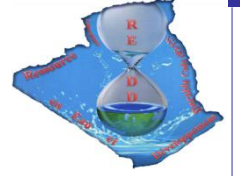




وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA

Laboratoire Ressource en Eau
et Développement Durable

جامعة باجي مختار - عنابة

REDD

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MEMOIRE DE MAGISTER

Option: Qualité des eaux et impact sur l'homme et l'environnement

THEME

***APERÇU HYDROGEOLOGIQUE ET
HYDROCHIMIQUE SUR LE SYSTEME DE CAPTAGE
TRADITIONNEL DES EAUX SOUTERRAINES
« FOGGARA » DANS LA REGION D'ADRAR***

Présenté par : **BENHAMZA MESSAOUD**
Ingénieur d'État en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba

Promoteur: **Mr. L. DJABRI**

Pr. **U.B.M. Annaba**

Soutenu publiquement
Devant le jury composé de :

Président : **Mr. A. HANI**

Pr. **U.B.M. Annaba**

Examineur : **Mr. H. CHAFFAI**

M.C.A **U.B.M. Annaba**

Mr. S. CHAAB

M.C.A **U.B.M. Annaba**

2012/2013

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À la mémoire de ma mère

A mon cher père que dieu le garde

A ma femme pour son soutien et encouragement.

A mes anges, Abdelhak, Mohammed El amine et

Zakaria, j'ai pris de votre temps pour ce modeste

Travail, qu'ils me pardonnent.

A mon frère et mes sœurs.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire de la direction Régionale de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Adrar. J'exprime ma reconnaissance au directeur Régionale : Mr Ansari Taïa, pour son amitié, aide et soutien pour la réalisation de ce travail, qu'il trouve ici ma considération.

Je tiens particulièrement à remercier le Professeur Larbi Djabri, directeur du laboratoire Ressource en Eau et Développement Durable université Badji Mokhtar Annaba, pour avoir dirigé ce travail et pour sa patience et sa gentillesse, qu'il trouve ici mes respects.

J'exprime ma reconnaissance et remerciement au Professeur Hani Azzeddine, Dr. Chaab Salah et Dr. Chaffai Hicham pour avoir accepté de juger ce travail.

A mes enseignants de l'université Badji Mokhtar Annaba qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

A mes collègues de l'ANRH pour leurs soutiens.

Également à toute la promotion magister 2007 et 2008 pour leur respect et soutien moral.

Un remerciement particulier à mon ami Handouzi Med Ali, je te remercie vivement de ton aide.

ACRONYMES

ADE : Algérienne Des Eaux.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

BURGEAP : Bureau d'Études de Géologie Appliquée

CI : Continental Intercalaire.

CEP : Compagnie d'Exploration Pétrolière.

CT : Complexe Terminal.

DEM : Digital Élévation Model.

DRE : Direction des Ressources en Eau (ex. DHW)

DSA : Direction des Services Agricole.

ERESS : Étude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional.

ETP : Évapotranspiration Potentielle.

ETR : Évapotranspiration Réelle.

GPS : Global Positioning System.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

PDGDRS : Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes.

SASS : Système aquifère du Sahara septentrional.

SI : Système d'information.

SIG : Système d'information géographique.

UNESCO : United Nations Éducation Science and Culture Organisation.

GLOSSAIRE

Aghisrou : Canal qui se trouve entre le peigne répartiteur et le premier puits de la foggara.

Amazer : La partie enlevée de la galerie lors de son approfondissement.

Aud : Tige ou une partie de plante.

Chahed : Le témoin de la foggara.

Chegfa : Outil de mesure du débit de la foggara.

Djemaâ : Conseil de la tribu ou du Ksar.

El Hassab : Le comptable de la foggara qui fait les calculs du débit.

Erg : Dune de sable.

Foggara : Galerie souterraine qui draine l'eau de la nappe vers la surface du sol.

Fouaha : Puits, Hassi, ou bien cône de puits de foggara.

Gourara : Région de Timimoun entre Aougrou et Zaouiet Debagh.

Guemoun : Petite parcelle de culture dans le jardin.

Habba : Graine, unité de mesure du débit de la foggara.

Halafa : Outil de mesure du débit de la foggara signifie « par laquelle on jure ».

Hamada : Plateau rocheux.

Hassi : Puits de foggara.

Kasria : Peigne partiteur de forme triangulaire ou rectangulaire.

Kébira : La Grande

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

Khorga : Trou.

Kial Asfar : Le mesureur jaune.

Kial El Ma : Le mesureur d'eau.

Kirat : Carat, unité de mesure de débit.

Kraa : Jambe, extension d'une foggara.

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

Louh : Outil de mesure de débit de la foggara « bois plane ».

Machte : Brosse, construction à la fin de Kasria aide à l'acheminement des parts d'eau.

Majen : Bassin d'accumulation des eaux.

Majra : Canal de la foggara.

Nfad : Galerie drainante qui relie tous les puits de la foggara.

Nouba : Débit reçu dans un intervalle de temps.

Oued : Cours d'eau.

Sbaâ : Doigt.

Sebkha : Dépression salée ou gypseuse.

Seghéria : La Petite

Seguia : Rigole, canal.

Tarha : Extension de la foggara.

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

Tmen : Le huitième.

Touat : Région d'Adrar entre Tsabit et Reggane.

Ratba : Extension de la foggara.

Reg : Surface plane couverte de sable et gravier.

Zemam : Registre dans lequel les informations de la foggara sont inscrites.

Liste des Figures

| N° | Titre de figure | Page |
|---------------------|---|------|
| Chapitre. I | | |
| Figure n° 1.1 : | Situation géographique de la région..... | 01 |
| Figure n° 1.2 : | Répartition communale de la wilaya d'Adrar..... | 02 |
| Figure n° 1.3 : | Traits morphologiques en 3D de la zone d'étude..... | 03 |
| Figure n° 1.4 : | Répartition des bassins du Sahara Algérien..... | 05 |
| Figure n° 1.5 : | Extrait de la carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien drapée Sur MNT (G.Busson, 1967)..... | 07 |
| Figure n° 1.6 : | Diagramme géologique de la région d'étude..... | 10 |
| Figure n° 1.7 : | Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14 (OSS, 2004)..... | 11 |
| Figure n° 1.8 : | Situation des coupes géologiques dans le bassin occidental..... | 12 |
| Figure n° 1.9 : | Coupes géologiques AA, BB, CC dans le bassin occidental..... | 13 |
| Figure n° 1.10 : | Situation des profils Géologiques dans la région d'étude..... | 14 |
| Figure n° 1.11 : | Profils géologiques A, B et C dans le bassin Occidental..... | 15 |
| Figure n° 1.12 : | Profils géologiques D, E dans le bassin occidental..... | 16 |
| Figure n° 1.13 : | Profils géologiques en 3 D dans le bassin de l'Erg Occidental ... | 17 |
| Chapitre. II | | |
| Figure n° 2.1 : | Variations moyennes annuelles des températures..... | 20 |
| Figure n° 2.2 : | Variations moyennes mensuelles des températures..... | 21 |
| Figure n° 2.3 : | Carte des isohyètes dans le domaine du SASS (M.Ould Baba Sy 2004) | 21 |
| Figure n° 2.4 : | Variation interannuelle des précipitations | 22 |
| Figure n° 2.5 : | Variation des moyennes mensuelles des précipitations..... | 23 |
| Figure n° 2.6 : | Diagramme Ombrothermique pour la période (1991-2010)..... | 23 |
| Figure n° 2.7 : | Humidité relative station Adrar..... | 24 |
| Figure n° 2.8 : | Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone..... | 26 |
| Figure n° 2.9 : | Climagramme d'Emberger station d'Adrar..... | 27 |

| N° | Titre de figure | Page |
|----------------------|--|------|
| Chapitre. III | | |
| Figure n° 3.1 : | Carte géologique drapée sur diagramme hydrogéologique du bassin Occidental | 31 |
| Figure n° 3.2 : | Carte de l'épaisseur de la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar | 33 |
| Figure n° 3.3 : | Carte d'altitude du Substratum de la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar..... | 34 |
| Figure n° 3.4 : | Carte géologique drapée sur Diagramme hydrogéologique de la région d'Adrar | 35 |
| Figure n° 3.5 : | Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar, 1971..... | 38 |
| Figure n° 3.6 : | Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar, décembre 2007..... | 39 |
| Figure n° 3.7 : | Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar, Mars 2010..... | 41 |
| Figure n° 3.8 : | Carte piézométrique du Continental Intercalaire Autour de la ville d'Adrar, Décembre 2007..... | 42 |
| Figure n° 3.9 : | 9 Carte piézométrique du Continental Intercalaire Autour de la ville d'Adrar, Mars 2010..... | 43 |
| Figure n° 3.10 : | Carte de la Transmissivité (m^2/s) du Continental Intercalaire C.I..... | 45 |
| Figure n° 3.11: | Carte du Coefficient d'emmagasinement du Continental Intercalaire. | 46 |
| Figure n° 3.12: | Simulation des rabattements dans la région d'Adrar..... | 48 |
| Chapitre. IV | | |
| Figure n° 4.1 : | Carte de positionnement des foggaras et forages de la zone d'étude sur image satellite..... | 51 |
| Figure n° 4.2 : | Schéma descriptif d'une foggara..... | 54 |
| Figure n° 4.3 : | Schéma en perspectif d'une foggara..... | 56 |
| Figure n° 4.4 : | Réseau ramifié des foggaras autour de la ville d'Adrar sur image Satellite..... | 57 |

| N° | Titre de figure | Page |
|---------------------|---|------|
| Chapitre. IV | | |
| Figure n° 4.5 : | Vue d'ensemble des éléments de la foggara..... | 59 |
| Figure n° 4.6 : | Kiel El Ma avec son Louh (Boutadara.Y, 2009)..... | 60 |
| Figure n° 4.7 : | Schéma de fonctionnement d'une foggara..... | 63 |
| Figure n° 4.8 : | Évolution des débits des foggaras par commune (1960-2011)..... | 66 |
| Figure n° 4.9 : | Comparaison de l'évolution de la palmeraie sur un fond topographique et Satellitaire..... | 69 |
| Figure n° 4.10 : | Évolution de tarissement des foggaras de 1960-2011..... | 71 |
| Figure n° 4.11 : | Évolution des niveaux d'eau dans les puits des foggaras en 2007..... | 73 |
| Figure n° 4.12 : | Évolution des niveaux d'eau dans les puits des foggaras en 2010..... | 74 |
| Figure n° 4.13 : | Profil le long de la foggara Cheurfa (Ouled Brahim, Commune Timmi)..... | 75 |
| Chapitre. V | | |
| Figure n° 5.1: | Carte de la Conductivité électrique des eaux des foggaras de la région d'Adrar..... | 80 |
| Figure n° 5.2: | Carte de Résidu Sec des eaux des foggaras de la région d'Adrar (Année 2011)..... | 81 |
| Figure n° 5.3: | Carte de la dureté de l'eau des foggaras dans la région d'Adrar (Année 2011)..... | 82 |
| Figure n° 5.4: | Répartition des faciès chimiques des eaux des foggaras dans la région d'Adrar..... | 83 |
| Figure n° 5.5: | Carte de Calcium (2011)..... | 85 |
| Figure n° 5.6: | Carte de Magnésium (2011)..... | 85 |
| Figure n° 5.7: | Carte de Sodium (2011)..... | 85 |
| Figure n° 5.8: | Carte de Potassium (2011)..... | 85 |

| N° | Titre de figure | Page |
|--------------------|--|------|
| Chapitre. V | | |
| Figure n° 5.9 : | Carte des Chlorures (2011)..... | 87 |
| Figure n° 5.10 : | Carte des Sulfates (2011)..... | 87 |
| Figure n° 5.11 : | Carte des Bicarbonates (2011)..... | 87 |
| Figure n° 5.12 : | Carte des Nitrates (2011)..... | 87 |
| Figure n° 5.13 : | Carte de l'Ammonium (2011)..... | 88 |
| Figure n° 5.14 : | Carte des Phosphates (2011)..... | 88 |
| Figure n° 5.15 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune d'Adrar et Timmi | 89 |
| Figure n° 5.16 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Bouda | 90 |
| Figure n° 5.17 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Tamentit | 90 |
| Figure n° 5.18 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras des communes de Fenoughil et Tamest..... | 91 |
| Figure n° 5.19 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Zaouiet Kounta..... | 91 |
| Figure n° 5.20 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune d'In Zeghmir..... | 92 |
| Figure n° 5.21 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras des communes de Reggane et Sali..... | 92 |
| Figure n° 5.22 : | Diagramme de Schöeller des eaux des foggaras des communes d'Adrar et Timmi..... | 93 |
| Figure n° 5.23 : | Diagramme Schöeller Commune de Bouda..... | 94 |
| Figure n° 5.24 : | Diagramme Schöeller Commune de Tamentit..... | 94 |
| Figure n° 5.25 : | Diagramme Schöeller Fenoughil Communes de Fenoughil et Tamest | 94 |
| Figure n° 5.26 : | Diagramme Schöeller Commune de Zaouiet Kounta..... | 94 |
| Figure n° 5.27 : | Diagramme Schöeller Commune de d'In Zeghmir..... | 95 |
| Figure n° 5.28 : | Diagramme Schöeller Communes de Reggane et Sali..... | 95 |

| N° | Titre de figure | Page |
|--------------------|---|------|
| Chapitre. V | | |
| Figure n° 5.29 | Relation Na-Cl..... | 96 |
| Figure n° 5.30 : | Relation SO ₄ -Ca | 96 |
| Figure n° 5.31 : | Relation Na-Ca | 97 |
| Figure n° 5.32 : | Relation SO ₄ -Na | 98 |
| Figure n° 5.33 : | Relation SO ₄ -Mg | 98 |
| Figure n° 5.34 : | Relation K-Cl | 99 |
| Figure n° 5.35 : | Relation EC-TH..... | 99 |
| Figure n° 5.36 : | Représentation graphique en ACP des eaux des foggaras 2011..... | 101 |
| Figure n° 5.37 : | Représentation graphique des Individus, 2011..... | 101 |
| Figure n° 5.38 : | Représentation graphique en ACP des eaux des foggaras 1960..... | 103 |
| Figure n° 5.39 : | Représentation graphique des Individus, 1960..... | 103 |
| Figure n° 5.40 : | Diagramme de Richards des eaux des communes d'Adrar et Timmi..... | 105 |
| Figure n° 5.41 : | Diagramme de Richards Commune de Bouda..... | 106 |
| Figure n° 5.42 : | Diagramme de Richards Commune de Tamentit | 106 |
| Figure n° 5.43 : | Diagramme de Richards Communes de Fenoughil et Tamest | 106 |
| Figure n° 5.44 : | Diagramme de Richards Commune de Zaouiet Kounta | 106 |
| Figure n° 5.45 : | Diagramme de Richards Commune d'In Zeghmir | 107 |
| Figure n° 5.46 : | Diagramme de Richards Communes de Reggane et Sali | 107 |

| N° | Titre de figure | Page |
|--------------------|--|------|
| Chapitre. V | | |
| Figure n° 5.47 : | Variation des Éléments Chimiques des eaux des Foggaras entre 1960 et 2011..... | 109 |
| Figure n° 5.48 : | Cartes de l'évolution du Calcium (1960 - 2011)..... | 110 |
| Figure n° 5.49 : | Cartes de l'évolution du Magnésium (1960 - 2011)..... | 111 |
| Figure n° 5.50 : | Cartes de l'évolution de Sodium (1960 - 2011)..... | 112 |
| Figure n° 5.51 : | Cartes de l'évolution des Chlorures (1960 - 2011)..... | 113 |
| Figure n° 5.52 : | Cartes de l'évolution des Sulfates (1960 - 2011)..... | 114 |
| Figure n° 5.53 : | Cartes de l'évolution des Bicarbonates (1960 - 2011)..... | 115 |
| Figure n° 5.54 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras Année 1960..... | 116 |
| Figure n° 5.55 : | Diagramme de Piper des eaux des foggaras Année 2011..... | 116 |

Liste des Tableaux

| N° de Tab | Titre de tableau | Page |
|----------------------|---|------|
| Chapitre. II | | |
| Tableau n° 2.1 : | Caractéristiques de la station pluviométrique d'Adrar..... | 19 |
| Tableau n° 2.2 : | Température moyenne annuelle station Adrar (1991-2010)..... | 20 |
| Tableau n° 2.3 : | Données sur la vitesse des vents dans la station d'Adrar..... | 24 |
| Tableau n° 2.4 : | Données sur l'Insolation dans la station d'Adrar..... | 25 |
| Tableau n° 2.5 : | Bilan d'eau selon C.W.Thornthwaite à la station d'Adrar..... | 28 |
| Chapitre. III | | |
| Tableau n° 3.1 : | Inventaire des points d'eau dans la région d'étude..... | 36 |
| Tableau n° 3.2 : | Débit extrait dans la région d'étude..... | 47 |
| Chapitre. IV | | |
| Tableau n° 4.1 : | Unités de mesure du débit de la foggara d'après (Remini.B, 2008)..... | 61 |
| Tableau n° 4.2 : | Tableau des sous multiples de Habba..... | 61 |
| Tableau n° 4.3 : | Tableau des sous multiples de Kirat..... | 61 |
| Tableau n° 4.4 : | Récapitulative des foggaras de la région d'étude..... | 65 |
| Tableau n° 4.5 : | Évolution des débits totaux des foggaras..... | 65 |
| Tableau n° 4.6 : | Débit des foggaras par commune (année 1960,1998 et 2011)..... | 66 |
| Tableau n° 4.7 : | Superficie des palmeraies de la zone d'étude..... | 68 |
| Chapitre. V | | |
| Tableau n° 5.1 : | Valeur propre de l'année 2011..... | 100 |
| Tableau n° 5.2 : | Matrice de corrélation de l'année 2011..... | 100 |
| Tableau n° 5.3 : | Valeur propre de l'année 1960..... | 102 |
| Tableau n° 5.4 : | Matrice de corrélation de l'année 1960..... | 102 |
| Tableau n° 5.5 : | Classification des eaux d'irrigation (méthode Richards)..... | 104 |
| Tableau n° 5.6 : | Classification des eaux de la région d'étude..... | 105 |
| Tableau n° 5.7 : | Variation des Éléments Chimiques entre 1960 et 2011..... | 108 |

Table des Matières

| N° | | Page |
|---------|---|------|
| | <i>Introduction Générale</i> | 1 |
| | <i>Chapitre I : CADRE PHYSIQUE ET GEOLOGIQUE</i> | |
| 1.1 | Situation géographique..... | 1 |
| 1.2 | Aspect géomorphologique et topographique..... | 2 |
| 1.2.1 | Le Plateau..... | 2 |
| 1.2.2 | L’Erg..... | 3 |
| 1.2.3 | Le Reg..... | 3 |
| 1.2.4 | La Dépression..... | 3 |
| 1.2.5 | Réseau Hydrographique..... | 4 |
| 1.3 | Aspect Socio-Economique..... | 4 |
| 1.3.1 | Agriculture..... | 4 |
| 1.3.2 | L’Élevage..... | 4 |
| 1.3.3 | Industrie..... | 4 |
| 1.3.4 | Tourisme..... | 4 |
| 1.4 | Géologie de la région..... | 5 |
| 1.4.1 | Situation Générale..... | 5 |
| 1.4.2 | Géologie de la région d’étude..... | 6 |
| 1.4.2.1 | Le Quaternaire | 6 |
| 1.4.2.2 | Le Complexe Terminal (CT)..... | 6 |
| 2a | Le Mio-Pliocène | 6 |
| 2b | L’Éocène..... | 8 |
| 2c | Le Sénonien | 8 |
| 1.4.2.3 | Le Turonien..... | 8 |
| 1.4.2.4 | Le Cénomaniens... .. | 8 |
| 1.4.2.5 | Le Continental intercalaire (CI)..... | 8 |
| 5a | L’Albien..... | 9 |
| 5b | L’Aptien..... | 9 |
| 5c | Le Barrémien..... | 9 |
| 5d | Le Néocomien..... | 9 |
| 1.4.2.6 | Le Jurassique..... | 9 |
| 1.4.2.7 | Le Trias..... | 10 |
| 1.4.2.8 | Le Paléozoïque..... | 10 |
| 8a | Le Carbonifère..... | 10 |
| 8b | Le Dévonien..... | 10 |
| 8c | Le Silurien..... | 10 |
| 8d | L’Ordovicien..... | 10 |
| 1.4.2.9 | Le Précambrien..... | 11 |
| 1.4.3 | Paléorecharge..... | 11 |
| 1.4.4 | Coupes géologiques..... | 12 |
| 1.4.5 | Profils géologiques..... | 14 |
| | Conclusion..... | 18 |

Chapitre II : HYDROCLIMATOLOGIE

| N° | | Page |
|-----------|---|-------------|
| 2.1 | Introduction..... | 19 |
| 2.2 | La Température..... | 19 |
| 2.2.1 | Variations des températures moyennes annuelles..... | 19 |
| 2.2.2 | Variations des températures moyennes mensuelles | 21 |
| 2.3 | La Précipitation..... | 22 |
| 2.3.1 | Variations interannuelles des précipitations..... | 22 |
| 2.3.2 | Variations moyennes mensuelles des précipitations | 22 |
| 2.3.3 | Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN..... | 23 |
| 2.4 | Le Vent..... | 24 |
| 2.5 | Humidité relative de l'air..... | 24 |
| 2.6 | L'insolation..... | 25 |
| 2.7 | Détermination des indices climatiques..... | 25 |
| 2.7.1 | Indice d'aridité de DE MARTONNE | 25 |
| 2.7.2 | Climagramme d'Emberger..... | 26 |
| 2.8 | Évapotranspiration..... | 27 |
| 2.8.1 | Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle)..... | 27 |
| 2.8.1.1 | D'après la formule de C.W .Thornthwaite..... | 27 |
| 2.8.2 | Estimation de l'ETR (l'évapotranspiration réelle)..... | 28 |
| 2.8.2.1 | ETR selon la formule de Turc..... | 28 |
| 2.9 | Bilan hydrique..... | 28 |
| | Conclusion..... | 29 |

Chapitre III : HYDROGEOLOGIE

| | | |
|---------|---|-----------|
| 3.1 | Définition du système aquifère..... | 30 |
| 3.2 | Le Continental Intercalaire dans la région d'étude..... | 30 |
| 3.3 | Épaisseur du Continental Intercalaire..... | 32 |
| 3.4 | Lithologie de la nappe du Continental Intercalaire..... | 32 |
| 3.5 | Piézométrie du Continental Intercalaire..... | 36 |
| 3.5.1 | Inventaire des points d'eau..... | 36 |
| 3.5.2 | Piézométrie..... | 37 |
| 3.5.2.1 | Piézométrie de 1971..... | 37 |
| 3.5.2.2 | Piézométrie de Décembre 2007..... | 37 |
| 3.5.2.3 | Piézométrie de Mars 2010 | 40 |
| 3.5.2.4 | Évolution piézométrique entre 2007 et 2010 autour de la ville d'Adrar.... | 40 |
| 3.6 | Paramètre hydrodynamique de la nappe du Continental Intercalaire C.I.... | 40 |
| 3.6.1 | Transmissivité T..... | 40 |
| 3.6.2 | Coefficient d'Emmagasinement S..... | 44 |
| 3.7 | Estimation des réserves et recharge de la nappe du C.I..... | 44 |
| 3.8 | Débit d'Exploitation | 47 |
| 3.9 | Simulation des rabattements dans la région d'Adrar..... | 47 |
| | Conclusion..... | 49 |

