d'œuvre locale ou provenant des régions voisines tels que le Mali, le Niger et le Soudan (René, 1985).

V.2. DEFINITION DE FOGGARA

La Foggara signifie en arabe "Fakara"(creuser). Certains historiens estiment que ce terme provient du mot arabe "El Fokr" (pauvreté). Toute personne qui creuse une Foggara se trouve dans l'obligation d'y investir à tel point qu'elle finit par se retrouver dans le besoin avant d'en bénéficier. Mais certains pensent que le nom de Foggara est relatif au mot "Fakra" qui signifie littéralement vertèbre en arabe (Kobori, 1982). Mais la désignation la plus correcte semble provenir du mot arabe « fadjjara » (faire jaillir), qui désignerait la sortie de l'eau de la bouche d'un canal.

Cette technique de captage, utilisée dans le Sud algérien sous le nom de foggara, porte d'autres appellations dans d'autres régions ou d'autres pays du Maghreb et d'orient tel que :

- ❖ « Chegga » à Bou-Saâda ;
- ❖ « Ngoula » ou « Kriga » dans le Sud tunisien ;
- ❖ « Khettara » au Sud marocain ;
- ❖ « Kanat » en Iran ;
- ❖ « Khiras » en Afghanistan ;
- ❖ « Sahrig » au Yemen ;
- ❖ « Medjrit » d'origine arabe, en Espagne (canal).D'où vient le nom de la ville Madrid.

Foggara est une technique traditionnelle du captage des eaux souterraines très répandue dans les Oasis. Elle consiste à capter l'eau souterraine à l'aide d'une galerie drainante souterraine qui sert à mener l'eau des profondeurs jusqu'à l'air libre par seul biais de la différence de charge hydraulique (écoulement gravitaire).

Dans le Sahara algérien, les foggaras se situent à la périphérie du plateau du Tademaït. Les conditions d'installation y sont en effet particulièrement bien adaptées :

- l'existence de l'eau : eaux de la nappe du CI.
- les conditions topographiques favorables (favorisent l'écoulement gravitaire de l'eau).
- l'existence des dépressions naturelles qui permettront l'installation des palmeraies (les terrasses d'apport éolien).

V.3. DIFFERENTS TYPES DE FOGGARAS

Selon le contexte géologique et hydrogéologique dans lequel sont aménagées les foggaras, différents types peuvent être distingués (ANRH Adrar).

3.1. Foggara du Continental Intercalaire :

Ce groupe contient le plus grand nombre des foggaras sahariennes (Touat, Gourara, Tidikelt). Dans les parties gréseuses du Continental Intercalaire (Gourara en particulier), la galerie est étroite, propre et bien taillée et ne dépasse guère 0.60 m de largeur.

Dans le Nord de Touât les eaux des foggaras traversent les formations calcaires en se chargeant de sels (sulfates, carbonates de chaux), ces derniers se déposent par couches le long des parois de la galerie. Lorsqu' ils rencontrent une aspérité, ces dépôts ont tendance à s'accumuler (concrétion calcaires), il se forme un étranglement qui, si l'on n'y prenait pas garde, pourrait se transformer en un véritable barrage.

Dans la partie méridionale et au Tidikelt, les foggaras sont creusées dans les formations argilo-sableuses du continental intercalaire et sont moins bien taillées. Les parois s'effritent, la galerie s'élargit, et se forme des grandes cavernes par l'effet d'éboulement.

3.2. Foggara du Tertiaire Continental et de la Dalle Calcaire :

A la lisière sud de l'Erg, un certain nombre des foggaras sont creusées dans la dalle calcaire coiffant la hamada. Elles sont peu profondes (3.50 m au puits amont) et ont un fort débit.

3.3. Foggaras des alluvions quaternaires :

Les plus typiques sont celles du Hoggar à Tamanrasset. Elles sont creusées dans les arènes et sables grossiers des alluvions de l'oued.

V.4. SITUATION GEOGRAPHIQUE DES FOGGARAS

D'après l'étude de la carte de positionnement des foggaras la (figure 33) montre l'alignement des foggaras à partir de la ville d'Adrar jusqu'à la ville de Reggan avec une direction Nord-ouest Sud-est, hydrogéologiquement cette position représente la limite Sud-ouest des affleurements de la nappe du C.I. Ces Foggaras, situées au Sud-Ouest du Grand Erg Occidental, sont réparties sur la périphérie du plateau de Tademaït, véritable château d'eau des Foggaras.

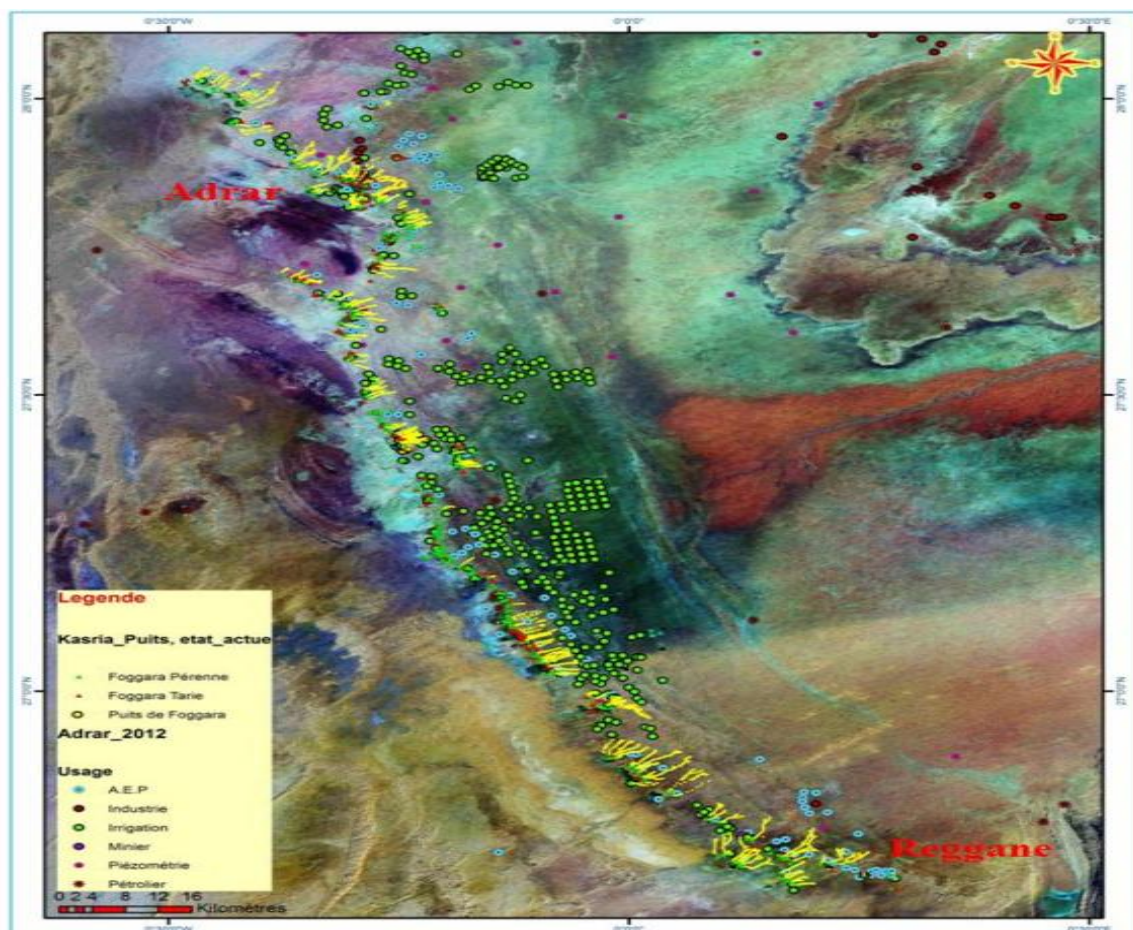


Figure 33. Carte de positionnement des foggaras et forages de la zone d'étude sur image satellite (Ben hamza, 2013).

V.5. REPARTITION DES FOGGARAS :

En 1988, l'Agence Nationale des Ressources Hydriques révèle l'existence de 903 Foggaras "pérennes", d'une longueur totale de galerie de 2300 km équipées de 187.500 puits d'aération. En 2014, ce nombre a été revu à la baisse fait ressortir l'existence de 679 foggaras actives, 28 autres actives mais dont le débit tellement faible ne permet pas d'atteindre les palmeraies, en plus de 758 foggaras dont les eaux se sont tariées et de 369 foggaras "définitivement perdues". La voie satellitaire montre 154.360 puits sur le tracé des systèmes de foggaras, depuis la région de Tsabit au nord de la wilaya, vers celles de Zaouiet-Kounta au Sud.

V.6. LES ELEMENTS D'UNE FOGGARA

Le système de Foggara est divisé en deux parties le captage et la distribution.

V.6.1. Le captage :

Le captage de l'eau souterraine est assuré par une galerie de plusieurs kilomètres, de faible pente, qui draine l'eau de la nappe vers la surface libre. Cette galerie est équipée de plusieurs puits verticaux qui servent à l'entretien et à l'aération de la Foggara.

a. La galerie

La galerie est l'élément moteur de la Foggara. Elle est constituée de deux parties :

- La première partie est le siège d'un écoulement en charge.
- la seconde partie est le lieu d'un écoulement à surface libre.

L'ouvrage se compose d'une galerie de section variable, de largeur variant de 50cm à 80cm et de hauteur allant de 90cm à 150cm. La longueur de la galerie peut varier de 1Km à 15km (figure34), tandis que la gamme du débit est de 1 L/s à 50 L/s (Remini.et, Achour, 2008).

Les Foggaras sont alignées d'Est en Ouest et sont soigneusement disposées afin d'éviter tout éventuel drainage qui pourrait endommager d'anciennes Foggaras voisines. La distance à respecter entre deux galeries doit être supérieure à 100 "*khamas*". Le *Khamas* correspond à la longueur de deux bras ouverts et tendus d'un homme de taille normale, soit 2 mètres environ. La galerie est composée de plusieurs "*Enfad*", terme désignant le tunnel entre deux puits. En règle générale, la distance moyenne entre deux "*Enfad*" avoisine les 13 mètres. La galerie se termine par l'*Aghissrou* qui représente la partie située entre le premier puits, compté à partir de la sortie, et la *Majra*. Cette partie peut être couverte par des pierres plates. (ABIDI.N)

L'étude de l'alignement des foggaras montre que les galeries de la majorité des foggaras sont ramifiées, la partie amont de la foggara prennent à la fin la forme de signe «Y».

b. Les puits « Hassi » :

Les puits « Fouaha » sont la partie visible de la foggara, à l'intérieur des villes ils considérées font un objet esthétique.

La galerie de la foggara est une succession de puits verticaux, la distance qui sépare les puits entre eux, elle change d'une région à l'autre selon le type de terrain traversé à Adrar et à Timimoune, la longueur varie entre 07 et 40 m. La profondeur des puits varie suivant le niveau statique de la nappe et la topographie de la région, peu profonds à Adrar que dans les autres villes.

Au début de la réalisation de la foggara, les puits servent à l'évacuation des déblais ou à l'apport de remblais. Une fois en exploitation, ces puits sont utilisés comme accès pour l'entretien et pour l'aération de la galerie. Leur profondeur varie de 1 à 40m et leur diamètre de 0,5m à 1m. Les puits sont alignés parallèlement au sens d'écoulement de la nappe avec une direction NE-SW, pour augmenter le débit de la foggara, des puits sont ajoutés à gauche et à droite de l'alignement principal, des puits pour la deuxième galerie.

c. L'Aghisrou :

C'est la partie où la galerie sort en surface, il est situé entre le premier puits et le canal principal « *Majra* », généralement recouvert par des plaquettes de ciment ou de roche avec de l'argile. La longueur de l'Aghisrou dépend de la profondeur du premier puits et du niveau de sol, sa longueur est de quelques mètres à des centaines de mètres.

d. Canal Principal « Majra » :

C'est un canal de forme rectangulaire qui sert à conduire l'eau vers le peigne répartiteur « *Ksaria* », sa longueur est de quelques mètres à quelques kilomètres, il est construit par des argiles, actuellement ces canaux sont en ciment et même en PVC, pour minimiser les pertes par infiltration.

V.6.2. La distribution :

La distribution de l'eau s'effectue juste à la sortie de la galerie et repose sur quatre éléments majeurs qui sont : *Kasria* (répartiteur); *Seguia* (canal), *Madjen* (bassin de récupération) et *Gamoun* (Jardin). Une fois l'eau arrivée à la sortie de la galerie, elle est répartie entre les propriétaires par la *Kasria*. Le cheminement de l'eau jusqu'au *Madjen* s'effectue par l'intermédiaire des *Seguias*.

a. Peigne Répartiteur « Kasria » :

A la sortie de la Foggara, l'eau est répartie par un peigne appelé "*Kasria*" ou « *Qasri* », conçu en pierre plate de forme triangulaire ou rectangulaire construit par des argiles, actuellement en ciment pour stocker l'eau avant d'être répartie entre les copropriétaires. Le bassin est muni d'un tranquillisateur pour amortir la vitesse avant de passer par le *Machte* « brosse » d'où chaque part d'eau sera canalisée par une *Seguia* vers le jardin le plus loin dans la palmeraie. Le peigne est doté de plusieurs ouvertures de dimensions variables. Plusieurs types de *Kasria* peuvent être observés dans la palmeraie :

La *Kasria Lakbira* ou bien peigne principal est un bassin de forme triangulaire coupé à sa base par un répartiteur jouant le rôle de tranquillisateur d'eau. Il permet non seulement d'amortir et de calmer l'écoulement avant sa répartition mais aussi la mesure du débit. La *Kasria Lakbira* reçoit la totalité du débit de la Foggara qui est alors réparti en 3, 4 voir les rigoles (*Seguias*).

La *Kasria Secondaire* : est un bassin de forme triangulaire placé après la *Kasria Lakbira*. Il est utilisé pour le partage familial de chaque tribu ou du groupe de personnes ayant participé à la réalisation de la Foggara

La *Kasria multiple* : appelée aussi *Kasriates*, sont de petites *Seguias* qui viennent après la *Kasria* secondaire, le long du parcours des *Seguias* qui acheminent l'eau vers le *Madjene*.

b. Rigole « Seguia » :

C'est un canal à ciel ouvert de section rectangulaire ou circulaire est construite généralement en terre. Une quantité appréciable d'eau est perdue par infiltration et par évaporation. Ceci a encouragé les oasisiens à construire des *Seguias* en ciment et même en PVC pour réduire les infiltrations, mais cette solution a provoqué le dessèchement de certains palmiers implantés près de ces *Seguias*. Les canaux drainent l'eau de la *Kasria Lakbira* jusqu'au *Madjene*, puis du *Madjene* jusqu'au *Gamoun*. , les *seguias* se ramifient dans tous les sens de la palmeraie.

c. Bassin « Le Madjen » :

C'est un bassin de récupération et de régularisation qui reçoit l'eau des *Kasriates* multiples. D'une section rectangulaire ou bien carrée de profondeur relativement faible, il joue le rôle d'un château d'eau. Il se situe à la côte la plus élevée du jardin afin de permettre à l'eau de s'écouler par gravité dans des *Seguias* et d'irriguer l'ensemble du jardin. *Le Madjene* est construit de façon à se remplir en 24 heures.

On peut distinguer le *Madjene* en terre, plus ancien, dont le fond est couvert d'une couche d'argile pour éviter les infiltrations. Le *Madjene* le plus récent est conçu en ciment. L'irrigation s'effectue en règle générale de bonne heure, que ce soit en été ou en hiver. La multiplication et la répartition des *Madjens* dans la palmeraie créent une fraîcheur pendant l'été grâce à l'humidité qu'ils dégagent durant la journée.

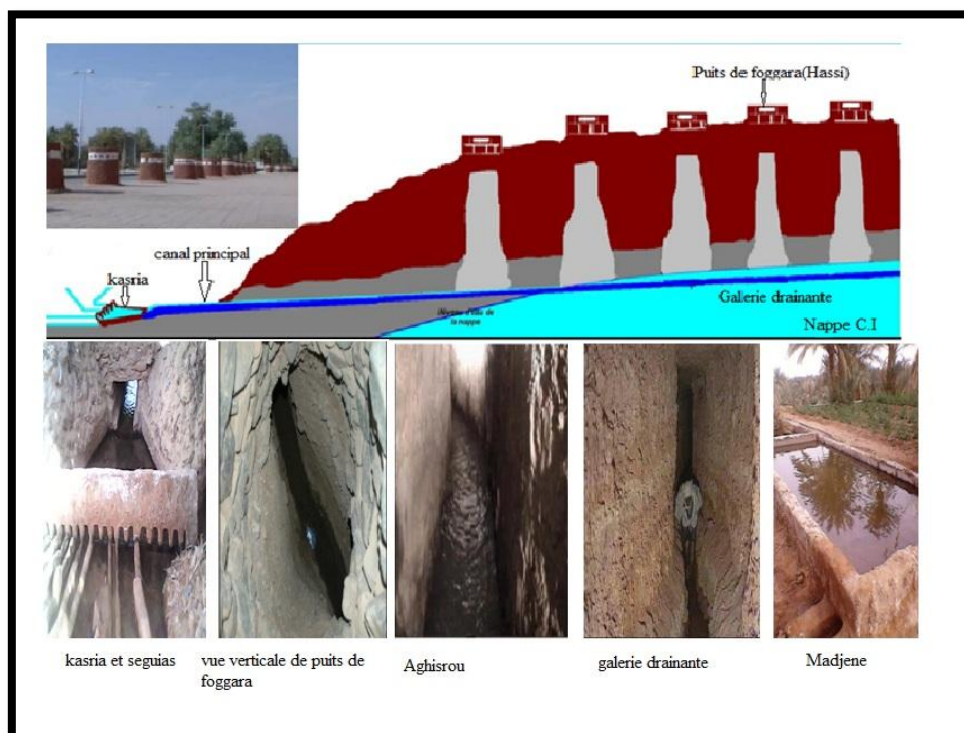


Figure 34. Vue d'ensemble des éléments de foggara.

V.7.1' EVOLUTION DES FOGGARAS

La foggara est née, l'eau parvient dans les jardins. Son évolution dans le temps est dictée par l'augmentation des besoins en eau et l'extension des cultures. On tend à ce moment-là à multiplier les puits. Mais la progression est limitée par la falaise terminale du plateau, par ailleurs les difficultés augmentent avec la profondeur croissante des puits. Le puisatier essaiera alors d'approfondir le drain où suinte l'eau des grès. Là aussi la difficulté consiste à maintenir une pente suffisante afin d'obtenir l'écoulement de l'eau.

Parallèlement, et c'est un fait, l'appauvrissement de la nappe vient compliquer considérablement la situation. On se trouve alors placé dans l'alternative suivante :

Soit approfondir la foggara et déplacer en conséquence, s'il est possible, les jardins vers le bas de la dépression ou bien abandonner la foggara et elle trépassé.

Dans la région, certaines foggaras présentent (quand on suit leur parcours souterrain) plusieurs galeries superposées. En surface, on observe des vestiges de jardins abandonnés qui correspondent au niveau d'irrigation des différentes galeries.

La palmeraie se déplace et suit les mouvements de l'eau. Mais il y a des cas où les jardins ne peuvent plus émigrer dans la dépression. Les bassins collecteurs finissent alors par se trouver au dessous du niveau des jardins et l'irrigation se fait par puisage (Figure 35)

Tableau 14. Récapitulatif des foggaras de *la région d'étude*.

communes	Année 1998		Année 2011	
	Foggara Pérenne	Foggara Tarie	Foggara Pérenne	Foggara Tarie
ADRAR	9	14	5	18
BOUDA	20	3	18	5
TIMMI	40	20	29	31
TAMNETIT	38	40	37	41
FENOUGHIL	41	7	36	12
TAMEST	24	10	17	17
ZAQUIET KONTA	38	13	20	31
IN ZEGMIR	42	23	23	42
SALI	41	11	29	23
REGGANE	96	27	57	66
Totaux	389	168	271	286

Source l'ANRH

Plusieurs campagnes d'inventaires et de jaugeages de débits des foggaras ont été effectuées durant les années 1670, 1906, 1932, 1960, 1998, 2011 et le dernier inventaire en 2014 pour la totalité de la wilaya d'Adrar. L'absence des données actuelle nous a acculé à utiliser les données de 2011 le Tableau 14 au dessous récapitule l'inventaire des foggaras de la zone d'étude qui englobe 10 communes de la wilaya d'Adrar pour les années 1998 et 2011.

Dans le tableau 14, on signale que certaines Foggaras captent les eaux de la nappe phréatique du Grand Erg Occidental. Cependant, en raison du tarissement de la nappe, de l'effondrement des galeries et de l'ensablement des Foggaras, le nombre de Foggaras ne cesse de diminuer chaque année.

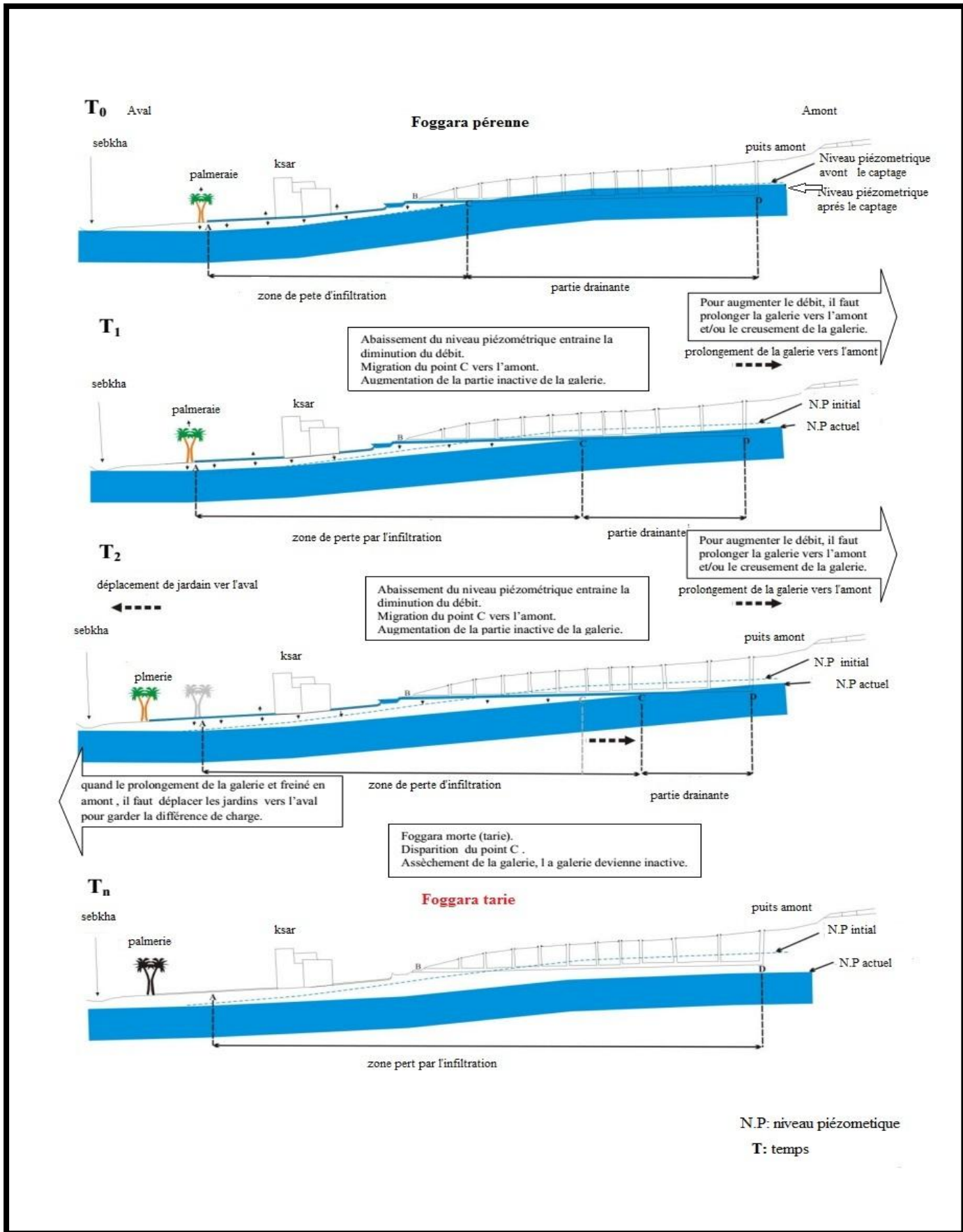


Figure 35. Evolution de Foggara.

VI.8. LA REPARTITION DES EAUX DE FOGGARA :

La répartition se fait à travers un outil en forme de peigne en pierre tendre et facile à gratter, c'est la « *kasria* ». Pour faciliter la mesure et éviter un gros débit à la fois, la *kasria* doit avoir un nombre suffisant d'ouvertures par lesquelles l'eau s'échappe facilement sans faire retour en arrière. Ces ouvertures qui permettent à l'eau de couler dans les rigoles ne sont pas obligatoirement égales. Il arrive même d'avoir plusieurs ouvertures qui déversent à la fois l'eau dans le même *majra*.

L'eau d'une foggara est répartie par de nombreuses « *kasrias* ». La première qui reçoit la totalité du débit de la foggara est la « *kasria-lak'bira* » (le partiteur principal). Cette *kasria* principale répartit le débit de la foggara généralement en trois, quatre ou cinq grandes rigoles qui sont des « *majras* » au singulier « *majra* ». A partir d'*el-kasria lak'bira*, les *majras* vont en éventail dans toutes les directions de la palmeraie (Hamadi, 1982).

Au bout de ces *majras* des *kasrias* secondaires répartissent les eaux dans d'autres *majras* plus petits ou des « *segua* » (petites rigoles). Les souagui rejoignent les *madjens* (bassins de récupération) qui se trouvent à l'endroit le plus haut du jardin et où l'eau s'accumule pendant vingt quatre heures. Les vannes d'irrigation s'ouvrent en général, le matin de bonne heure en été, et dans la matinée en hiver. D'autres *kasrias* minimales se trouvent tout le long des différents parcours suivant la nécessité (Hamadi, 1982).

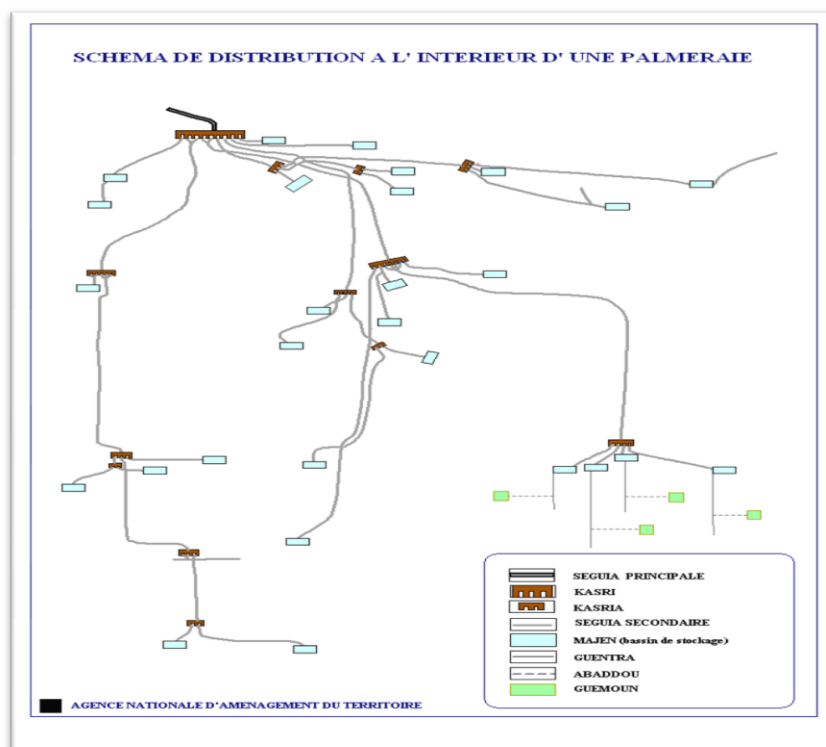


Figure 36. Système de la répartition par la *Kasria*.

V.9. LES FACTEURS INFLUENÇANT SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA FOGGARA

a. La pente :

Une pente régulière représente habituellement un bon compromis :

- Trop faible : Elle favorise l'alluvionnement et accroît la fréquence des curages.
- Trop forte : Elle exacerbe l'érosion linéaire.

En général, la pente des foggaras, est une valeur moyenne de l'ordre de 2 à 6 mm/m avec un très large écart autour de cette moyenne. Cette faible pente est insuffisante (compte tenu de

l'irrégularité du fond de la galerie et des parois), pour assurer une circulation des eaux assez rapide, entraîner les matériaux étrangers et éviter l'ensablement. Il s'ensuit que les foggaras non régulièrement curées s'ensablent. Par ailleurs, la côte de la bouche étant fixée par les nécessités de l'irrigation, il est difficile d'augmenter le rabattement, et par conséquent le rendement de l'ouvrage.

b. La forme de la galerie :

La forme de la galerie joue un rôle essentiel sur le fonctionnement d'une foggara. Dans cette dernière, on distingue :

- Des zones très étroites de l'ordre de 0,4 à 0,5 m de largeur, pour augmenter la vitesse d'écoulement et favoriser l'auto curage.
- Des zones très larges > 0,5 m et plus profondes jusqu'à 1,2m, permettent d'augmenter le volume d'eau, de piéger les sédiments provenant de la zone étroite et faciliter leur prélèvement.

c. Le rabattement :

Le rabattement est donné par la différence du niveau de l'eau dans la foggara et la surface piézométrique de la nappe phréatique. La figure ci dessous montre qu'il varie en chaque point de la foggara : Au point B il est nul, entre C et B c'est l'évacuation de la foggara qui alimente par la nappe phréatique sous-jacente, de B à A.

Le rabattement maximum, qui est en général celui du point A, est le plus intéressant. La note de M. Combes (1957) sur les foggaras du Tidikelt souligne que celles-ci sont drainantes sur leur plus grande longueur, du moins jusqu'à près de leur sortie sur les jardins. Elles peuvent rabattre la nappe, dans la partie amont, de trois mètres au maximum. Ce rabattement diminue progressivement vers l'aval. Le niveau mesuré dans une foggara est donc généralement plus profond que le niveau statique réel.

d. La position du point d'intersection (B) :

Il serait pratiquement très important de connaître pour chaque foggara la position du point d'intersection (B) ou' la galerie coupe la surface de la nappe. En aval de ce point, la foggara perd de l'eau et devrait être rendue étanche pour un bon rendement.

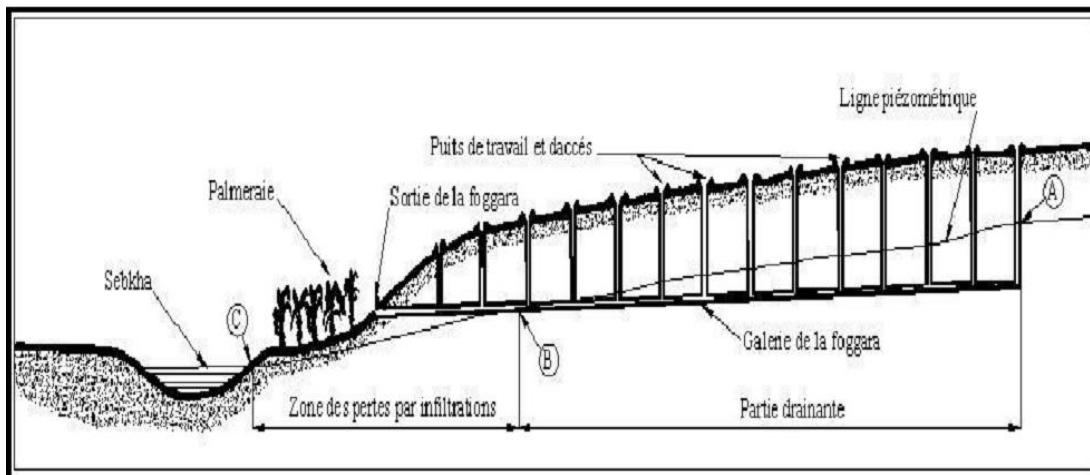


Figure37.Coupe schématique d'une foggara.

V.10. TECHNIQUES ET ORGANISATION DE LA MESURE DES EAUX DE LA FOGGARA :

Comme l'eau est une matière rare, elle prend la première importance dans la région. Une nécessité absolue s'avère indispensable pour la répartition suivante des règles convenables à de si faibles débits. **Il n'est autorisé à quiconque de mesurer une kasria qu'elle soit principale ou secondaire sans avertir bien à l'avance tous les propriétaires.**

La date de l'opération est fixée en accord entre le *Chahed*, le *kial* et le propriétaire qui désire un transfert de *habba sghira* d'une *seguia* à une autre, un retrait ou une vérification si celui-ci ressent une lésion.

La présence de tous les propriétaires n'est pas obligatoire. Si pour une raison ou une autre *Kial el-ma* s'absente, la mesure est purement et simplement annulée et remise à une date ultérieure. Un procès verbal de chaque séance, écrit par le *chahed* doit figurer dans le registre de la foggara.

V.10.2.Outil de mesure :

Le débit d'une foggara se mesure en *habba kbira*. Avant toute répartition, qu'il s'agit d'une *kasria* principale ou secondaire, *kial el-ma* doit d'abord savoir le nombre de *habbas kbira* fournis par la foggara. Cette opération se fait par un outil de fabrication traditionnel appelé «*Louh*» dans la région de Gourara, «*Chegfa* ou *Halafa*» dans la région de Tidikelt et «*Kiel Asfar* ou *Chegfa*» dans le Touat. C'est une plaque de cuivre de fabrication de différentes formes et diamètres, le nom «*chegfa*» vient du mot arabe «*chakafa*» (le tesson) un morceau d'un pot, ou un récipient en terre cuite. Cet appareil est d'une forme cylindrique de 15cm de haut environ et de 25 à 30cm de diamètre. Il est ouvert de chaque côté. Ou forme rectangulaire de 15cm à 25cm de largeur et 30cm à 50cm de longueur. L'outil est percé d'une rangée de trous de différents diamètres qui correspondent aux multiples et sous multiples de l'unité de mesure.

V.10.3. Unité de mesure :

L'unité de mesure du débit «*Habba*» «*Habba zrig*» «*Habba maaboud*» change de nom dans chaque région, elle s'appelle *kherga* dans le Tidikelt, *Tmen*, *Majen*, *Sba*, *Aud*, *Kherga* dans la Gourara et *Sbaa*, *Majen*, *Habba* dans le Touat. L'unité de mesure n'est pas la même dans toute la région, elle diffère d'une région à l'autre et même d'une foggara à l'autre dans le même ksar, d'où les différents outils utilisés pour la mesure du débit pour chaque foggara, dans le Touat elle est de l'ordre de 0.058 l/s (Mehdaoui, 2011), alors qu'elle est de 0.133 l/s dans le Tidikelt (Hamadi, 1982), le tableau 4.1 ci-dessous donne les différents débits dans la région d'Adrar.

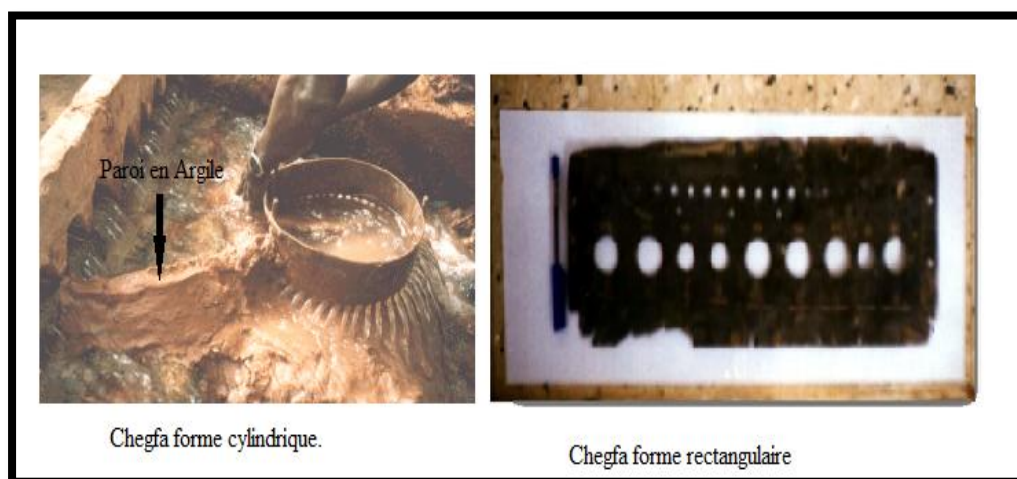


Photo 1. Différentes formes de Chegfa (la mesure)

Tableau 15. Unités de mesure du débit de la foggara (*d'après Remini, 2008*).

Palmeraie	Unité	Débit L /s
Timimoun	Tmen	0.0261
Deloul	Majen	0.0166
Charouine	Sbaa	0.0833
Tinekouk	Aud	0.0633
Aougrouit	Kherga	0.0683
Ouled said	Habba	0.0433

V.10.4. Méthodes de mesure de la quantité d'eau :

D'abord faire une plateforme bien nivelée entre la Kasria et les Majras après avoir supprimé une partie suffisante des lits de toutes les Souagui partant de cette Kasria. La Chegfa doit être placée et maintenue à l'aide de l'argile dans l'axe de Kasria et à 80cm pour permettre de tranquilliser l'écoulement. Pendant la mesure, on ne laisse personne prendre l'eau de la Foggara, tout au moins sur 100m. Et ce afin de ne pas gêner l'écoulement constant de l'eau.

Le Kial (mesureur) (Figure 38) commence la mesure par l'ouverture la plus à droite de la Kasria. Pendant la mesure de celle-ci, l'eau des autres ouvertures coule librement en désordres dans les Seguias. Le Kial construit avec de l'argile, un petit chenal bien étanche, de façon que la totalité de l'eau déversée par l'ouverture qui se mesure, coule directement dans la Chegfa par le portillon. Il laisse un nombre de trous ouverts sur la paroi. Tous les autres trous sont bouchés par l'argile. Si au contraire, elle n'arrive pas à ce niveau, il en bouche un ou plusieurs trous. Quand le niveau de l'eau dans la Chegfa se maintient exactement au niveau supérieur de cylindre, la mesure est considérée juste. Il marque alors sur une tablette en argile préalablement préparée, le nombre de Habba Zérig obtenues. Il procède ainsi, successivement à toutes les autres ouvertures de partiteur (la Kasria). Une fois la mesure est faite correctement sous l'œil vigilant des propriétaires présents, El-hassab (le comptable) fait l'addition suivant les nombres gravés dans la tablette pour obtenir le débit total en Habba Zérig. Le chahed annonce le nombre de Habba Mâaboud de tous les propriétaires. (H. A. El hadj. 1982).



Figure 38. Kiel El Ma avec son Louh (Boutadara.Y, 2009)

V.10.5. Évolution des débits foggara :

Les foggaras de Touat, constituent l'exutoire naturel de la nappe du Continental Intercalaire, d'après les résultats des trois dernières campagnes de jaugeages de débits des foggaras effectuées durant les années 1988, 2011 et 2014 (Tableau 4.5).

Le débit global des foggaras a subi une réduction significative, il diminue de 3 m³/s en 1998 à 1.827 m³/s en 2011 soit une réduction du débit de 1.7m³/s en 2014 qui réparti sur 97 foggaras débitant entre 9 et 29 litres/ sec, 227 foggaras débitant entre 1 et 5,9 L/s, et 355 foggaras débitant moins de 0,9 L/s (INT. 1).

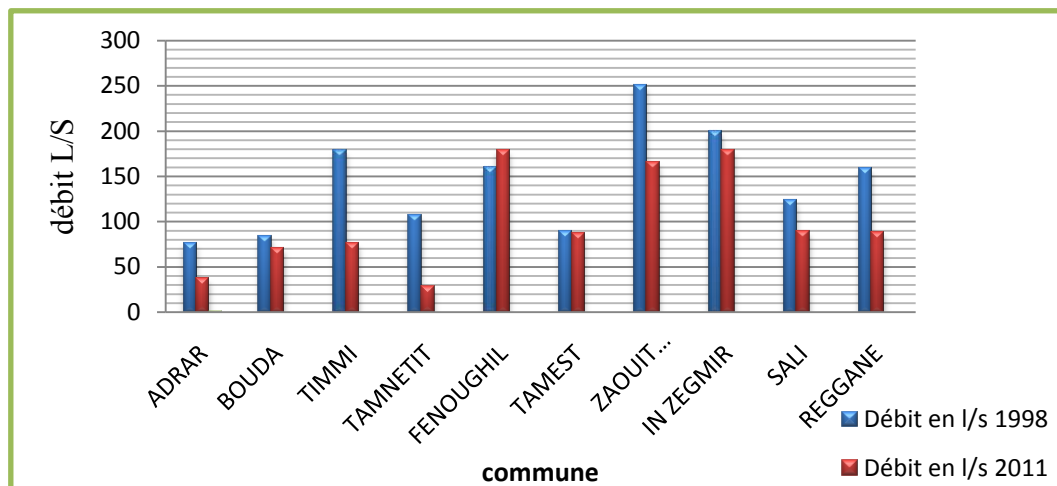


Figure 39. Histogramme d'évolution des débits des foggaras par commune (1998-2011).

Tableau 16. Débit des foggaras par commune (année 1998 et 2011).

Commune / années	Débit en l/s 1998	Débit en l/s 2011
ADRAR	75,78	36,9
BOUDA	83,65	70,4
TIMMI	178,63	75,4
TAMNETT	106,6	27,8
FENOUGHIL	159,3	178,34
TAMEST	88,21	86
ZAOUIT KONTA	249,67	164,54
IN ZEGMIR	199,61	178,34
SALI	123,45	88,64
REGGANE	158,38	88,05
TOTAUX	1423,28	918,2

Source l'ANRH

Interprétation :

- Pour l'année 1998 : Le plus fort débit exploité par foggara est enregistré à la commune de Zaouit kounta avec une valeur de 249,67 L/s. Quant au plus faible, il est enregistré à la commune d'ADRAR, avec une valeur de 75,78 L/s (figure 39).

- Pour l'année 2011 : Cette situation a engendré le tarissement des foggaras sur toutes les communes néanmoins la commune de Fenoughil observé une augmentation de débit (10 à 15 L/s)

V.10.6. Facteurs influençant le débit :

- ❖ Naturels : la sécheresse et l'ensablement.
- ❖ Humains : le manque d'entretien, l'influence des forages, et autres.

V.10.6. 1. Naturels :

a. La sécheresse : La nappe exploitée par les foggaras, située dans les couches supérieures du Continental Intercalaire est influencée directement par les agents naturels : la rareté des pluies, surtout de ces dernières décennies et l'augmentation remarquable de la température (évaporation intense). Ces deux agents sont parmi les facteurs qui contribuent à la baisse du niveau de la nappe et par conséquent, au débit des foggaras

b. L'ensablement :

C'est un deuxième facteur qui menace gravement les foggaras. Le Touat est l'une des régions les plus ventilées où le vent entraîne une formation importante des Ergs et des dunes de sable. Des observations faites sur place par le Capitaine Lô, échelonnées sur plusieurs années, permettent de dire que ces dernières avancent de 1 à 1,5 mètres par an. Elles font disparaître progressivement les foggaras sous les dunes et déboucher celles-ci à l'air libre. Pour atteindre les jardins, elles doivent traverser des zones de dunes qui, dans certains cas, dépassent 1000 m de largeur. Les agriculteurs protègent les canalisations en les enterrant, mais dès que l'une d'elles s'effondre sous le poids du sable (l'accident s'est déjà produit), la foggara devient inutilisable. Par ailleurs, la distance entre la sortie de la foggara et les jardins ne fait qu'augmenter. Les Seguias s'allongent sans cesse et le volume d'eau qui parvient en fin de course dans les surfaces cultivables est infime.

En amont, ce facteur constitue un grand problème, car le vent transporte et jette des quantités énormes de sable dans les puits, et le fait boucher parfois totalement. Pour éviter ce problème, le drain bien attendu ne sera pas laissé sans revêtement, comme le sont les foggaras actuelles. Un revêtement poreux empêchera l'entraînement de sable, les éboulements et favorise l'aération des galeries comme c'est le cas actuel de certaines foggaras dans le centre ville d'Adrar.

V.10.6.2. Humains**a. Le manque d'entretien**

Le manque d'entretien et la main d'œuvre nécessaire et qualifiée sont en relation avec plusieurs facteurs parmi lesquels nous avons la livraison (des légumes et autres matières agricoles) à partir du Nord du pays. Cela implique le désintéressement des jeunes car ils trouvent au marché tout ce dont ils ont besoin, sans avoir à travailler les jardins qui manquent donc de main d'œuvre. L'apparition des professions multiples en relation avec l'agronomie. L'entretien influe beaucoup sur le rendement des foggaras.