**Chapitre IV : SYSTÈME DE CAPTAGE TRADITIONNEL DES
EAUX « FOGGARA »**

| N° | | Page |
|--------|---|------|
| 4.1 | Introduction..... | 50 |
| 4.2 | Historique de la Foggara..... | 50 |
| 4.3 | Étymologie « Foggara »..... | 52 |
| 4.4 | Situation géographique des foggaras | 52 |
| 4.5 | Naissance d'une foggara..... | 52 |
| 4.5.1 | Une source..... | 52 |
| 4.5.2 | Puits Amont..... | 53 |
| 4.5.3 | Puits Aval..... | 53 |
| 4.6 | Composition de la foggara | 53 |
| 4.6.1 | Le Puits « Hassi »..... | 53 |
| 4.6.2 | La Galerie « N'fad »..... | 55 |
| 4.6.3 | L'Aghisrou..... | 55 |
| 4.6.4 | Canal Principal « Majra » | 55 |
| 4.6.5 | Peigne Répartiteur « Kasria » | 58 |
| 4.6.6 | Rigole « Seguia » | 58 |
| 4.6.7 | Bassin « Majen » | 58 |
| 4.7 | Mesure et partage du débit de la foggara | 58 |
| 4.7.1 | Outil de mesure | 60 |
| 4.7.2 | Unité de mesure..... | 60 |
| 4.7.3 | Mesure du débit | 62 |
| 4.7.4 | Partage du débit | 62 |
| 4.8 | Fonctionnement de la foggara | 62 |
| 4.9 | Type de foggara | 63 |
| 4.9.1 | Foggara de l'Erg | 64 |
| 4.9.2 | Foggara du plateau..... | 64 |
| 4.9.3 | Foggara du Jardin..... | 64 |
| 4.9.4 | Groupement de foggaras | 64 |
| 4.10. | Recensement des foggaras..... | 64 |
| 4.10.1 | Inventaires des foggaras..... | 64 |
| 4.10.2 | Historique du débit..... | 65 |
| 4.11 | Nettoyage et entretien de la foggara..... | 67 |
| 4.12 | Relation Palmeraie-Foggara | 67 |
| 4.13 | Relation Forage-Foggara..... | 70 |
| 4.14 | Relation société-Foggara..... | 70 |
| 4.15 | Cartographie des foggaras..... | 70 |
| 4.15.1 | Carte de tarissement des foggaras | 70 |
| 4.15.2 | Carte de profondeur de la galerie..... | 72 |
| 4.16 | Les contraintes qui agissent sur la foggara | 76 |
| | Conclusion..... | 77 |

| N° | Chapitre V : HYDROCHIMIE | Page |
|---------|---|-------------|
| 5.1 | Introduction..... | 78 |
| 5.2 | Les Compagnes d'échantillonnages..... | 78 |
| 5.3 | Analyse de l'eau..... | 79 |
| 5.3.1 | Les paramètres physico-chimiques..... | 79 |
| 5.3.1.1 | La température..... | 79 |
| 5.3.1.2 | La Conductivité..... | 79 |
| 5.3.1.3 | Potentiel Hydrogène | 81 |
| 5.3.1.4 | Résidu Sec | 81 |
| 5.3.1.5 | Dureté totale..... | 82 |
| 5.3.2 | Les paramètres chimiques..... | 83 |
| 5.3.2.1 | Balance Ionique..... | 83 |
| 5.3.2.2 | Les Faciès chimiques | 83 |
| 5.3.2.3 | Les éléments majeurs..... | 84 |
| | 3a Le Calcium (Ca^{++})..... | 84 |
| | 3b Le Magnésium (Mg^{++})..... | 84 |
| | 3c Le Sodium (Na^+)..... | 84 |
| | 3d Le Potassium (K^+)..... | 84 |
| | 3e Les Chlorures (Cl^-)..... | 86 |
| | 3f Les Bicarbonates (HCO_3^-)..... | 86 |
| | 3g Les Sulfates (SO_4^-)..... | 86 |
| 5.3.2.4 | Les éléments de pollution..... | 86 |
| | 4a Les Nitrates (NO_3^-)..... | 86 |
| | 4b Les Nitrites (NO_2^-)..... | 86 |
| | 4c L'Ammonium (NH_4^+)..... | 88 |
| | 4d Les Phosphates (PO_4^-) | 88 |
| 5.3.3 | Représentation graphique..... | 89 |
| 5.3.3.1 | Digramme de PIPER..... | 89 |
| 5.3.3.2 | Diagramme de SCHOELLER BERKALOFF..... | 93 |
| 5.3.4 | Relation chimiques..... | 95 |
| | 4a Sodium-Chlorure (Na-C)..... | 95 |
| | 4b Sulfates-Calcium (SO4-Ca)..... | 95 |
| | 4c Sodium-Calcium (Na-Ca) | 97 |
| | 4d Sulfates-Sodium (SO4-Na)..... | 97 |
| | 4e Sulfates- Magnésium (SO4-Mg)..... | 98 |
| | 4f Potassium-Chlorure (K-Cl) | 99 |
| | 4g Conductivité – Dureté (EC-TH)..... | 99 |

| N° | | Page |
|-----------|--|-------------|
| 5.4 | Analyse en Composantes Principales (ACP) | 100 |
| 5.4.1 | Compagne de l'année 2011 | 100 |
| 5.4.2 | Compagne de l'année 1960..... | 102 |
| 5.5 | Eau d'Irrigation | 104 |
| 5.6 | Étude comparative | 106 |
| | Conclusion..... | 117 |
| | Conclusion Générale et Recommandations..... | 118 |
| | Bibliographie..... | 121 |
| | Annexes..... | 124 |

ملخص

يشكل نظام السقي التقليدي "الفقارة" العمود الأساسي في حياة سكان الواحات في منطقة أدرار، التوسع العمراني، التطور الفلاحي و الصناعي، النمو الديموغرافي لهم علاقة بوفرة المصادر المائية اللجوء إلى إستخراج كميات معتبرة من المياه في العشرية الأخيرة لسد الحاجيات المتزايدة، باستعمال الطرق الحديثة للبحث و الإستخراج ، عدم صيانة الفقاقير، تراجع و هبوط مستوى منسوب الطبقة المائية للقاري المتناوب على المستوى الجهوي أثر سلبا على الفقاقير.

هذه الحالة أنتجت مخلفات سلبية من ناحية كمية و نوعية مياه الفقارة، هذه الأخيرة انخفض منسوب مياهها و تردت نوعيته ، فالواحة التي تسقيها غيرت ماضيها الأخضرالى مستقبل مظلم، العديد من الفقارات تركت فماتت.

هذه الدراسة سمحت بالإرتكاز على المعلومات السابقة و الحالية ، إعطاء نظرة على حالة الفقاقير في منطقة أدرار مع إعطاء بعض المقترحات لحماية و المحافظة على هذا النظام كموروث إنساني مشترك. هذه الأم "الفقارة" التي ولدت و حافظت على ديمومة الواحات في قلب منطقة تعتبر من أشد المناطق قساوة في العالم.

مفتاح الكلمات: الفقارة، نظام السقي التقليدي، أدرار ، القاري المتناوب، الواحة، هيدروكيميا.

Résumé

Le système de captage traditionnel des eaux « foggara » constitue l'élément fondamental de la vie des oasisiens de la région d'Adrar.

L'extension urbaine, le développement agricole et industriel, la croissance démographique sont eux-mêmes en relation étroite avec la disponibilité de la ressource hydrique, la nécessité d'extraire des grands volumes d'eau pour subvenir au besoin croissant ces dernières décennies par l'utilisation des nouvelles techniques d'explorations et d'exhaures, le manque d'entretien de la foggara, l'abaissement et/ou le rabattement du niveau piézométrique de la nappe du Continental Intercalaire à l'échelle régional ont une grande influence sur le fonctionnement de la foggara.

Cette situation a engendré des effets néfastes sur la quantité et sur la qualité physico-chimique de l'eau de la foggara, cette dernière voit son eau diminuer et sa qualité dégradée de plus en plus, la palmeraie qu'elle serve a changé son passé vert par un avenir sombre, de nombreuses foggaras sont abandonnées et tarées.

Cette étude a permis en s'articulant sur les anciennes et actuelles informations de donner un aperçu sur l'état actuelle des foggaras de la région d'Adrar et de suggérer quelques recommandations pour la sauvegarde et le maintien de ce système comme un bien commun de l'humanité, puisque c'est grâce à cette mère "la foggara" pour la naissance et la pérennité des oasis de la région d'Adrar au cœur d'une région parmi les zones les plus hostiles au monde.

Mots Clés : Foggara, Adrar, système de captage traditionnel, Continental intercalaire, Oasis, Hydrochimie.

Abstract

The system of traditional collecting of water "Foggara" constitutes the fundamental element in the life of the Adrar oasis area.

The urban extension, the agricultural and industrial development, the demographic growth are themselves in close connection with the availability of the hydrous resource, the need for extracting from great volumes of water to provide for the increasing need in the last decades by the use a new techniques of explorations and pumping, the lack of maintenance of foggaras, lowering and/or the folding back of the water level of the aquifer Intercalary Continental Guide has the scale regional have a great influence on the operation of will foggara.

This situation generated harmful effects on the quantity and on the physicochemical quality of the foggaras water, the foggara sees its water decreases and its more and more degraded quality, the palm plantation that it serf changed her passed green by a dark future, the many ones foggaras are given up and dried up.

This study in articulated on the old and current data to give an outline on the state current of the foggaras in Adrar area and to give some recommendations for the safeguard and the maintenance of this system like a common good of humanity, since it is thanks to this mother "foggara" for the birth and perennity of the oases in Adrar area inside the heart of an area among the most hostile zones in the world.

Keywords: Adrar, Foggara, Traditional system of water collecting, Intercalary Continental, Oasis, Hydrochemical.

***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***

Introduction Générale

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.

Cette étude a pour objectif, de donner les grandes lignes de fonctionnement du système traditionnel de captage des eaux dit « foggara » qui représente l'exutoire Ouest de la nappe du Continental Intercalaire C.I, de faire un diagnostic des différents paramètres qui influent sur le bon fonctionnement de ce système et de suivre l'évolution quantitative et qualitative des eaux de ce système durant les 50 ans passées (1959-2011).

Ce travail est divisé en Cinq chapitres :

- Le premier chapitre s'articule autour des caractéristiques naturelles de la région d'Adrar (situation géographique, géomorphologie, caractéristiques des sols et géologie de la région).
- Le deuxième chapitre traite les caractéristiques du climat de la région d'Adrar.
- Le troisième chapitre est consacré aux ressources en eau souterraines, ainsi que le diagnostic de l'état actuel des ressources de la nappe du Continental Intercalaire.

Les deux chapitres spécifiques à la foggara :

- Le quatrième chapitre est consacré à la description et au fonctionnement de la foggara.

- Le cinquième chapitre est consacré à la qualité physico-chimique des eaux des foggaras.

Peu sont les études réalisées pour comprendre le fonctionnement hydraulique et hydrogéologique du système foggara et aussi qui traite le volet qualité physico-chimique des eaux des foggaras, nous a conduits de faire ce travail pour donner un mérite à ce système, de l'étudier pour sensibiliser et convaincre les décideurs de le protéger et de le sauvegarder, c'est un patrimoine national et mondial.

CHAPITRE I

***CADRE PHYSIQUE ET
GÉOLOGIQUE***

I. CADRE PHYSIQUE ET GEOLOGIQUE

1.1 Situation géographique.

La zone d'étude fait partie de la wilaya d'Adrar, elle est située entre les latitudes 26°30'N et 28°00'N et les longitudes 0°30'W et 0°30'E, elle s'étend de la ville d'Adrar jusqu'à la ville de Reggane sur presque une distance de 170 km (Figure 1.1).

Cette zone est limitée :

- Au Nord par le Grand Erg Occidental.
- A l'Ouest par Erg Echech.
- Au Sud par la Tanezrouft.
- A l'Est par le plateau de Tademaït.

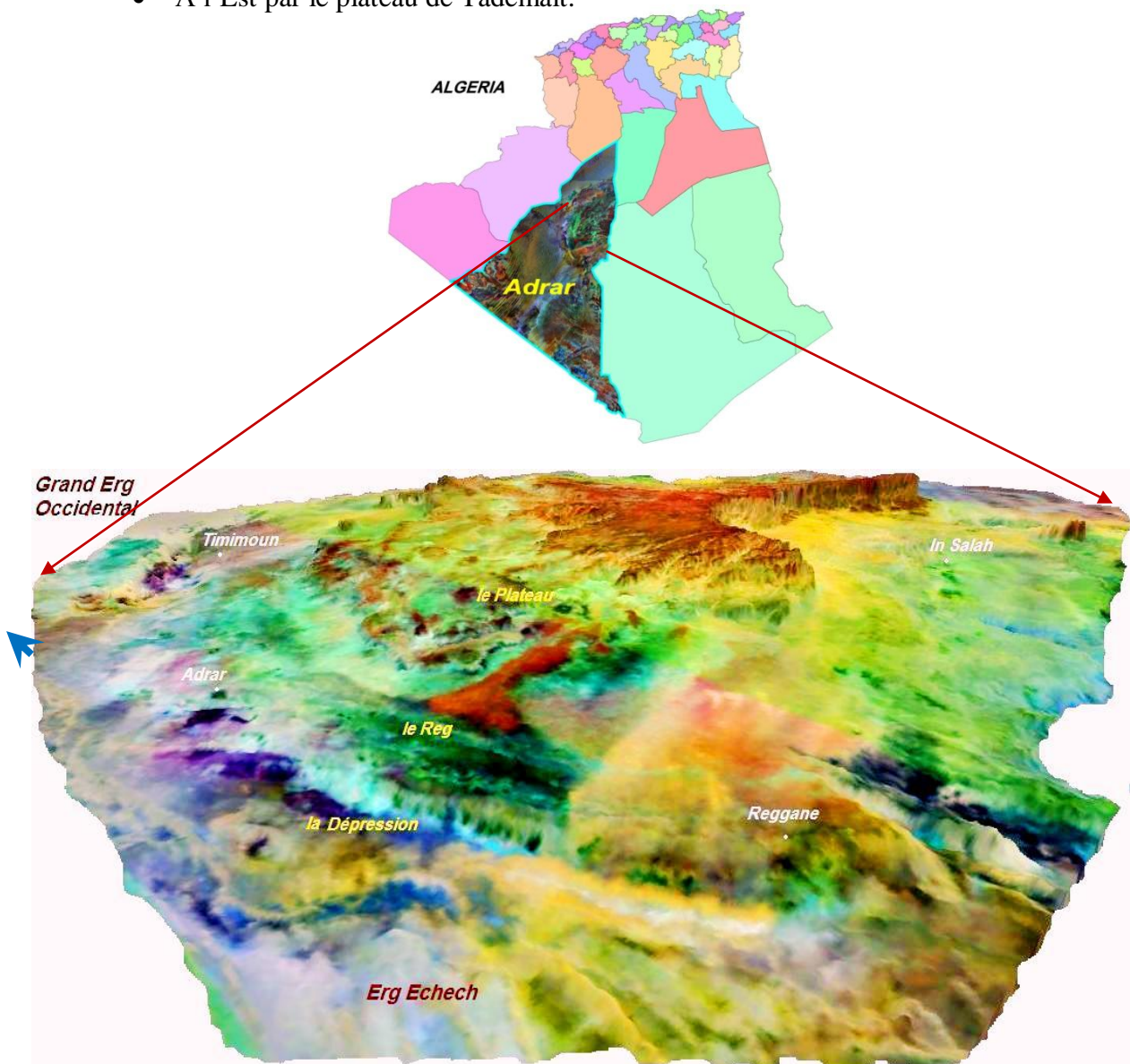


Figure 1.1 Situation géographique de la région d'étude.

La zone d'étude englobe 10 communes parmi les 28 communes de la wilaya d'Adrar à savoir du Nord au Sud (figure 1.2) :

- Adrar
- Bouda
- Timmi
- Tamentit
- Fenoughil
- Tamest
- Zaouiet kounta
- In Zeghmir
- Sali
- Reggane

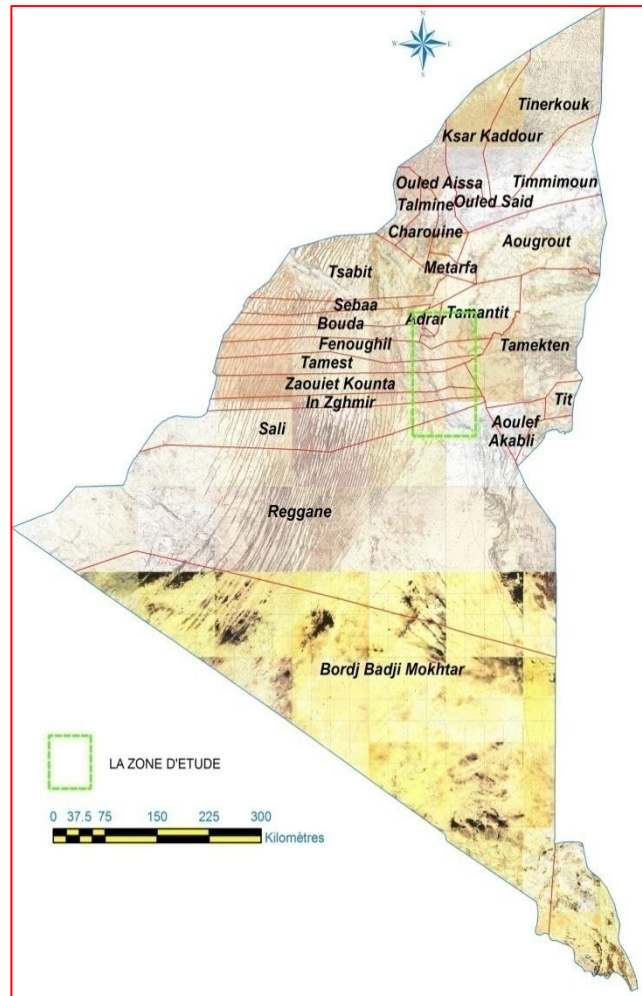


Figure 1.2 Répartition communale de la wilaya d'Adrar.

La population de la wilaya d'Adrar est estimée à 431 270 habitants (estimation 2010), avec une superficie de 427300 km², soit une densité de 1.01 habitant/km².

1.2 Aspect géomorphologique et topographique.

Le secteur d'étude fait partie d'une grande zone allongée sensiblement orientée Est-Ouest, elle renferme quelques traits morphologiques, on trouve :

1.2.1 Le Plateau.

Il limite la zone d'étude à l'Est (plateau de Tademaït) d'une forme tabulaire rocheuse.

1.2.2. L'Erg.

L'Erg est représenté par de massives dunes de sable à l'Ouest de la région d'étude (Erg Echache) et au Nord par le Grand Erg Occidental, d'autres petits Ergs abritent une végétation éphémère où sont formés artificiellement par des obstacles installés contre la progression des dunes de sable vers la palmeraie. Ils sont dispersés dans toute la région d'étude.

1.2.3. Le Reg.

C'est une surface plane couverte de gravier, sable et des débris de roches, il limite la zone au Sud.

1.2.4 La Dépression.

Elle se localise en aval de la palmeraie, elle est représentée par une sebkha où les efflorescences salines interdisent toute végétation et qui évolue dans le cadre du système endoréique. Elle s'étale tout le long de la rive gauche de la zone d'étude.

L'analyse des M.N.T (Model Numérique de Terrain) et les D.E.M (Digital Élévation Model) permettent de voir clairement les formes morphologiques du relief de la zone d'étude, l'altitude par rapport au niveau de la mer de la zone d'étude est de l'ordre de 150 à 200 m au niveau de la dépression, de 200 à 300 m au niveau du Reg et de 350 à 800 m au niveau du plateau de Tademaït (Figure 1.3).

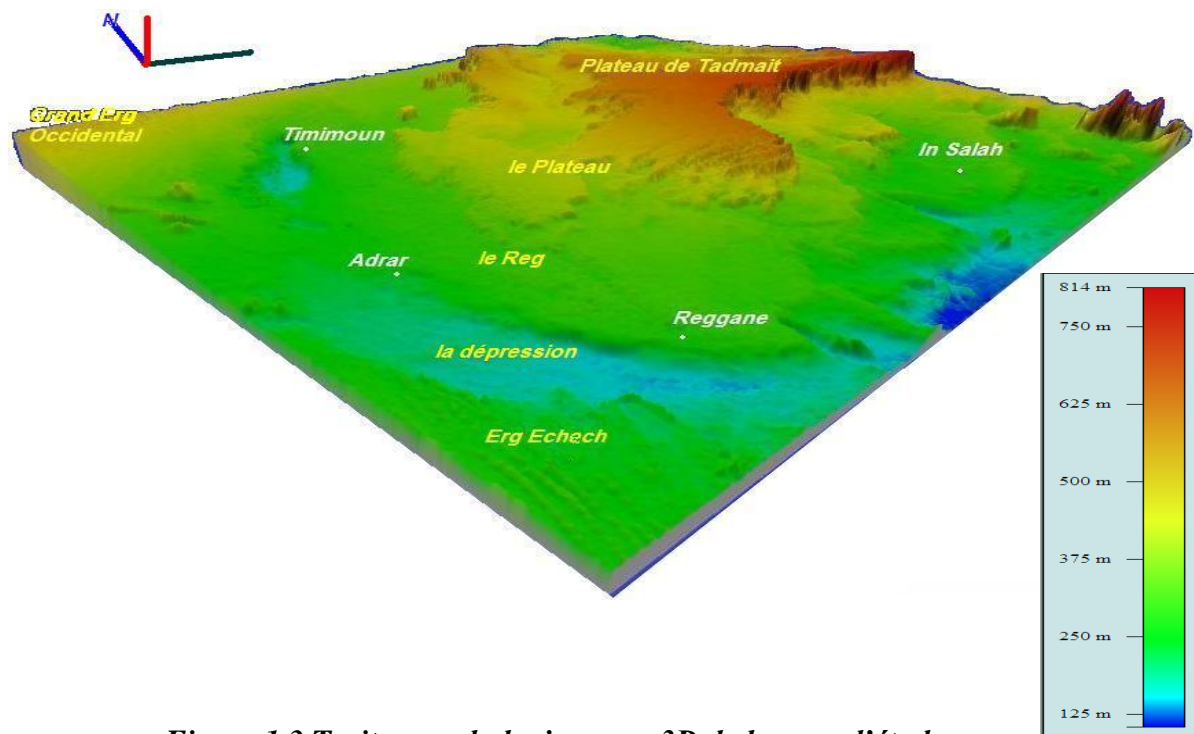


Figure 1.3 Traits morphologiques en 3D de la zone d'étude.

1.2.5 Réseau Hydrographique.

La région d'Adrar appartient à l'unité du bassin occidental du Sahara Septentrional, en raison des faibles précipitations, le réseau hydrographique est peu développé seul l'Oued Messaoud existe, il est temporaire et sec depuis quelques années.

1.3. ASPECT SOCIO-ECONOMIQUE.

1.3.1. Agriculture.

Le secteur agricole a connu une grande expansion dans les années 90, avec la subvention de l'état, des centaines de forages sont réalisés, des milliers d'hectares sont cultivés, dans le cadre de la mise en valeur des grands périmètres pour la production des céréales et autres cultures pour une autosuffisance de la région, les périmètres de mise en valeur sont situés à l'Est de la zone d'étude en amont des foggaras, tout le long de l'axe reliant Adrar à Reggane.

A l'intérieur de la palmeraie, on trouve plusieurs variétés de cultures sont produites dont le rendement est très faible à cause, des faibles superficies et les méthodes d'irrigation traditionnelles utilisées, généralement ces cultures sont utilisées pour une autoconsommation.

1.3.2. L'Élevage.

Vu la rareté des précipitations et l'aridité de la région, les pâturages sont inexistant ce qui constitue l'entrave principale qui gêne le développement de l'élevage dans cette région, quelques espèces animales typiques aux régions sahariennes, camelins, Caprins, ovins et des centaines de bovins constitue la ressource animale dans la région.

1.3.3. Industrie.

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

1.3.4. Tourisme.

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

1.4. GEOLOGIE DE LA REGION

1.4.1 Situation Générale.

La zone d'étude fait partie de la grande plate forme 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 1.4), on distingue de l'Ouest à Est :

- Le Bassin de Tindouf
- Les bassins de Boubernous et Ougarta
- Le bassin de Béchar
- Le bassin d'Ahnet-Timimoun
- Les bassins Azzene et Azzel Matti
- Le bassin de Sbaâ
- Le bassin de Reggane
- Les bassins du Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya
- Le Bassins d'Illizi-Ghadamès

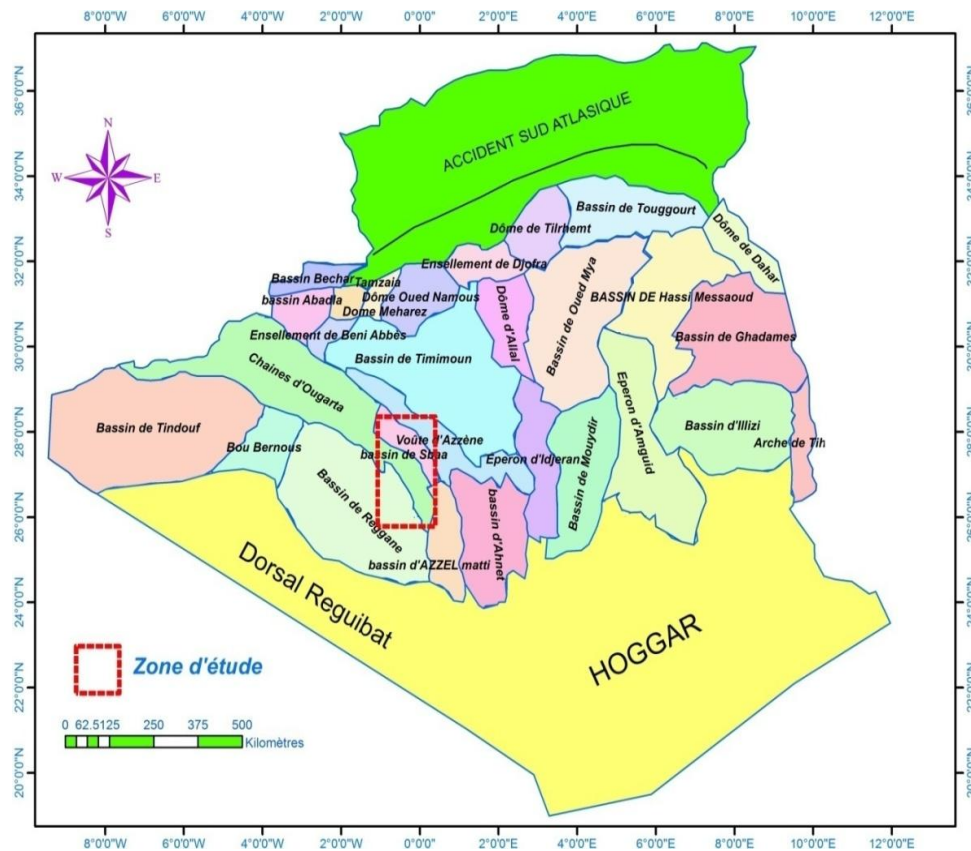


Figure 1.4 Répartition des bassins du Sahara Algérien.

La région d'étude est répartie sur trois bassins à savoir, le bassin de Sbaâ au Nord, l'Ougarta au centre et Reggane au Sud.

L'ensemble de la région est recouverte par des importants cordons dunaires de l'Erg Chech à l'Ouest et au Sud ouest, au Nord elle est limitée par la dépression de Timimoun, à l'Est par le bassin d'Ahnet et au Sud par la dorsale Reguibate, la couverture sédimentaire méso-cénozoïque couvre la majeure partie de la région d'étude.

1.4.2 Géologie de la région d'étude.

L'analyse des données (carte géologique, log de forage), nous 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 du 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).