L'existence par exemple de zones étanches (étanchéité artificielle par les argiles en général) dans la partie aval (morte) des foggaras que les mauvais puisatiers les considèrent comme des déblais qui bouchent la galerie et freinent les eaux. Et lorsqu'ils curent ces zones. Les eaux provenant de l'amont des foggaras s'infiltreront en aval, par conséquent, le débit diminue considérablement. Un autre cas survenu dans la région d'étude pour l'entretien de la foggara de Nazoua. Au lieu de commencer l'entretien d'aval en amont, ils ont fait le contraire. Ce qui a entraîné une dénivellation c'est à dire la partie amont devient plus profonde que celle en aval. La pente n'a pas été assurée pour l'acheminement des eaux jusqu'aux oasis. Il faut donc une main d'œuvre qualifiée pour faire un bon entretien.

b.L'influence des forages : en général, l'apparition des forages et l'exploitation excessive de la nappe ont engendré, avec le temps, une baisse du niveau statique de cette dernière, et par conséquent du débit des foggaras.

L'infiltration des eaux dans la partie dénoyée par le forage voisin n'a pas une influence remarquable du forage sur la foggara, car il ne provoque aucun changement dans le régime de cette dernière ceci est dû d'une part à l'éloignement de la partie drainant de la foggara par rapport à la zone d'influence du forage (distance de 800m jusqu'à 100m).

Ainsi que là mauvaise gestion par des responsables non qualifiés, qui ne visent que leurs intérêts personnels, les risques causés par les habitations : Durant ces dernières années plusieurs habitants ont construit des jardins au voisinage des foggaras ce qui permet la

pénétration des couches sablo-argileuse qui atteint le niveau des foggaras d’où l’apparition des remblais des éboulements qui constituent de grandes cavernes et détériorent la galerie de la foggara. (Abella B. 2002)

V.11. LES SOLUTIONS POUR AMELIORER ET SAUVEGARDER LES DEBITS DES FOGGARAS :

Pour faire face aux problèmes menaçant la foggara, plusieurs recommandations peuvent être proposées :

- ❖ La formation et le perfectionnement des gestionnaires et les copropriétaires des foggaras
- ❖ La réhabilitation des foggaras.
- ❖ Faire des corrections des débits des forages qui existent dans les champs de captage des foggaras. Le procédé de correction des débits des forages permet d’éliminer ou réduire l’interférence réciproque entre les points de captage.
- ❖ Etablissement des périmètres de protection (immédiat, rapproché et éloigné) et Fermeture des puits pour limiter les apports éoliens et l’ensablement.
- ❖ Utiliser l’énergie hydraulique des eaux des foggaras pour la production de l’électricité qui peut être utilisée dans des travaux d’entretien ou autre, donc assurer une autonomie de la foggara.
- ❖ Renforcement des foggaras par des puits équipés de pompes à énergie solaire ou éolienne: l’implantation des puits peu profonds équipés par des pompes à énergie solaire permet de combler le déficit des débits des foggaras, cette solution est très importante et faisable surtout pour les foggaras ayant pure caractéristique $1 Q \geq 1 L/s/km$, Il est conseillé de ne pas implanter les puits au voisinage des têtes des foggaras (zone de drainage des foggaras) car on risque de rabattre le niveau de la nappe et assécher la partie drainante par pompage . le puits doit être implanté dans la partie aval de la foggara pour capter les flux des débits passés sous les galeries.
- ❖ Respecter une distance de sécurité ($>$ rayon d’influence) lors de l’implantation des nouveaux captages (forage) pour éviter l’influence directe par le cône de rabattement et éviter les phénomènes d’interférence Respecter une distance de sécurité.

CONCLUSION

La technique traditionnelle de foggaras constitue un patrimoine historique et culturel national, elle est très adaptée aux conditions climatiques et sociales de la région. Elle permet une exploitation rationnelle des eaux de la nappe du CI. Elle est la source de vie des générations passées et elle doit l’être pour les générations futures. Cette technique est menacée par plusieurs problèmes qui aggravent son état et la rendent incapable de faire face aux défis de la demande croissante en eau tel que :

- ❖ Le tarissement des foggaras : (manque d’entretien, l’influence directe de l’exploitation intensive de la nappe par les forages,...., etc.).
- ❖ La vulnérabilité à toutes sortes de pollutions, en particulier d’origine anthropique (les déchets d’ordures divers, l’absence ou l’inexistence de réseaux d’assainissement, fosses septiques, etc.

Pour faire face aux problèmes menaçant la foggara, on peut proposer de :

- ❖ Considérer la foggara comme une vraie entreprise ayant son propre capital et ses gestionnaires hautement qualifiés et compétents.
- ❖ Le soutien financier des foggaras par l’état
- ❖ La sensibilisation contre les risques qui menacent la foggara.

CHAPITRE VI

HYDROCHIMIQUE

INTRODUCTION

Durant des siècles l'eau de la Foggara est utilisée pour l'alimentation en eau potable des Oasiens et l'irrigation de la palmeraie, actuellement la Foggara irrigue seulement la palmeraie, les besoins en eau de boisson sont assurés par des forages profonds.

Ce travail fait l'objet d'une étude hydro-chimique des eaux des Foggaras de la région d'Adrar afin de définir : la qualité, la potabilité, les faciès, la composition chimique et les possibilités pour l'irrigation.

A cet effet des analyses des paramètres physico-chimiques ont été faite, au niveau du Laboratoire de Recherche n°25 de l'Université de Tlemcen (Avril 2015) pour déterminer l'origine et l'évolution des sels dissous dans les eaux étudiées.

Cette étude porte sur 12 Foggaras qui captent la nappe du CI dans la région de Touat. Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques sont regroupés dans le tableau 17 :

Tableau 17 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux

Nom de Foggara	pH	CE (mS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	(Na ⁺ + K ⁺) (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	CO ₂ dissout	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
OULED LAHCEN	7,85	4,18	227,2	178	483,81	773,9	830	60	28,06	139,40
TIMADAIN	8,01	3,42	197,6	80,64	545,60	621,25	490	40	25,62	376,44
MAJD EL KHIR	7,68	2,76	154	90,48	383,16	468,6	470	36	31,72	253,48
ZAGLOU	7,94	2,67	168	62,4	406,10	457,95	460	40	35,38	225,47
TAOURAGH	8,01	2,24	23,6	54,24	517,70	358,55	225	44	31,72	439,74
ANHIL	7,9	1,384	77,6	27,8	236,94	266,25	200	36	34,16	100,03
ARMOL	7,99	1,466	64,8	39,12	252,96	252,05	200	24	31,72	178,15
HANNOU	7,81	3,04	168,4	57,96	531,65	518,3	500	40	36,6	296,57
OULED YAKOUB	7,8	1,371	67,6	30,24	242,11	241,4	145	28	34,16	206,41
BNI OUAZAL	8,13	1,77	94,4	43,92	288,92	301,75	230	40	28,06	244,80
HAMMAD	7,68	1,593	97,6	39,36	240,87	216,55	270	40	39,04	221,03
CHIBANI	7,67	3,25	200	86,4	474,30	568	570	48	32,94	253,27

VI.1. METHODE ET STRATEGIE DE TRAVAIL

1. Prélèvements :

Les prélèvements sont effectués selon une répartition et une fréquence différente d'un site à un autre, selon le type de point d'eau (puits, Foggaras) et la facilité d'accès et de la disponibilité des ouvrages.

2. Mesures in situ :

Quatre paramètres ont été mesurés (T de l'air et de l'eau, pH, Conductivité.) in situ, au prélèvement de l'échantillon. Ces paramètres permettent de définir les caractéristiques fondamentales de l'eau.

3. Analyse des éléments chimiques :

Des analyses des éléments chimiques des eaux étudiées ont été effectuées pour : les Cations : (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) ; les Anions : (HCO_3^- , Cl^- , et SO_4^{2-} , NO_3^-) et un gaz (CO_2).

VI.2. PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES

Les caractères organoleptiques sont des paramètres qui doivent être appréciés au moment du prélèvement : certaines odeurs peuvent, par exemple, disparaître pendant le transport, ou l'aspect de l'échantillon se modifier au cours du transport et du stockage (apparition d'une coloration, de précipité, etc.).

VI.2.1. COULEUR

La couleur de l'eau de boisson est généralement due à la présence de substances organiques colorées. Toutes les eaux prélevées et analysées des échantillons sont incolores.

VI.2.2. ODEUR

Généralement, les odeurs proviennent, soit des produits chimiques, soit de la matière organique en décomposition, soit des protozoaires, soit des organismes aquatiques. L'odeur due à la présence simultanée dans l'eau de plusieurs produits peut être plus intense que la somme des odeurs dues à chaque constituant.

Les tests des échantillons n'ont donné aucun résultat remarquable dans les eaux de ces Foggaras.

VI.2.3. GOUT

D'une façon générale, il est bien difficile de porter un jugement sur la qualité d'une eau par la seule évaluation de la saveur. En dehors de la salinité, une saveur désagréable peut révéler la présence de substance indésirable dont il importera de préciser l'origine.

C'est le cas en particulier de certaines saveurs amères, douces et salées décelables à la dégustation et du goût imputable à des concentrations très faibles de substances fortement sapides.

VI.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES PHYSICO –CHIMIQUES

La méthode d'analyse statistique multidimensionnelle en composantes principales consiste à exprimer un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux (ZAGHTOU, 2011).

L'interprétation statistique des résultats des analyses chimiques des eaux à l'aide des paramètres caractéristiques des échantillons, comme la moyenne et l'écart type peut s'avérer insuffisante si le nombre d'échantillons devient important. Des méthodes statistiques multidimensionnelles ont pour objet la description simultanée des données volumineuses, fournissant ainsi des informations et des éléments.

Parmi ces méthodes d'interprétations, on a utilisé l'analyse en composantes principales qui permet une analyse des relations entre les nombreuses variables donnant ainsi des renseignements sur l'évolution du chimisme des eaux et la détermination des caractères dominants dans le milieu. Nous avons entrepris une étude statistique sur les 12 échantillons d'eau, nous avons utilisé le logiciel EXCEL STAT (version 7) et 10 variables définies comme suit :

- Les éléments chimiques majeurs de l'eau exprimés en mg/L : Ca, Na, Mg, K, Cl, HCO_3 , NO_3 , SO_4

- Le pH
- La minéralisation.

3.1. Paramètre représentatifs :

Les résultats sont résumés dans le tableau 18.

Eléments	minimum	maximum	moyenne	écarte type
Minéralisation (mg/L)	1039,96	3170,71	1842,25	<u>707,55</u>
Ph	7,67	8,13	7,87	0,14
Ca ²⁺ (mg/L)	23,6	227,2	128,40	62,52
Mg ²⁺ (mg/L)	27,8	178	65,88	39,42
Na ⁺ +k ⁺ (mg/L)	773,9	236,55	383,68	<u>120,02</u>
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	25,62	39,04	32 ,43	3,68
Cl ⁻ (mg/L)	216,55	773,9	420,38	<u>169,31</u>
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	145	830	382,5	<u>195,4</u>
NO ₃ ⁻ (mg/L)	100,03	439,74	244,56	89,94

A partir de ce tableau 02, on constate que les sulfates, chlorures, sodiums et minéralisations présentent des valeurs importantes de l'écart-type, ceci confirme la grande dispersion entre les valeurs relatives à ces éléments.

3.2 ACP :

Les coefficients de corrélation entre les teneurs des différents éléments majeurs sont donnés par le tableau 19.

Tableau 19 : matrice de corrélation des analyses des données physico-chimiques

	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
pH	1								
CE	-0,17	1							
Ca ²⁺	-0,31	<u>0,88</u>	1						
Mg ²⁺	0,19	<u>0,88</u>	0,75	1					
Na ⁺ +K ⁺	0,04	<u>0,80</u>	0,54	0,5	1				
Cl ⁻	-0,12	<u>0,99</u>	<u>0,88</u>	<u>0,87</u>	0,77	1			
SO ₄ ²⁻	-0,3	<u>0,96</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	0,62	<u>0,95</u>	1		
HCO ₃ ⁻	-0,56	-0,42	-0,26	-0,47	-0,32	-0,48	-0,29	1	
NO ₃ ⁻	0,24	0,2	0,14	-0,07	0,68	0,12	-0,06	-0,20	1

La matrice de corrélation (Tableau 03) entre les variables nous permet de déterminer les fortes corrélations positives significatives à savoir :

CE- Ca; CE-Mg; CE-SO₄²⁻; CE-(Na+K); Mg-Cl; SO₄-Cl et très forte entre CE-Cl ; Mg-SO₄ ; Ca-SO₄, Ca-Cl.

Ces liaisons témoignent de l'influence des formations salifères (gypse, anhydrite, sel.) sur le chimisme de l'eau de la région. Et que les éléments bien corrélés entre eux auraient la même origine.

Le pH paraît sans liaison directe avec l'ensemble des éléments. Il en est de même pour HCO₃ qui reste isolé, son degré de corrélation avec les autres ions n'est pas significatif.

VI.4. ETUDE DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

4.1. Les caractéristiques physiques :

a. La température :

La température de l'eau est un paramètre d'une grande utilité en ce qui concerne les études hydrogéologiques. L'eau de la Foggara parcourt plusieurs kilomètres de distance avant d'atteindre son exutoire la Kasria de la Foggara où la mesure s'effectue, ce trajet affecte la température de l'eau de la Foggara depuis sa sortie de la nappe dans la galerie au sous sol jusqu'à son émergence en surface, l'écoulement à ciel ouvert durant la période de grande chaleur affecte la température au cours de la mesure, les températures des eaux des Foggaras varient entre 21 et 24°C.

b. Potentiel Hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau par la concentration en ions H⁺, les valeurs du pH dans la région d'étude varient de 7 à 8.

c. La Conductivité (CE):

La conductivité mesure l'aptitude de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et par la suite donner une idée sur la minéralisation totale d'une eau. Les valeurs mesurées ont été corrigées par rapport à une température standard de 25°C.

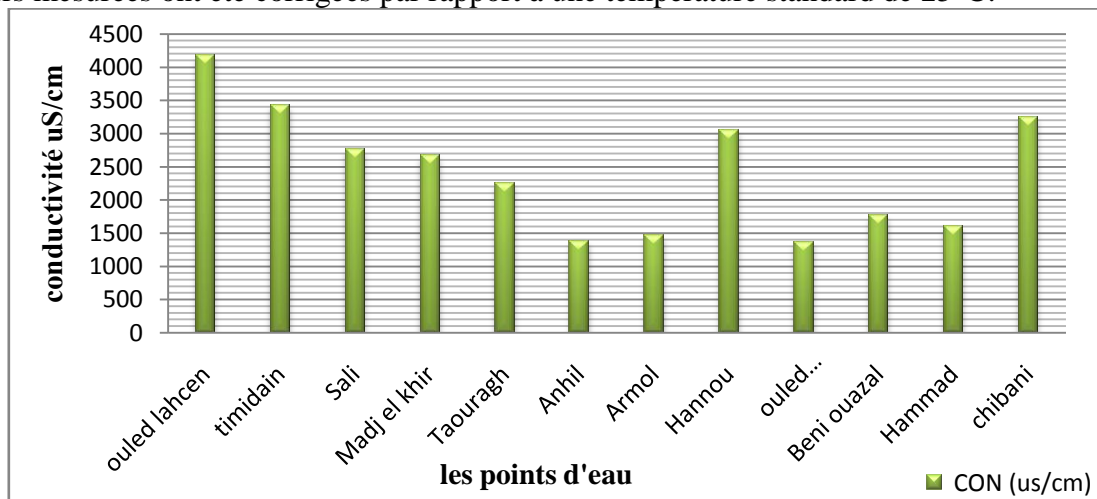


Figure 40 : Histogramme de la conductivité de chaque station.

Les valeurs observées dans la figure 40 varient entre 1371 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ouled yaakoub) et 4180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ouled lahcen), Les valeurs maximales sont liées à la présence des formations gypso-salines qui occupent les zones dépressionnaires de la région (sebkhas et lits d'anciens oueds).

d. La minéralisation :

La minéralisation de l'eau peut être déterminée soit par la conductivité électrique (méthode rapide), soit par la teneur en ions dissous obtenue par sommation des concentrations des anions et des cations car celles-ci sont fortement corrélées dans toutes les formations aquifères (en première approximation on peut lier la force ionique à la concentration ionique).

Tableau 20 : Détermination de minéralisation global

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation (mg/L)
$\text{CE} < 50$	$M = \text{CE} \times 1,365079$
$50 < \text{CE} < 166$	$M = \text{CE} \times 0,947658$
$166 < \text{CE} < 333$	$M = \text{CE} \times 0,769574$
$833 < \text{CE} < 10\ 000$	$M = \text{CE} \times 0,758544$
$\text{CE} < 10\ 000$	$M = \text{CE} \times 0,850432$

Tableau 21 : classification de l'eau en fonction de la conductivité

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation (mg/L)
$\text{CE} < 100$	Très faible
$100 < \text{CE} < 200$	Faible
$200 < \text{CE} < 333$	Moyenne
$333 < \text{CE} < 666$	Moyenne accent
$666 < \text{CE} < 1000$	Important
$\text{CE} > 1000$	Elevée

Tableau 22 : calcul des Minéralisations

Nom de Foggara	Minéralisation (mg/l)	Qualité des eaux
OULED LAHCEN	3170,71	Elevée
TIMADAIN	2594,22	Elevée
SALI	2093,58	Elevée
MAJD EL KHIR	2025,31	Elevée
TAOURAGH	1699,14	Elevée
ANHIL	1049,82	Elevée
ARMOL	1112,03	Elevée
HANNOU	2305,97	Elevée
OULED YAKOUB	1039,96	Elevée

BENI OUAZAL	1342,62	Elevée
HAMMAD	1208,36	Elevée
CHIBANI	2465,27	Elevée
Moyenne	1842,25	/

La carte d'iso-minéralisation (Figure 50) montre que la minéralisation augmente selon le sens d'écoulement des eaux de l'Est (plateau du Tademaït) vers l'Ouest (dépression du Touat), elle oscille entre 1039,96 (Ouled Yaakoub) et 3170,1 (Ouled Lahcen) mg/L, avec une moyenne de 1842,25 mg/L, elle atteint ses valeurs maximales au niveau des zones dépressionnaires et les Sebkhass.

e. La dureté (TH) :

Dans le tableau (voir l'annexe) on peut voir que la valeur maximale de TH est de 130 °F, valeur mesurée au niveau de la région de Timmadanin, la valeur minimale observée dans la région de Taouragh, est de 28 °F. La moyenne étant de 59,17 °F. La dureté semble la principale caractéristique des eaux de la nappe du CI dans la région de Touat. Ce qui entraîne des désagréments pour les usages domestiques à savoir :

- la mauvaise cuisson des légumes ;
- le non moussage du savon ;
- le bouchage des chauffe-bains ;
- la formation de couche jaunâtre sur les baignoires...etc.

4.2 LES PARAMETRES CHIMIQUES

4.2.1 Balance Ionique :

La vérification des résultats des analyses pour une bonne interprétation et représentation graphique des données est très importante, Pour l'ensemble des échantillons nous avons procédé à la vérification des analyses par la balance ionique à partir de la relation :

$$e\% = \frac{\sum r.cations - \sum r.anions}{\sum r.cations + \sum r.anions} \times 100$$

- e < 2% bonne analyse
- 2% < e < 5% analyse acceptable
- e > 5% mauvaise analyse

La vérification de la balance ionique des résultats des analyses de la région sont résumé dans le tableau 23 :

Tableau 23 : Calcul d'erreur sur les analyses chimiques.

Nom de Foggara	Balance ionique	Résultat
OULED LAHCEN	8%	Mauvaise analyse
TIMIDAIN	4%	Analyse acceptable
SALI	7%	Mauvaise analyse
MADJED ELKHIER	8%	Mauvaise analyse
TAOURGH	9%	Mauvaise analyse
ANHIL	9%	Mauvaise analyse

ARMOUL	9%	Mauvaise analyse
HANNOU	9%	Mauvaise analyse
OULED YAAKOUB	9%	Mauvaise analyse
BENI OUAZAL	8%	Mauvaise analyse
HAMMAD	8%	Mauvaise analyse
CHIBANI	9%	Mauvaise analyse

4.2.2 Les Faciès Chimiques

Les résultats des analyses des eaux des Foggaras de la région d'étude montrent que deux faciès hydrochimiques sont dominants dans toute la région, le chloruré sodique et le sulfaté sodique (tableau 24).

Tableau 24: Formule et faciès chimique des eaux de la nappe du continental intercalaire.

Nom de Foggara	Les cations	Les anions	Faciès chimique des eaux
OULED LA HACEN	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r\text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
TIMIDAIN	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r\text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
SALI	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r\text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
ZAGLOU	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r\text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
TAOURGH	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r \text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
ANHIL	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r \text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
ARMOUL	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r \text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
HANNOU	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r \text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
OULED YAAKOUB	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r \text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
BOUDA	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r \text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
TASABIT	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r\text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique
CHIBANI	$r(\text{Na}^+ + \text{k}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^- > r\text{HCO}_3^-$	Chlorurée sodique

4.2.3 Classification des eaux :

Plusieurs méthodes de classification des eaux naturelles ont été proposées par divers auteurs. Dans le cadre de cette étude, seulement la classification de Piper, la classification de Stiff et la classification de Schoeller-Berkaloff sont prises en considération.

A . CLASSIFICATION DE PIPER :

Cette méthode est basée sur la représentation graphique des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper qui permet de classer et comparer les eaux entre elles.

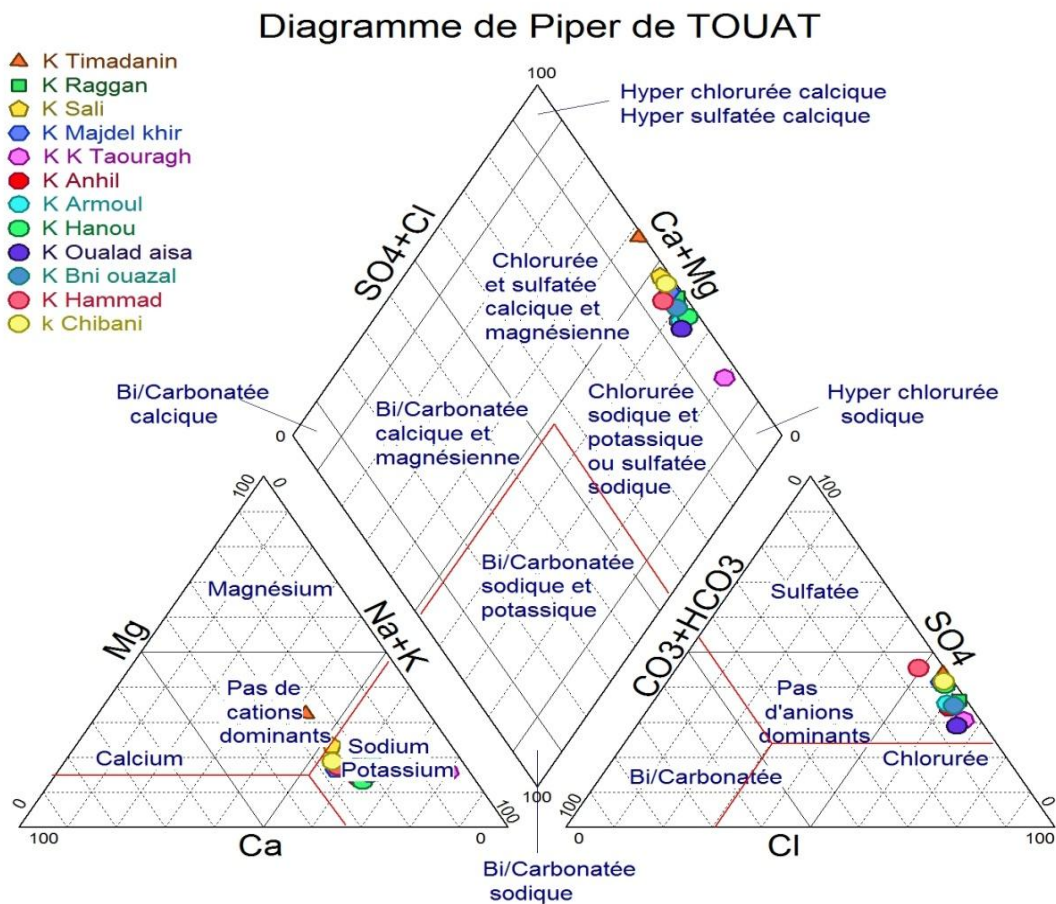


Figure 41: Représentation graphique des eaux du CI sur le diagramme de PIPER.

Le report des 12 points d'eau sur le diagramme de Piper (Figure 41) montre que le regroupement des points est en majeure partie sur les losanges des familles :

- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique 91,7%.
- Chloruré et sulfaté calcique et magnésien 8,31%.

B . CLASSIFICATION DE SCHOELLER-BERKALOFF

Ce digramme à échelle logarithmique, permet de distinguer par simple lecture des échelles, les concentrations des ions dominants et donc de déduire rapidement les différents faciès chimiques. Soit 58,33% des échantillons présentent un faciès chloruré sodique et potassique, et 41,67% des échantillons présentent un faciès sulfaté sodique et potassique. Les différentes analyses sont représentées dans les figures 42, 43.

TOUAT

Scheller
Berkaloff

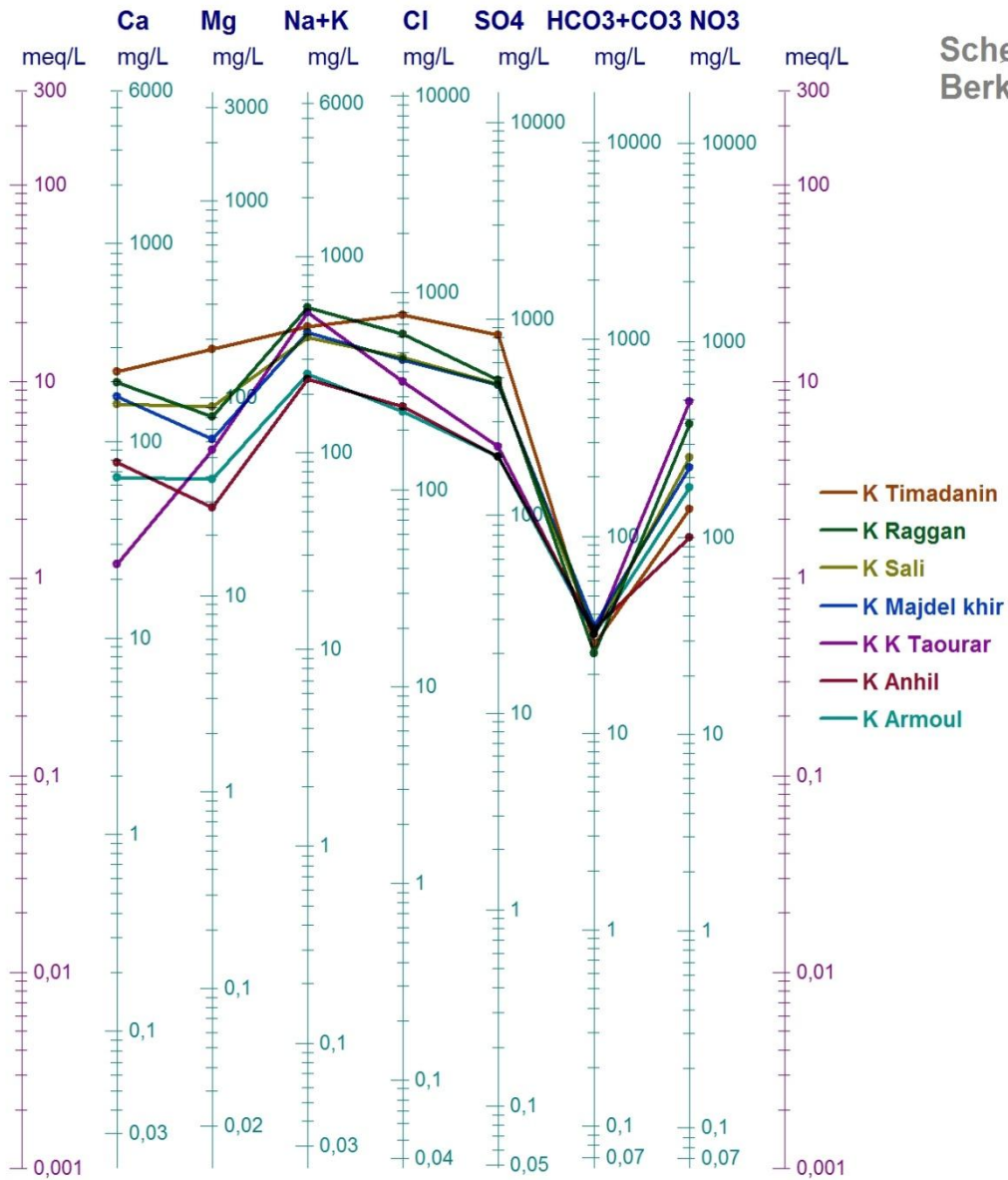


Figure 42 : Représentation graphique des eaux du CI.

région de TOUAT

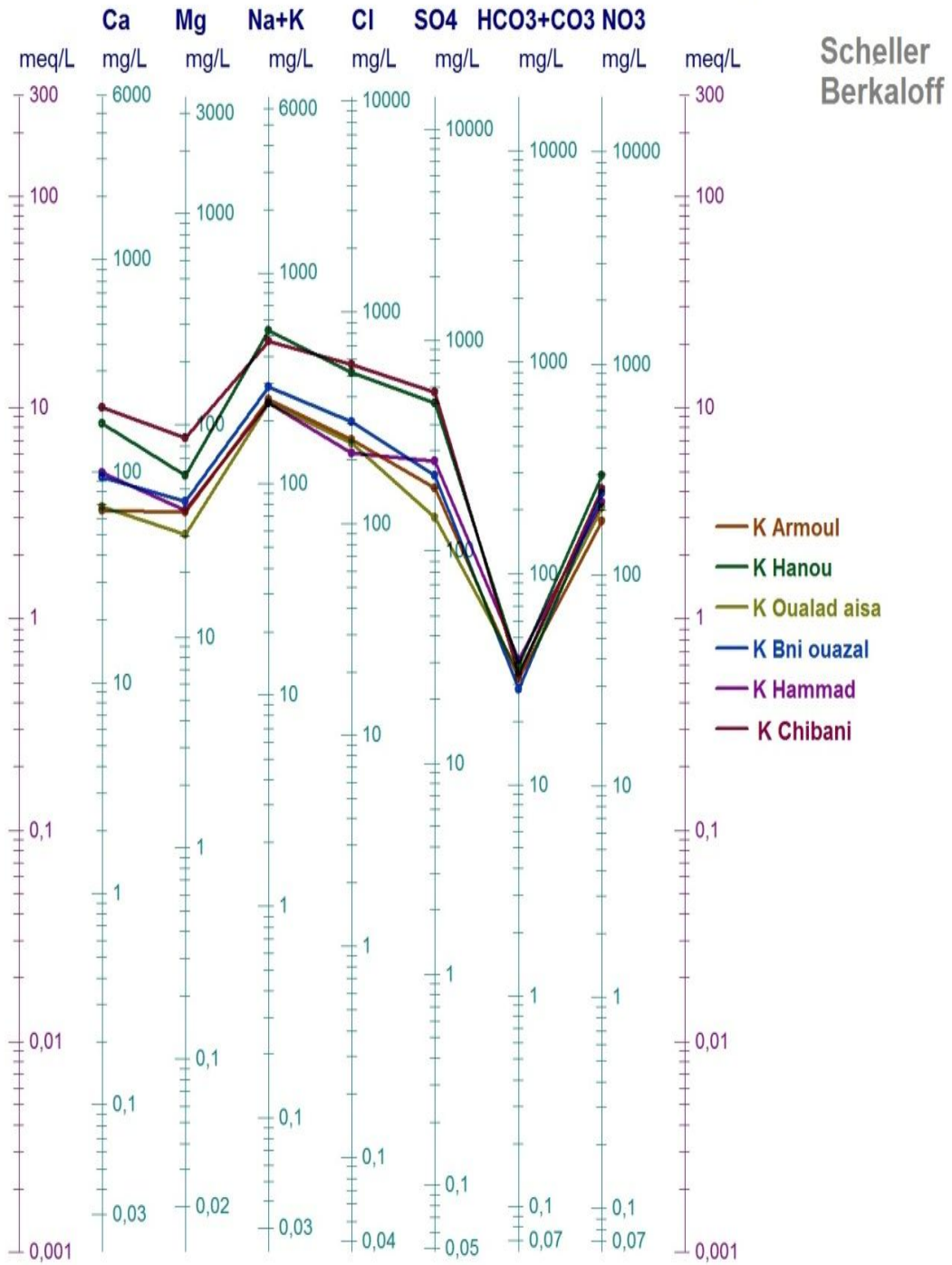


Figure 43: Représentation graphique des eaux du CI

C. DIAGRAMME DE STIFF :

Ce diagramme permet de configurer les analyses. Il présente trois axes horizontaux gradués exprimant les concentrations en meq/L et un axe vertical à l'origine, dont les cations sont présentés à gauche de l'axe verticale, il s'agit des cations : Calcium, Magnésium et sodium+potassium. Les anions représentés à droite de l'axe sont: Chlorure, Bicarbonate et Sulfate.

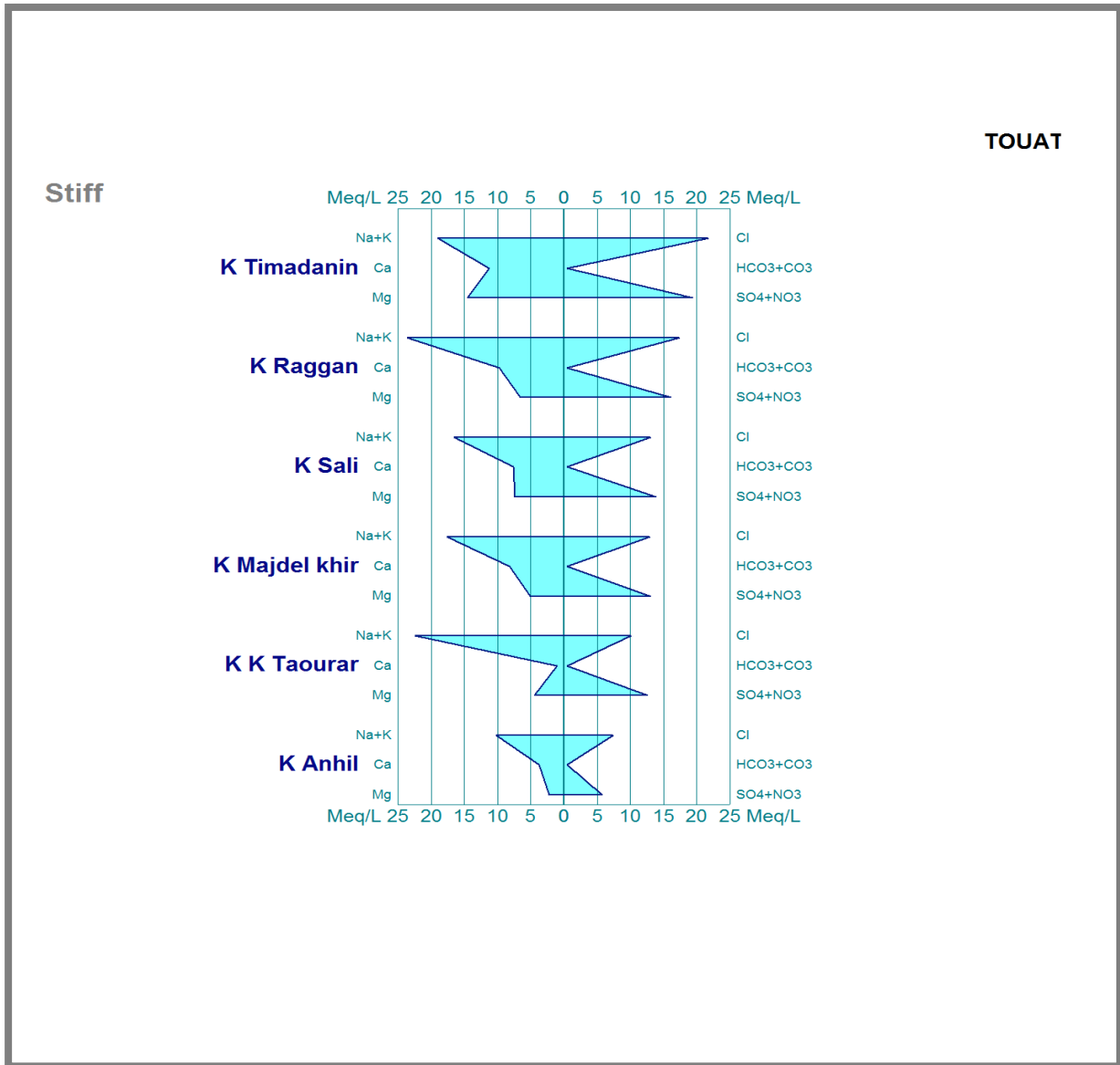


Figure 44 : Représentation graphique des eaux du C. I.

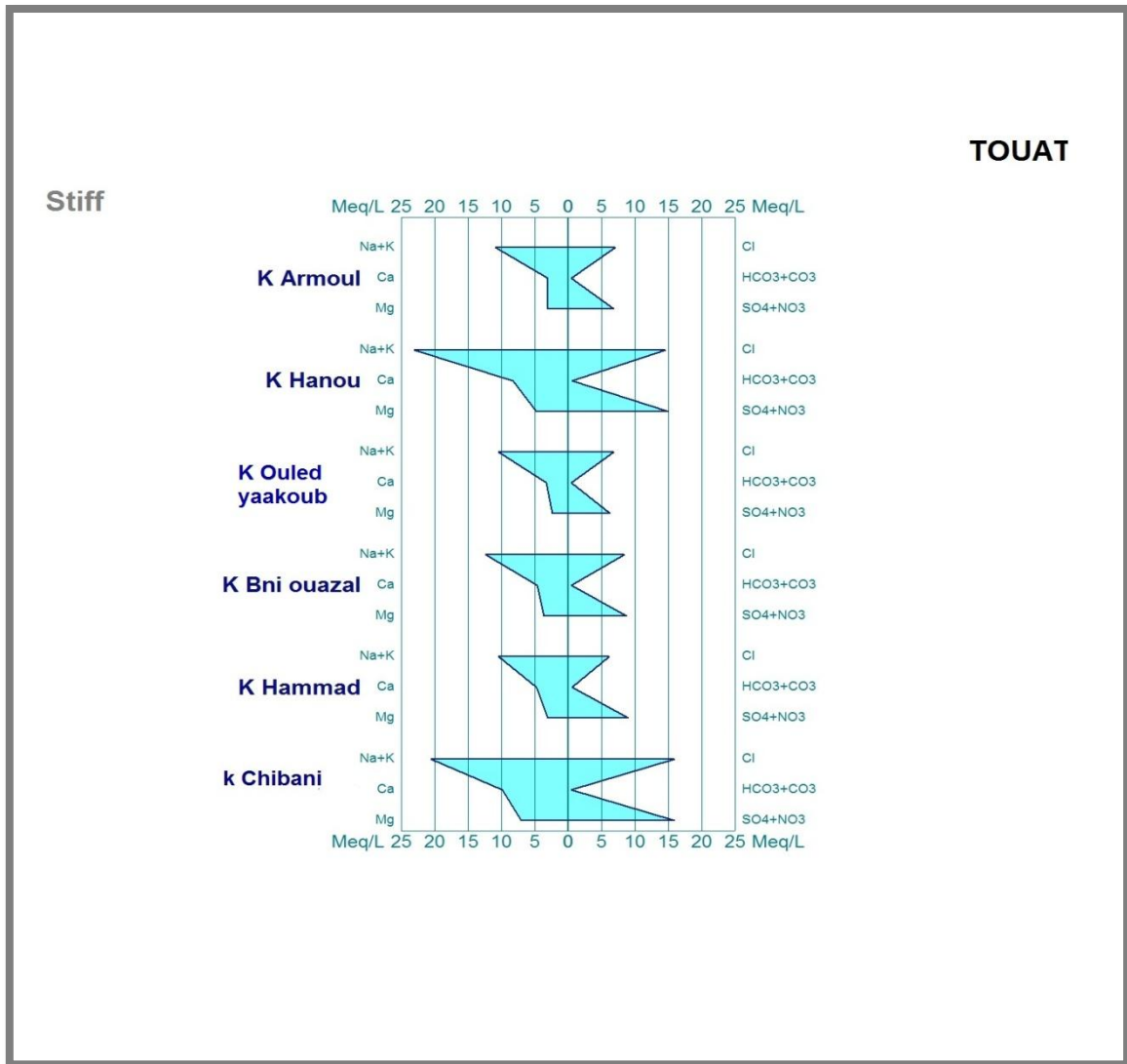


Figure 45 : Représentation graphique des eaux du C. I.

Le report des 12 points d'eau sur le diagramme de Piper (Figure 44, 45) montre que le regroupement des points est en majeure partie sur les losanges des familles :

- Chloruré sodique et potassique.
- Sulfaté sodique et potassique.

4.2.4 Relation chimiques :

a- Sodium-Chlorure (Na-Cl)

L'analyse de cette relation montre une évolution proportionnelle entre le sodium et les chlorures (Figure 46) ce qui indique une origine commune, probablement l'halite (NaCl), et qui confirme la domination du faciès chloruré sodique. Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0,59.

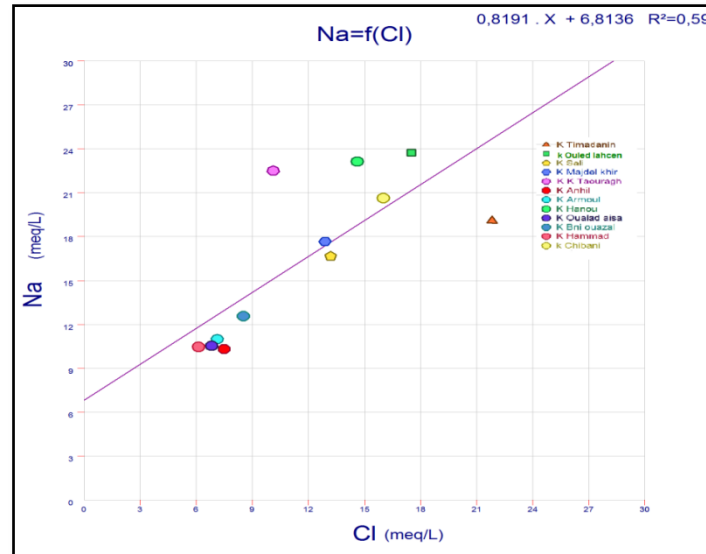


Figure 46 : Relation Na- Cl

b- Sulfate-Calcium (SO₄-Ca):

Les sulfates ont une relation proportionnelle avec le Calcium, donc ils ont des origines communes, soit du gypse (CaSO₄, 2H₂O) soit de l’anhydrite (CaSO₄), avec un excès pour les sulfates, d’où l’échange de base du calcium des formations argileuses. Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0,85 (Figure 47).

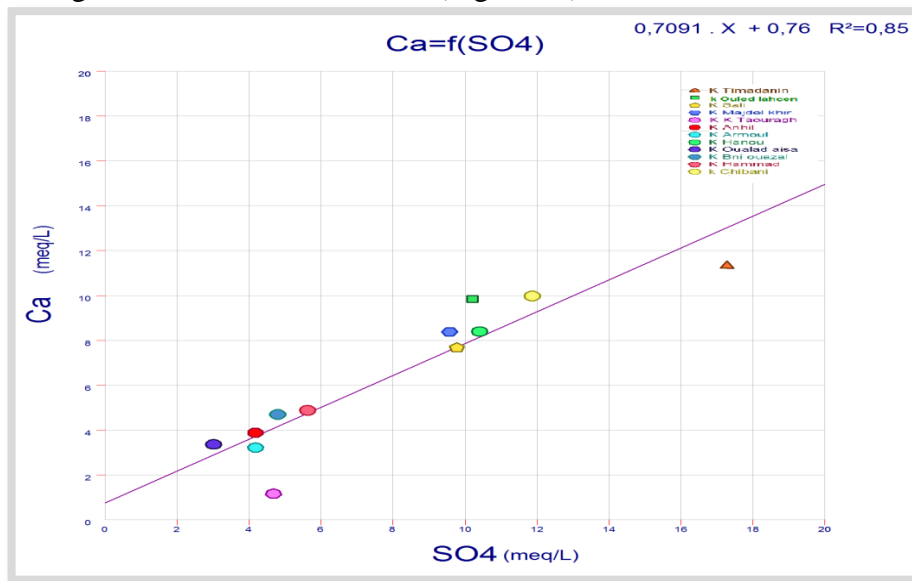


Figure 47: Relation Ca-SO4

c- Magnesium - Sulfate (Mg- SO4):

La figure 48, indique que la relation sulfate magnésium est bien liée avec une évolution proportionnelle, donc l'origine est probablement du sel de magnésium la kiesérite (MgSO4). Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0,85.