Les formations géologiques rencontrées dans l'ensemble des trois bassins sont similaires (Figure 1.5), on trouve de haut en bas :

1.4.2.1 – Le Quaternaire.

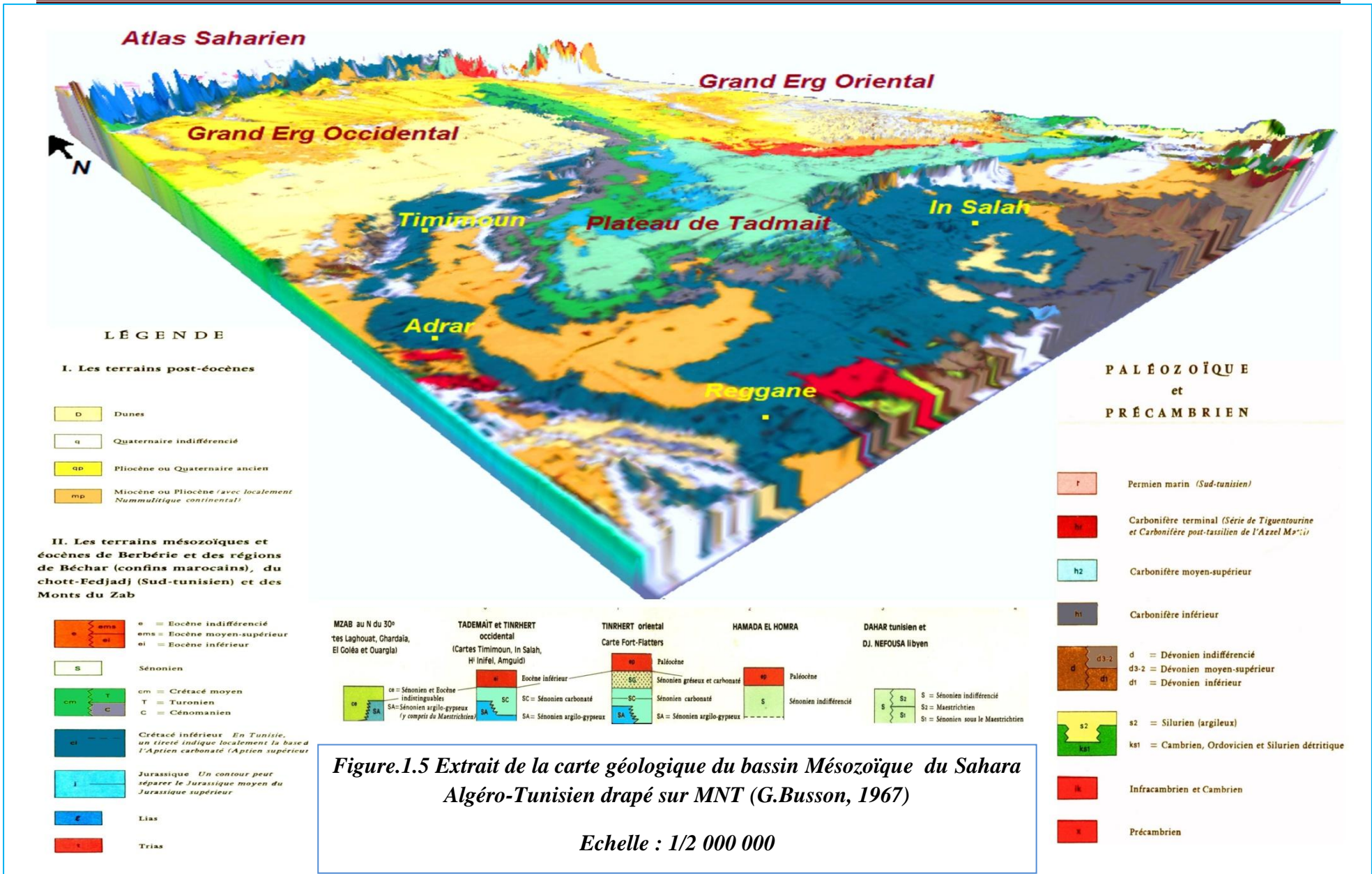
Le Quaternaire est constitué de sable éolien et sable argileux, représenté à l'Ouest et au Sud de la région par les dunes de l'Erg Chech et de la Tanezrouft, et au Nord par les dunes du Grand Erg Occidental.

1.4.2.2 – Le Complexe Terminal (CT).

Les formations du Complexe Terminal appelé aussi « Continental Terminal » affleurent à la limite Ouest de la région d'étude par les formations du plateau de Tademaït. Elle comporte plusieurs étages géologiques assemblés dans une seule nappe, d'où provient le nom « complexe » de la nappe, on trouve de haut en bas :

2a. Le Mio-Pliocène :

Les formations du Miocène et Pliocène se présentent sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse, qui forme une ceinture au piémont du plateau de Tademaït, de point de vue hydrogéologique le Mio-pliocène n'a aucun intérêt dans la région d'étude.



2b. L'Éocène : On distingue dans l'Éocène deux ensembles lithologiques :

- l'Éocène évaporitique au sommet : formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marne.
- l'Éocène carbonaté à la base : formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marne, d'argile et même d'anhydrite.

2c. Le Sénonien : Il s'individualise en deux faciès :

- Le Sénonien supérieur ou Sénonien carbonaté : Il est essentiellement constitué de dolomie et de calcaire fissuré avec des intercalations de marne, d'argile et d'anhydrite.
- Le Sénonien inférieur à sédimentation lagunaire caractérisé par des formations argileuses et salifères à anhydrite.

1.4.2.3 – Le Turonien.

Il s'individualise en deux faciès :

- Le Turonien supérieur : formé par des calcaires jaunes dolomitiques et d'argiles.
- Le Turonien inférieur : formé par des calcaires blancs dolomitiques et marneux.

1.4.2.4 – Le Cénomaniens.

Le Cénomaniens est formé par une alternance de bancs de calcaire et dolomie, d'argile et d'évaporites (anhydrite ou sel). Son épaisseur est de 50 m, d'après la carte géologique de Timimoun, il forme la base du plateau de Tademaït, on constate aussi que le Cénomaniens inférieur est argileux alors que le Cénomaniens supérieur est calcaire.

1.4.2.5 – Le Continental Intercalaire.

Les formations du Continental Intercalaire C.I affleurent en une auréole continue encerclant le massif du Tademaït, d'El Goléa jusqu'à l'Est d'In Salah, directement surmontées par les argiles du Cénomaniens.

Au Nord-ouest, le CI affleure tout le long de l'Atlas Saharien, au Sud et à l'Ouest, le CI repose directement sur les formations marines du Paléozoïque, qui forme en affleurent une ceinture continue de la vallée de la Saoura jusqu'à In Salah.

Les coupes stratigraphiques des forages profonds ont permis de construire un diagramme géologique de la zone d'étude (Figure 1.6), L'observation de ce diagramme permet de voir le Continental Intercalaire comme l'ensemble compris entre le jurassique et le

cénomannien, c'est à dire entre les plissements hercyniens qui ont chassés la mer de la plate-forme saharienne et l'invasion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble comprend majoritairement des formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur.

On trouve de haut en bas :

5a. L'Albien :

L'Albien est constitué à la base par des grès et des sables dans lesquels s'intercalent des argiles et des argiles dolomitiques et au sommet par une dalle quartzitique.

5b. L'Aptien :

L'Aptien est un bon repère géologique, généralement formé par un faciès calcaro-dolomitique appelé «barre aptienne» l'épaisseur de cet horizon est comprise entre 10 et 30 m.

5c. Le Barrémien :

Le Barrémien est constitué par des grès grossier à gravier, d'argile et des sables admettant des passées d'argiles.

5d. Le Néocomien :

Le Néocomien comprenant des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base, elles sont surmontées par une alternance de dolomie et d'argile.

Dans notre région d'étude les horizons ci-dessus sont assemblés pour former une seule nappe homogène, le Continental Intercalaire au sens large, appelé aussi localement « la nappe Albienne ».

1.4.2.6 - Le Jurassique.

Cet étage est représenté par des argiles tendres légèrement sableuses parfois micacées admettant des passées de dolomie, grès et calcaire d'une épaisseur totale comprise entre 200 et 300 m.

Le Jurassique inférieur et moyen (Lias-Dogger) comprend principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement du sel et d'anhydrite.

Les formations du jurassique supérieur sont formées par des intercalations d'argile, d'argile sableuse et de calcaire dolomitique.

1.4.2.7- Le Trias.

Il est généralement représenté par une sédimentation de type lagunaire constituée d'argile, d'argile plastique, d'argile bariolée gypseuse, d'anhydrite parfois massive et de dolomie.

1.4.2.8 – Le Paléozoïque.

Les formations d'âges paléozoïques affleurent au Sud-ouest de la ville d'Adrar vers la ville de «Koussane et Bouzzane», elles plongent sous le recouvrement mésozoïque et cénozoïque jusqu'à son apparitions à l'Est de la ville de Reggane, on trouve de haut en bas :

8a. Le Carbonifère.

Le Carbonifère affleure au centre de la zone d'étude près du village de Tiouririne par des couches de calcaire, argile et gypse qui appartient au Namurien et par des grès, calcaire et argiles du Viséen inférieur et supérieur, alors que le Tournaisien représenté par des grès argileux.

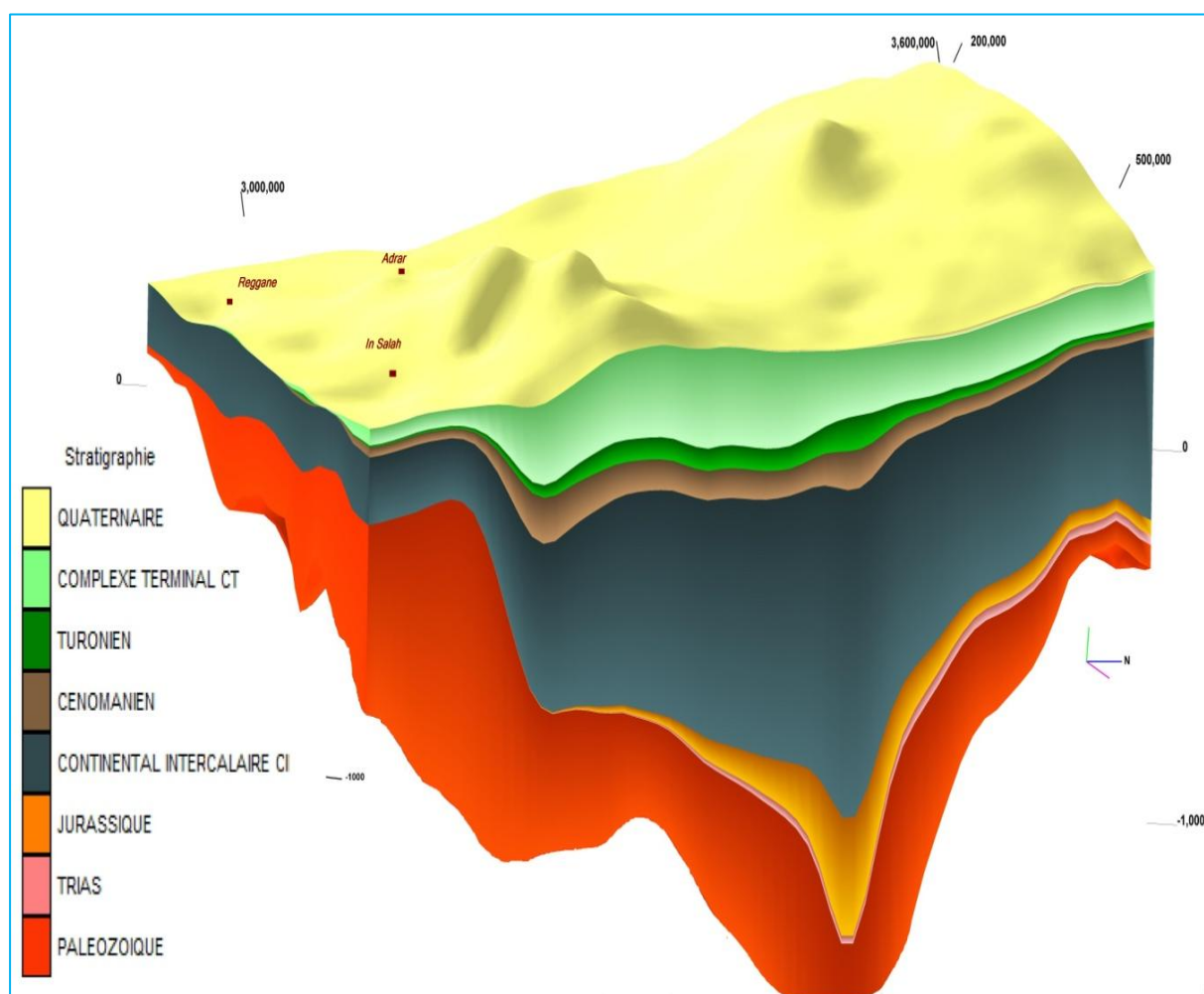


Figure 1.6 Diagramme géologique de la région d'étude.

8b. Le Dévonien.

Il affleure essentiellement dans la région de Zaouiet Kounta sous forme de grès et de calcaire et argile.

8c. Le Silurien.

Le Silurien est présent au Sud du village El Ahmeur par des argiles à graptolites.

8d. L'Ordovicien.

Les formations d'âges ordoviciennes affleurent près du village de Tasfaout par des formations de grès rouge ou vert, silts et argile.

1.4.2.9- 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).

1.4.3. Paléorecharge.

Les réserves dites «fossiles» sont situées, en général, à des grandes profondeurs et connues pour être pratiquement non renouvelables. Dans les régions arides du monde, comme le Nord de l'Afrique, la péninsule arabique, l'Australie et le sud-ouest des États-Unis d'Amérique, ces nappes sont d'autant plus importantes qu'elles peuvent être un facteur déterminant du développement socioéconomique (Ould Baba Sy, 2005).

L'utilisation du terme «eau fossile» est peu utilisée dans le lexique des hydrogéologues, l'eau qui s'infiltre dans la nappe est en mouvement, jusqu'à sa sortie soit par pompage ou perdue aux exutoires naturels, la durée de ce mouvement nous donne une fausse idée que les eaux sont en générales fossiles.

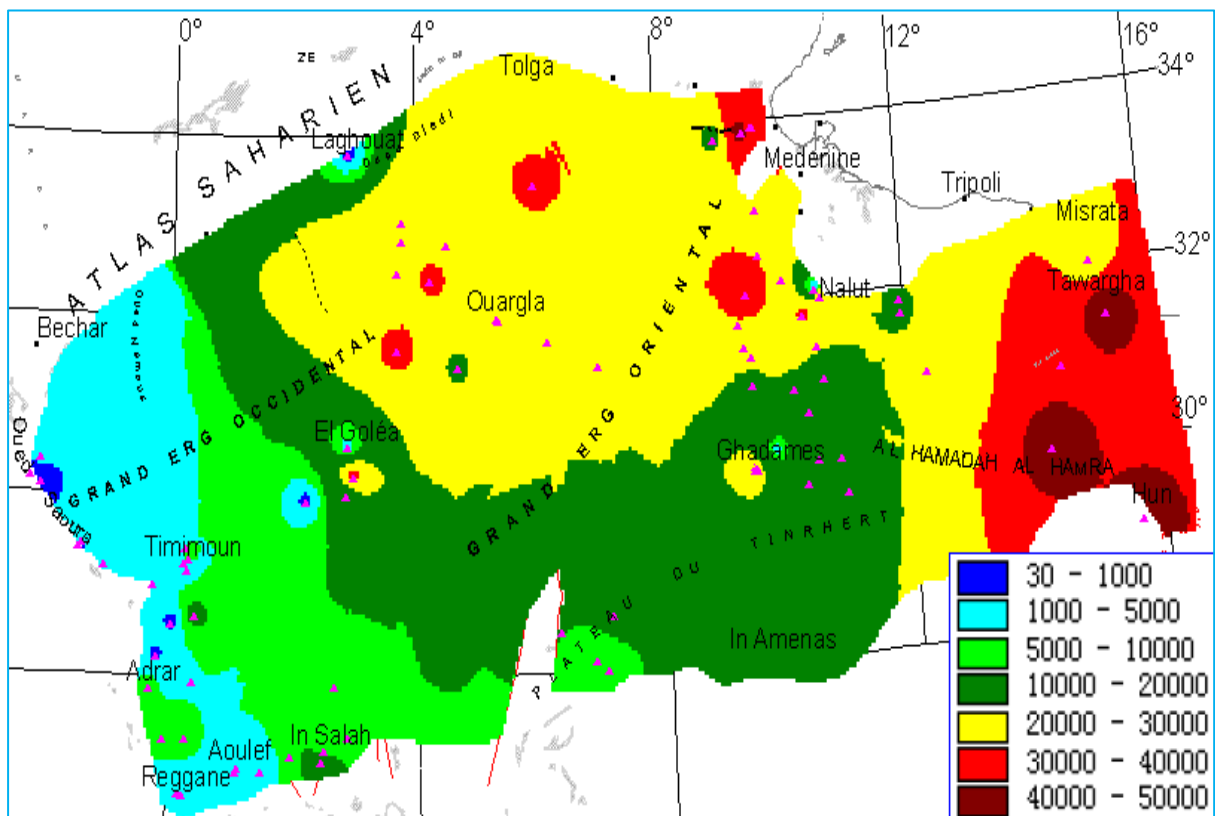


Figure 1.7 Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14 (OSS, 2004).

D'après plusieurs auteurs, c'est pendant la période humide de l'Holocène que la recharge de la nappe du Continental Intercalaire s'est effectuée, les simulations de paléorecharge du modèle OSS montrent que l'hypothèse d'une recharge nulle sur l'Atlas saharien, le Dahar, Jebel Nefusa et le Mزاب est inacceptable. La figure 1.7 montre les teneurs en carbone 14 « C14 » dans les eaux de la nappe du Continental Intercalaire, d'après cette carte les eaux de la région d'Adrar ont un âge entre 1000 et 10000 ans.

1.4.4. Coupes géologiques.

Plusieurs coupes géologiques ont été réalisées dans le cadre de cette étude (figure 1.8), dont trois 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 dans notre étude.

Les coupes AA, BB et CC (figure 1.9) 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.

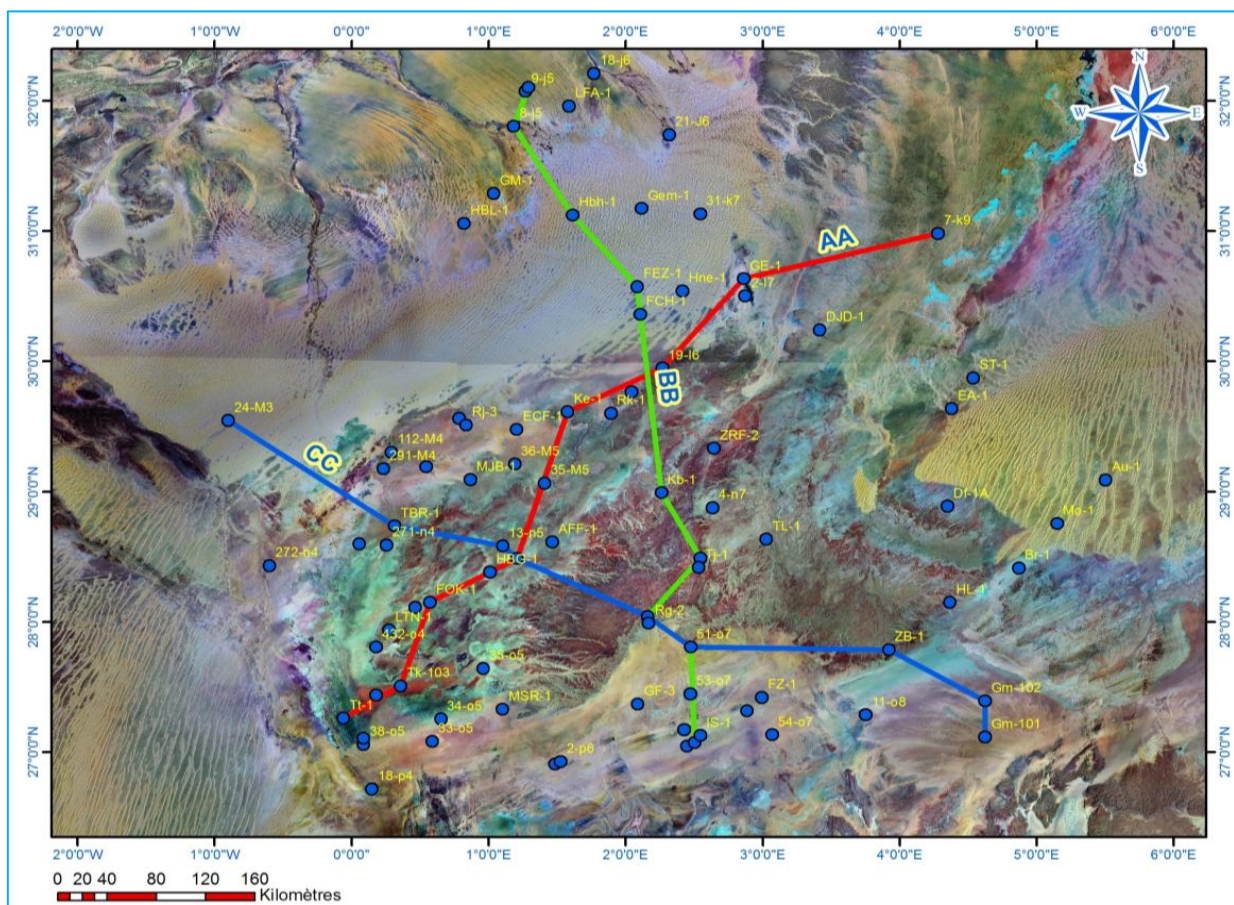


Figure 1.8 Situation des coupes géologiques dans le bassin Occidental.

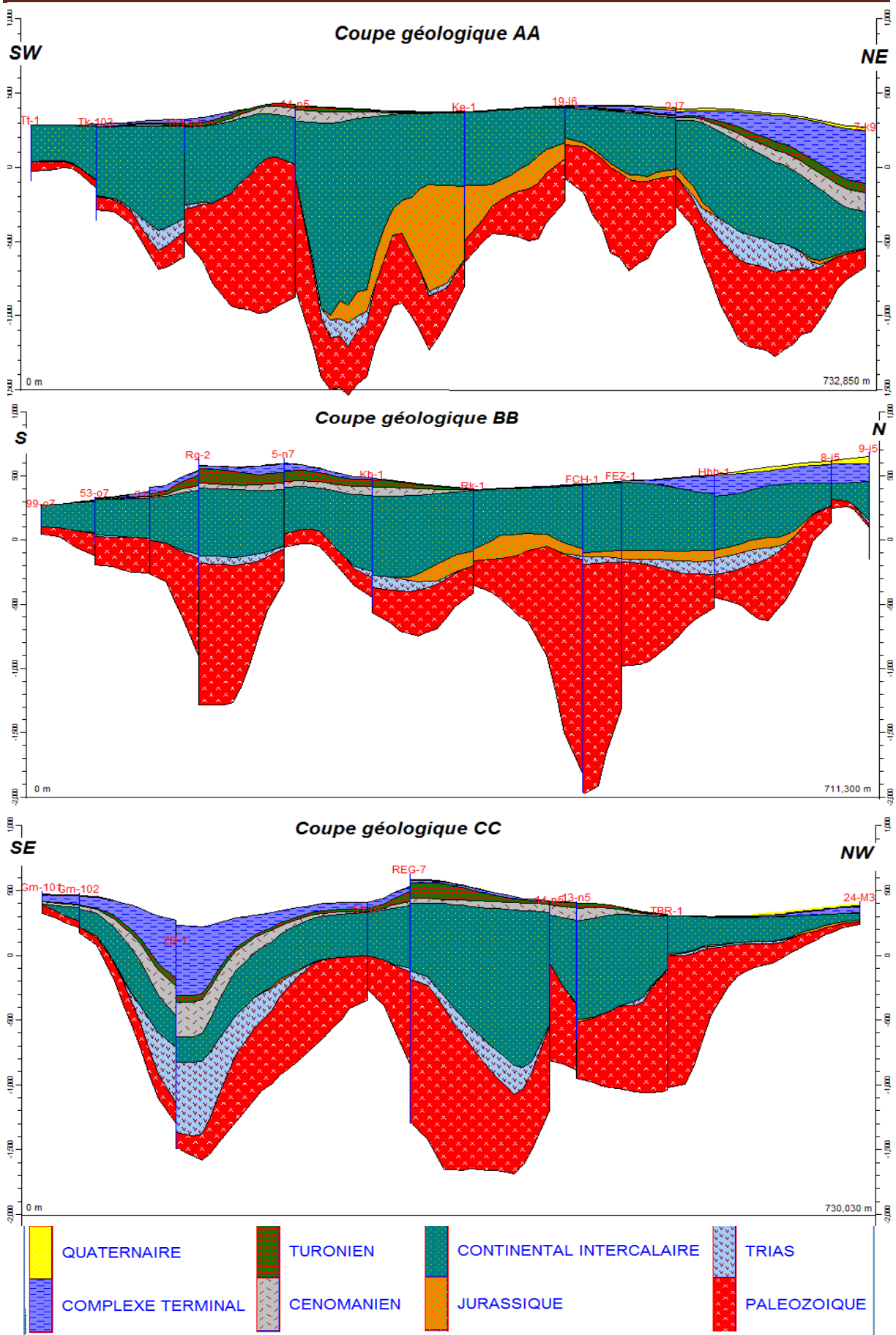


Figure 1.9 Coupes géologiques AA, BB, CC dans le bassin occidental.

1.4.5. Profils géologiques.

L'utilisation du logiciel Rockworks nous a permis de tracer plusieurs profils géologiques dans la zone d'étude et dans le bassin occidental (figure 1.10).

Les profils géologiques A, B et C (Figure 1.11) 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 1.12) 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.

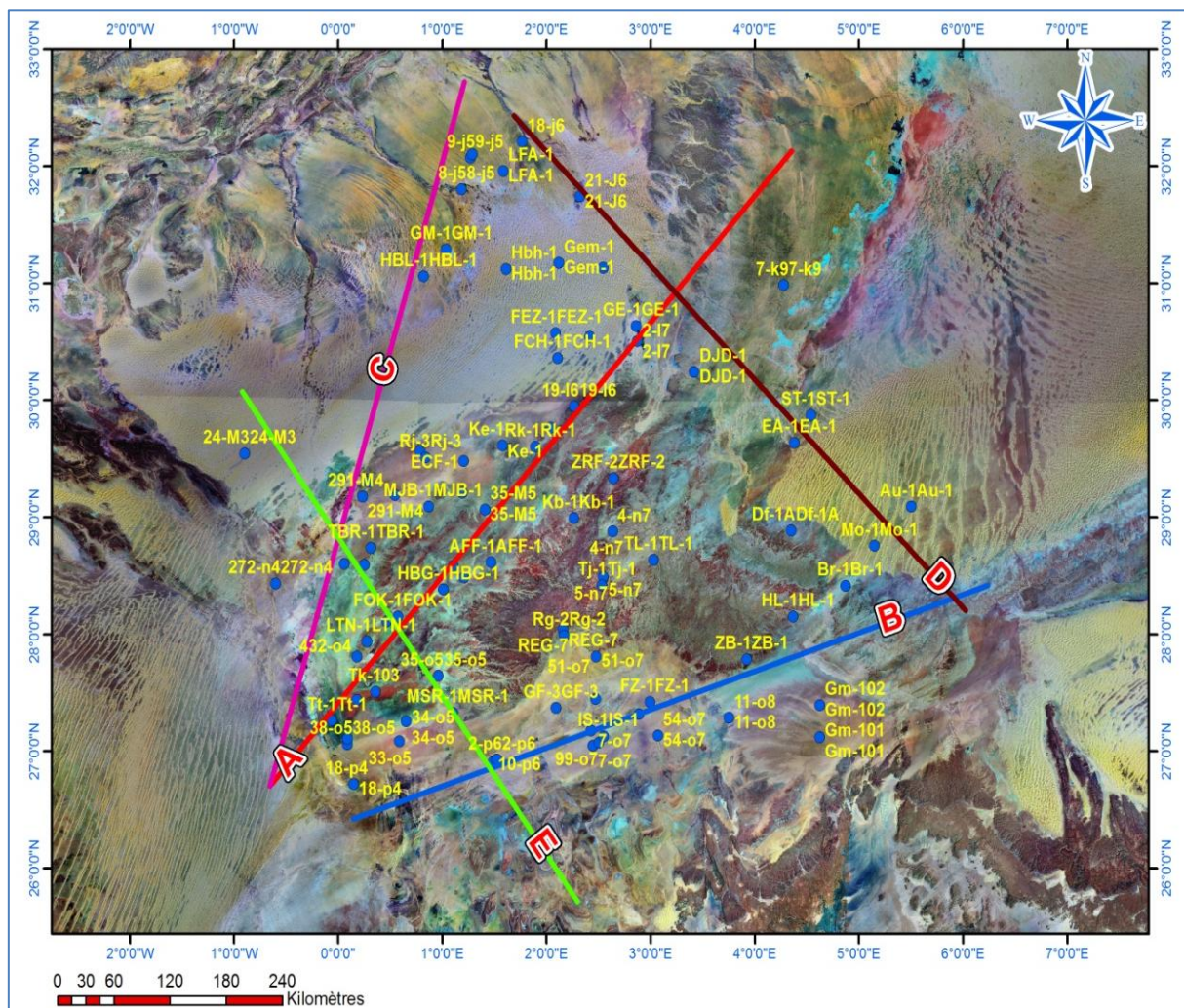


Figure 1.10 Situation des profils géologiques dans la région d'étude.

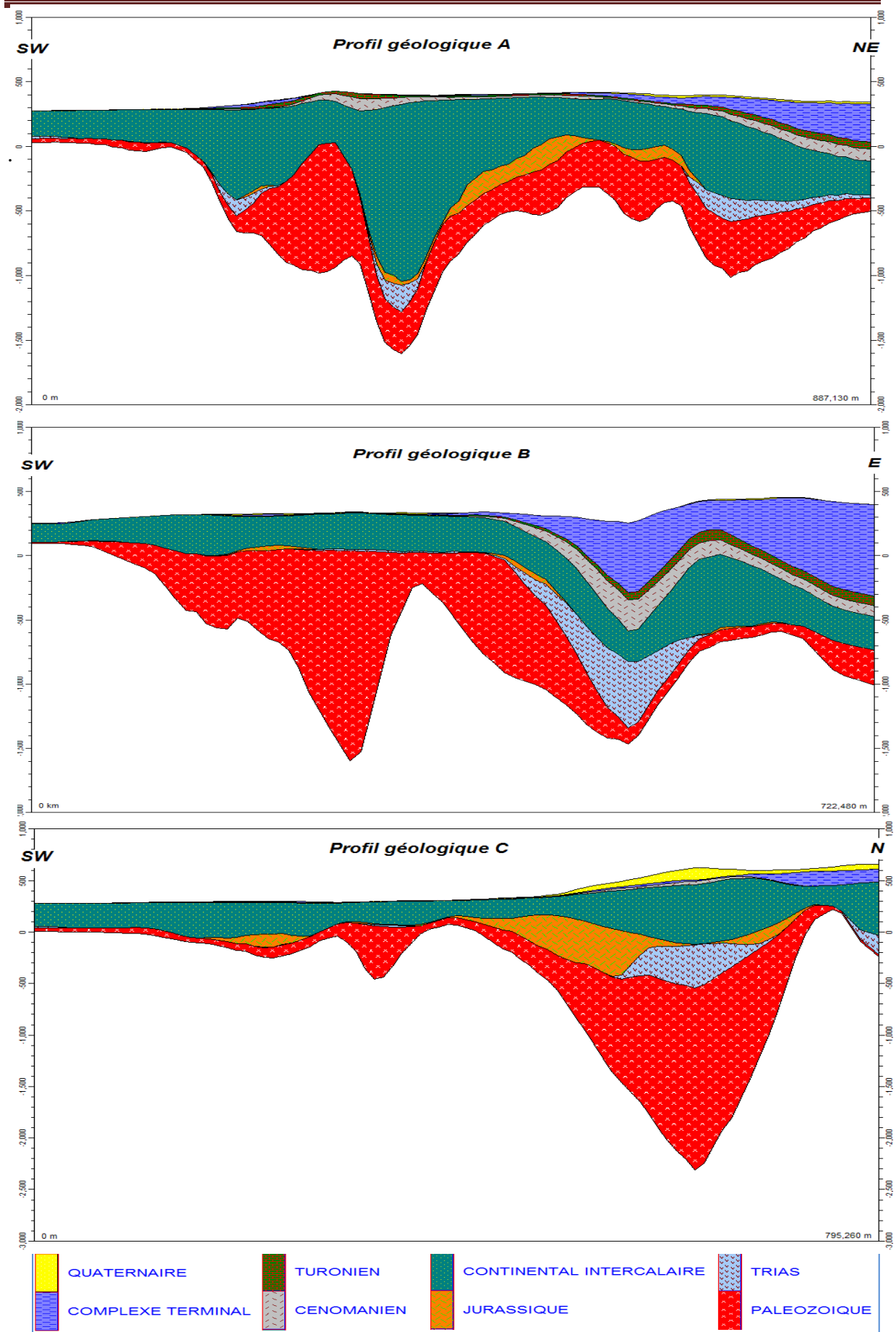


Figure.1.11 Profils géologiques A, B et C dans le bassin Occidental.

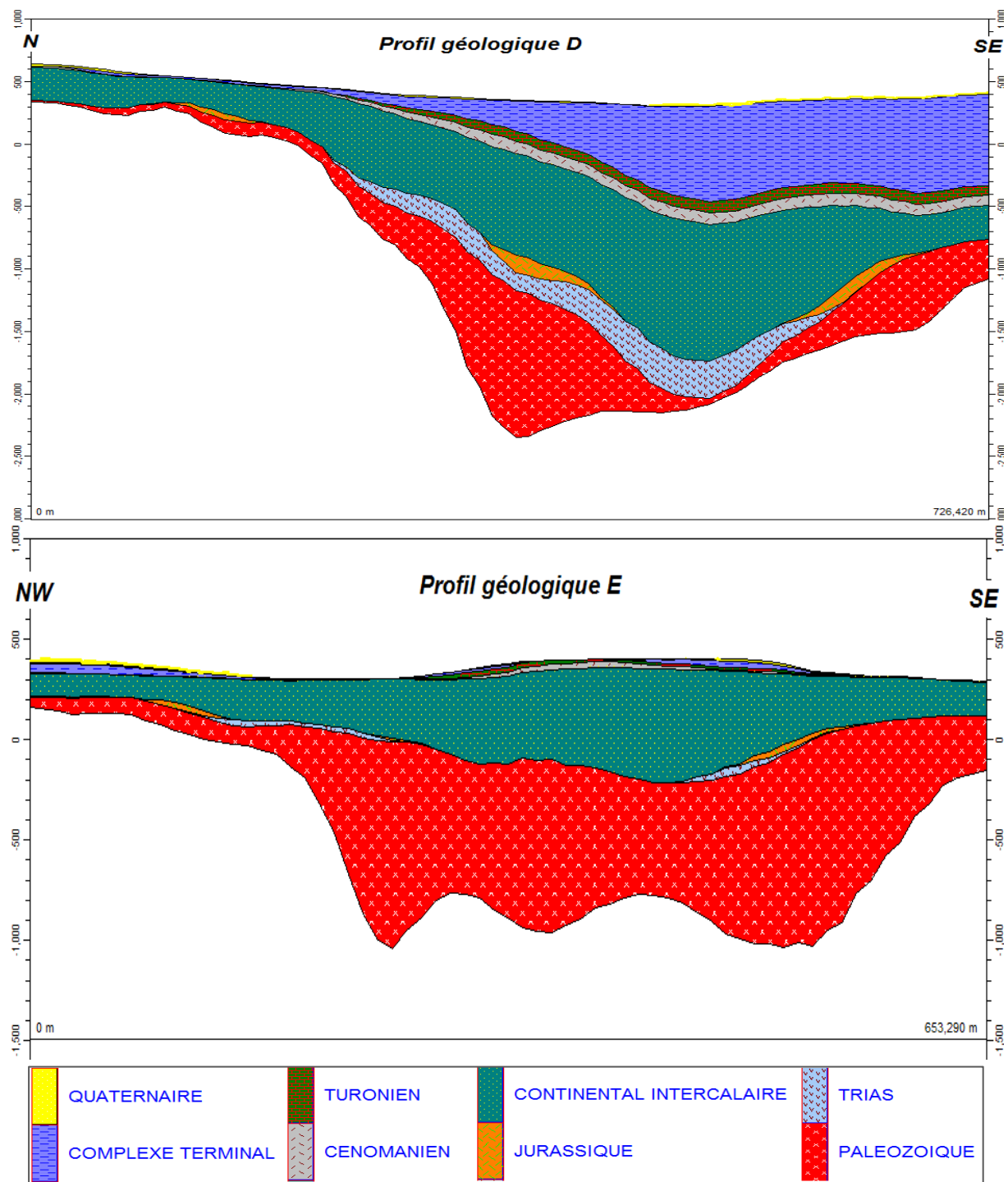


Figure.1.12 Profils géologiques D, E dans le bassin occidental.

A l'échelle régionale la figure 1.13 montre bien l'allure des formations géologiques du bassin Occidental, les profils en intersection 3D montrent que la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar est peu profonde, l'épaisseur de la nappe augmente en allant de l'Ouest vers l'Est, elle devient plus profonde et captive.

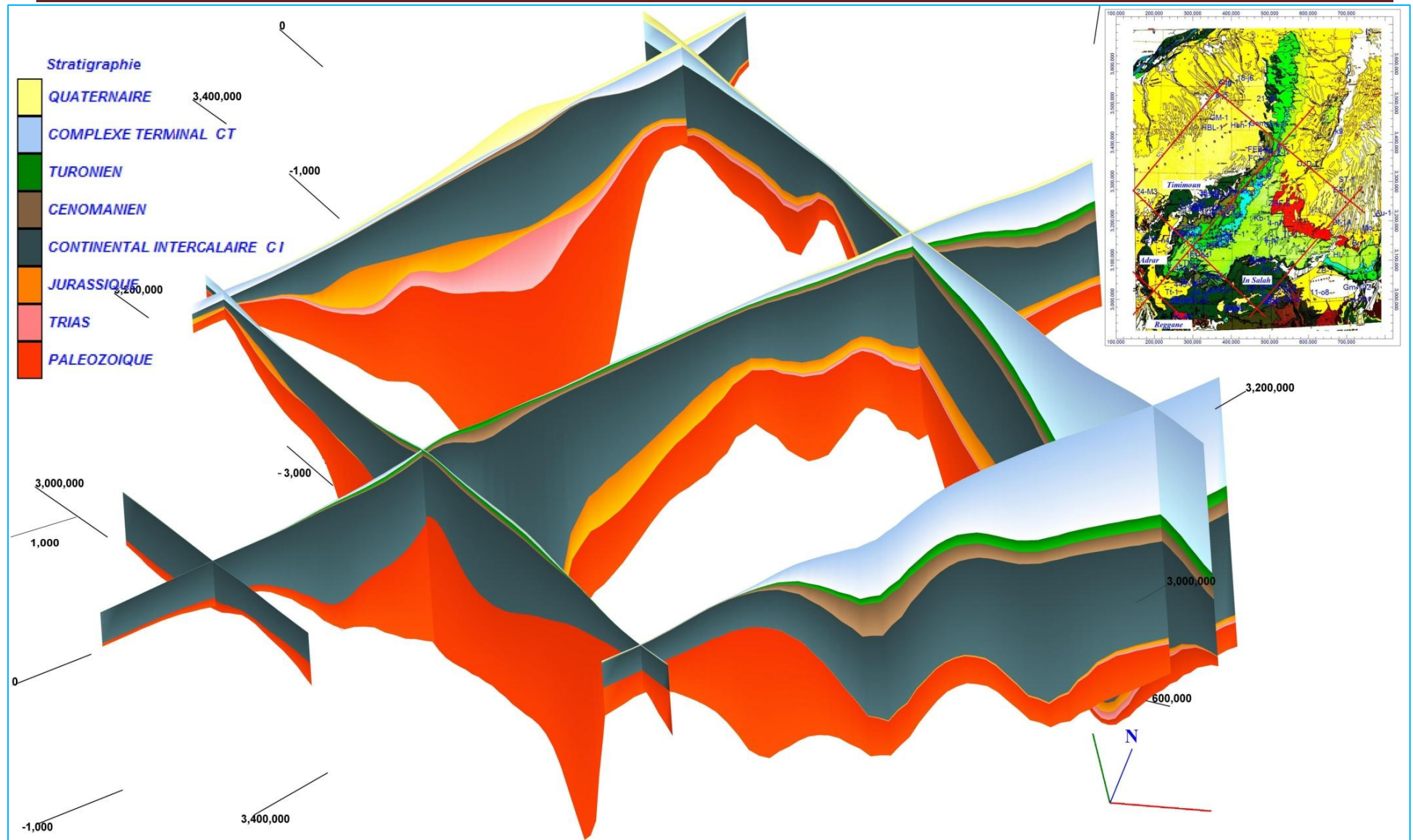


Figure 1.13 Profils géologiques en 3 D dans le bassin de l'Erg Occidental.

Conclusion.

L'étude géologique de la partie Sud Ouest du système aquifère du Sahara Septentrionale SASS, montre que les formations du Continental Intercalaire (C.I) sont constituées par des sédiments continentaux grésos-argileuses d'âge crétacé inférieur allant du barrémien au mur céno manien, 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 réalisés dans le cadre de cette étude montrent 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 II

HYDROCLIMATOLOGIE

II. HYDROCLIMATOLOGIE

2.1. Introduction.

La région d'Adrar se caractérise par un climat très sec, la rareté des précipitations rend les terres très hostiles.

Pour traiter le volet climatique, nous avons utilisé seulement les données de la station d'Adrar, vue l'inexistence des données climatiques pour la région de Reggane et l'éloignement des autres stations à savoir (In Salah à 400 km et Timimoun à 200 km).

Les données utilisées se rapportent à la période allant de l'année 1991 à l'année 2010, soit 20 ans d'observations. Cette station météorologique est localisée à 15 km à l'Est de la ville d'Adrar (Tableau 2.1).

Tableau.2.1 *Caractéristiques de la station pluviométrique d'Adrar.*

| Station | Code | X | Y | Z | Année d'observation |
|---------|----------|--------|---------|-----|---------------------|
| Adrar | 13-01-16 | 0°10'W | 27°50'N | 279 | 1991-2010 |

2.2. La Température.

La température est un élément fondamental du climat, sa variation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux.

Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique, c'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région. L'analyse des températures sera faite à partir des données de la station d'Adrar pour la période allant de 1991 à 2010.

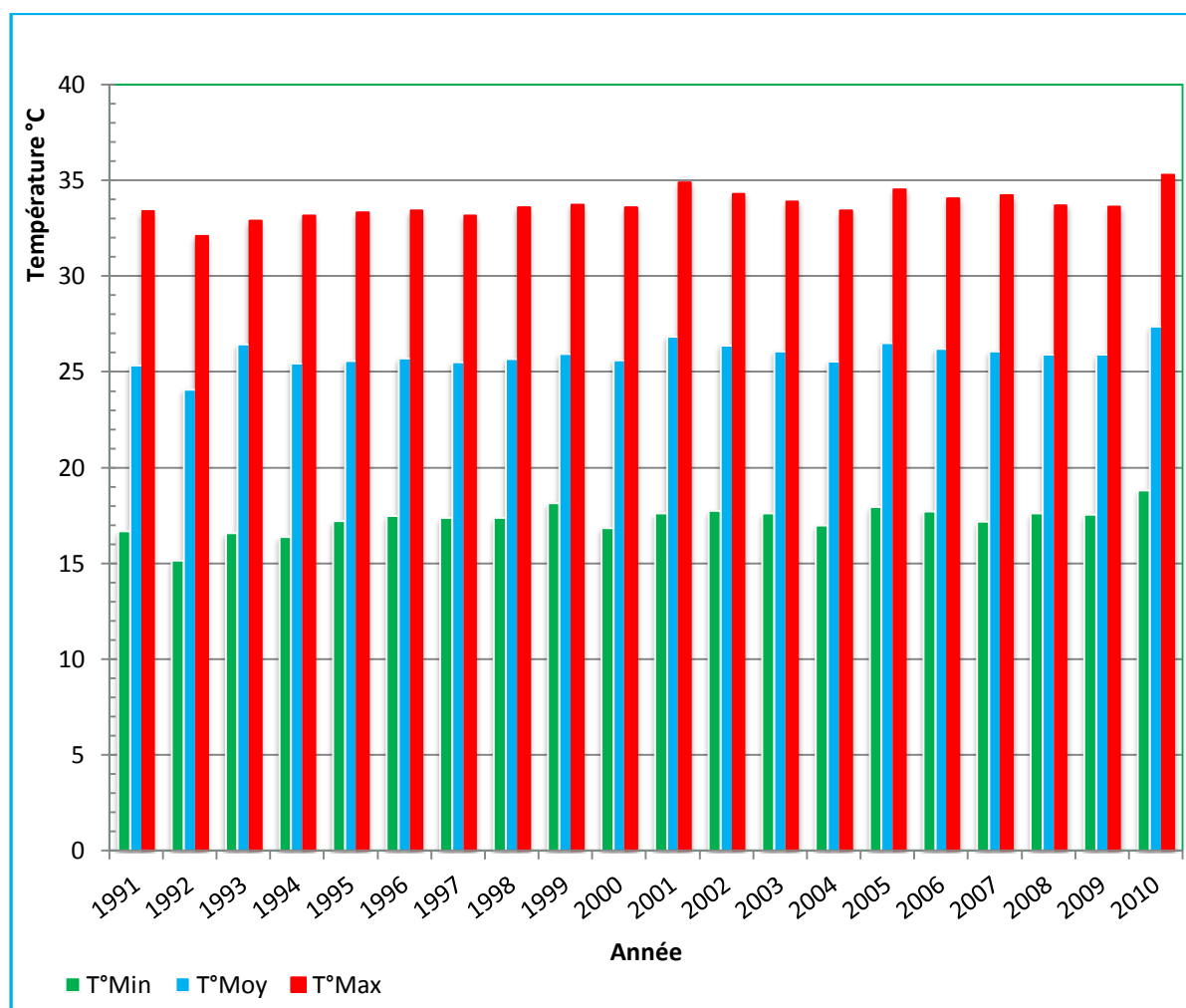
2.2.1 Variations des températures moyennes annuelles.

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 1992 avec une température moyenne annuelle de 24.07°C, la température moyenne interannuelle est de 25,89°C.

La figure 2.1 et le tableau 2.2 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.2.2 *Température moyenne annuelle station Adrar (1991-2010).*

| Année | T°C min | T°C moy | T°C max | Année | T°C min | T°C moy | T°C max |
|-------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|
| 1991 | 16.67 | 25.32 | 33.39 | 2001 | 17.61 | 26.84 | 34.89 |
| 1992 | 15.14 | 24.07 | 32.09 | 2002 | 17.73 | 26.38 | 34.28 |
| 1993 | 16.57 | 26.43 | 32.90 | 2003 | 17.60 | 26.07 | 33.88 |
| 1994 | 16.38 | 25.43 | 33.16 | 2004 | 16.97 | 25.52 | 33.41 |
| 1995 | 17.20 | 25.55 | 33.33 | 2005 | 17.93 | 26.48 | 34.53 |
| 1996 | 17.48 | 25.69 | 33.41 | 2006 | 17.72 | 26.20 | 34.06 |
| 1997 | 17.37 | 25.49 | 33.16 | 2007 | 17.18 | 26.05 | 34.21 |
| 1998 | 17.38 | 25.65 | 33.60 | 2008 | 17.59 | 25.91 | 33.70 |
| 1999 | 18.13 | 25.93 | 33.72 | 2009 | 17.53 | 25.88 | 33.63 |
| 2000 | 16.84 | 25.61 | 33.58 | 2010 | 18.81 | 27.37 | 35.28 |

**Figure.2.1** *Variations moyennes annuelles des températures.*

2.2.2 Variations des températures moyennes mensuelles.

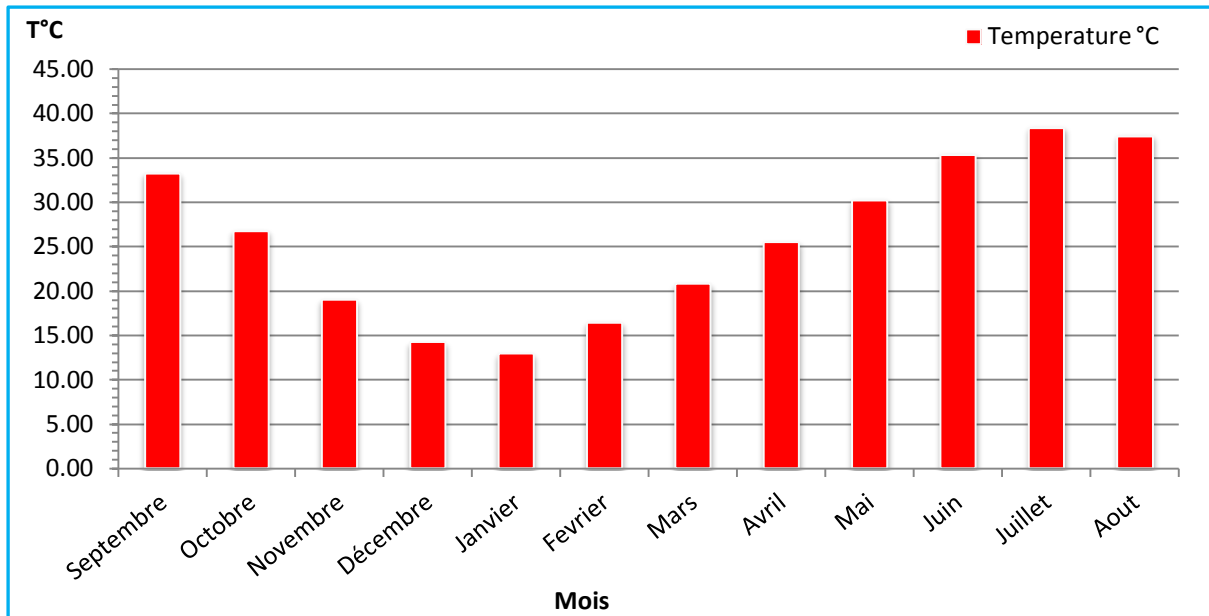


Figure.2.2 Variations moyennes mensuelles des températures.

L'analyse de l'histogramme des températures moyennes mensuelles (Figure 2.2) montre que le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température moyenne de l'ordre de 38.33°C, alors que le mois le plus froid c'est le mois de Janvier avec une température moyenne de l'ordre de 12.94°C, la température moyenne mensuelle est de l'ordre de 25.83°C.