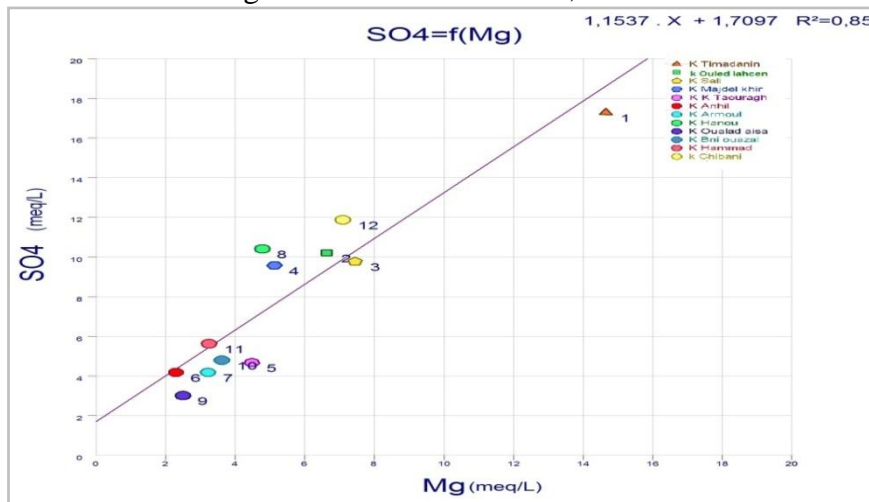


Figure 48: Relation Mg-SO4

d. Conductivité – Dureté (EC-TH) :

La relation est bien visible sur la figure 49 entre la dureté et la conductivité, avec un coefficient de corrélation de la régression linéaire de 0,88, qui confirme le classement de diagramme de Piper où les eaux sont classés d'une dureté très élevée et d'une salinité très élevée.

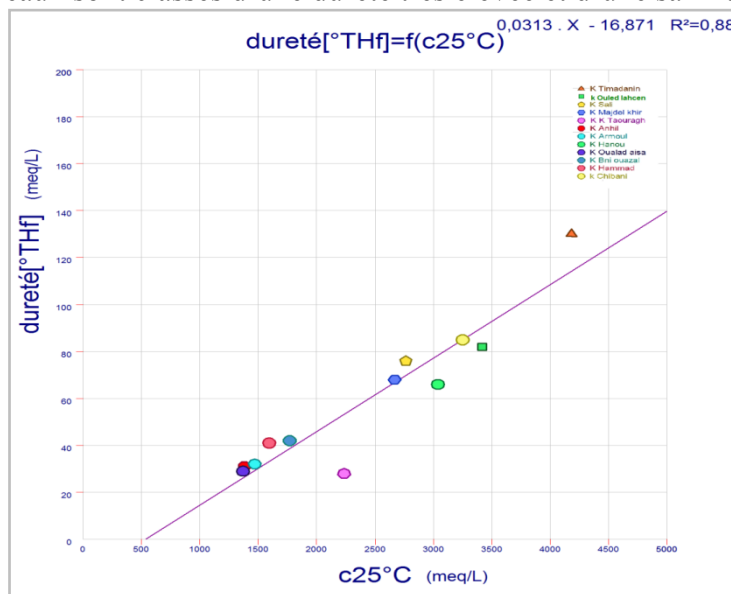
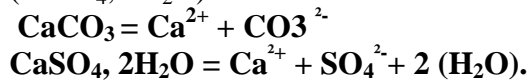


Figure 49 : Relation CE-TH

4.3.1. Les cations:

4.3.1.1. Le Calcium (Ca²⁺) :

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).



D'après la carte d'isoteneur en Calcium (Figure 51), la concentration augmente de l'Est vers l'Ouest due à l'accumulation des eaux et la présence des dépôts gypso-salins contribuant fortement à cette augmentation. L'origine de ces teneurs est certainement liée au lessivage des terrains et des dalles calcaires du plateau de Tademaït (sénonien, turonien) et la dissolution des encroûtements gypso-salins de la dépression du Touat (sebkhas).

4.3.1.2. Le Magnésium (Mg^{2+}) :

Ses origines sont comparables à celles du calcium, ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite). L'évolution des teneurs est identique à celle du calcium. D'après la carte d'isoteneur en Magnésium la (Figure 52) montre que la concentration élevée de magnésium est au centre de la région.

4.3.1.3. Le Sodium (Na^+) et le Potassium (K^+) :

L'origine du sodium dans les eaux est liée principalement au lessivage des dépôts évaporitiques et ceci par des phénomènes de lessivage, d'évaporation et par échange de base. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



D'après la carte d'isoteneur en sodium et potassium (Figure 53), les fortes teneurs se localisent dans la partie Ouest de la zone d'étude tout le long de la vallée de Oued Messaoud, et au niveau des sebkhas.

4.3.2. Les anions

4.3.2.1. 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. Les chlorures rencontrés en grande quantité dans les eaux souterraines proviennent de la dissolution et lessivage des terrains salifères.

D'après la carte d'isoteneur en chlorures (figure 54), leur évolution suit la direction d'écoulement des eaux souterraines et les fortes teneurs se localisent au centre de la région. Leur origine est liée au lessivage des formations évaporitiques gypso-salines et les formations argileuses intercalées dans les formations gréseuses du Crétacé inférieur.

4.3.2.2. Les Bicarbonates (HCO_3^-) (hydrogénocarbonates)

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées et par les eaux chargées en gaz carbonique.

L'analyse de la carte d'isoteneur en bicarbonates (Figure 55) montre une augmentation des teneurs au centre de la région.

4.3.2.3. Les Sulfates (SO_4^{2-})

La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses. La carte d'isoteneur en sulfates (Figure 56) montre que les fortes valeurs caractérisent le centre de la région. L'origine des sulfates dans les eaux est essentiellement liée à la nature lithologique des formations gypseuses, à leur solubilité, et à l'oxydation du soufre présent dans l'atmosphère.

4.3.2.4. Les Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée, en général à l'utilisation des engrais chimiques utilisé en agriculture et au rejet des eaux usées.

La carte d'isoteneur en nitrates (Figure 57) montre la zone de concentration qui présente des fortes valeurs de nitrates, elles sont dues aux activités agricoles dans la région et aux rejets des eaux usées.

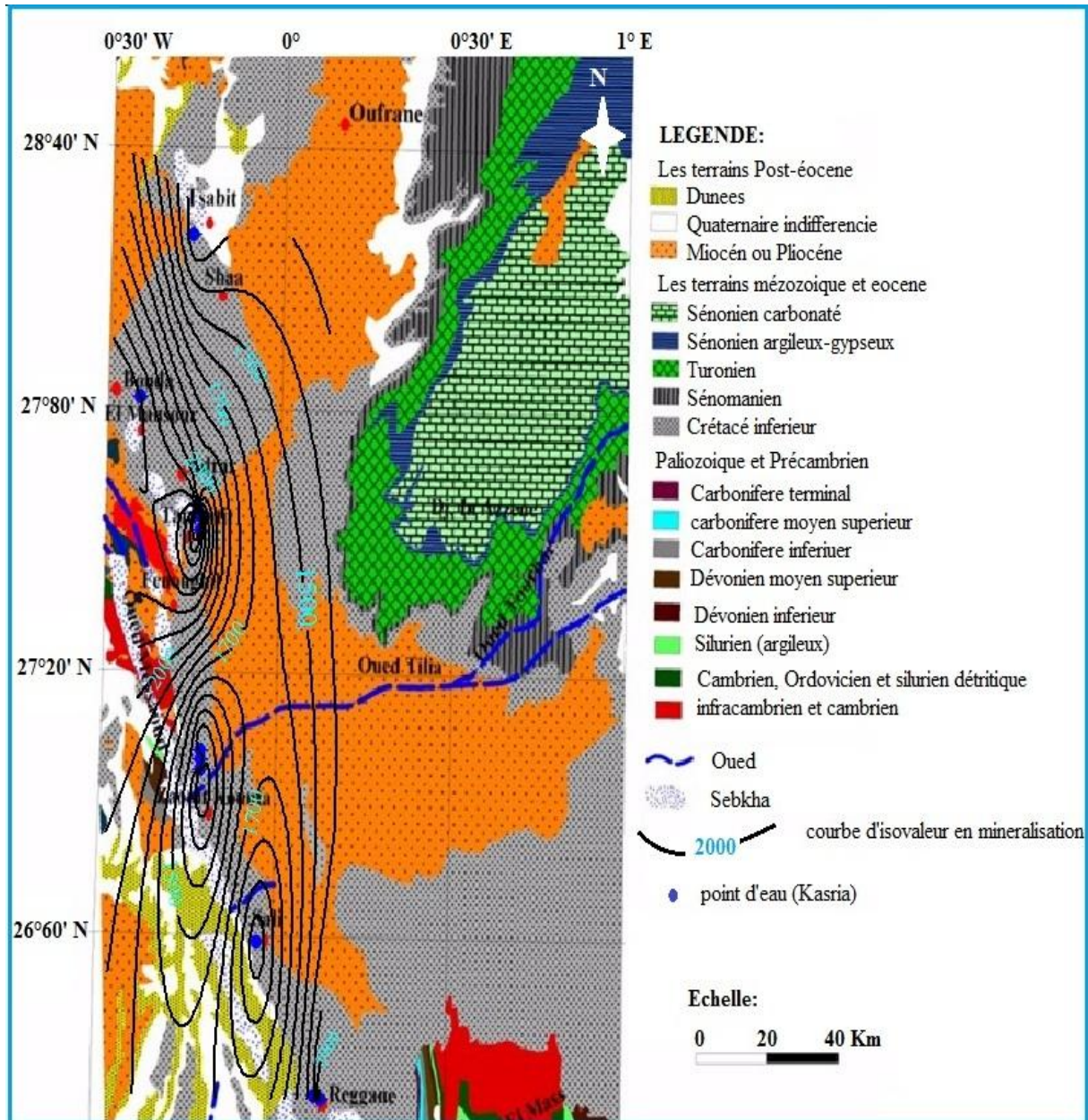


Figure 50: carte d'isoteneur en minéralisation dans la région de TOUAT

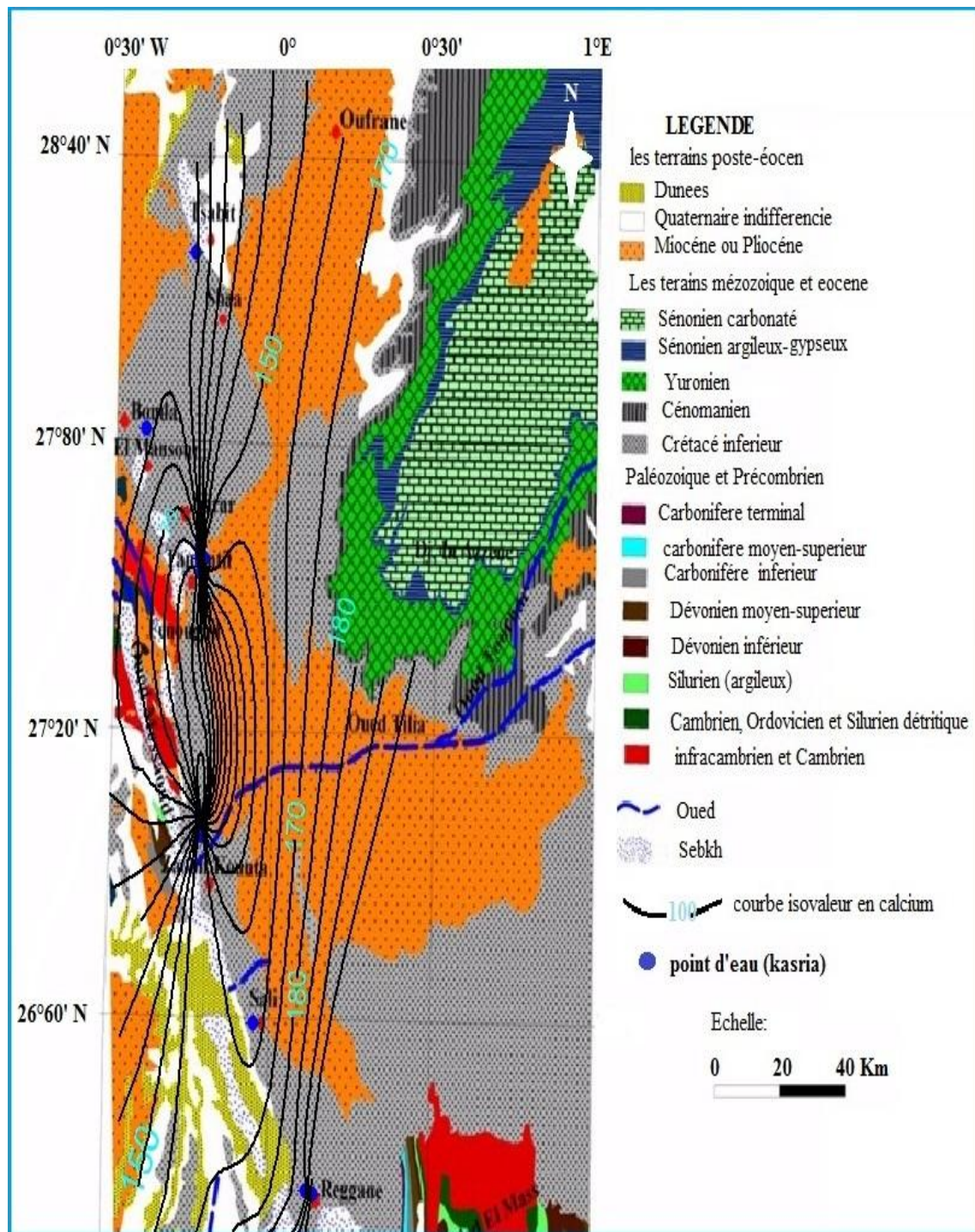


Figure 51: carte d'isoteneur de calcium dans la région de TOUAT.

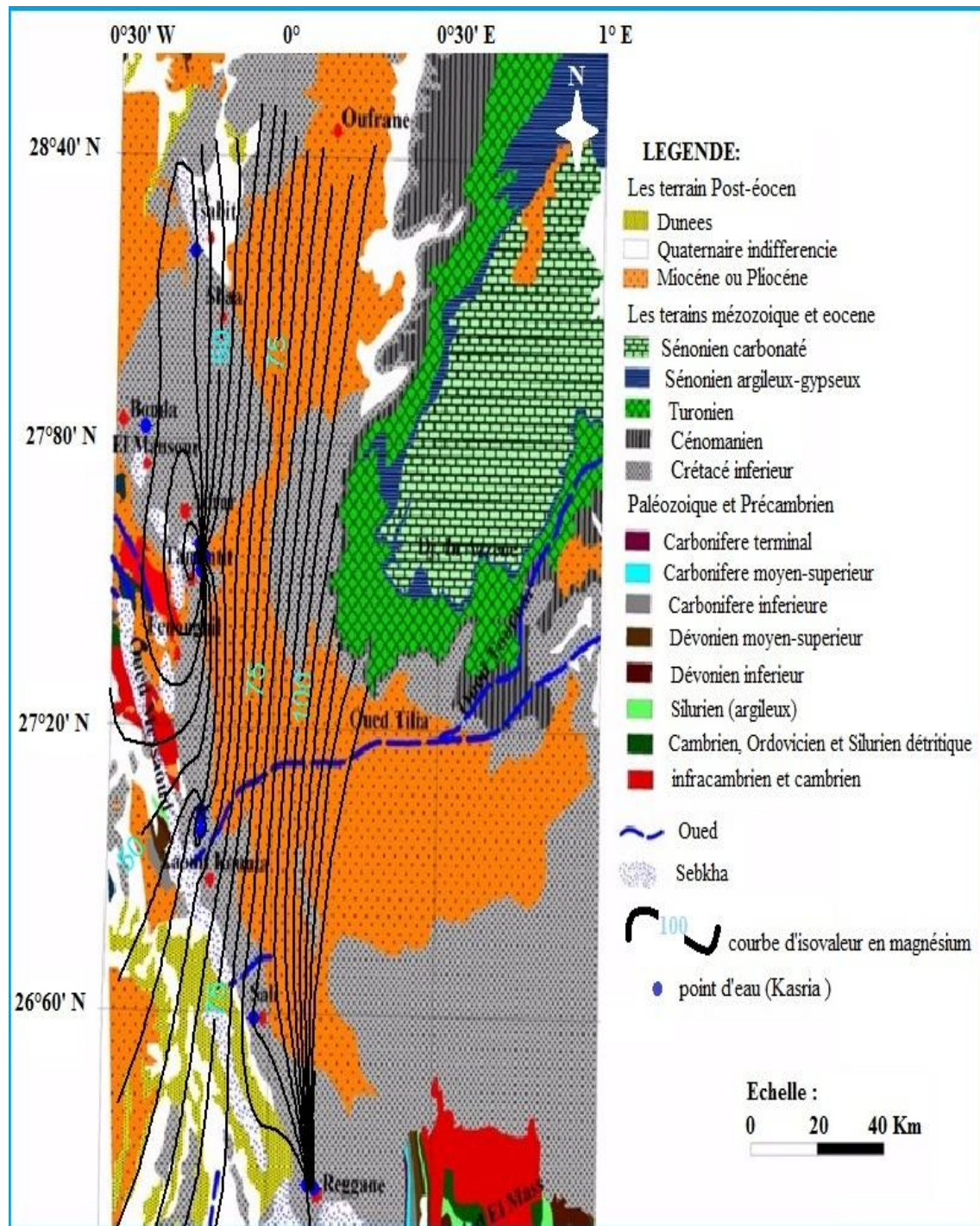


Figure 52 : carte isoteneur en Magnésium dans la région de TOUAT.

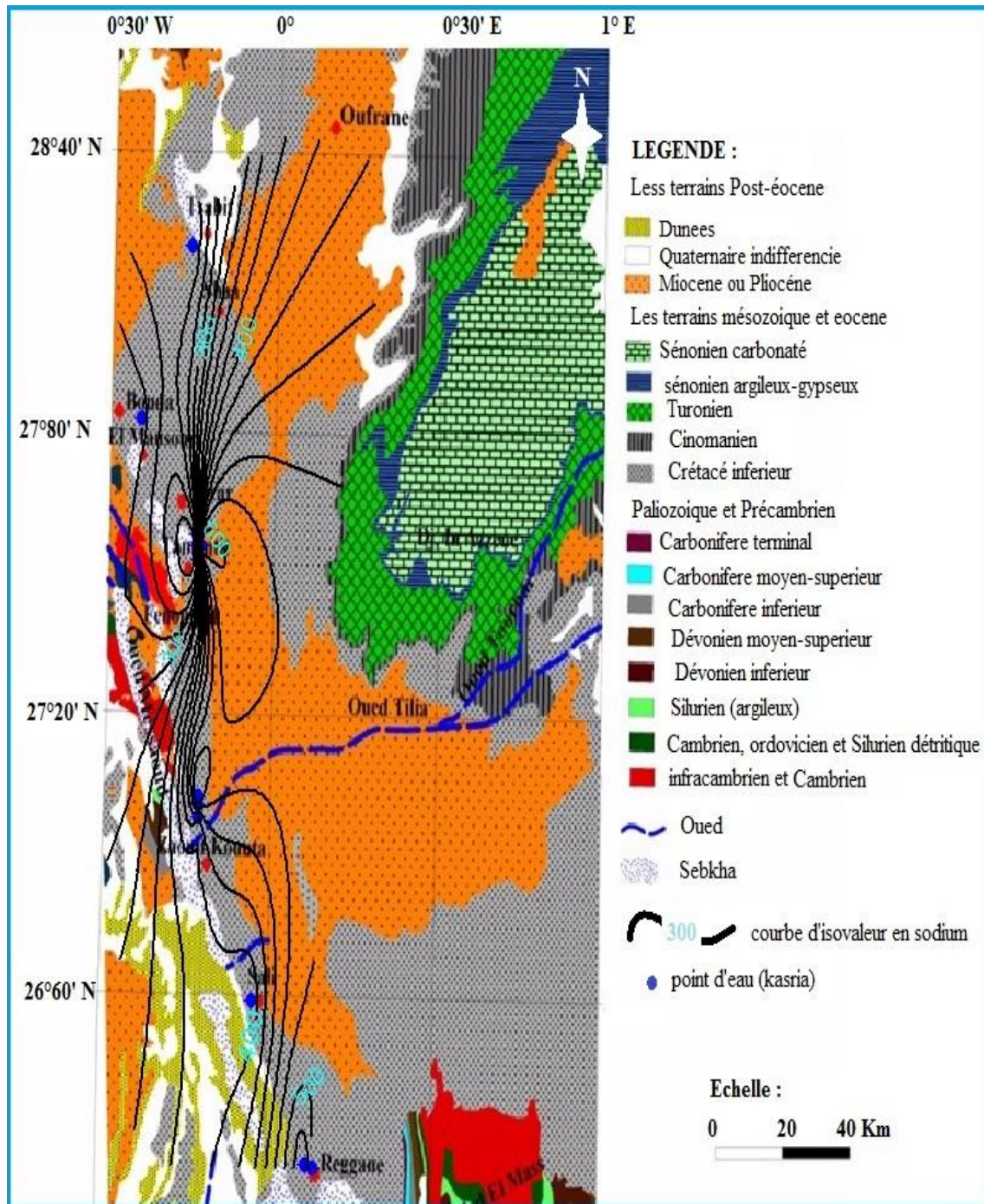


Figure 53 : carte d'isoteneur de sodium et potassium dans la région de TOUAT.