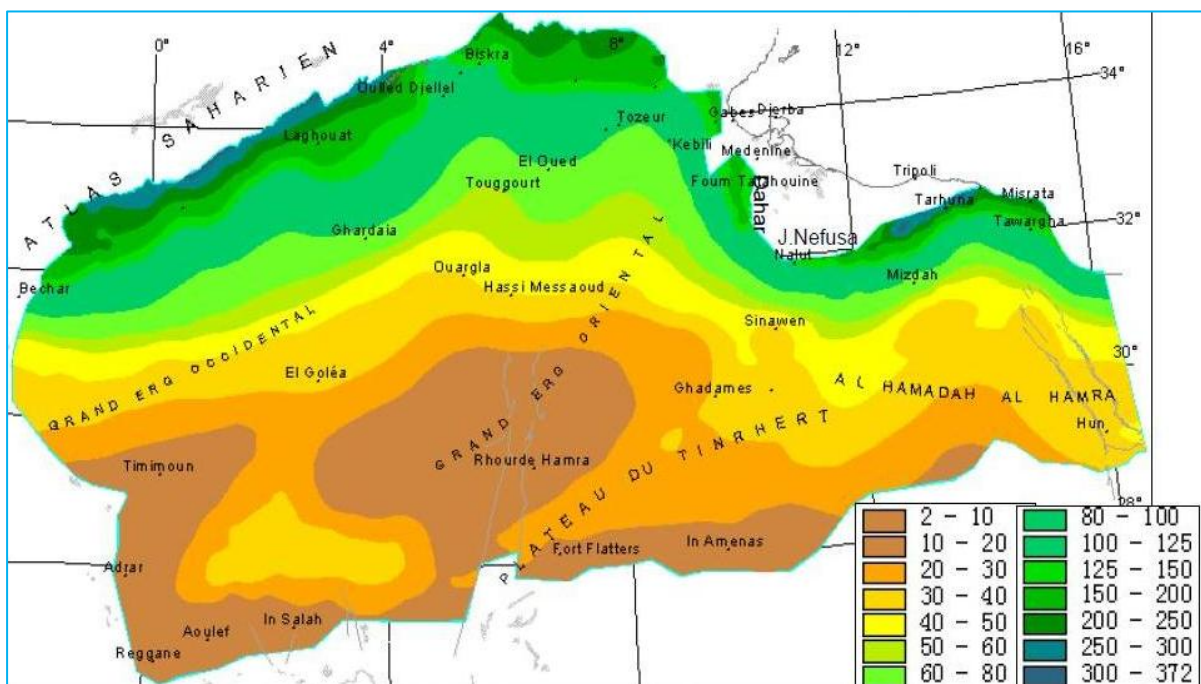


Figure.2.3 Carte des isohyètes dans le domaine du SASS (M.Ould Baba sy 2004).

2.3. La Précipitation.

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental des régions sahariennes, la figure 2.3 ci-dessus montre que les précipitations annuelles sont très faibles et ne dépassent guère les 50 mm/an dans toute la région allant d'El Goléa à In Salah, dans notre région d'étude la précipitation est de l'ordre de 2-30 mm/an.

2.3.1 Variations interannuelles des précipitations.

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 20 ans (1991-2010), montre que l'année 1997 est la plus arrosée avec une précipitation moyenne de l'ordre de 31.09 mm/an et que l'année 1998 est la plus sèche avec une précipitation moyenne de l'ordre de 1.02 mm/an, la précipitation moyenne interannuelle est de 13.25 mm/an (Figure 2.4).

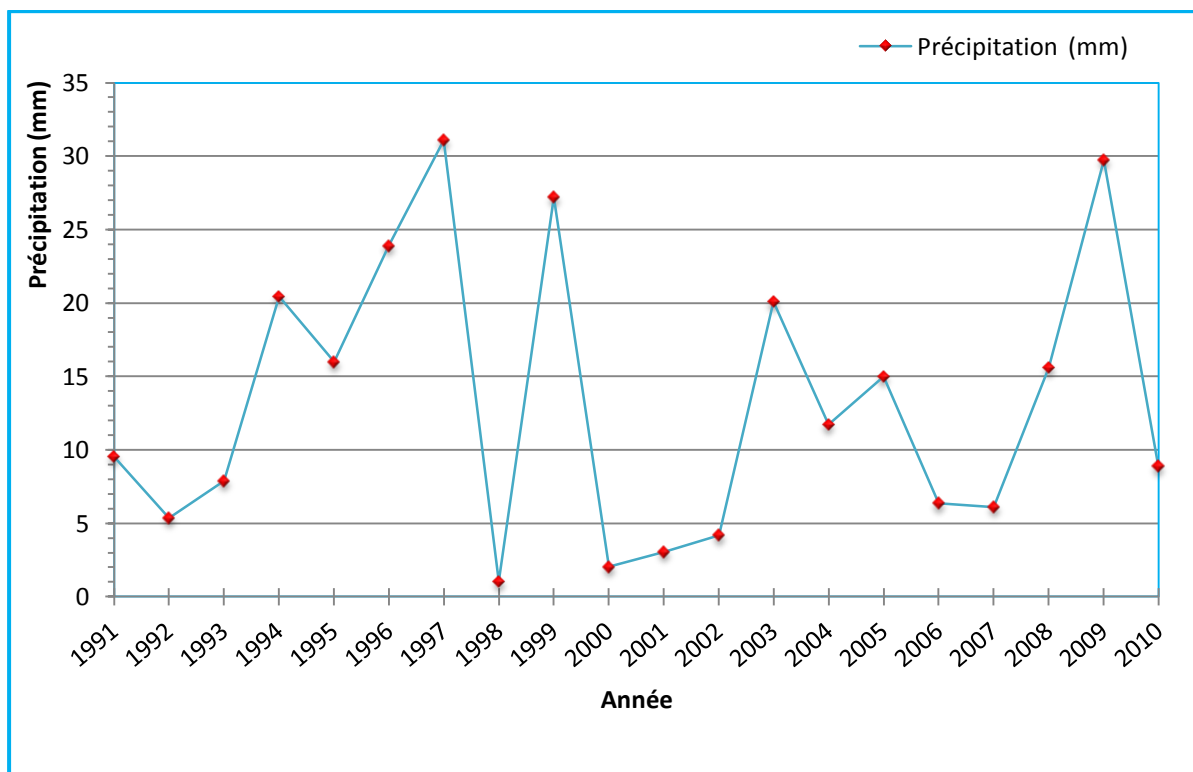


Figure 2.4 Variation interannuelle des précipitations.

2.3.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations

La figure 2.5 montre les variations des moyennes mensuelles des précipitations sur une période de 20 ans, le mois de Novembre est le mois le plus arrosé avec 1.94 mm de précipitation et le mois d'Août comme le mois le plus sec avec 0.48 mm. La moyenne mensuelle est de l'ordre de 1.10 mm/mois.

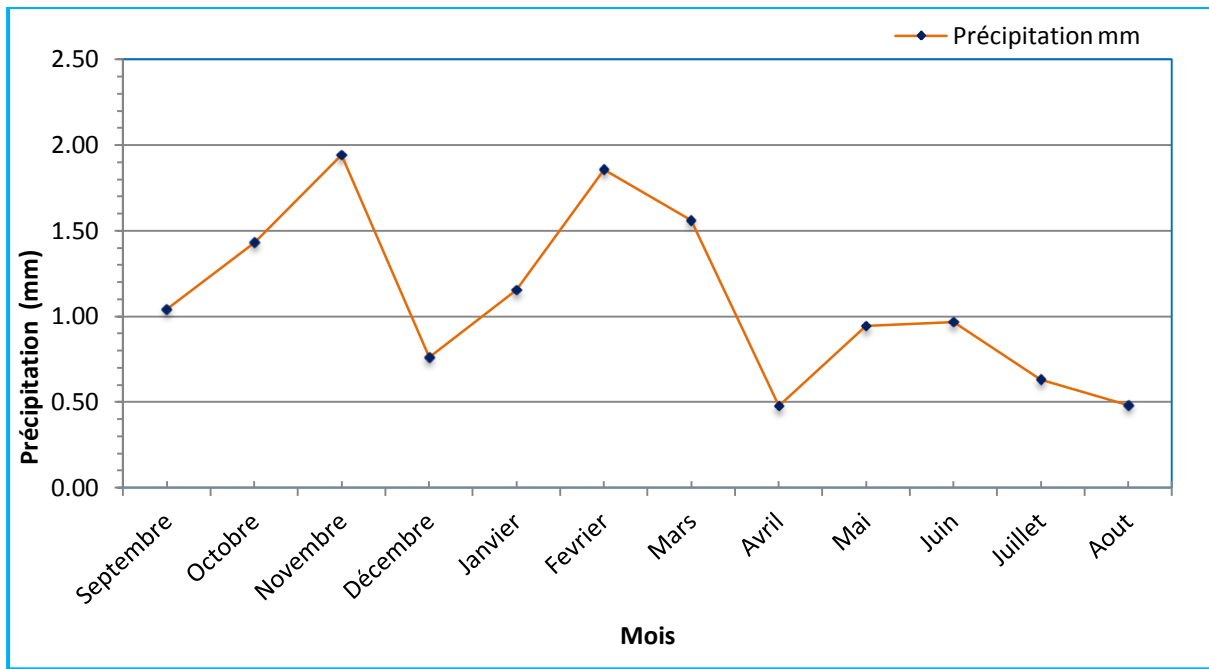


Figure.2.5 Variation des moyennes mensuelles des précipitations.

2.3.3 Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN

Le diagramme Ombro-thermique (Figure 2.6) de Gausсен permet de calculer la durée de la saison sèche. Dans notre cas la courbe des précipitations passe largement au-dessous de la courbe des températures, cette allure permet de constater que la période sèche s'étale sur toute l'année.

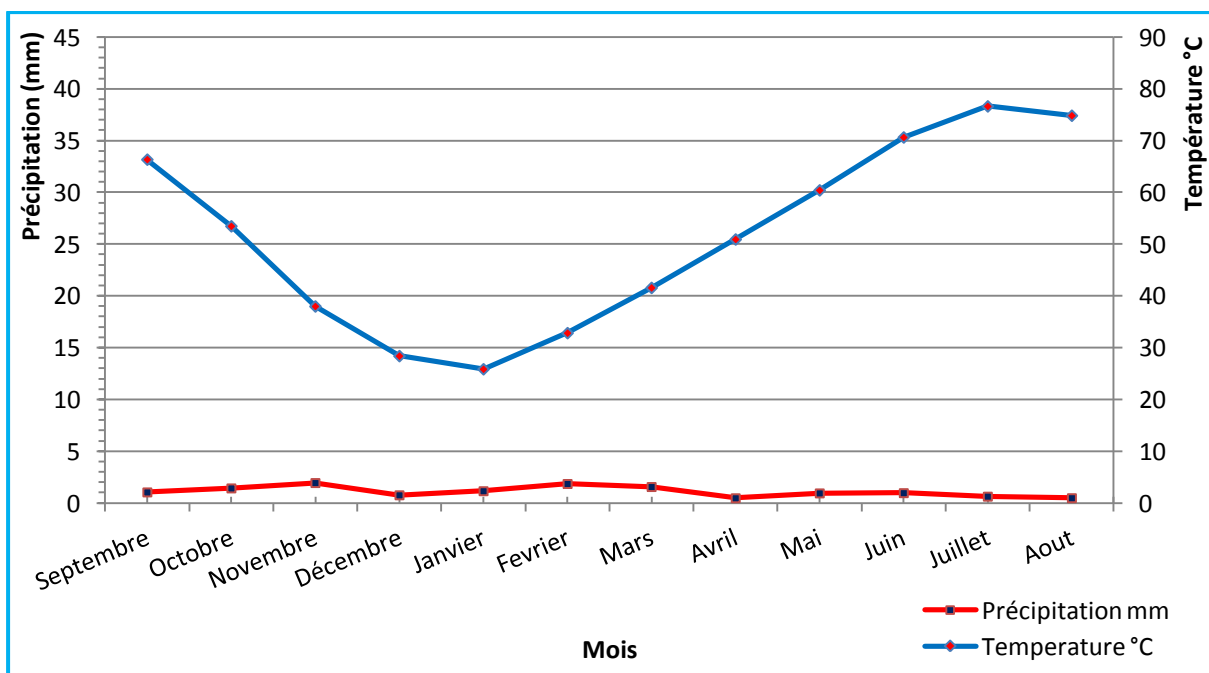


Figure.2.6 Diagramme Ombrothermique pour la période (1991-2010).

2.4. Le Vent

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques de la région d'Adrar, on note que les vents sont très 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, en été, les vents sont chauds et secs (sirocco) avec une direction dominantes des vents NE en hiver et SW en été (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Données sur la vitesse des vents dans la station d'Adrar.

| | J | F | M | A | M | J | JL | A | S | O | N | D | MOY |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Vitesse | 5,7 | 5,6 | 6,6 | 6,3 | 6,0 | 5,5 | 5,8 | 5,6 | 5,6 | 5,5 | 5,3 | 4,8 | 5,7 |
| Moyenne m/s | | | | | | | | | | | | | |

2.5. Humidité relative de l'air.

La répartition des résultats de l'humidité est l'inverse de la répartition des résultats de la température. La valeur maximale de l'humidité de l'air est obtenue en hiver (Décembre-Janvier) et la valeur minimale en été (Juin-Juillet) tel que présenter dans la Figure 2.7, l'humidité relative est faible elle est inférieure à 40%.

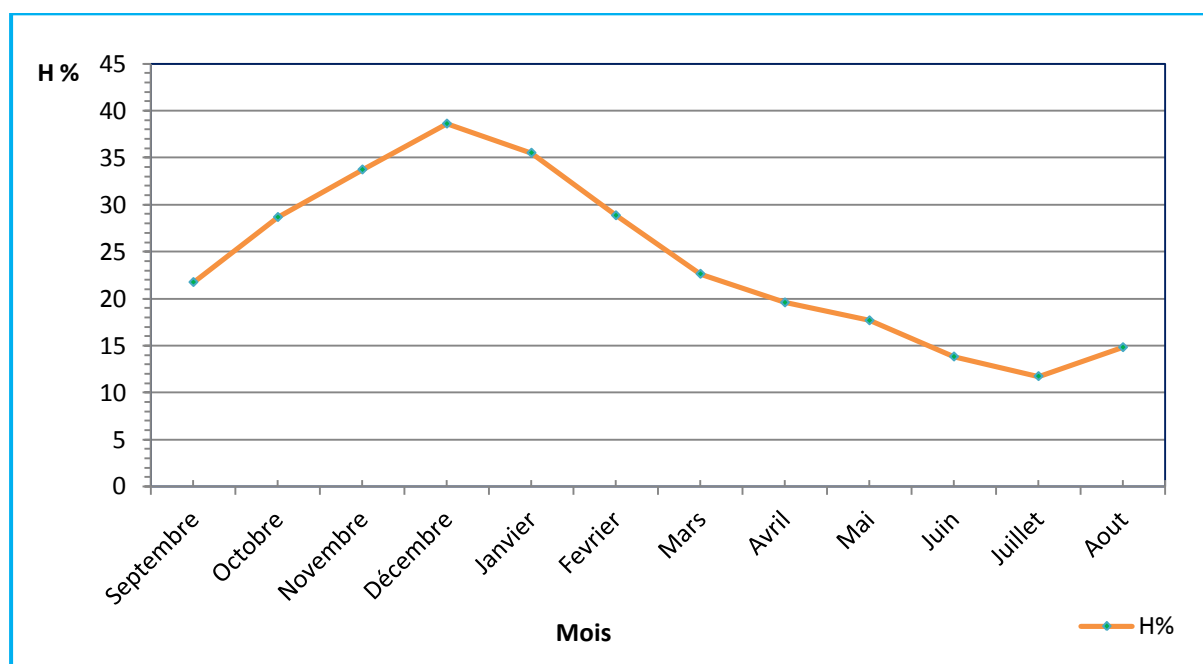


Figure.2.7 Humidité relative station Adrar.

2.6. L'insolation

C'est la période d'ensoleillement du sol avec un ciel clair, c'est le contraire de la nébulosité, le tableau 2.4 ci-dessous montre les valeurs de l'insolation.

Tableau.2.4 Données sur l'Insolation dans la station d'Adrar.

| Mois | J | F | M | A | M | J | JL | A | S | O | N | D | MOY |
|---------------------|-----|----|------|------|----|------|----|------|------|-----|-----|-----|-------|
| Insolation (heures) | 9.6 | 10 | 11.2 | 11.6 | 12 | 13.2 | 13 | 12.4 | 10.8 | 9.6 | 8.7 | 8.2 | 10.85 |

2.7. Détermination des Indices climatiques

2.7.1. 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 :

$$I = P / T + 10$$

Avec :

I : Indice d'aridité.

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

$$P = 13,25 \text{ mm} ; T = 25,89 \text{ °C}$$

$$I = 13,25 / 25,89 + 10 = 0.36 \text{ mm/°C}$$

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

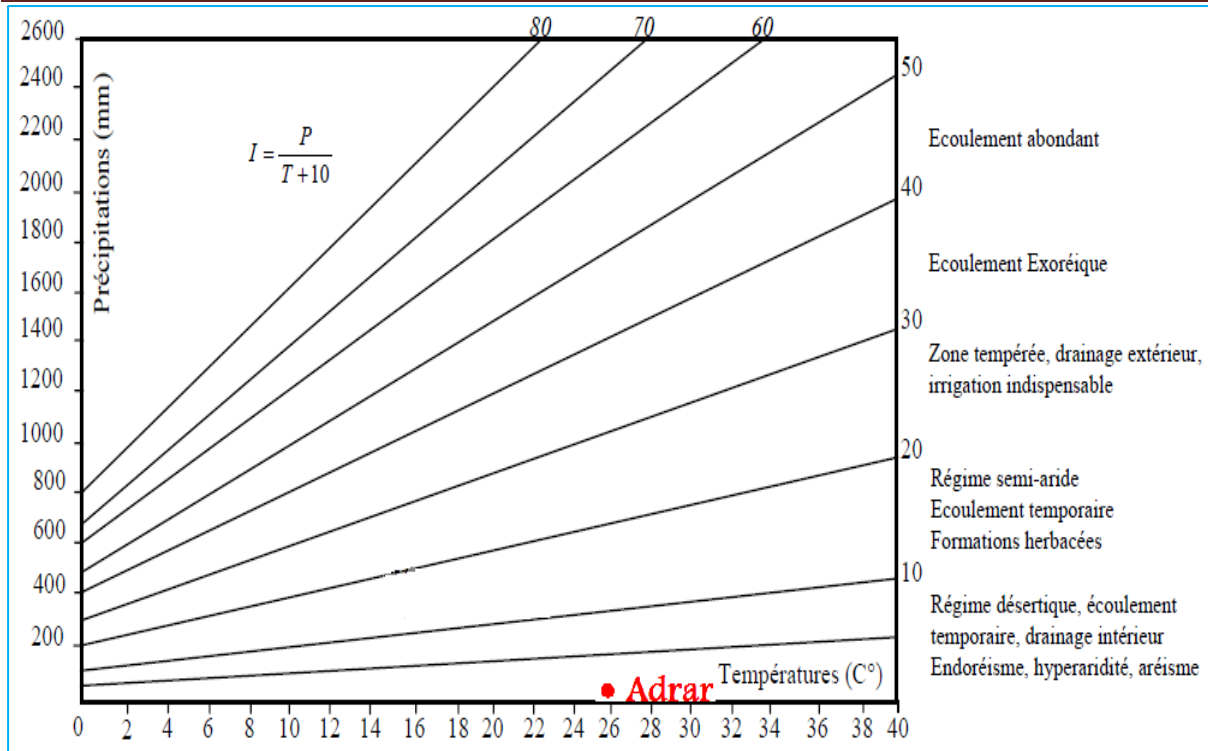


Figure.2.8 Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE MARTONE.

D'après l'indice d'aridité de DE MARTONE, on peut dire que notre région d'étude se caractérise par un climat hyper aride $I < 5$, la figure 2.8 montre la position de notre région.

2.7.2 Climagramme d'Emberger

Pour déterminer les climats, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 , qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement du mois le plus froid et le plus chaud qui permet de positionner une station sur un diagramme, il propose donc la formule suivante :

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

Avec ;

P : Précipitation moyenne annuelle (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)

$P = 13.25 \text{ mm}$ $M = 311.48 \text{ °K}$ $m = 286.09 \text{ °K}$ Ce qui donne : $Q_2 = 1.74$

La figure 2.9 permet de dire que le climat de la région d'Adrar est de type saharien à hiver très chaud.

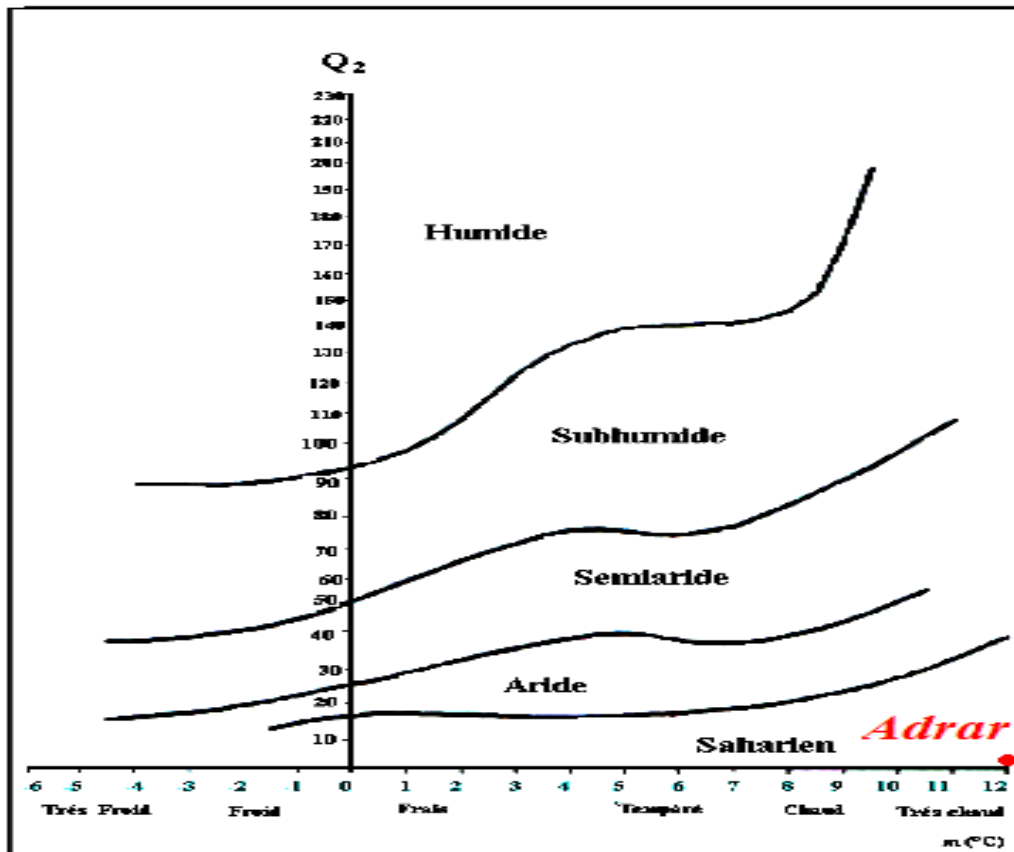


Figure.2.9 Climagramme d'Emberger station d'Adrar.

2.8. Évapotranspiration.

2.8.1. Estimation de l'ETP (l'Évapotranspiration Potentielle).

2.8.1.1. D'après la formule de C.W .Thorntwaite.

C.W. Thorntwaite a proposé également en 1948 une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

avec : $ETP = 16[10t/I]^a k$

$$i = (t/5)^{1.514} \quad I = \sum_1^{12} i$$

$$a = 1.6 \cdot I / 100 + 0.5$$

ETP: Évapotranspiration Potentielle moyenne mensuelle (mm).

i: Indice thermique mensuel.

a: paramètre arbitraire lié à la température.

I: Somme des indices thermiques mensuels.

t: Température moyenne mensuelle (c°).

k: coefficient d'ajustement mensuel.

L'ETP est estimée à 1336 mm/an (voir tableau bilan).

2.8.2. Estimation de l'ETR (l'Évapotranspiration Réelle)

2.8.2.1. ETR selon la formule de Turc

$$\text{ETR} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

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).

| Station | ETR TURC (mm/an) | ETR CW.Tornthwaite (mm/an) |
|---------|------------------|----------------------------|
| ADRAR | 13.96 | 13.25 |

2.9. Bilan hydrique

Cette méthode permet d'établir le bilan hydrique à l'échelle mensuelle, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) sont définies en fonction de la pluie, de la température et en tenant compte de la latitude et de la variation de la réserve facilement utilisable (RFU) (tableau.2.5).

Tableau 2.5 Bilan d'eau selon C.W.Thornthwaite à la station d'Adrar.

| Mois | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 1.04 | 1.43 | 1.94 | 0.76 | 1.16 | 1.85 | 1.56 | 0.48 | 0.95 | 0.97 | 0.63 | 0.48 | 13.25 |
| T (°C) | 33.18 | 26.75 | 19.00 | 14.21 | 12.94 | 16.43 | 20.80 | 25.47 | 30.22 | 35.33 | 38.33 | 37.43 | 25.84 |
| I | 17.55 | 12.66 | 7.55 | 4.86 | 4.22 | 6.05 | 8.65 | 11.76 | 15.23 | 19.30 | 21.83 | 21.06 | 150.74 |
| K | 1.02 | 0.99 | 0.90 | 0.90 | 0.92 | 0.88 | 1.03 | 1.07 | 1.16 | 1.15 | 1.18 | 1.13 | - |
| ETP(mm) | 162.35 | 84.11 | 28.25 | 12.11 | 9.43 | 18.08 | 42.05 | 78.85 | 140.58 | 219.67 | 285.78 | 255.37 | 1336.63 |
| RFU(mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ETR(mm) | 1.04 | 1.43 | 1.94 | 0.76 | 1.16 | 1.85 | 1.56 | 0.48 | 0.95 | 0.97 | 0.63 | 0.48 | 13.25 |
| DA (mm) | 161.31 | 82.68 | 26.31 | 11.35 | 8.27 | 16.22 | 40.49 | 78.37 | 139.64 | 218.70 | 285.15 | 254.89 | 1323.38 |
| EXC(mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

D'après le bilan, on remarque que la zone est déficitaire, l'ETP est de 1336 mm, la réserve facilement utilisable est épuisée, un déficit agricole de 1323 mm et un excédant nul.