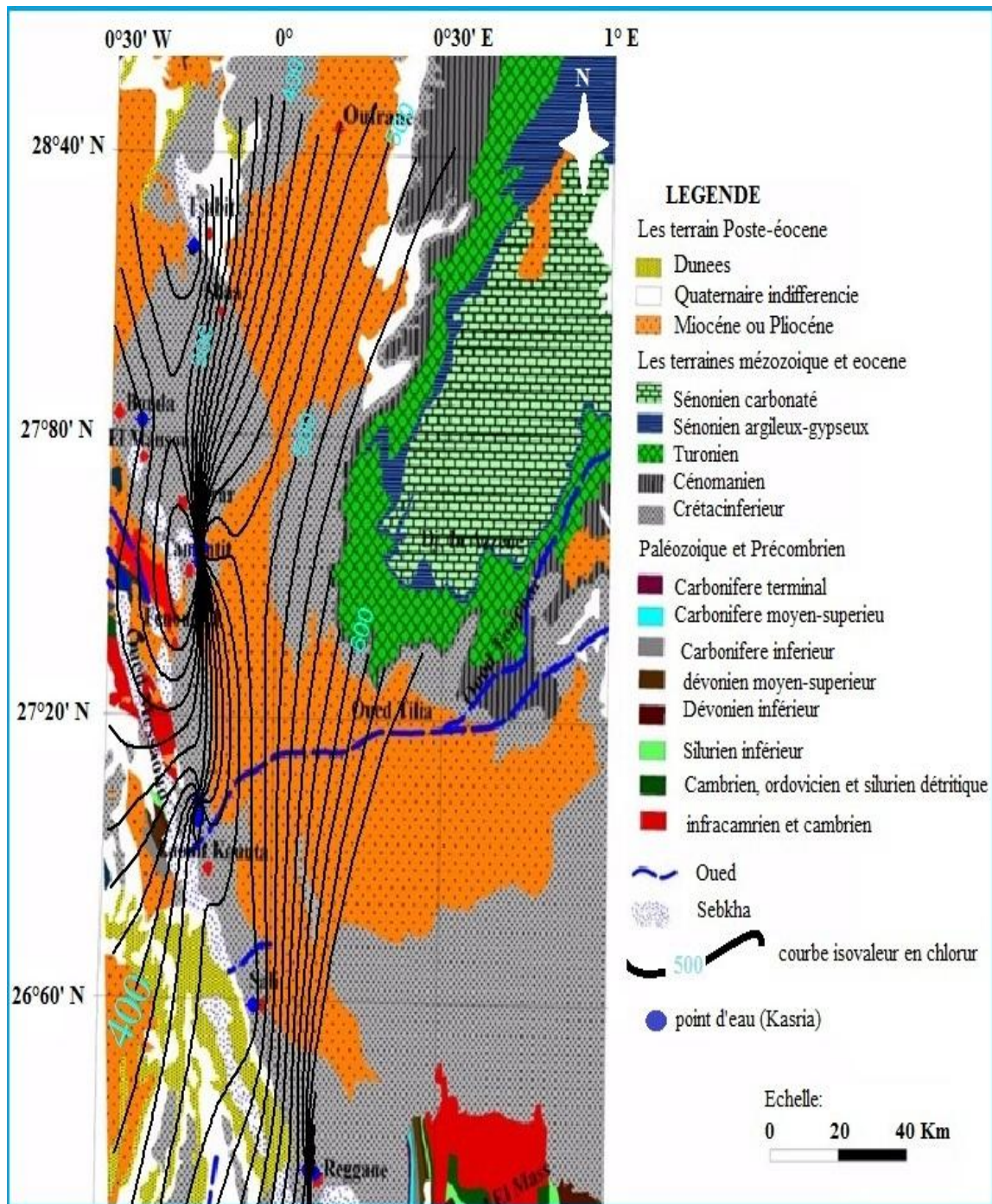


Figure 54 : carte d'isoteneur en chlorure dans la région de TOUAT.

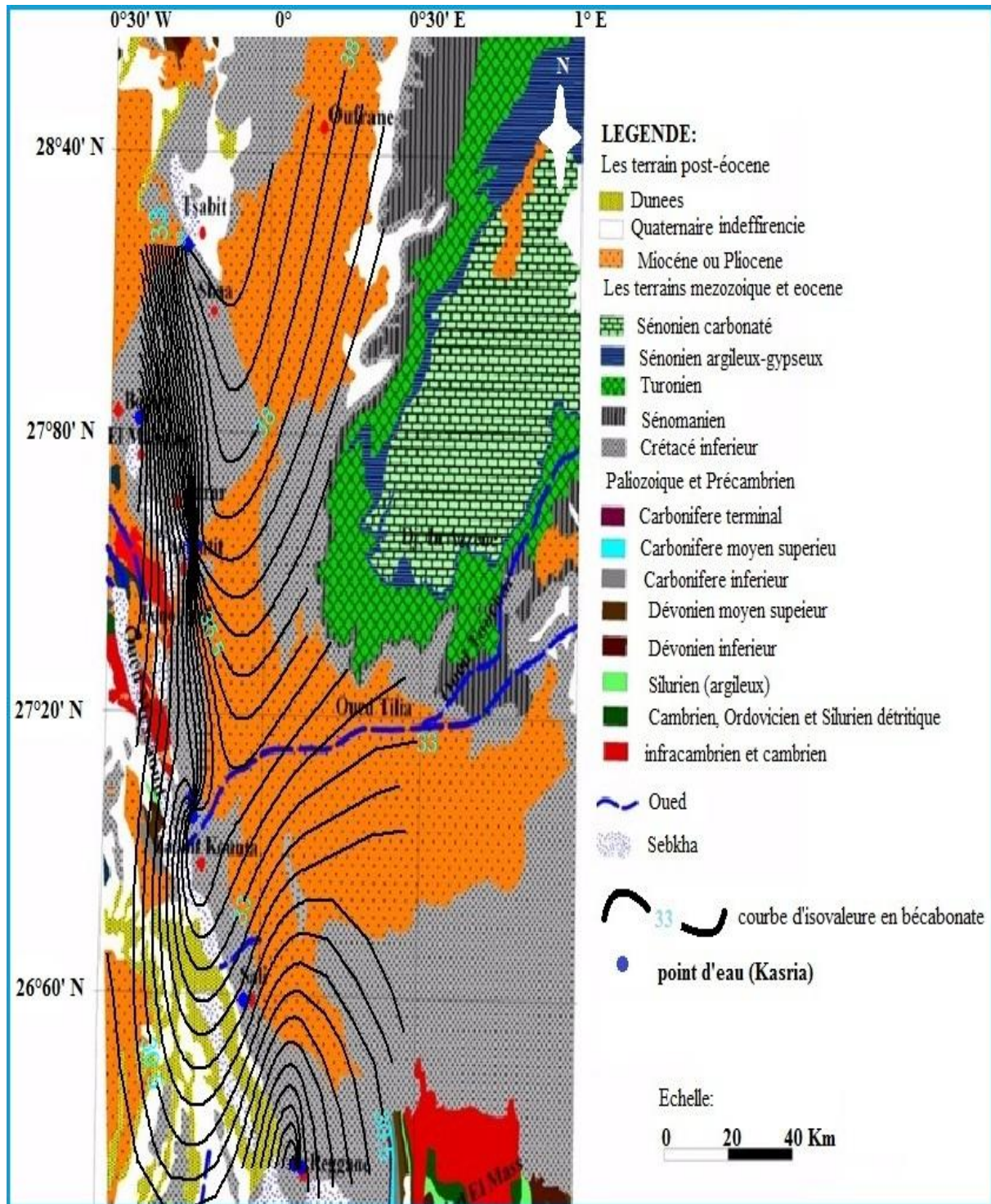


Figure 55 : carte d'isoteneur en Bicarbonates dans la région de TOUAT.

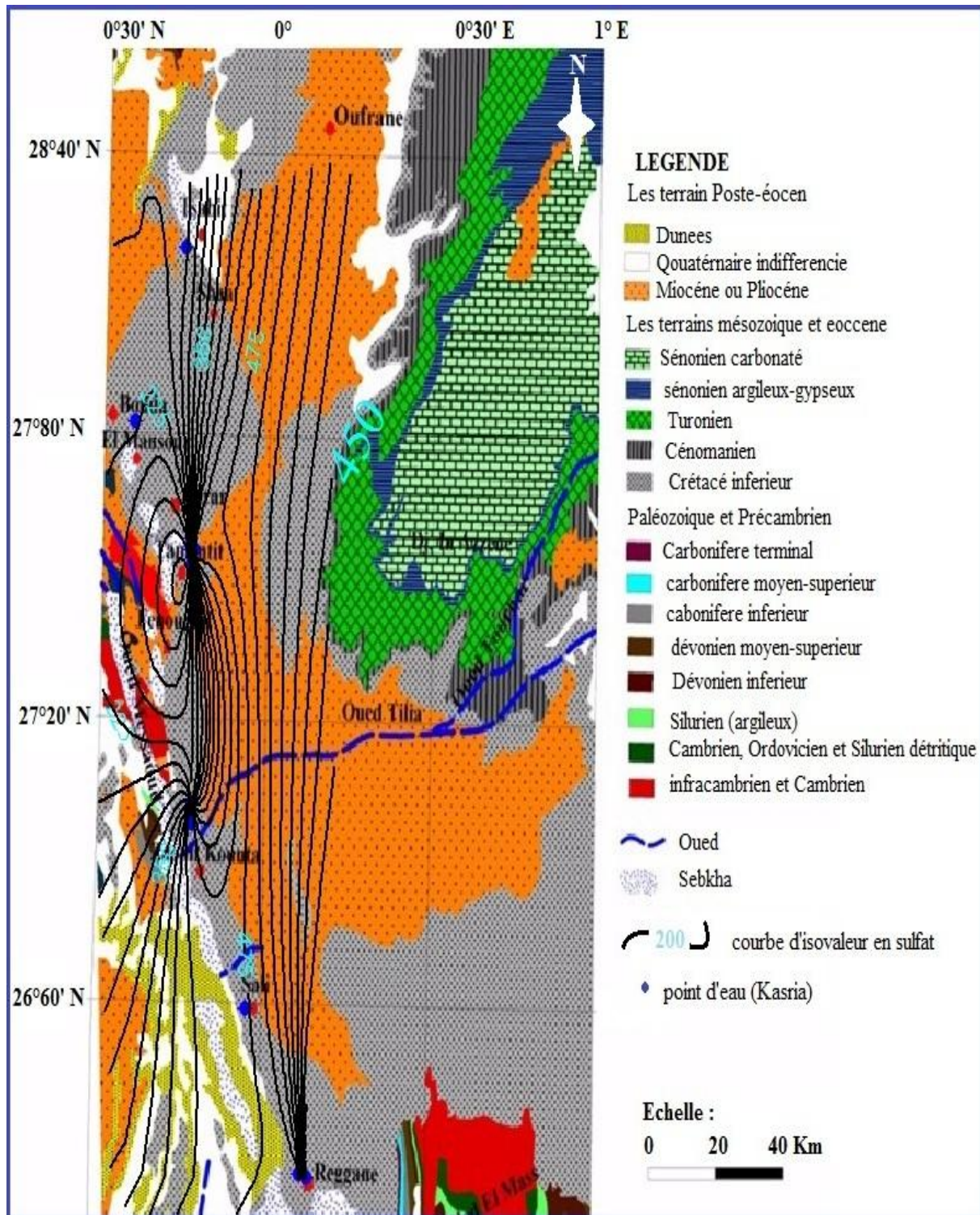


Figure 56: Carte d'isoteneur en Sulfates dans la région du TOUAT.

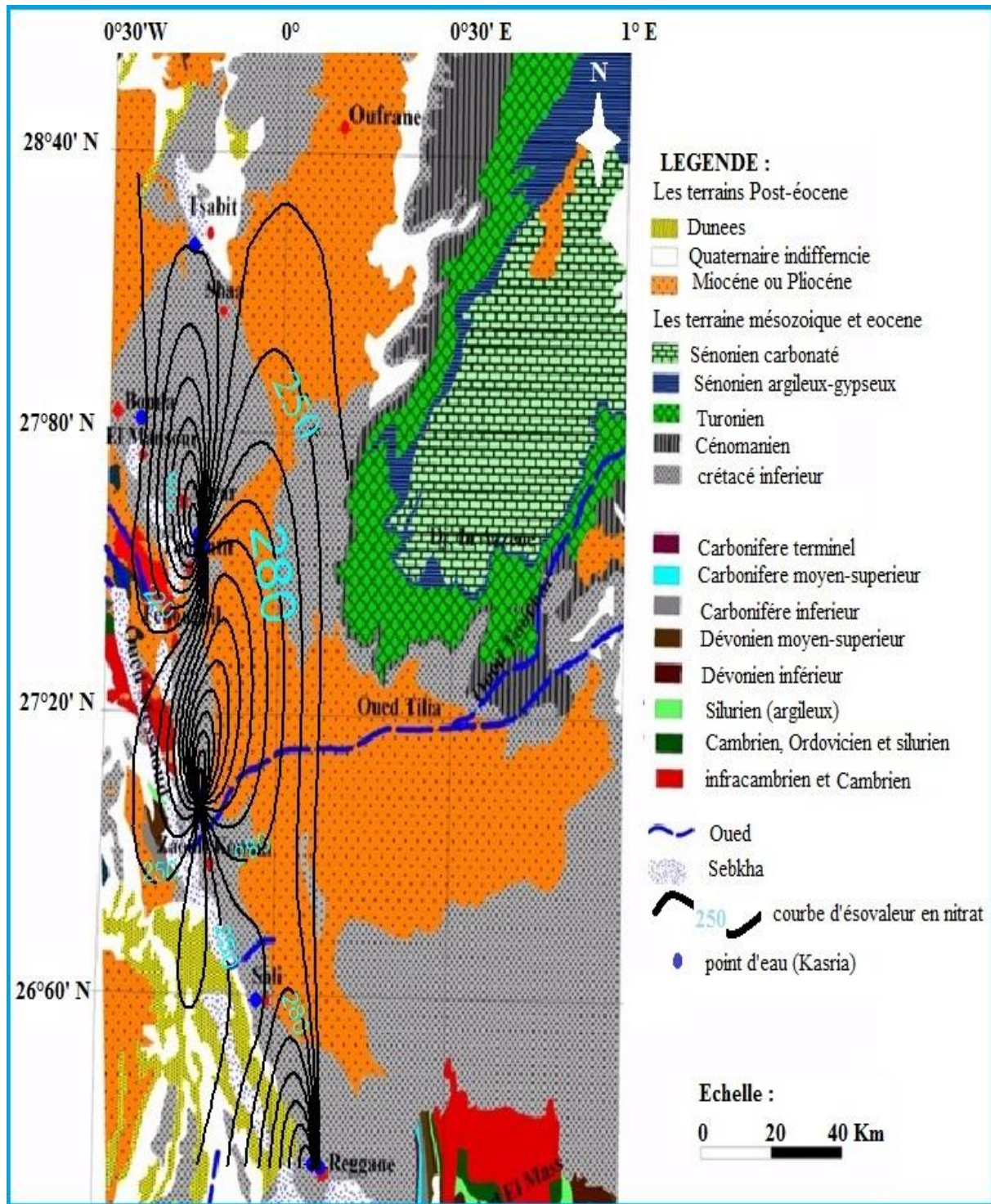


Figure 57 : carte d'isoteneur en Nitrites dans la région de TOUAT.

VI.4. Etude des valeurs relatives :

VI.4.1. Etude des rapports caractéristiques :

L'étude de variation de ces rapports permet de :

- ❖ voir l'évolution chimique des eaux pendant leur trajet souterrain ainsi que le contact avec le milieu géologique.
- ❖ donner des indications sur la zone d'alimentation et la circulation des eaux souterraines.

Les principaux rapports étudiés sont : $r \text{Ca}^{2+}/r \text{Mg}^{2+}$; $r\text{SO}_4^{2-}/r \text{Cl}^-$; $r \text{Na}^+/r \text{Cl}^-$

Tableau 25 : Calcul des rapports caractéristiques.

Nom Foggara	$r(\text{Ca}/\text{Mg})$	$r(\text{Na}+\text{k}/\text{Cl})$	$r(\text{SO}_4/\text{Cl})$
OULED LA HACEN	0,77	0,72	0,79
TIMIDAIN	1,47	1,01	0,58
SALI	1,02	0,94	0,74
MADJED ELKHIER	1,62	1,02	0,74
TAOURGH	0,26	1,65	0,46
ANHIL	1,67	1,02	0,56
ARMOUL	0,99	1,15	0,59
HANNOU	1,74	1,17	0,71
OULED YAAKOUB	1,34	1,15	0,44
BENI OUAZAL	1,29	1,10	0,56
HAMMAD	1,49	1,27	0,92
CHIBANI	1,39	0,96	0,74

4.1.1. Le rapport $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$:

On constate que :

Les résultats sont inférieures à l'unité ce qui montre que les chlorures dominent par rapport aux sulfates. Cela est lié à la dissolution des terrains salifères (formations évaporitiques gypso salines).

4.1.2. Le rapport $r(\text{Na}^++\text{K}^+)/r\text{Cl}^-$

On a :

- 75 % sont supérieures à l'unité ce qui montre prédominance de sodium et son origine concerne les dépôts évaporitiques et les formations gypso-salines.
- 25% sont inférieures à l'unité ce qui montre la prédominance des Chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles, et aux rejets domestiques et industriels.

4.1.3. Le rapport $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Mg}^{2+}$

La prédominance du magnésium par rapport au calcium est nette sur 25 % des points, les valeurs obtenues du rapport $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Mg}^{2+}$ sont inférieurs à l'unité, tandis que 75% des points sont supérieurs à l'unité ou le calcium domine. La prédominance de magnésium est liée à la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).

VI.4.2. Indices de saturation :

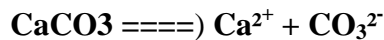
Les indices de saturations constituent un outil précieux pour la compréhension des mécanismes chimiques au sein d'un aquifère, en effet les concentrations de nombreux ions peuvent être expliquées par la présence de minéraux dans les sédiments. Afin d'étudier les

indices de saturation, il est néanmoins nécessaire d'avoir des données chimiques fiables, notamment en ce qui concerne les variables sensibles telles que le pH ou l'alcalinité. Ces indices permettent de déterminer l'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux.

$$SI = \log (IAP/K)$$

- IAP : représente le produit de solubilité exprimé à l'aide des activités.
- K : la constante d'équilibre relative à la dissolution du minéral.

Pour le cas de la calcite :



Donc le produit d'activité ionique:

$$IAP = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} ; \quad (a_{\text{Ca}^{2+}} : \text{activité de l'ion Ca}^{2+}).$$

A l'état d'équilibre thermodynamique, le produit de solubilité de la calcite (K_{CaCO_3}) est :

$$K_{\text{CaCO}_3} = (a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}}) / a_{\text{CaCO}_3}.$$

Alors, l'indice de saturation exprimé est :

$$SI = \log (IAP/K_{\text{CaCO}_3})$$

Si :

- IS = 0 : l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite
- IS > 0 : l'eau est sursaturée par rapport à la calcite
- IS < 0 : il montre que l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite Le calcul des indices de saturation a été obtenu en utilisant le logiciel Diagramme. Les résultats sont représentés dans le Tableau 26.

Tableau 26: Indices de saturation des eaux souterraines de la zone étudiée.

Nom de Foggara	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite
OULED LA HACEN	-0.06	-0.20	-0.18	-0.86	-0.19
TIMIDAIN	-0,15	-0,30	-0,08	-0,68	-0,9
SALI	-0,35	-0,50	-0,60	-0,95	-1,17
MADJED ELKHIER	-0,02	-0,16	-0,15	-0,9	-1,13
TAOURGH	-0,78	-0,93	-0,88	-1,95	-2,18
ANHIL	-0,31	-0,46	-0,77	-1,4	-1,63
ARMOUL	-0,34	-0,49	-0,59	-1,49	-1,72
HANNOU	-0,18	-0,32	-0,52	-0,88	-1,12
OULED YAAKOUB	-0,46	-0,61	-0,99	-1,58	-1,18
BENI OUAZAL	-0,11	-0,26	-0,24	-1,32	-1,55
HAMMAD	-0,38	-0,53	-0,83	-1,23	-1,45
CHIBANI	-0,27	-0,42	-0,58	-0,8	-1,02

Les minéraux carbonatés (Tableau 26) présentent des degrés de saturation différents. En effet, celui de la calcite varie de -0,78 à -0,06, suivi par celui de l'aragonite qui varie de -0,93 à -0,16 et enfin celui de la dolomite varie de -0,99 à -0,08. Tous les points n'ont pas atteint les degrés de saturation.

Les minéraux évaporitiques (Tableau 26) montrent des degrés de saturation le gypse enregistre des indices qui varient de -1,95 à -0,68 (où tous les points d'eau analysés n'ont pas atteint le degré de saturation), suivi de l'anhydrite dont l'indice varie de -2,18 jusqu'à -0,9 (tous les points sont sous-saturés).

IV.5. Potabilité chimique des eaux :

L'eau destinée à l'alimentation humaine (AEP) ne doit pas contenir de substances chimiques ou de germes nocifs pour la santé. L'évaluation de cette qualité se fait en fonction de la réglementation algérienne en vigueur.

IV.5.1. Les normes de potabilité :

Tableau 27 : Normes Algériennes de potabilité

Paramètres	unités	Concentration maximale admissible
pH		6,5-8,5
Conductivité	μS/cm à 20°C	2880
Résidu sec	mg/L après séchage à 180°C	2000
Dureté Totale	mg/L de CaCO ₃	500
Calcium	mg/L	200
Magnésium	mg/L	150
Sodium	mg/L	200
Potassium	mg/L	20
Sulfates	mg/L	400
Chlorures	mg/L	500
Nitrates	mg/L	50
Nitrites	mg/L	0,1

Tableau 28. Classification de la potabilité des eaux d'après la norme algérienne.