Conclusion

Le climat dans la région d'Adrar est connu par sa température élevée, sa précipitation rare et irrégulière, ses tempêtes de sable violentes, ces conditions rendent la région très hostile.

D'après les données, la précipitation moyenne annuelle ne dépasse pas les 14 mm/an, avec une température moyenne de l'ordre de 26 °C, le climat est saharien de type hyper aride.

L'établissement du bilan hydrique et l'estimation de ces paramètres nous permettent de ressortir les résultats suivants :

- Le bilan est déficitaire.
- L'excédent est nul.
- L' RFU est épuisée durant toute l'année.

CHAPITRE III

HYDROGÉOLOGIE

III- HYDROGEOLOGIE

3.1. Définition du système aquifère.

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » couvre une vaste superficie plus d'un million de km², il est reparti entre trois pays à savoir l'Algérie (700 000 km²), la Tunisie (80 000 km²) et la Libye (220 000 km²). Il s'étend du Nord depuis l'Atlas Saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et le rebord méridional du Tinrhert au Sud et de l'Ouest depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye à l'Est. Ce bassin renferme une série des couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI).

Le bassin SASS se subdivise en trois sous bassins : le bassin du Grand Erg Occidental à l'Ouest, le bassin du Grand Erg Oriental au centre et le plateau de la Hamada El Hamra à l'Est.

Notre région d'étude fait partie du bassin du Grand l'Erg Occidental (Figure 3.1), 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 (C.Kilian) :

- A la base, le cycle essentiellement marin du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne.
- Au sommet, le cycle marin du Crétacé supérieur, résultat de la transgression cénomaniennne.

L'examen de la carte géologique permet donc de définir le Continental Intercalaire comme l'ensemble continental compris entre un toit « base du cénomaniennne » et un mur « entre la discordance hercynienne et le barrémien ».

3.2 Le Continental Intercalaire dans la région d'étude.

Le Continental Intercalaire est la seule et unique nappe d'eau dans la région d'étude, elle affleure tout le long de l'axe reliant Timimoun à In Salah (figure 3.1), elle représente la partie à surface libre du Système Aquifère du Sahara Septentrional dans sa partie Sud Ouest.

La nappe d'eau est contenue dans des formations d'âge crétacé inférieur, composée

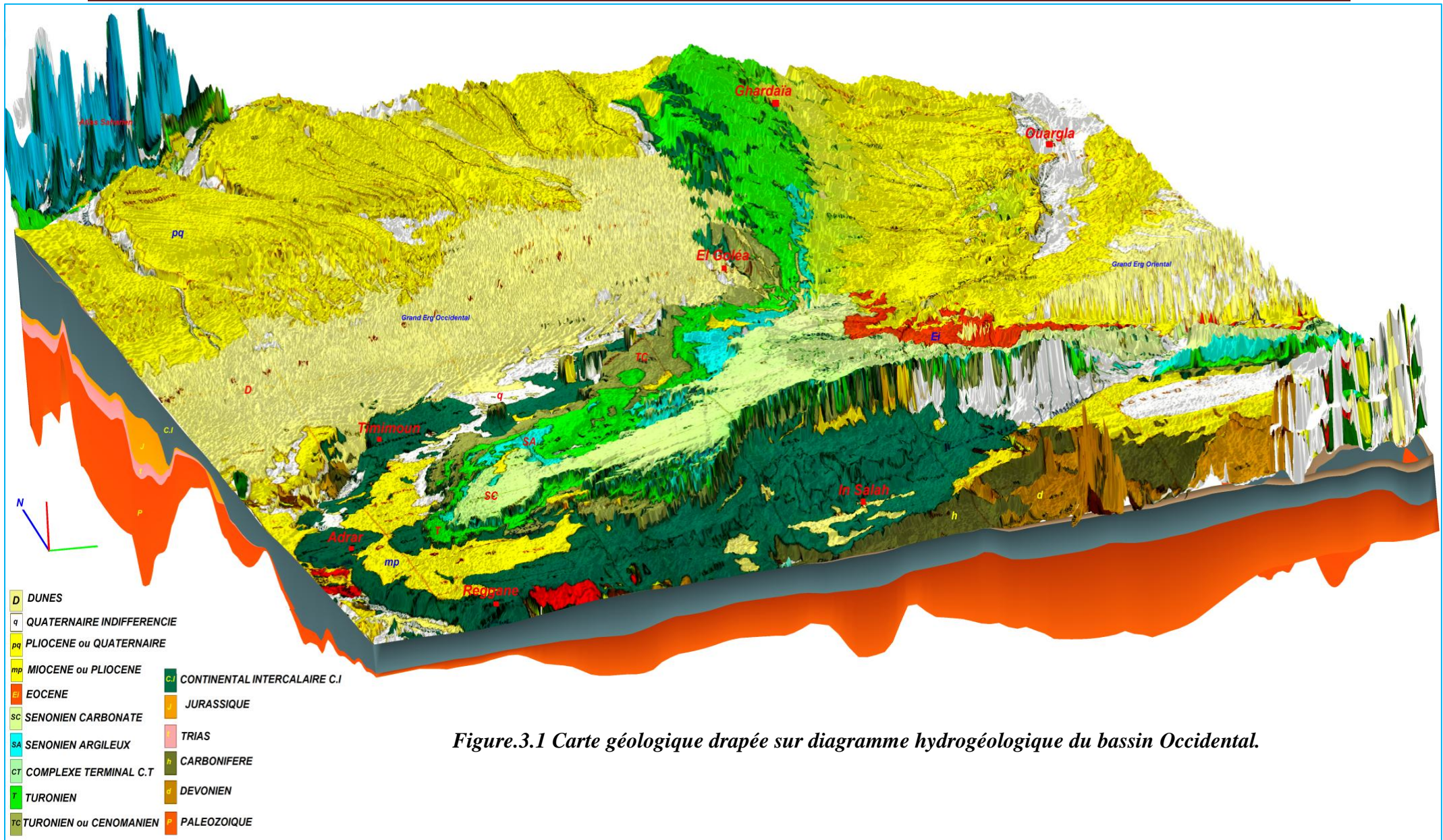


Figure.3.1 Carte géologique drapée sur diagramme hydrogéologique du bassin Occidental.

d'une lithologie meuble, argile, grès, sable et gravier, elle est sollicitée par 271 foggaras, 219 forages et plus de 2161 puits traditionnels dans l'axe reliant Adrar à Reggane, le niveau statique est de l'ordre de 10 à 30 m par rapport au sol et qui dépasse les 100 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, avec des débits des forages de l'ordre de 20 à 50 l/s qui engendrent des rabattements de 10 à 25 m.

3.3. Épaisseur du Continental Intercalaire.

Sur la base des logs de forages nous avons réalisé deux cartes, une pour l'épaisseur de la nappe (figure 3.2), et l'autre pour le substratum (figure 3.3), ainsi qu'un diagramme des formations hydrogéologiques de la partie Ouest du S.A.S.S qui englobe dans sa partie Sud Ouest la région d'étude (figure 3.4), d'après ce diagramme et les deux cartes, l'épaisseur de la nappe du Continental Intercalaire diminue de Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud, il est de l'ordre de 700 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, alors qu'il est de moins de 40 m vers l'Erg Echech.

Les forages réalisés par les différents services de l'état (ANRH, DRE, DSA, ADE ...etc.) montrent que l'épaisseur du Continental Intercalaire dans la zone d'étude est peu épais, allant d'Adrar à Reggane l'épaisseur du CI ne dépasse pas les 250 m.

Les forages réalisés par la Compagnie d'Exploration Pétrolière (CEP) au Sud de Kahal de Tabelbala à l'extrême Ouest de la zone d'étude confirment que le Continental Intercalaire est érodé dans les forages K4 au K7 vers 1° 30'W (G.Conrad, 1969).

3. 4. Lithologie de la nappe du Continental Intercalaire.

L'analyse des coupes lithologiques des forages réalisés dans la région d'étude montre qu'il n'y a pas un grand changement latéral de faciès dans les forages, la majorité des forages ont presque la même lithologie, on trouve de haut en bas :

- Une dalle très dure de calcaire ou de calcaire dolomitique, ou de grès quartzitique.
- Une couche gréseuse et argileuse et argile multicolore.
- Une couche de sable et de gravier.
- Une couche d'argile sableuse avec gypse ou anhydrite.
- Une couche d'argile rouge ou marron plastique.

Cette lithologie est typique pour la majorité des forages de la région d'étude. (Voir coupes techniques 1 et 2 des forages en Annexes1 et 2).

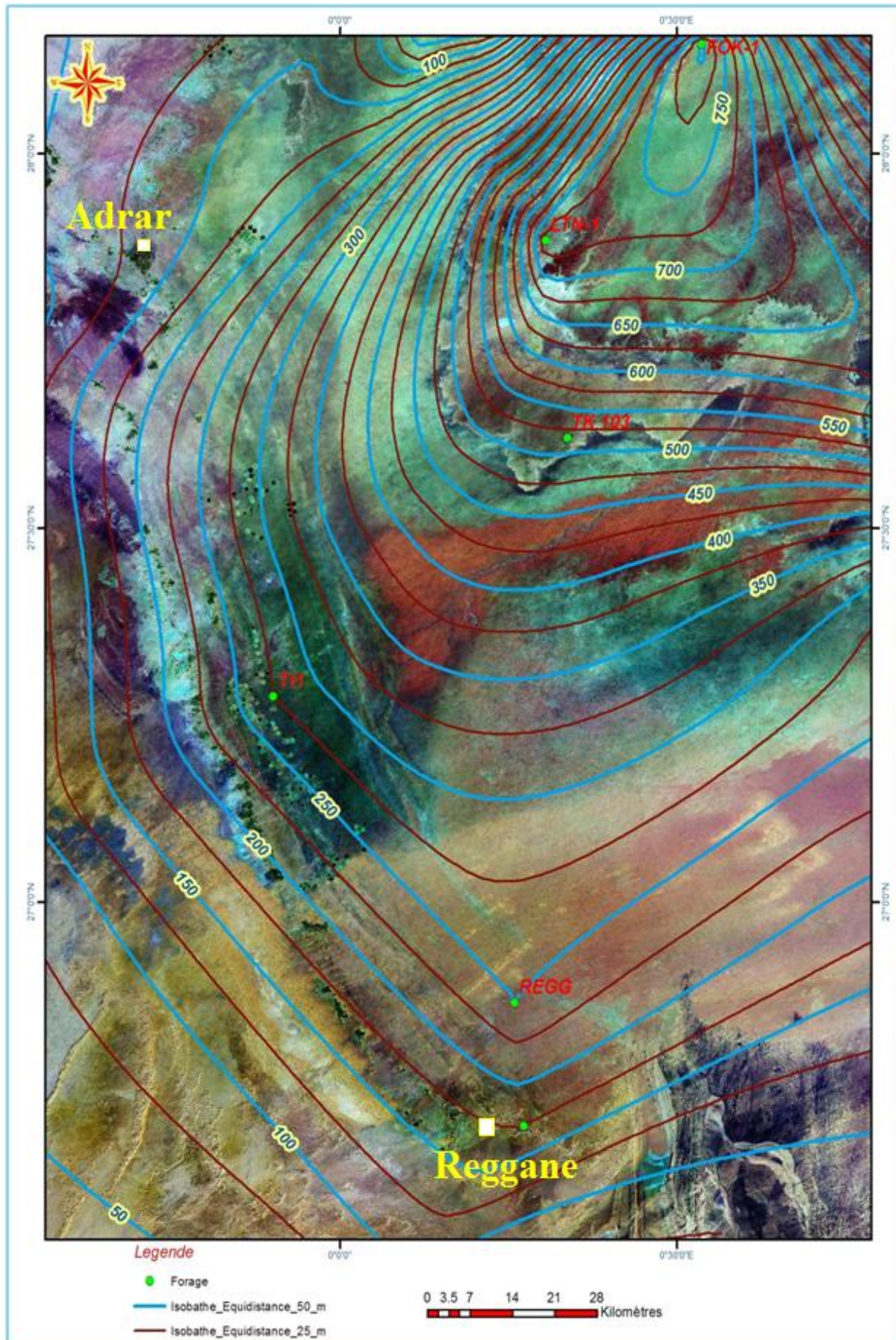


Figure.3.2 Carte de l'épaisseur de la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar.

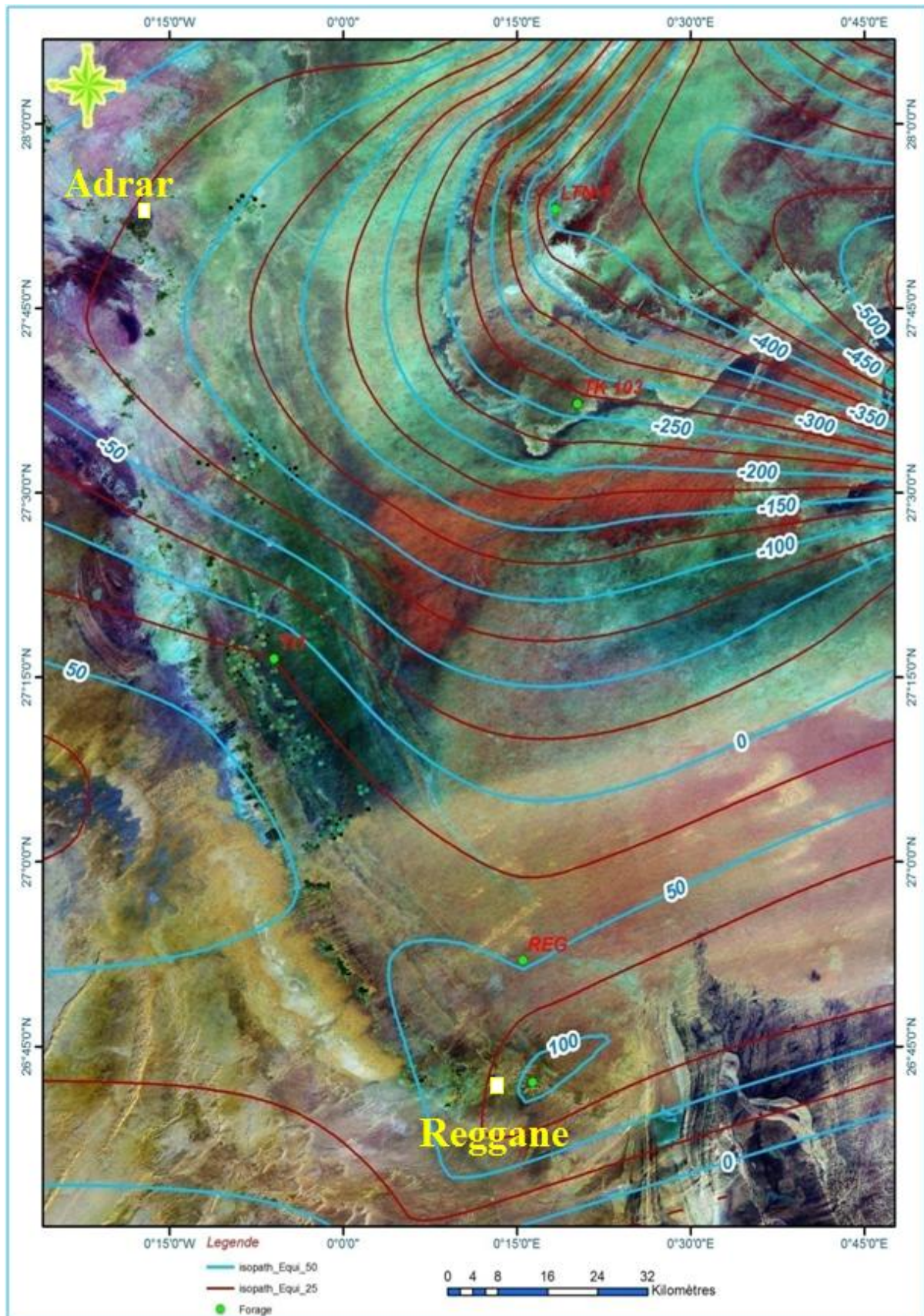


Figure.3.3 Carte d'altitude du Substratum de la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar.

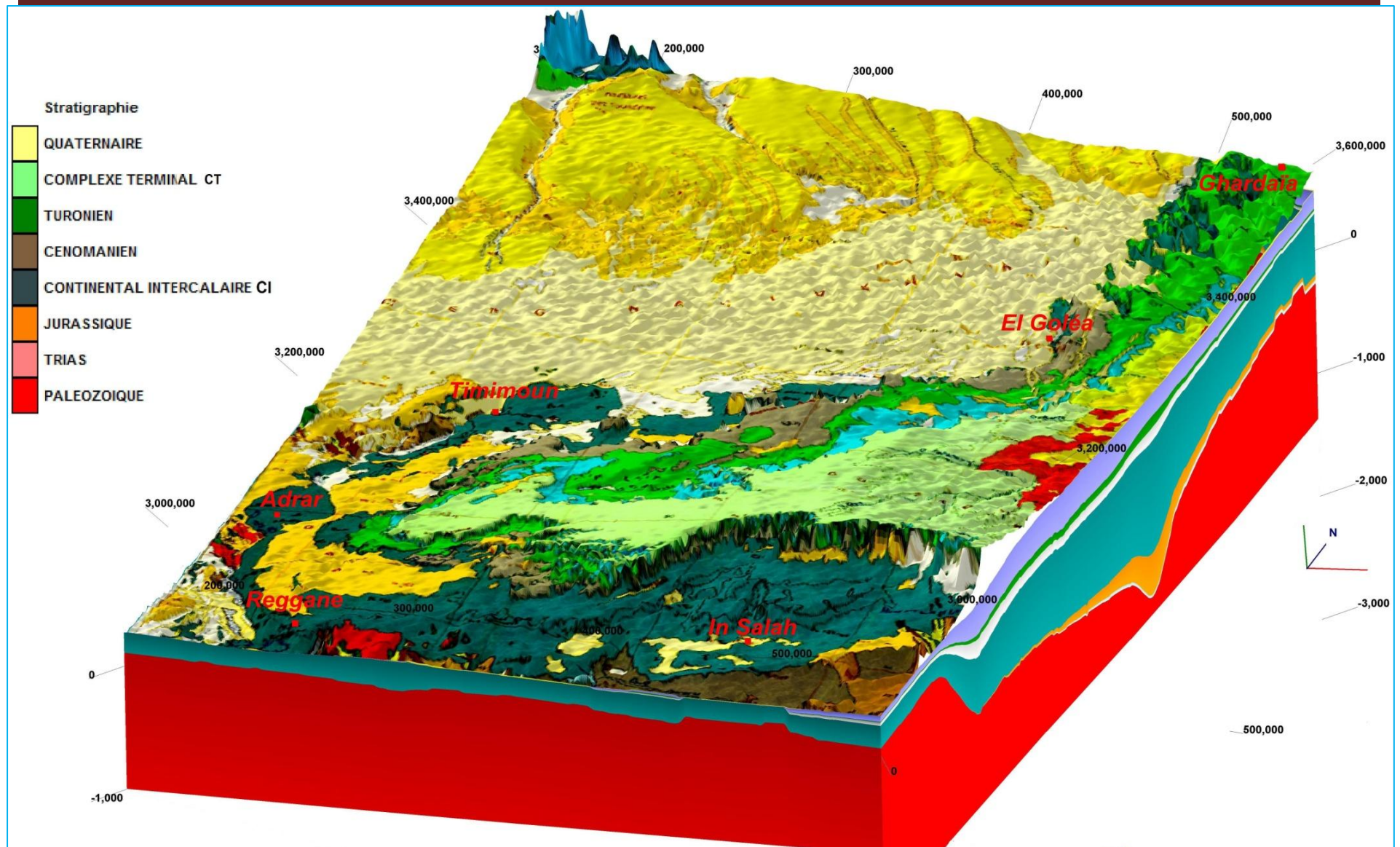


Figure.3.4 Carte géologique drapée sur diagramme hydrogéologique de la région d'Adrar.

3.5 Piézométrie du Continental Intercalaire.

3.5.1 Inventaire des points d'eau.

Dans la cadre d'une gestion rigoureuse de la ressource en eau, l'agence nationale des ressources hydraulique (ANRH) représentée par sa direction régionale d'Adrar a réalisé l'inventaire de tous les points d'eau (Forage, Foggara, Puits) à travers la wilaya d'Adrar par GPS (Global Positioning System).

Ce travail nous a facilité la tâche pour la réalisation de cette étude, il a permis aussi de construire une géante base de données et de là gérer par un SIG (Système d'Information Géographique).

Notre région d'étude est exploitée par plus de 2651 points d'eau (forages, foggaras et puits traditionnels), le tableau 3.1 donne un récapitulatif de l'inventaire des points d'eau dans la zone d'étude.

Tableau.3.1 Inventaire des points d'eau dans la région d'étude.

| Désignation | Exploité | Non Exploité | Totaux |
|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Forage A.E.P | 97 | 51 | 148 |
| Forage Irrigation | 114 | 301 | 415 |
| Forage Industrie | 8 | 9 | 17 |
| Puits traditionnel | 2161 | - | 2161 |
| Foggara | 271 | 286 | 557 |
| Totaux | 2651 | 647 | 3298 |

La totalité des points d'eau de la région sont concentrés sur une bande de 20 km de large et de 170 km de longueur, cette partie se trouve juste à la limite Sud-ouest de la nappe du Continental Intercalaire.

3.5.2 Piézométrie.

Pour la réalisation de la cartographie piézométrique, nous avons utilisé les données du réseau piézométrique de l'ANRH d'Adrar installé en 2007 pour les années 2007 et 2010, et les données de l'Étude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional (ERESS) réalisée durant la période 1969-1971 par l'UNESCO pour l'année de 1971, ce qui nous a permis de suivre sur presque 40 ans d'observation l'évolution piézométrique de la nappe du Continental Intercalaire (C.I) dans le temps et dans l'espace dans sa partie Sud-ouest d'une part et d'autre part de connaître la direction générale de l'écoulement et d'identifier les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

3.5.2.1 Piézométrie de 1971.

A fin de suivre l'évolution de la piézométrie dans la région d'étude, nous avons reconstitué la carte piézométrique de l'ERESS de 1971 (figure 3.5), avec 132 points de mesures qui englobent tout le SASS, la première constatation et que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant un axe de direction Nord-est Sud-ouest, les courbes isopièzes sont resserrées dans la partie Sud-ouest, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.002.

Dans la partie Nord-est, les courbes isopièzes sont espacées, indiquant un faible gradient hydraulique, de l'ordre de 0.0003, c'est une zone vierge, qui représente la zone de flux d'alimentation de la nappe provenant des rebords du plateau de Tademaït.

3.5.2.2 Piézométrie de Décembre 2007.

Le réseau piézométrique utilisé est composé de 30 piézomètres installés autour de la ville d'Adrar sur un rayon de 60 km, complété par les niveaux piézométriques de quelques forages réalisés dans la même période pour contourner une zone de 170 km de longueur, 44 points au total sont utilisés pour l'établissement de cette carte (figure 3.6).

D'après la carte piézométrique, le sens d'écoulement de la nappe est orienté Nord-est Sud-ouest, avec un abaissement du niveau piézométrique estimé à huit (08) mètre par rapport au niveau de 1971 (soit une diminution de 8 m durant 36 ans). Le gradient hydraulique est faible, il est de l'ordre de 0.003 dans la région de Tasfaout, pour les autres régions le gradient hydraulique est de l'ordre de 0.0001 au centre et de 0.0002 à l'Est de la zone d'étude.

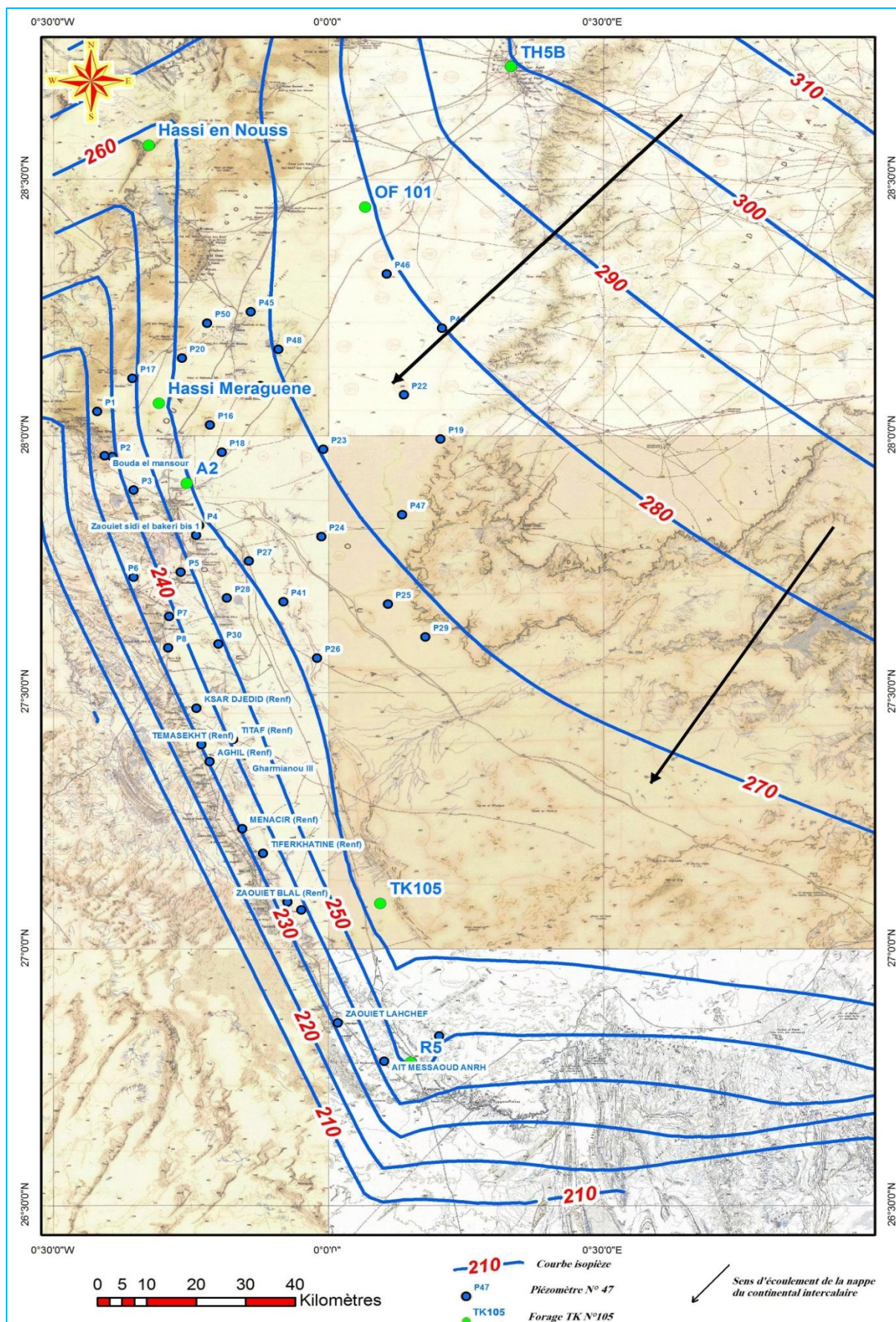


Figure.3.5 Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar, 1971.

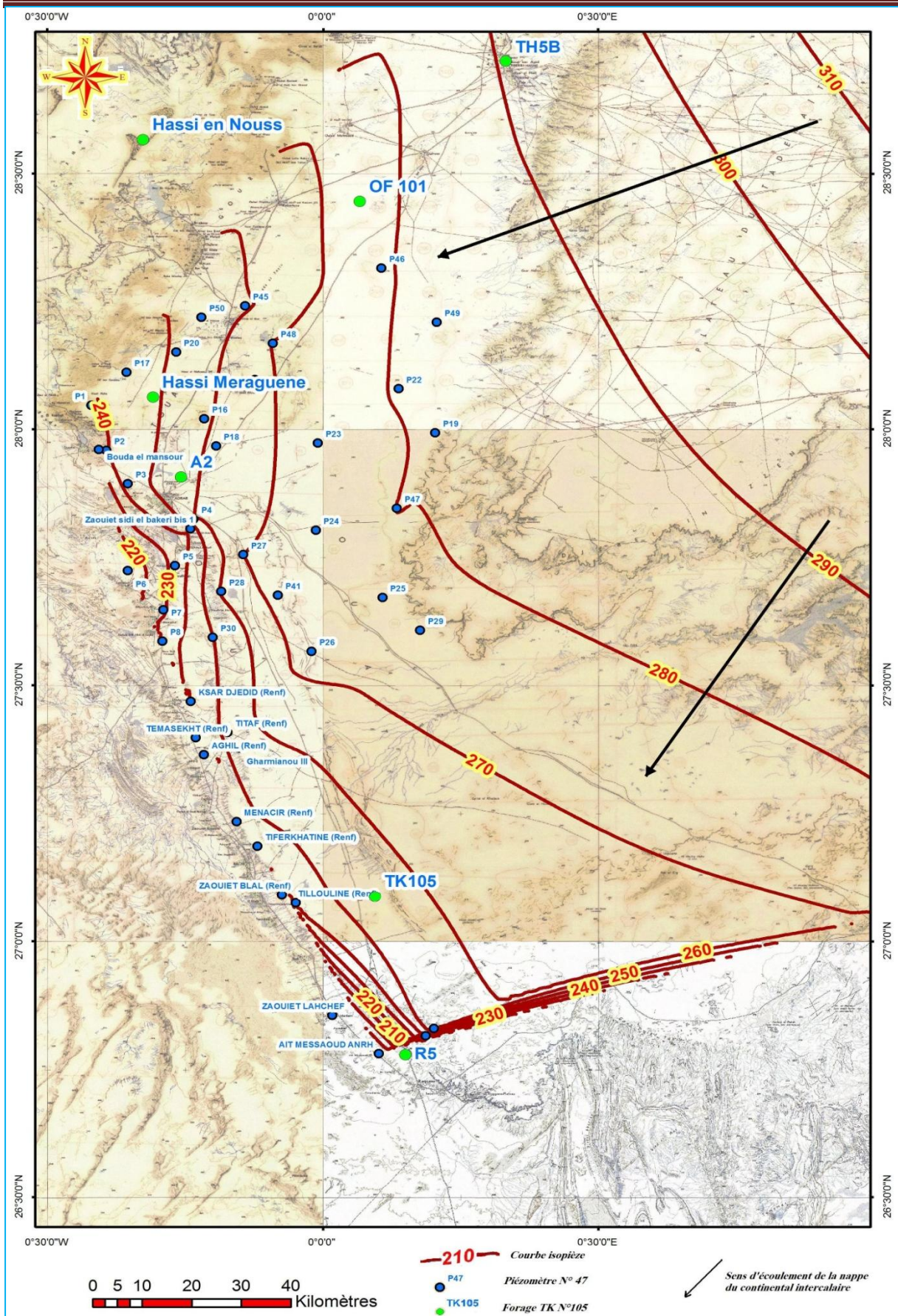


Figure.3.6 Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar, décembre 2007.

3.5.2.3 Piézométrie de Mars 2010.

Nous avons utilisé aussi les données des 30 piézomètres, complétées par les niveaux de 10 forages réalisés dans la même période, soit 40 points d'eau employés pour l'établissement de cette carte (figure 3.7).

L'examen de cette dernière conduit aux mêmes constatations que celle signalées dans la carte de 2007, le même sens d'écoulement de la nappe, Nord-est Sud-ouest, avec un abaissement du niveau piézométrique estimé à plus de huit (08) mètre par rapport au niveau de 1971, 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.

3.5.2.4 Évolution piézométrique entre 2007 et 2010 autour de la ville d'Adrar.

La comparaison des deux cartes piézométriques réalisées pour les deux périodes à savoir Décembre 2007 et Mars 2010 (figure 3.8 et 3.9) par le même réseau de surveillance (30 piézomètres) autour de la ville d'Adrar, nous a permis de dégager les premières constatations sur l'évolution du niveau piézométrique dans la région, premièrement, qu'il y a un abaissement de quelques centimètres dans la région d'étude, mais avec un rabattement significatif de l'ordre de 20 à 50 cm au alentour du champ captant de la ville d'Adrar (champ captant de Tililane), deuxièmement une chute alarmante de 3.08 mètre dans le piézomètre P06 près de la ville de Tasfaout, et qui marque aussi un écoulement convergeant vers le piézomètre P06, ce dernier est situé près des affleurements du primaire, le gradient hydraulique est similaire pour les deux périodes, avec 0.003 pour la partie Sud et 0.0008 pour la partie Nord.

3.6 Paramètre hydrodynamique de la nappe du Continental Intercalaire C.I.

3.6.1 Transmissivité T:

L'analyse des différents résultats des essais de pompage réalisés dans la région d'étude montre qu'il n'y a pas une grande variation des valeurs de la transmissivité de l'aquifère, vue qu'il n'y a pas un grand changement latéral de faciès et que la nappe est libre dans toute la région d'étude.

La carte des transmissivités dressée à partir des données issues des essais de pompage (figure 3.10) montre que les valeurs de la transmissivité dans la partie où le Continental Intercalaire affleure sont de l'ordre de 0.01 à 0.08 m²/s.

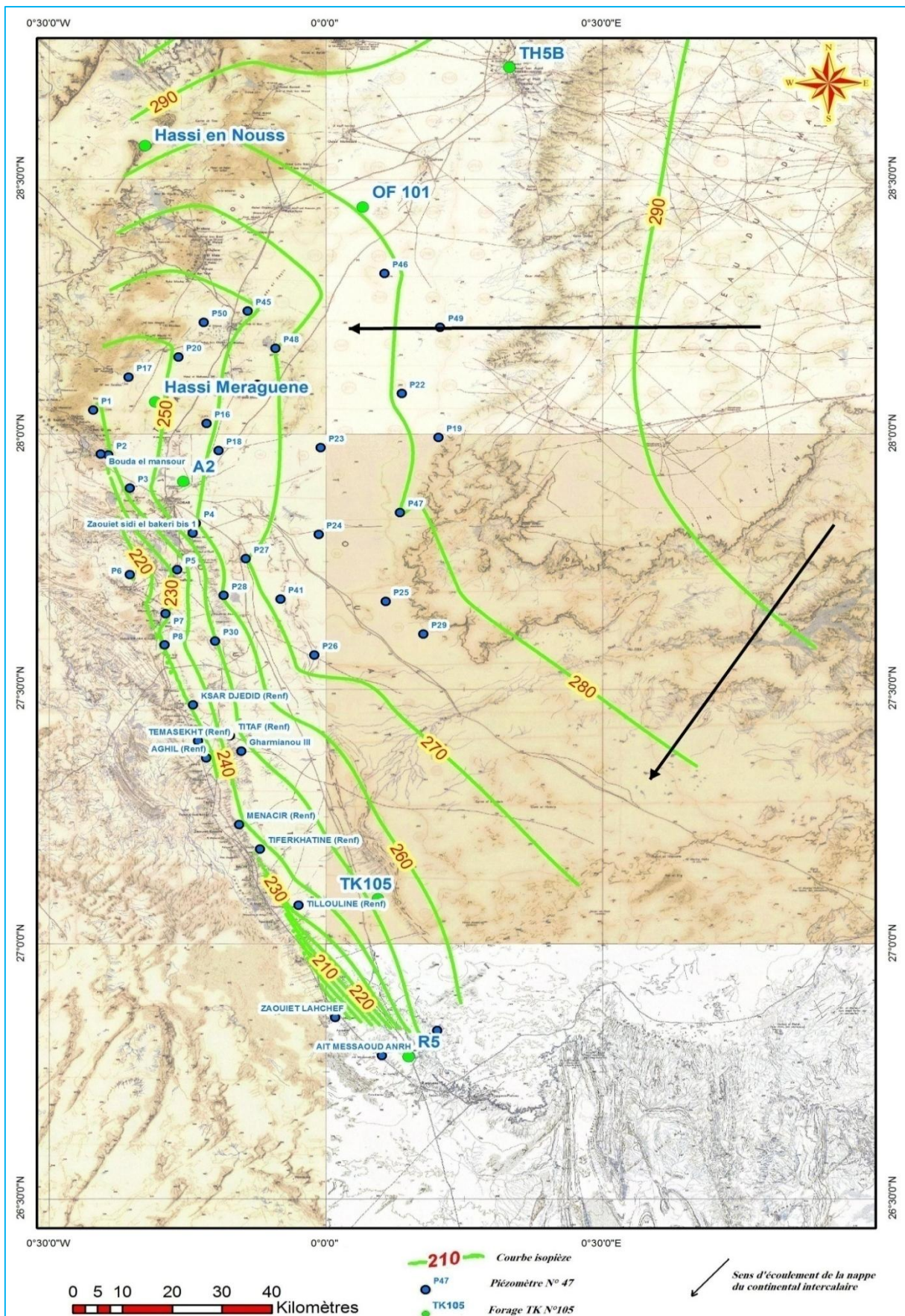


Figure.3.7 Carte piézométrique du Continental Intercalaire dans la région d’Adrar, Mars 2010.

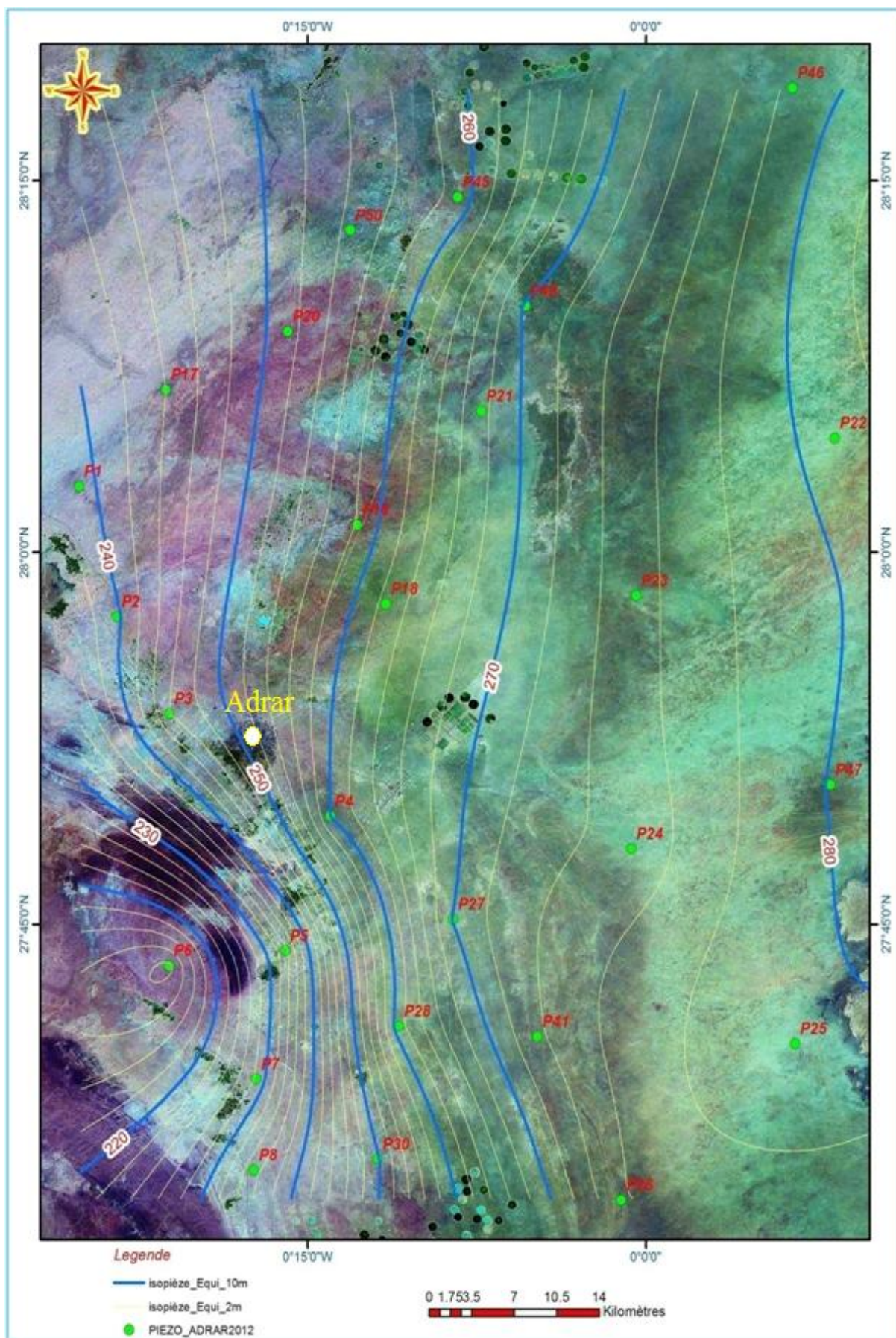


Figure.3.8 Carte piézométrique du Continental Intercalaire autour de la ville d'Adrar, Décembre 2007.

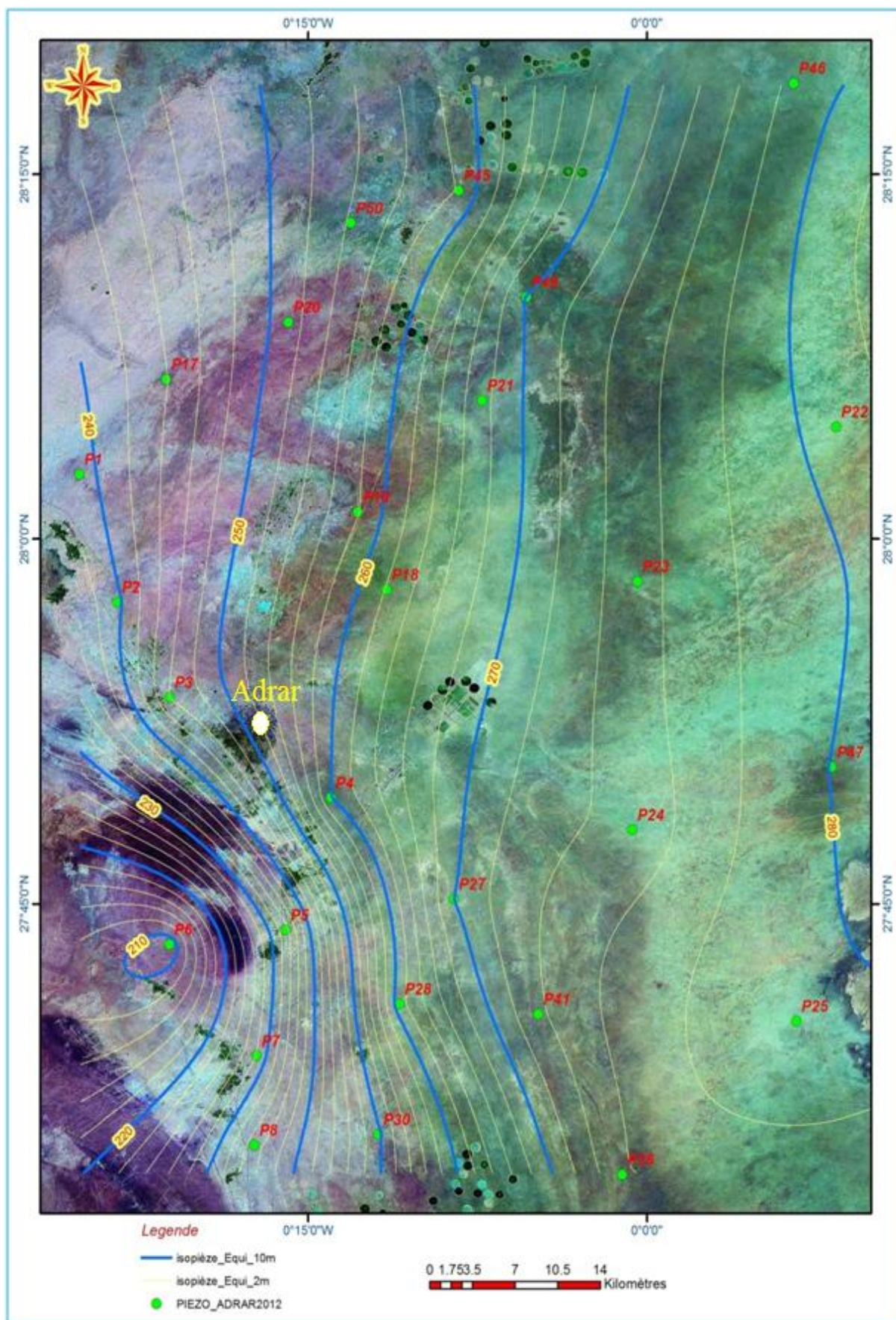


Figure.3.9 Carte piézométrique du Continental Intercalaire autour de la ville d'Adrar, Mars 2010.

3.6.2 Coefficient d'Emmagasinement S :

Vue le manque et la rareté des essais de pompage réalisés avec des piézomètres d'observation pour le calcul du coefficient d'emmagasinement qui englobe toute la région, nous avons utilisé seulement les données issues du modèle mathématique de l'OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel, 2002) pour cartographier le coefficient d'emmagasinement dans la région d'étude.

La reconstitution de la carte du coefficient d'emmagasinement (figure 3.11) montre que les valeurs du coefficient sont de l'ordre de 0.05 dans la partie où le CI est libre et entre 0.005 et 0.0004 sous le Grand Erg Occidental et le plateau de Tademaït, là où le Continental Intercalaire s'enfonce et la nappe devient captive sous le recouvrement du crétacé supérieur du plateau de Tademaït.

3.7 Estimation des réserves et recharge de la nappe du C.I.

L'immensité du système aquifère du Continental Intercalaire C.I (1.1 million km²) rend l'estimation de ses réserves très difficile, plusieurs études réalisées pour l'estimation de la capacité du réservoir du Continental Intercalaire mais ces études ne tiennent pas compte de toute la partie libyenne du système aquifère (Ould Baba sy, 2004) on peut citer :

- CORNET (1961 et 1964) : avec un volume de 50000 10⁹ m³.
- L'Étude de l'ERESS en 1971 : avec un volume de 60000 10⁹ m³
- MARGAT (1992) : avec un volume de 40000 10⁹ m³
- OULD BABA SY (2005) : avec un volume de 20000 10⁹ m³

Concernant la recharge du Continental Intercalaire, elle s'effectue d'une façon directe sur les zones d'affleurement :

- du piémont de l'Atlas saharien au Nord-ouest.
- du massif du Dahar à Est.
- des rebords Ouest du plateau de Tademaït et au Sud du plateau du Tinrhert.

Ou indirectement à travers les sables dunaires du Grand Erg Occidental, elle est estimée selon plusieurs auteurs à :

- CORNET (1961) : 25 m³/s.
- l'étude BURGEAP (1963) : 15 m³/s.
- OULD BABA SY (2005) : 9,37 m³/s

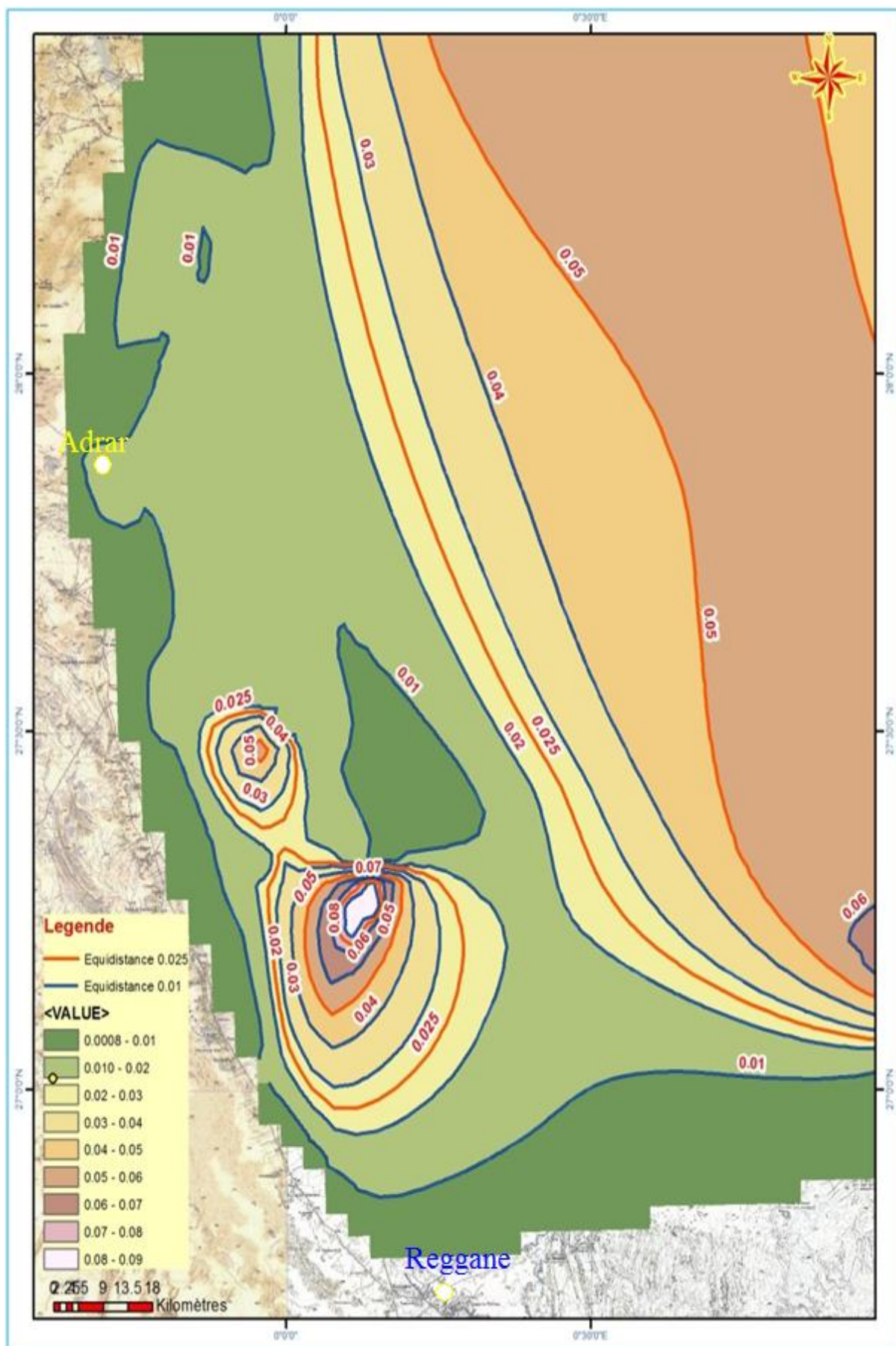


Figure.3.10 Carte de la Transmissivité (m^2/s) du Continental Intercalaire C.I.