N de Foggara	PH	CE (µS/cm)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na+	K+	Cl- (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	
Normes	6,5-8,5	2880	200	150	200	20	500	400	50	Eau potable
OULED LA HACEN	7,85	4180	227,2	178	483,81		773,9	830	139,40	Eau non potable
TIMADAIN	8,01	3420	197,6	80,64	545,60		621,25	490	376,44	Eau non potable
SALI	7,68	2760	154	90,48	383,16		468,6	470	253,48	Eau non potable
ZAGLOU	7,94	2670	168	62,4	406,10		457,95	460	225,47	Eau non potable
TAOURAGH	8,01	2240	23,6	54,24	517,70		358,55	225	439,74	Eau non potable
ANHIL	7,9	1384	77,6	27,8	236,94		266,25	200	100,03	Eau non potable
ARMOL	7,99	1466	64,8	39,12	252,96		252,05	200	178,15	Eau non potable
HANNOU	7,81	3040	168,4	57,96	531,65		518,3	500	296,57	Eau non potable
OULED YAKOUB	7,8	1371	67,6	30,24	242,11		241,4	145	206,41	Eau non potable
BOUDA	8,13	1770	94,4	43,92	288,92		301,75	230	244,80	Eau non potable
TASABIT	7,68	1593	97,6	39,36	240,87		216,55	270	221,03	Eau non potable
CHIBANI	7,67	3250	200	86,4	474,30		568	570	253,27	Eau non potable

INTERPRETATION

- ✗ Les valeurs de calcium (Tableau12) varient entre 23,6 mg/L et 227,2 mg/L. La majorité des points d'eau présentent des concentrations conformes à la norme de potabilité 200 mg/L au Concentration Maximal Admissible (CMA). Sauf la région de OULED LA HACEN avec une valeur 227,2 qui dépasse la norme de potabilité.
- ✗ Les valeurs de magnésium (Tableau 12) sont comprises entre 27,8 et 178 mg/L. Toutes les concentrations sont conformes à la norme de potabilité 150mg/L de CMA. A part la région d'OULED LA HACEN qui dépasse la norme.
- ✗ Les valeurs de sodium et potassium varient entre 288,92mg/L qui enregistré au niveau de BENI OUAZAL et 531, 65mg/L au niveau de HANNOU. Tous les point d'eau sont supérieur à la norme de potabilité 200 mg/L de CMA.
- ✗ La concentration en sulfate (Tableau12) varie entre 145mg/L et 830 mg/l. La moitié des points présentent des concentrations inférieures à la norme de potabilité 400mg/L de CMA.
- ✗ La concentration de nitrites est comprise entre 100 ,03 et 439,97mg/L. Tous les points d'eau dépassent la norme de potabilité 50mg/L de CMA.

- ✗ La concentration de chlorure est comprise entre 216,55mg/L et 773,9mg/L. La majorité des points d'eau sont conformes à la norme de potabilité 500mg/l de CMA.
- ✗ Les valeurs de bicarbonates enregistrées (Tableau12) montrent des valeurs qui varient entre 25,62 mg/l et 39,04 mg/l. elles sont inférieures à la norme de potabilité à 500 mg/L de CMA.

IV.5.2. classification des eaux selon la dureté

Tableau.29 : Potabilité des eaux étudiées en fonction de la dureté.

TH (°F)	0-7	7-22	22-32	32-54	> 54
Qualité d'eau	douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très Dures

D'après le tableau 13, nous pouvons dire que la qualité des eaux varie d'assez douce à très dure. Les eaux étudiées sont d'une qualité dure à très dure qui caractérise les périmètres agricoles.

Tableau 30. Classification des eaux de la région d'étude à partir de la dureté totale

Qualité d'eau	Les points d'eau
Assez dure	Taourgh-Anhil-Armol- ouled yaakoub
Dure	Beni Ouazal-Hammad
Très dure	Reggane-Timdain-Sali-Mejd el khir-Hannou-Chibani

VI.6. Critères des eaux pour l'irrigation :

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. La rareté des ressources superficielles, dans ces zones, engendre une sollicitation des 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 des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué (ZAGHTOU, 2011).

6.1. Sodium Adsorption Ratio (SAR) :

Pour l'irrigation, en raison de l'effet de leurs éléments minéraux sur les végétaux, la méthode du taux d'absorption du sodium mis au point en 1969 par le US Geological Survey a été appliquée. Cette méthode fait intervenir la salinité et le risque d'alcalinisation des sols.

Le S. A. R. est donné par :

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

La concentration de chaque ion est exprimée en méq/L ; selon le taux d'absorption du sodium (S. A. R.), on a la classification des eaux (tableau 31) :

- ☞ SAR < 10 : eau à faible danger d'alcalinisation des sols, (eaux excellentes).
- ☞ 10 < SAR < 18 : eau avec un danger d'alcalinisation assez appréciable (eaux bonnes).
- ☞ 18 < SAR < 26 : eau avec un danger d'alcalinisation important (eaux convenables).
- ☞ SAR > 26 : eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort (eaux médiocres).

Tableau 31: Résultats du S. A. R.

Nom de Foggara	SAR	Qualité de l'eau
OULED LA HACEN	4,31	Eau excellente
TIMIDAIN	6,11	Eau excellente
SALI	4,48	Eau excellente
MADJED ELKHIER	5,02	Eau excellente
TAOURGH	9,89	Eau excellente
ANHIL	4,34	Eau excellente
ARMOUL	4,53	Eau excellente
HANNOU	6,66	Eau excellente
OULED YAAKOUB	4,55	Eau excellente
BENI OUAZAL	4,55	Eau excellente
HAMMAD	3,85	Eau excellente
CHIBANI	5,22	Eau excellente

6.2. Le pourcentage de sodium (classification de WILCOX)

Il est connu que le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium. Les études menées par Wilcox sur cette question ont abouti au diagramme de la figure 58. Nous avons jugé intéressant d'utiliser la classification de Wilcox, fondée sur la conductivité électrique et le pourcentage du sodium soluble dans l'eau (Louvrier, 1976), pour examiner ce problème. Le pourcentage du sodium peut être défini comme suit :

$$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \times 100$$

Tableau 32. Classification de pourcentage de sodium selon Wilcox.

Degré	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1	Excellente	C1 -S2	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité
3	Admissible	C3-S1 C3-S2 C2-S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée
4	Mediocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions. Sol très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

Selon les figures, les eaux de la région d'étude se répartissent en différentes classes, le tableau 33 montre cette classification :

Tableau 33 : classification des eaux de la région d'étude.

Classe	Région
C3-S4	Majd el khir, Anhil , Hammad , Ouelad yaakoub, Armol, Taourgh.
C4-S4	Timmadanin, Ouelad Lahcen, Beni Ouazal , Chibani, Sali.

Dans le tableau 33, la région d'étude est caractérisée par deux classes : C3-S4 et C4-S4. Elles ne conviennent pas à l'irrigation mais elles peuvent être utilisées sous certaines conditions : sol très perméables, bon lessivage et plantes tolérant très bien le sel.

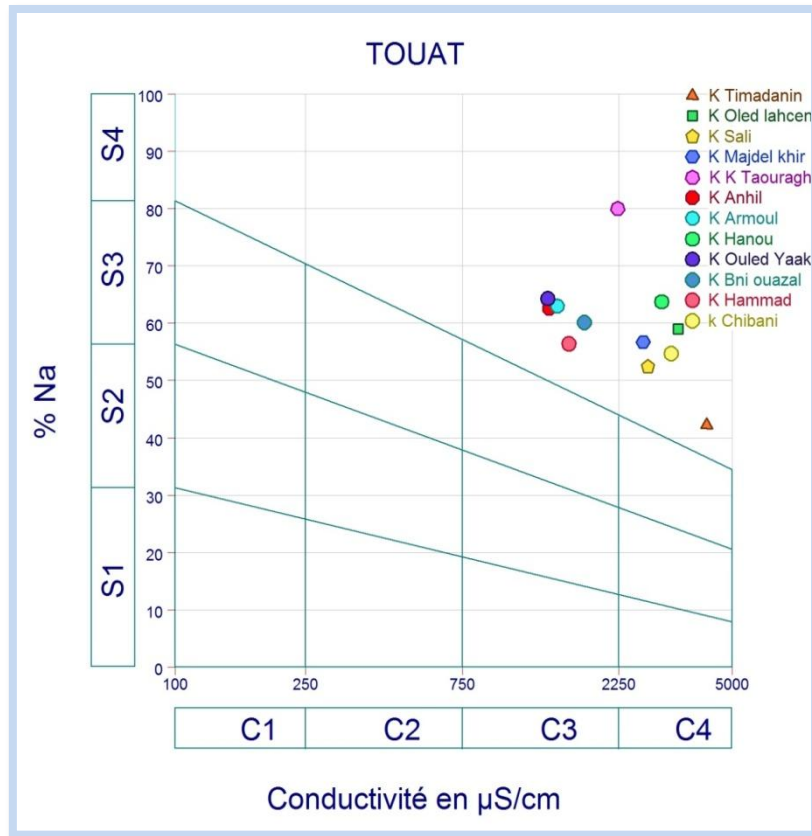


Figure 58: Diagramme de Wilcox des eaux de la région Touat.

6.3. Les indices de qualité des eaux d'irrigations :

a. Indice de perméabilité

Des études récentes (Younsi, 2001, Debieche, 2002) ont indiqué que la perméabilité du sol dépend de plusieurs autres facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Les trois premiers termes ont été combinés dans une seule formule donnant ce que l'on appelle l'indice de perméabilité (IP) défini par (Doneen, 1961).

b. Magnésium Hazard :

En générale, le calcium et le magnésium sont à l'état d'équilibre dans l'eau, le taux élevé de magnésium dans l'eau influe sur la qualité, où il devient de nature alcaline.

c. Kelly's Ratio :

L'aptitude de l'eau à l'irrigation, c'est aussi apprécié dans la base de Kelly's Ratio, le taux de sodium vers calcium et de magnésium sont utilisés comme le taux de Kelly's (Kelly's Ratio).

d. Chlorures :

Lorsqu'ils sont présents dans l'eau d'irrigation, ces éléments contribuent à augmenter la concentration des sels solubles. Des concentrations excessives de chlorures et de sulfates peuvent causer des brûlures sur le bout des feuilles du gazon et voire même entraîner la mort des plants.

Des concentrations de 250 à 400 ppm sont considérées comme indésirables pour l'irrigation des plantes sensibles aux sels. Heureusement, les sels de chlorure et de sulfate sont rapidement solubles. Ils peuvent donc être lessivés dans les sols qui se drainent bien.

e. Nitrates :

Une eau souterraine dont le milieu permet la dénitrification peut être exempte de nitrates, alors qu'une eau "polluée" par un apport important de matières organiques, d'engrais ou de rejets d'eau résiduaire peut présenter plusieurs centaines de mg/l de nitrates au-delà de la concentration maximale tolérée. L'apport de nitrates dans le sol, puis dans les eaux, est donc fortement lié à la quantité de matières organiques présente et aux conditions de milieu. Les actions anthropiques sont donc importantes : utilisation d'engrais azotés et de lisier. De même, les rejets de stations d'épuration ou plus simplement de latrines et fosses septiques représentent un apport en matières organiques susceptibles de produire des nitrates

Les indices des qualités des eaux d'irrigation sont classés dans le tableau 18.

Tableau 34 : les paramètres des qualités des eaux d'irrigation.

Indices	Formule	Classes et Qualité de l'eau
1- Magnesium Hazard (MH)	$MH = \frac{Mg \times 100}{Ca + Mg}$	<ul style="list-style-type: none"> • MH > 50 : eau ne convient pas • MH < 50 : eau convenable
2- Indice de perméabilité	$\frac{Na + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na} \times 100$	si : <ul style="list-style-type: none"> - PI supérieur à 75% l'eau est d'excellente qualité - PI entre 25% et 75 % l'eau est de bonne qualité. - PI est inférieur à 25% l'eau est de mauvaise qualité.
3- Kelly Ratio (KR)	$KR = \frac{Na}{Ca + Mg}$	<ul style="list-style-type: none"> • KR > 1 non convenable. • KR < 1 est convenable.
4- Chlorures	/	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cl < 4 méq/L pas de toxicité de l'eau (non toxique pour les plantes). ▪ 4 < Cl < 10 méq/L toxicité modérée. ▪ Cl > 10 méq/L toxicité sévère
5- Nitrates	/	<ul style="list-style-type: none"> • NO₃- < 5mg/l pas de toxicités eau. • 5 < NO₃- < 30 mg/l toxicités modéré. • NO₃- > 30 mg/l toxicité sévère

Tableau 35. Classification des eaux d'irrigation.

Nom de Foggara	IP en %	MH (még/L)	KR (még/L)	Cl (még/L)	NO3-(mg/L)
Ouled Lahcen	57,55	56,63	0,60	21,8	267,38
Timidain	69,25	40,48	1,06	17,5	378,76
Sali	64,50	49,48	0,81	13,2	277,61
Majd El Khir	67,16	38,24	0,96	12,9	311,46
Taouragh	90,11	79,30	2,93	10,1	613,32
Anhil	73,98	37,39	1,23	7,5	269,22
Armol	75,33	50,15	1,26	7,1	280,63
Hannou	73,14	36,45	1,29	14,6	413,11
Ouled Yaakoub	75,79	42,71	1,32	6,8	281,92
Beni Ouazal	71,69	43,68	1,11	8,5	282,29
Hammad	67,65	40,20	0,95	6,1	238,50
Chibani	65,48	41,86	0,89	16	323,47

INTERPRETATION :

- ✚ Les résultats de l'indice de perméabilité varient entre 64,90% et 90,11% , et montrent que l'eau est bonne pour l'irrigation.
- ✚ Les valeurs du Magnesium Hazard ont signalé que la majorité des points d'eau sont convenable pour l'irrigation sauf les points d'eau d'OULED LAHCEN, TOUARGH et ARMOL
- ✚ Les valeurs des nitrites sont comprises entre 323,47 et 613,32 mg/L et sont supérieures à 30 mg/L ce qui montre que l'eau présente une toxicité sévère.
- ✚ Les valeurs des chlorures varient entre 6,1 még/L et 21,8 még/L. Selon la classification on a deux classes de qualité d'eau : 41,67% d'une toxicité modérée et 58,33% d'une toxicité sévère.
- ✚ La classification selon le Kelly Ratio (KR) indique que la plus part des points d'eau ne conviennent pas.

CONCLUSION

L'étude hydro-chimique des eaux du C. I. dans la région de Touat, montre que :

- ✚ Ces eaux présentent une forte salinité, elles sont caractérisées par une minéralisation relativement élevée.
- ✚ Le contexte géologique de la région et la répartition spatiale des éléments chimiques montre que leurs origines sont liées principalement à la dissolution des formations essentiellement gréso-argileuses, gypso-salines du CI. Les variations de la concentration des éléments chimiques sont liées.
- ✚ L'étude des cartes d'isoteneur des éléments chimiques nous a permis de préciser la répartition quantitative des divers éléments dissous et de suivre leur évolution dans l'espace. Donc généralement leur évolution se fait suivant la direction principale

d'écoulement (de Tademaït vers la dépression de Touat). Les faibles concentrations trouvent en amont hydrodynamique et les fortes concentrations se trouvent dans les zones dépressionnaires.

✎ Les faciès chimiques caractérisent les eaux de la région d'étude :

- un faciès prédominant : le faciès Chloruré sodique
- et les autres faciès ; sulfaté sodique, Chloruré calcique et Sulfaté calcique.

Ces eaux se classent donc parmi les eaux dures à caractère incrustant et potabilité douteuse. Malgré leur qualité médiocre, ces eaux souterraines sont utilisées pour l'alimentation en eau potable.

Plusieurs facteurs ont contribué à l'acquisition de la minéralisation de la nappe du C. I. :

✎ Principalement par la contamination lithologique des terrains géologiques de la région et essentiellement les terrains du Crétacé inférieur (grès, argiles,...).

✎ Par le lessivage et la dissolution des terrains sus-jacents à l'échelle régional (calcaire du Cénomaniens, terrains calcaire-marneux du Turonien, formations lagunaires du Sénonien inférieur, terrains carbonatés du Sénonien supérieur, terrains carbonatés et évaporitiques de l'Eocène et les terrains du Mio-Plio-Quaternaire).

✎ l'infiltration directe et indirecte surtout au niveau des zones d'alimentation (piémonts du l'Atlas Saharien, Plateau du Tademaït) qui traverse ces formations géologiques, où :

- les terrains calcaires chargent les eaux par les ions Ca^{2+} , HCO_3^- , par la dissolution. Ce qui est confirmé par les cartes d'isoteneur en minéraux.
- les terrains salifères et gypsifères riches en gypses et en sels, chargent les eaux en ions Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} .

L'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, comme fertilisants, augmente les concentrations en éléments de NO_3^- .

L'irrigation par des eaux salées provoque la salinisation des sols et augmente ainsi la minéralisation par le retour des eaux à la nappe.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE :

Les raisons qui nous ont incités à entreprendre ce travail ainsi que les objectifs assignés ont été exposés dans l'introduction. Nous avons essayé d'aborder les problèmes par plusieurs approches indépendantes espérant converger vers un même résultat.

Le réseau hydrographique dans l'ensemble du Sahara Septentrional témoigne des écoulements endoréiques de surface au cours des périodes humides du Quaternaire.

Cette région est drainée par deux principaux oueds : Oued Messaoud, qui est l'ancien affluent de la rive gauche de l'oued Saoura, et Oued Tilia qui draine le versant occidental du plateau de Tademaït.

La géologie de la région de Touat est basée sur la description géologique et les informations fournis par les travaux de prospections géophysiques réalisés par SONATRACH et par les forages pétroliers ainsi que les travaux géologiques réalisés dans la région ont mis en évidence l'existence d'une structure d'importance hydrogéologique.

En général, les forages réalisés dans cette région ont mis en évidence des terrains constitués dans l'ensemble, de grès quartzeux, d'argile, d'argile sableuse, de grès parfois roses de sable, de marnes parfois rouges et de grès sableux.

La région d'étude est caractérisée par un climat saharien de type hyper aride. Ce type de climat est caractérisé par deux saisons : saison froide relativement courte ; saison plus chaude et relativement longue.

Les précipitations sont quasi nulles et irrégulières dans le temps et dans l'espace, elles ne dépassent pas les 20 mm/an ce qui ne constitue que 0.94 % du volume total de l'évapotranspiration potentielle. La température moyenne mensuelle est très élevée durant toute l'année et elle dépasse les 46°C en période estivale avec une moyenne annuelle de l'ordre de 25-26 °C.

L'étude hydrogéologique a permis de montrer que la nappe du Continental Intercalaire appelée aussi nappe de l'Albien constitue la seule ressource en eaux souterraine dans la région. Elle possède une grande extension régionale, elle forme avec la nappe du Complexe Terminal ce qu'on appelle le Système Aquifère du Sahara septentrionale (SASS). Cette nappe est captive dans la partie centrale et orientale du bassin, et libre sur la partie occidentale du bassin qui forme l'exutoire naturel de la nappe.

La carte piézométrique régionale de la nappe du CI, montre deux directions principales d'écoulement: généralement du Nord vers le Sud (piémonts de l'Atlas saharien vers Gourara et Touat) et de l'Est vers l'Ouest (du Plateau de Tademaït vers Touat). D'autres paramètres (pompages et irrigation) peuvent également intervenir dans les modifications locales de la piézométrie de la nappe.

Le système traditionnel des foggaras très adapté aux conditions climatiques et sociales de notre région permet une exploitation rationnelle des eaux de cette exploitation insuffisante avec l'augmentation des besoins notamment pour l'agriculture, car il y a des foggaras qui ont un faible débit et occupe une large surface.

L'eau s'écoule à une profondeur de la surface du sol de façon continue, pendant toute l'année, le débit de la foggara varie d'une foggara à une autre selon la nature du terrain traversé et d'une année à une autre selon les conditions climatiques, dans la région de Touat, Les débits des foggaras diminuent à cause de l'abaissement de niveau de la nappe.

Actuellement, plusieurs problèmes menacent ce système audacieux des foggaras qui assure la vie de plusieurs générations depuis le passé. Le plus dangereux est celui de l'exploitation intensive de la nappe par les forages avec le temps cela va provoquer un tarissement des foggaras.

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe du CI constitue un complément indispensable à l'étude hydrogéologique, elle permet d'apporter de nombreuses informations sur le milieu dans lequel les eaux souterraines circulent, la nature de l'encaissant, les zones d'alimentation et de circulation, la potabilité des eaux...

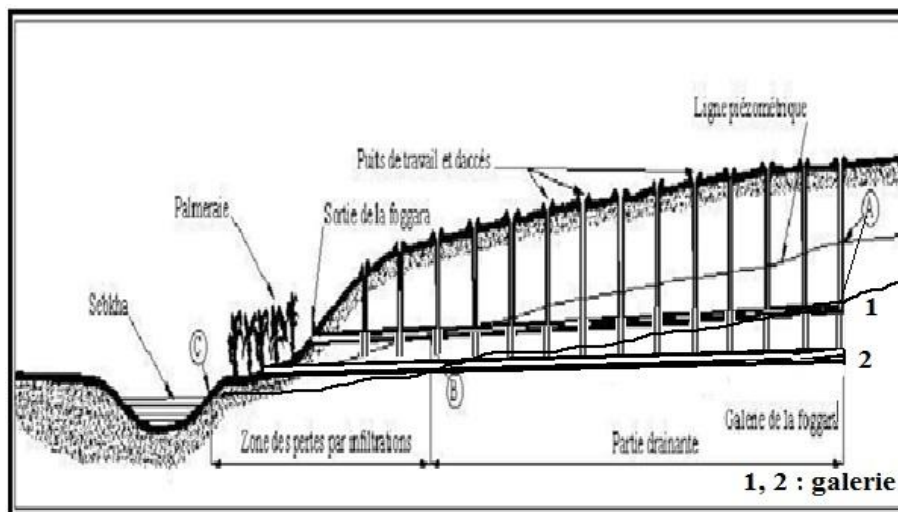
La partie de l'étude chimique et l'analyse en composantes principale montrent les liens des éléments chimiques de même famille et de même origine par la domination des éléments évaporitiques (sulfates) et salins (chlorures).

Cette étude a évoqué aussi la relation entre l'évolution de la palmeraie et les eaux des foggaras d'où l'augmentation de la salinité des eaux. Cette dernière a participé à la dégradation de la palmeraie de la région d'Adrar.

RECOMMANDATIONS

Plusieurs recommandations peuvent être proposées :

- ✗ La modernisation des outils de curage et travail pour le prolongement des galeries pour diminuer le temps du travail dans une foggara ceci va abaisser le prix de revient du mètre cube d'eau de la foggara.
- ✗ L'amélioration de l'état de connaissance des ressources en eau sur le plan quantitatif et qualitatif et fournir un état de référence pour la planification et la gestion à long terme des ressources en eau.
- ✗ Le processus d'élaboration d'un schéma d'aménagement des ressources en eau devra se construire sur la base d'un état de référence.
- ✗ Réhabiliter le réseau d'irrigation traditionnel (Madjen et séguia) pour réduire au maximum les pertes d'eau par évaporation et par infiltration.
- ✗ Réaliser un traitement préalable des rejets avant qu'ils atteignent les sebkhas et les oueds, et surveiller en permanence leur qualité.
- ✗ Modélisation mathématique du système d'écoulement des foggaras.
- ✗ Interdiction d'utiliser les foggaras comme lavoirs publics par la dispersion des détergents dans la palmeraie.
- ✗ Imperméabilisation de la zone non drainante de la foggara pour diminuer le volume d'eau perdu par infiltration et évaporation.
- ✗ Définir les périmètres de protection pour les foggaras, et champs des captages de AEP, et éviter l'implantation ces ouvrages à proximité des foggaras pour empêcher toutes influences et interférences.
- ✗ Approfondir les puits amonts dans les foggaras taries pour compenser le rabattement et dépasser à nouveau le niveau piézométrique et en pomper l'eau pour la redistribuer dans le système. Sinon, plus difficile et plus cher, rabaisser tous les puits de la foggara et sa galerie au niveau adéquat.



Coupe schématique d'une foggara après le rabattement

Références bibliographiques

ABELLAH B. et DJAAFRI M., (2002). Etude hydrogéologique de la région d'Aoulef (Tidikelt Occidental), Mémoire d'ingénieur d'état, uni. Oran.

ABIDI N., (2010). Les foggaras de Touat la fierté de la population locale.

AKKOUCHE M., (2007). Application de la datation par traces de fission à l'analyse de la thermicité de bassins à potentialités pétrolières. Exemple de la cuvette de Sbaâ et du bassin de l'Ahnet-Nord (plate-forme saharienne occidentale, Algérie) Thèse de doctorat d'état, université de Bordeaux1, France.

ANRH. Des forages (1998) et foggaras (2011) de la région du Touat.

ARSENAULT C., (2002). Le magnésium, nutriment essentiel à la santé la Josette officielle. Le magazine des jeunes familles, Vol 2, N°6.

ASKRI H. ET AL, (2001). Géologie de l'Algérie. Contribution de SONATRACH Division Exploration, Centre de Recherche et Développement et Petroleum Engineering and Development Division. 93p.

BABASY M., (2005). Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara septentrional, Thèse de Doctorat en Géologie, Faculté de Tunis, Tunisie.250p.

BENHAMZAM., (2011). Aperçu hydrogéologique et hydrochimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines « foggara » dans la région d'Adrar, Mém, Magister, U. B. M. Annaba, 130 p.

BESBES M., LARBES A., BABASY M. et MERZOUGUI B., (2005). Modélisation du Système Aquifère du Bassin Occidental du Sahara Septentrional, Première Phase : Hydrogéologie et Modèle Conceptuel. Rapport final d'OSS. Tunis. 64p

BONNET A. et al.,(1960) - Le Carbonifère post-tassilien du bassin de Reggane (Sahara occidental). *Bull. Soc.géol.de FR.*, 7ème série, t.II, p. 534-539.

BOUTADARA Y., (2009). Etude hydrogéologique des systèmes de captage traditionnels dans les oasis sahariennes. Cas des foggaras de la région du Touat (Adrar). Mém, Magister, USTO ORAN, 118p.

CLAIRBOIS, BIRMANDEIS, ALGERIE. Pp : 163-168.

CONRAD G., (1969). L'évolution Continentale Du Sahara Algérien (Saura, Erg Chach, Tanezrouft, AhnetMoydir), édition du centre national de la recherche scientifique Paris, pp. 49-65. , 527p.

CONRAD J. LEMOSQUET Y., (1984). Du craton vers sa marge: évolution sédimentaire et structurale du bassin Ahnet- Timimoun-Bechar (Sahara Algérien) au cours du Carbonifère. Données paléoclimatiques. *Bull. Soci. Géol. France*, Série 7, 26 (6). 987-994).

Delapparent A. F., (1947) cours hydrogéologie.

DUBIEF J., (1953). Essai Sur L'hydrologie Superficielle Au Saharien, direction du service de la colonisation et de l'hydraulique service des études scientifiques.

FABRE J., (1976). Introduction à la géologie du Sahara algérien. SNED, Alger, Algérie, 422p.

FABRE J., (2005). Géologie du Sahara occidental et central, musée royal de l'Afrique centrale – Belgique, 610p.

FABRE, 1976 et RIES, 2003, FABRE J., (2005). Géologie Du Sahara Occidental Et central, vol 8 édition Terouren Africain Géosciences collection Belgique.

HADJ FATEH I. et ROUAS D., (2013) .Etude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe du Continental Intercalaire de la région de Touat (wilaya d'Adrar), Mém, Ing, Ourgla, 122p.

HAMADI H., (1982). Quelques observations sur le système d'irrigation et la répartition des eaux des foggaras à Aoulef. pp. 35-46.

HASSANI M. I., (1988). Les méthodes traditionnelles de captage des eaux souterraines, dans le Sahara algérien, Revue techniques et sciences n°6, pp.20-24.

KHODJAOUI A., (2008) Le Dévonien inférieur de bassin de Reggane (Sahara occidental algérien) : sédimentologie, bio-stratigraphie et stratigraphie séquentielle. Thèse. Magister. Univ. Boumerdès, p. 6-25.

Killan C., (1931). Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr. Paris.

KOBORI I. et al., (1982). Case studies of foggara oases in the Algeria Sahara and Syria, University of Tokyo, 144p.

Labidi.O, S. et al., (2009) Géo-aquifère ; Rapport Final ; Observatoire du Sahara et du Sahel.

NASRI B., (2003). Étude hydrochimique des eaux d'APE d'Adrar. Rapport de stage.

Nedjah. N et al., (2011). Protection des eaux souterraines de la région d'Adrar des infiltrations d'eau usée par application du lagunage naturel, p228.

Observation Sahara et du Sahel (2002). SASS, une conscience de bassin, volume 4, modèle mathématique.271p.

Observation Sahara et du Sahel (2003) .Système Aquifère du Sahara Septentrional «SASS», Gestion commune d'un bassin transfrontière, Principaux résultats.12p.

Observation Sahara et du Sahel, (2004). Système aquifère du Sahara septentrional, Modèle Mathématique, Volume4, 271p.

Observation Sahara et du Sahel., (2003a) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Rapport interne. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie. 275p.

Observation Sahara et du Sahel., (2003b). Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4 : Modèle Mathématique. Projet SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p.

ONM, Données climatiques (2014). Station météorologique d'Adrar

OULD BABA SY M. (2005). Recharge et paléo-recharge du système aquifère du Sahara septentrional. *Thèse Doc*, univ : de Tunis EL MAN271p.

P.N.U.D., (1986). L'eau et le Maghreb: un aperçu sur le présent de l'héritage et l'avenir. Rapport, pp. 131-143.

REMINE B, ACHOUR B. Juin 2008. Les foggaras du Grand Erg Occidental Algérien », LARYSS, journal n° 07.

René A., (1985). L'eau en Algérie, Office des publications Universitaires, 388 p.

RODIER J., 2009. Analyse de l'eau. 9^{ème} édition. Paris, 1526 p.

TAHA A., (2005). Système traditionnel d'exploitation des eaux souterraines. Communication présentée au CIRESS–Décembre 2005.

UNESCO, (1972). Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. Plaquette 5. Utilisation des modèles pour l'établissement des programmes d'exploitation. 340p

YOUNSI A., (2001). Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salures des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée. Chaouia côtière, Maroc. Thèse de doctorat d'état, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc.

ZAGHTOU A., (2011). Etude hydrogéologique et hydrochimique des eaux de la nappe du continental intercalaire dans la région d'adjar (toutat) MAGISTER, 143.

SITES WEB:

Site internet 1

http://www.dcwadjar.dz/fr/index.php?option=com_content&view=article&id=157&Itemid=467&showall=1.

Site internet 2 : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Adjar_\(Alg%C3%A9rie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Adjar_(Alg%C3%A9rie))

Site internet 3 <http://algerie.lachainemeteo.com/meteo-algerie/ville/previsions-meteo-adjar-91736-0.php>.

Site internet 4

<http://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2001/adjar/valeurs/60620.html>

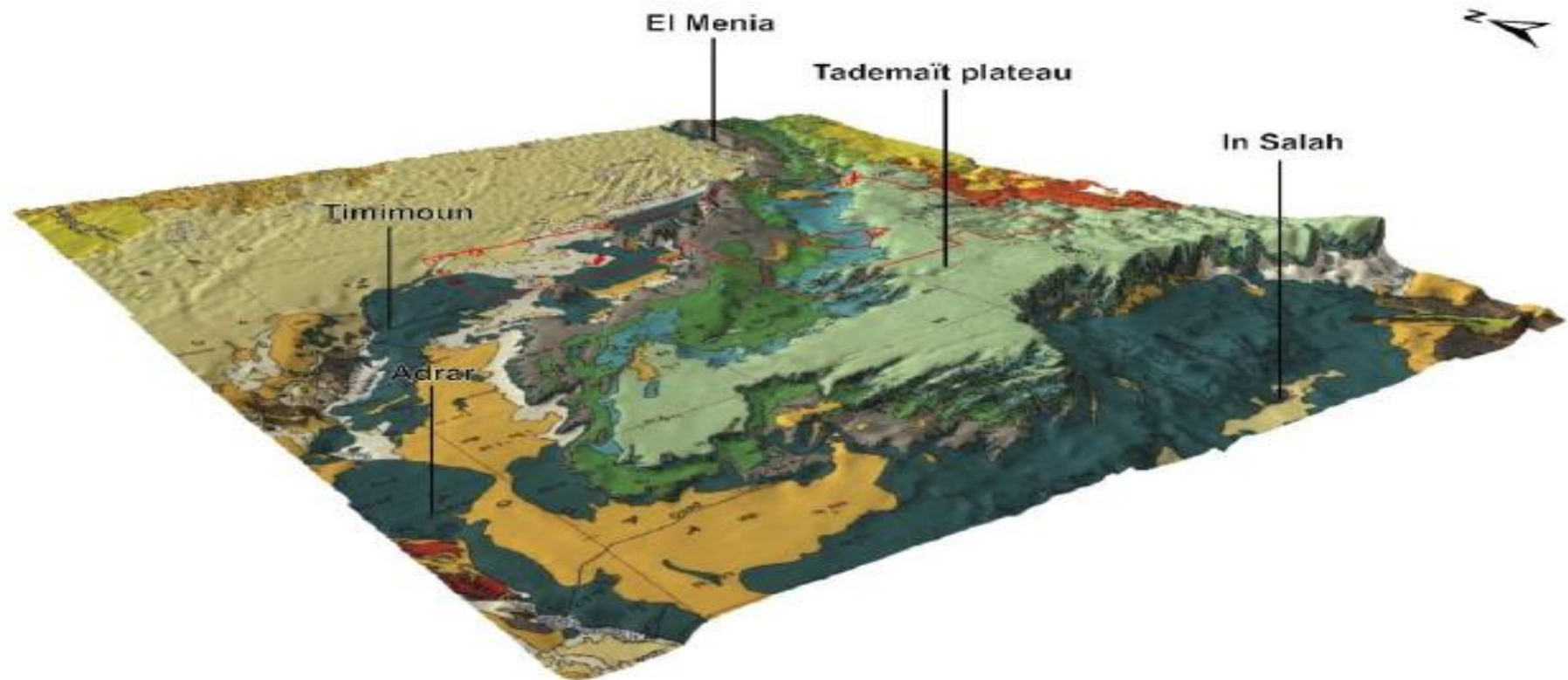
Site internet 5 <http://en.tutiempo.net/climate>

Site internet 6 http://www.ouargla-aps.dz/spip.php?page=imprimer&id_article=17619
LES FOGGARAS, PATRIMOINE UNIVERSEL (OBSERVATOIRE).

Site internet 7 <http://amistimimoun.free.fr/8Adjar/Foggara.pdf>

Logiciels utilisés : Surfer 8 ; MapInfo 7,5 ; Xlstat Version7 ; Diagramme.

ANNEXES



Carte géologie de la région d'étude forme 3D

Tableau : Résultat des analyses physico-chimique des points d'eau (foggara) de la région de TOUAT.

Nom de foggara	PH	CE (µs/cm)	Ca ²⁺ (méq/L)	T de l'aire °c	T de l'eau °c	Mg ²⁺ (méq/L)	(Na+k) (méq/L)	Cl ⁻ (méq/L)	SO ₄ ²⁻ (méq/L)	CO ₂ (méq/L)	HCO ₃ ⁻ (méq/L)	NO ₃ (méq/L)	TA	TA C (°F)	Duret (°F)
OULED LA HACEN	7,85	4180	11,6	26	24	14,83	15,61	21,8	17,29	1,36	0,46	2,25	0	2,3	82
TIMDANIN	8,01	3420	9,88	30	22,9	6,72	18	17,5	10,21	0,91	0,42	6,07	0	2,1	130
SALI	7,68	2760	7,7	25	23,75	7,54	12	13,2	9,79	0,82	0,52	4,09	0	2,6	76
MAJD EL KHIR	7,94	2670	8,4	30	23,05	5,20	13	12,9	9,58	0,91	0,58	3,64	0	2,9	68
TAOURGH	8,01	2240	1,18	21	23,05	4,52	17	10,1	4,69	1,00	0,52	7,09	0	2,6	28
ANHIL	7,9	1384	3,88	34,2	21,5	2,32	7,64	7,5	4,17	0,82	0,56	1,61	0	2,8	31
ARMOL	7,99	1466	3,24	33	21,7	3,26	8	7,1	4,17	0,55	0,52	2,87	0	2,6	32
HANNOU	7,81	3040	8,42	34	20,75	4,83	17	14,6	10,42	0,91	0,6	4,78	0	3	66
OULED YAAKOUB	7,8	1371	3,38	33	20,85	2,52	8	6,8	3,02	0,64	0,56	3,33	0	2,8	29
BENI OUAZAL	8,13	1770	4,72	26	22,5	3,66	9	8,5	4,79	0,91	0,46	3,95	0	2,3	42
HAMMAD	7,68	1593	4,88	25	23,15	3,28	8	6,1	5,63	0,91	0,64	3,57	0	3,2	41
CHIBANI	7,67	3250	10	25,5	23,15	7,20	15	16	11,88	1,09	0,54	4,09	0	2,7	85

N de foggara	X (m)	Y (m)	Type_	Objet	Usage_	etat_actue	Etat	Débit_Jaug L/s	Débit_Anci L/s	Longueur_F (m)	N_Puits_
K Hammad	683761,01	2987476,56	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	1	2	1	200
K Bni wazal	640462,09	3026175,64	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	5,5	0	5	270
K Anhil	582730,17	3025434,99	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité				
K Hannou	581273	3027975,2	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité				
K Armoul	581388,64	3028704,28	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité				
ouled aisa	578890,62	3031111,4	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité				
K Tawragh	492685,96	3054152,63	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	6	2,3	10	300
chibani	489355,27	3055263,61	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	/	/	/	
K Majdel khir	486394,66	3057300,41	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	1,8	4,7	1,15	80
K Sali	408308,55	3063966,27	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	0,5	0,56	1	80
K OUelad lahcen	336143,65	3063410,78	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	7	9	7,5	400
K Timadanin	341694,8	3068780,51	Foggara	Exploitation	Irrigation	PERENNE	Exploité	10	15,66	4,5	500

Les fiches techniques des forages

N°BIRH: N004-00168

Designation: TILILANE II **Profondeur:** 175 M
Longitude: 0°16' **NS:** 7 m
Latitude: 27°56' **ND:** 13.5 m
Z: 272 m **Débit:** 26 l/s



Profondeur	Coupe lithologique	Description géologique	Cotés en (m)	Etages	Coupe technique	Observation
0		Grès blanc à gris avec un peu de sable et calcaire	0.00			
6		Grès avec argile rouge	6.00			
12		Argile plastique rouge et brun mélangée avec sable	12.00			
20		Grès tendre avec un peu d'argile	26.00			
26		Gravier et grès avec un peu d'argile	32.00			
30		Gravier argileux	44.00			
40		Sable et argile avec un peu de gravier	55.00			
50		Argile sableuse avec gravier	63.00			
60		Gravier sableux avec argile	80.00			
70		Zone mélange sable et argile et gravier	90.50			
80		Argile sableuse avec gravier	96.00			
90		Sable avec argile brun et un peu de gravier	105.00			
100		Gravier moyen à grossier avec un peu d'argile	139.00			
110		Gravier grossier rond et angulaire	175.00			
139		Gravier, grès avec un peu d'argile				
140		Grès et gravier avec un peu d'argile				
150		Grès avec argile brun et rouge 10 à 20%				
175		Sable fin avec un peu d'argile				
180		Fin de forage				

Usage_ouvrage: Date de travaux: 06/1984 Date fin: 07/1984 Etat:	Daira: ADRAR Commune: ADRAR Lieu dite: TILILANE Réalisé par:
--	---

Date fin: 07/1984 Etat:	Lieu dite: TILILANE Réalisé par:
----------------------------	-------------------------------------

N° BIRH : 0004-00533

Désignation : AZZI 14

Profondeur : 150

Localisation : X : 00°08'47"

Ns : 19,30 m

Y : 27°14'47"

Debit : 40 l/s

Z :

ND :



AGENCE NATIONALE DES
RESSOURCES HYDRAULIQUES
DIRECTION REGIONALE SUD-OUEST ADRAR

Profondeur	Coupe Lithologique	Description géologique	Cotes en (m)	Etage	Coupe technique
0		dalle verte calcaire-gréseuse	4		
5		grès rouge tendre siliceux	9		
10		grès vert abrasif	14		
15		gravier moyen siliceux	24		
20		grès jaune tendre	34		
25		gravier fin et sable fin	34		
30		sable fin	34		
35		gravier	49		
40		grès rouge ferrugineux	54		
45		argile rouge gréseuse	54		
50		argile rouge compact	69		
55		argile rouge gréseuse	69		
60					
65					
70					
75					
80					
85					
90					
95					
100					
105		argile rouge sableuse + peu de gravier	104		
110		grès rouge argileux	114		
115		argile rouge gréseuse			
120					
125					
130					
135					
140					
145					
150					

Usage : IRR

Date debut de travaux : 29/03/92

Date fin de travaux : 24/05/92

Rabattement :

Daira : Zet-Kounta

Commune :

Lieu dite : AZZI (Foggarate azzi)



Photo : seguia de foggara morte (Hadje fateh et Rouas, 2011).



Photo : Sebkha De Tillouline (Hadje fateh et Rouas, 2011).



Photo sécessions des puits

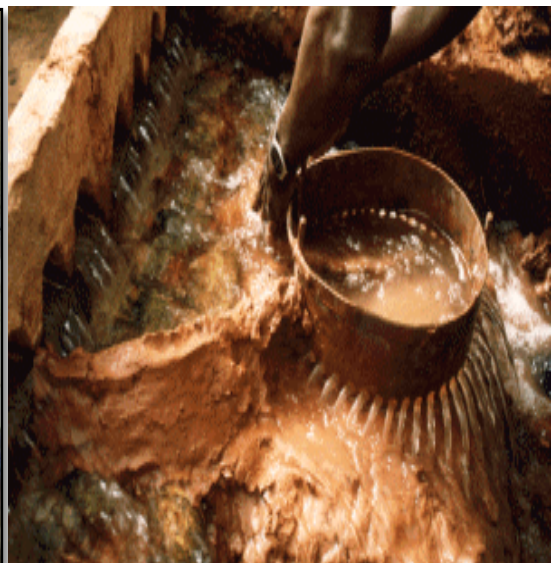


Photo : l'outil de La mesure de l'eau (chegfa) et l'expert de la mesure "kiyal el ma"(Hadje fateh et Rouas, 2011).

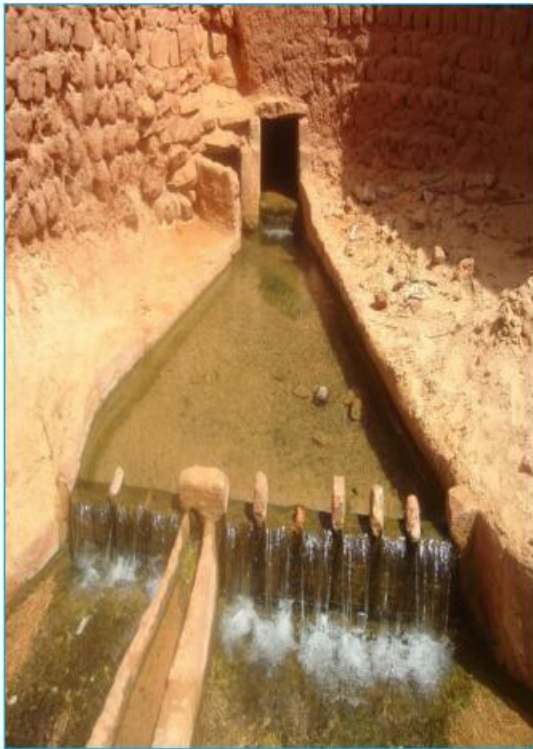


Photo : Différent type de Kasriya



Photo : différent type de seguia



Photo: le madjen fabrique en argile.



Photo : Irrigation oasienne par submersion



(a)- Afrague : Brise-vent Lutte contre l'ensablement (Zaghtu, 2011).



(b)- Salinisation des sols agricole



(c)- Influence de la sécheresse



(d)- Influence de la salinité (Sur les jardins)



(e)- Influence de la sécheresse

Photos 6: Impact environnemental- (a), (b), (c), (d), (e). (Zaghtu, 2011).



(a)- Exposition des seguias à la pollution



(b)- Conduite d'assainissement dans la nappe



(c)- Fuite proche d'une foggara

Photos 7: Pollution et impact environnemental- (a), (b), (c) (Zaghtu, 2011).



Photos 8: Rejet des eaux usées dans le milieu naturel (Zaghtu, 2011).

Ages	Système	Etages	Lithologie	Epaisseur (m)	
MEZ		Plio-Pleistocene		20-233	
		Continental Inter.		37-347	
PALEOZOIQUE	Carbonifère	Disc. hercyn. Namurien		26 1033	
		Viséen	D		77-284
			C		223 335
			B		354 376
			A		185
		Collis à l'ridet		381	
		Tournaisien		85-215	
	Dévonien moyen	Strunien		50-266	
		Famennien		190 1248	
			Frasnien		21 244
		Dev.Moy.	otvetan		2131
		Dévonien inf.	Eifelien		21-93
	Emslien			17-125	
	Praguien Lochkovien			57-215	
	Silurien			87 738	
	Ordovicien			18 183	
Cambrien			65-539		
		socté		10	

Coupe synthétique du bassin de Reggane (document Sonatrach, in Khodjaoui, 2008).
(JAKANI et MOKADDEM ,2014).