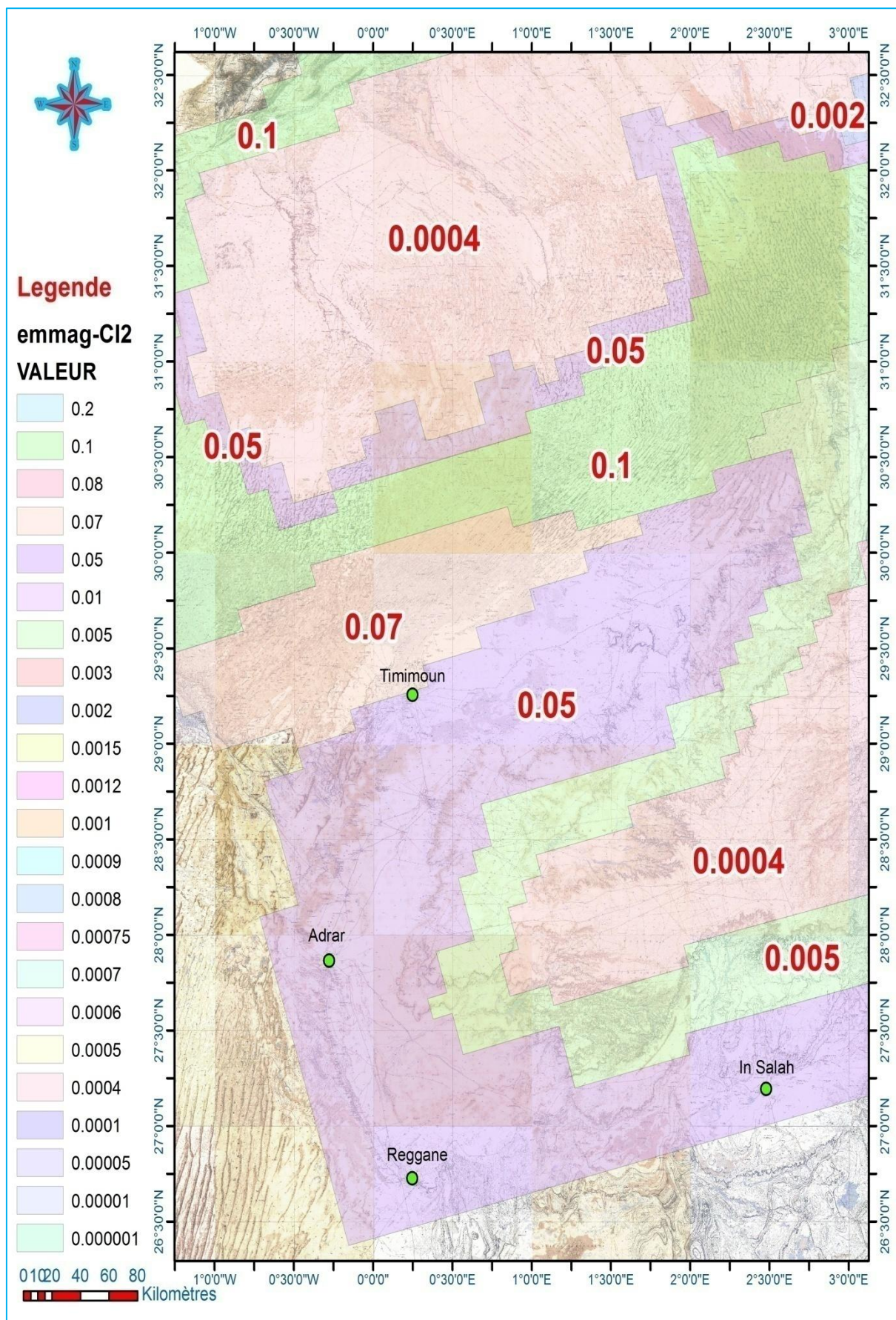


Figure.3.11 Carte du Coefficient d'emménagement du Continental Intercalaire C.I.

3.8 Débit d'Exploitation :

Les débits extraits par les différentes méthodes d'exhaures dans la zone d'étude, ne reflète pas la réalité, surtout pour les forages, puisque chaque année il y a un changement de nombre des forages qui sont mis en service par les agriculteurs ainsi que l'irrégularité des fréquences de pompage, en ajoutons le nombre exact des puits traditionnels en exploitations repartis sur une distance de 170 km.

Le tableau 3.2 ci-dessous récapitule les données des débits extraits dans la région allant d'Adrar à Reggane.

Tableau 3.2 Débit extrait dans la région d'étude.

| Désignation | Débit en m³/s |
|---------------------------|---------------------------------|
| Forage A.E.P | 1.115 |
| Forage Irrigation | 1.199 |
| Forage Industrie | 0.044 |
| Puits traditionnel | 0.720 |
| Foggara | 0.920 |
| Totaux | 4.038 |

3.9 Simulation des rabattements dans la région d'Adrar

Afin de suivre l'évolution des rabattements dans la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'étude, une simulation des rabattements des forages lorsque tous les forages exploitent simultanément la nappe, les paramètres choisis pour cette simulation sont ; Transmissivité 0.01 m²/s, coefficient d'emmagasinement 5%, avec des intervalles de temps de 5, 10, 15 et 20 ans, les résultats montrent qu'il y a de 15 à 20 m de rabattement pour les 20 ans de pompage ce qui influe négativement sur le système de captage traditionnel foggara, la figure 3.12 montre l'évolution des rabattements durant les intervalles des simulations.

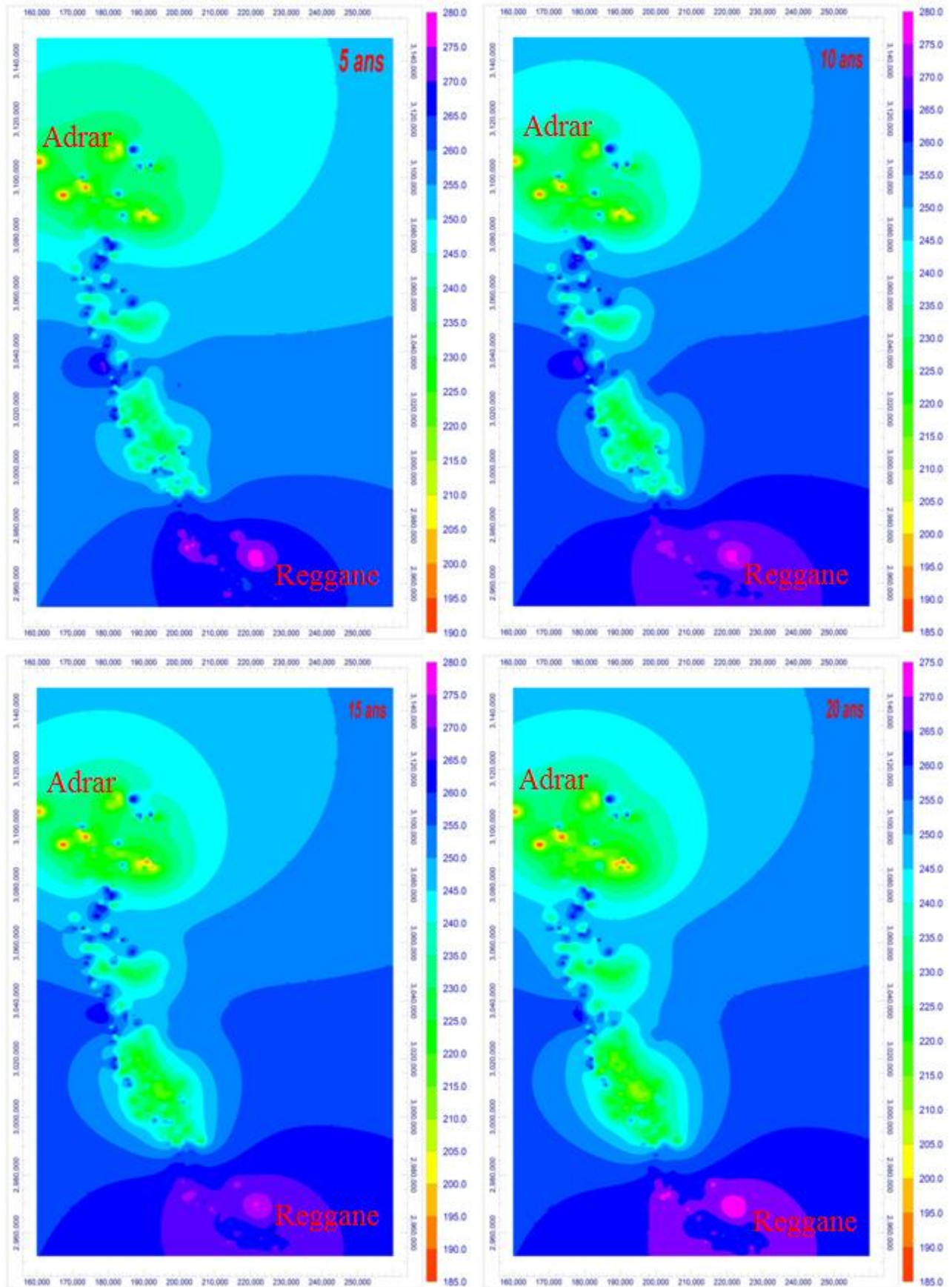


Figure.3.12 Simulation des rabattements dans la région d'Adrar.

Conclusion

Le système aquifère dans la région d'Adrar est représenté par une seule nappe à savoir le Continental Intercalaire C.I, cette dernière est contenue dans des formations d'âge crétacé inférieur, elle est composée de (sable, grès, argile et graviers), la profondeur des forages qui captent cette nappe est de l'ordre de 100 à 200 m, le niveau statique de la nappe varie du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest, il est de 10 à 30 m par rapport au niveau du sol, avec des débits d'exploitation de 20 à 50 l/s.

Les paramètres hydrodynamiques qui caractérisent la nappe sont estimés pour la transmissivité de $1 \text{ à } 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, et de l'ordre de 0.05 pour le coefficient d'emmagasinement, le débit extrait dans la région d'étude est de $4.038 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'analyse des cartes piézométriques réalisées montrent qu'il y a un abaissement du niveau piézométrique de la nappe dans la région sur une période de 40 ans d'observation, estimé à plus de 8 m, la simulation des rabattements dans la région a ressorti un rabattement de 15 à 20 m en maintenant le débit d'exploitation actuel sur une période de 20 ans. Le rabattement à l'échelle régionale de la nappe du Continental Intercalaire d'après le modèle de l'OSS estimé à 15 m avec les débits actuels d'exploitation, ce qui totalise un rabattement de 35 m durant les 20 prochaines années.

Cette constatation doit être prise en considération vue que le système de captage traditionnel des eaux « foggara » est un système très fragile où toute fluctuation du niveau piézométrique va influencer sur le fonctionnement global du système.

CHAPITRE IV

*SYSTÈME DE CAPTAGE
TRADITIONNEL DES
EAUX « FOGGARA »*

IV. SYSTÈME DE CAPTAGE TRADITIONNEL DES EAUX « FOGGARA »

4.1. Introduction

En survolant le désert ou en traversant les pistes d'Adrar, une harmonie de buttes comme des taupinières géantes alignées avec une symétrie remarquable nous frappent aux yeux, ce sont les « Foggaras » d'Adrar, un système de captage traditionnel des eaux souterraines daté de plusieurs siècles.

De Timimoun à In Salah sur presque 800 km, un archipel d'oasis se développe au piedmont du plateau de Tademaït, cette position n'est pas un fait du hasard, mais un acte ingénieux, une pente douce et une couche saturée d'eau, deux conditions naturelles, topographie et hydrogéologie de la région ont favorisé l'invention de ce système hydraulique de captage et de distribution des eaux de la nappe du Continental Intercalaire.

Ce système de captage est composé d'une succession de puits pour l'évacuation et l'entretien et d'une galerie souterraine qui draine l'eau de la nappe pour l'amener à la surface du sol.

L'eau sortie à la surface par gravité sera distribuée équitablement entre les copropriétaires de la foggara par un partiteur appelé « Kasria », l'eau ainsi partagée sera acheminée par des rigoles appelées « Seguias » vers le jardin de chaque copropriétaire ou repartagée une deuxième fois par une autre Kasria plus petite, arrivée au jardin, l'eau sera accumulée dans un bassin appelé « Majen » pour irriguer ensuite les palmiers dattiers et les différentes parcelles de cultures « Guemoun » du jardin.

4.2. Historique de la Foggara :

Le système de captage des eaux souterraines « Foggara » se trouve dans plusieurs pays mais sous différentes appellations, on le trouve en Chine sous le nom de « Karez », en Iran « qanat », au Pakistan « Kharez », au Yamen « Sahrij », au Oman « Falej », en Syrie sous le nom de « Kanawat », en Tunisie « Ngoula », au Maroc sous le nom de « Kheffara » et en Espagne « Minas », On trouve aussi des adductions similaires en Azrabeidjan, Arménie et dans l'ancienne Égypte.

D'après plusieurs auteurs cette technique aurait pris naissance en Iran, Hérodote mentionne l'existence de ce système en Mésopotamie au Ve siècle av.J.C, Polybe signale aussi ce système en Perse au IIIe et au IIe siècle avant J.C, ce qui atteste l'origine lointaine de

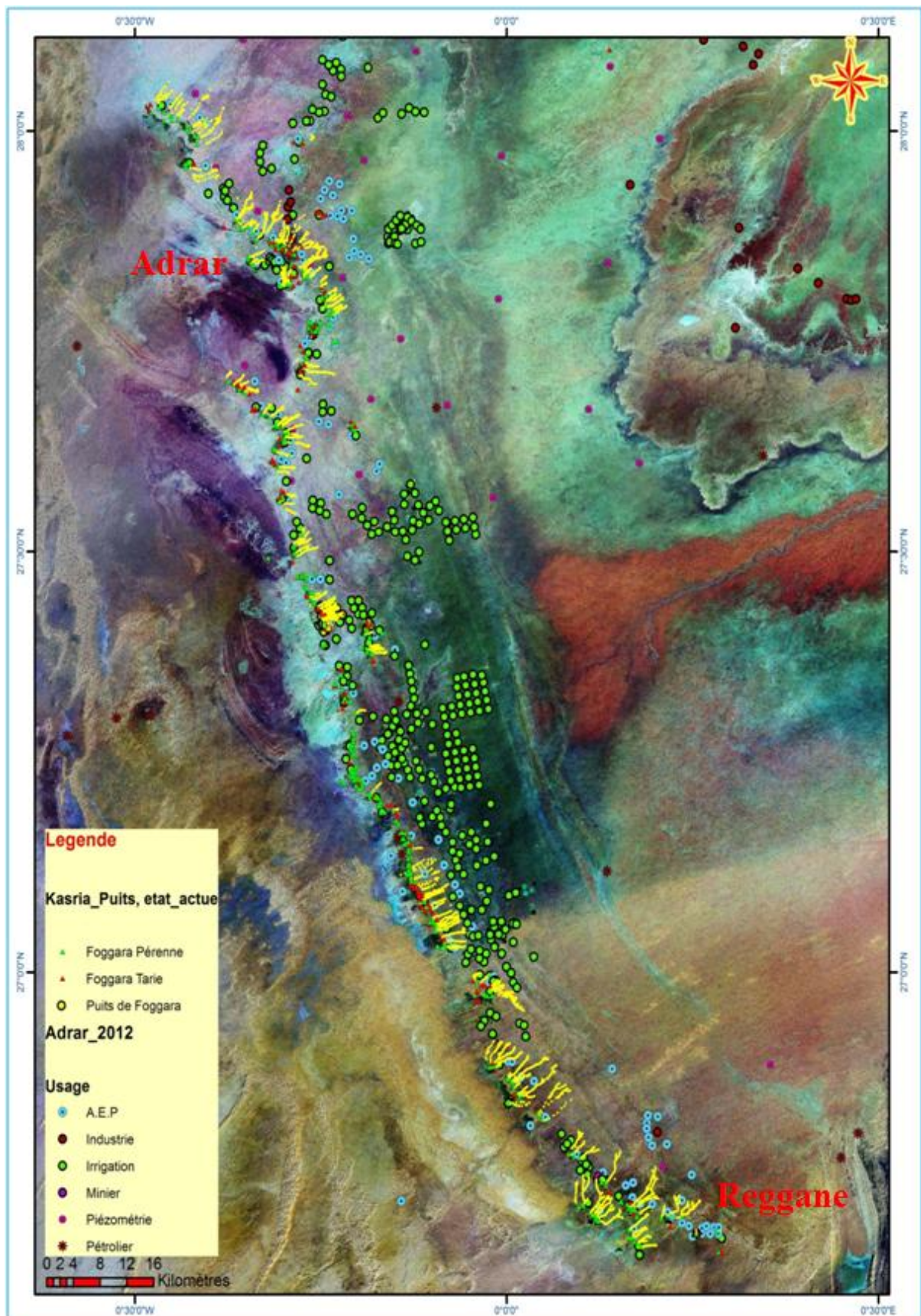


Figure.4.1 Carte de positionnement des foggaras et forages de la zone d'étude sur image satellite.

Cette technique, puis a suivi l'axe de diffusion de l'Islam qui s'est ensuite propagé vers l'Est et l'Ouest. Les rares documents trouvés justifient que les Foggaras sont introduites au Sahara Algérien entre le XI^{ème} et XII^{ème} siècle par El Malik El Mansour, qui aurait creusé la première Foggara appelée Hennou (actuellement elle débite 3.2 l/s) à Tamentit localité située à 15 km au sud de la ville d'Adrar, donc ce système est très répondeur, il représente un patrimoine hydraulique mondial. En Algérie La majorité des foggaras se trouve dans la wilaya d'Adrar, mais on la trouve aussi au Nord de la wilaya de Tamanrasset dans la région d'In Salah, dans la wilaya de Bechar dans la partie Sud-Est à Beni Abbès et Igli, et aussi quelques traces de « l'existence de la foggara dans la wilaya de Laghouat et à Boussaâda (Saadi, 1984) ».

4.3. Étymologie « Foggara »

L'étymologie du mot exact "Foggara" n'est pas connu, mais d'après plusieurs historiens le mot " Foggara " provient du mot arabe "Fagra" c'est-à-dire « Éventrer », dans le sens de creuser la terre pour sortir de l'eau ou du terme arabe "Fakra" c'est-à-dire vertèbre « les puits sont alignés comme une colonne vertébrale "Fagratte" », et d'autres pensent que ce terme provient du mot arabe "El Fokr" la pauvreté, c'est-à-dire que celui qui creuse une foggara se trouve dans l'obligation d'y investir tellement qu'il finit par tomber dans le besoin avant d'en bénéficier, mais la désignation la plus correcte d'après la littérature arabe semble provenir du mot arabe "Fadjara el ardh" faire jaillir la terre, qui désignerait la sortie de l'eau de la roche, en modifiant la prononciation de la lettre arabe « dj » de Fadjara en « g » qui devient « Foggara ».

4.4. Situation géographique des foggaras

L'analyse de la carte de positionnement des foggaras (figure 4.1) montre l'alignement des foggaras à partir de la ville d'Adrar jusqu'à la ville de Reggane avec une direction Nord-ouest Sud-est, hydrogéologiquement cette position représente la limite Sud-ouest des affleurements de la nappe du Continental Intercalaire C.I. les foggaras sont orientées en majorité Sud-ouest Nord-est en allant de l'aval à l'amont.

4.5. Naissance d'une foggara : Plusieurs hypothèses concernant le point d'impact de la naissance d'une foggara sont proposées, on cite :

4.5.1. Une source : La foggara a son point d'origine dans une source, celle-ci a pu se tarir ou bien les copropriétaires ont voulu augmenter le débit, une tranchée a été alors pratiquée dans

la nappe aquifère. Cette tranchée établie dans le sens d'écoulement de la nappe, elle part de l'aval vers l'amont, l'approfondissement progressif de la tranchée, la difficulté d'évacuer les déblais et la possibilité de construire un tunnel dans la couche des grès ont conduit au puits, le puisatier s'est alors transporté à la surface du sol, il a creusé jusqu'à la nappe et relié ces différents puits par une galerie souterraine (A.SAIDI, 1983).

4.5.2. Puits Amont

Les propriétaires qui ont voulu creuser une foggara et après le choix d'un point en amont ont creusé le premier puits pour s'assurer de la disponibilité de la ressource, puis les puits se succèdent de l'amont vers l'aval, raccordés par la galerie jusqu'à la sortie de l'eau en surface, le point de sortie est choisi aussi en aval par les copropriétaires.

4.5.3. Puits Aval

Les copropriétaires creusent le premier puits en aval, puis un deuxième puits raccordé par une galerie, puis un troisième puits et ainsi de suite, les puits se multiplient en s'enfonçant dans la nappe aquifère. Cette théorie est la plus adaptée, puisque au premier cas, l'origine d'une source n'est pas admise de point de vue hydrogéologique, puisque la formation aquifère est composée dans sa majeure partie par des formations meubles (sable, argile et grès), pour le deuxième cas il est très difficile de travailler de l'amont vers l'aval, avec des venues d'eau en puissances dans la galerie creusée en amont.

4.6. Composition de la foggara : La foggara est composée de plusieurs éléments, on trouve de l'amont vers l'aval (figure 4.2) :

4.6.1. Le Puits « Hassi » :

les puits « Fouaha » sont la partie visible de la foggara, à l'intérieur des villes font un objet esthétique, ils servent à l'accès et au curage de la foggara (évacuation des déblais et remblais) et à l'aération de la foggara, ils ne jouent aucun rôle hydraulique dans le fonctionnement de la foggara, la distance qui sépare les puits entre eux n'est pas constante, elle varie d'une région à l'autre (Gourrara, Touat et Tidikelt) et selon le type de terrain traversé, elle varie entre 07 et 40 m de longueur. La profondeur des puits varie selon le niveau statique de la nappe et la topographie de la région, peu profonds à Adrar que dans d'autres villes ;

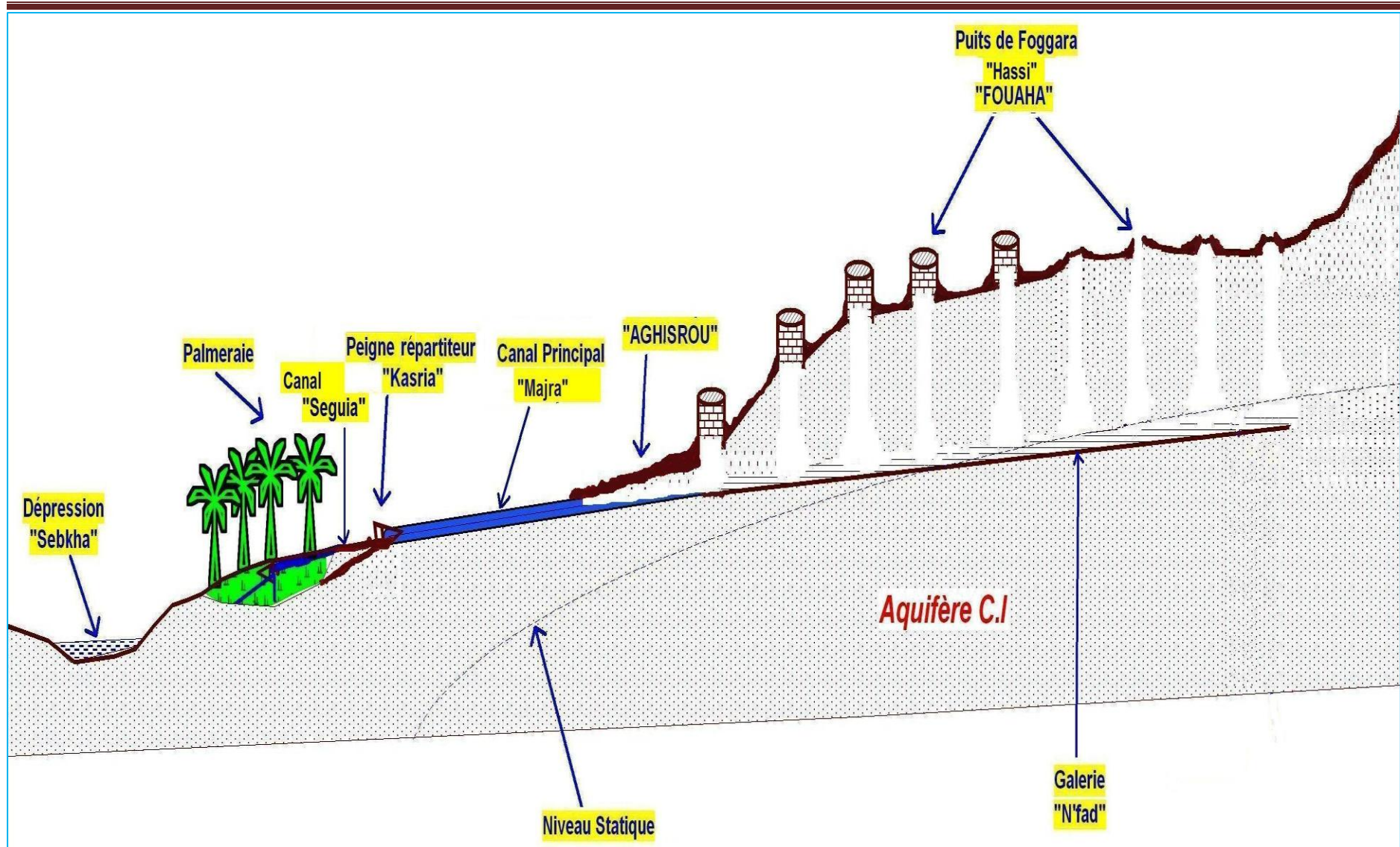


Figure.4.2 Schéma descriptif d'une foggara.

Zaouiet Kounta et Reggane où le niveau statique est assez profond, la profondeur des puits varie entre 2 à 40 m, avec un diamètre de 0.5 à 2 m. 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.

Les puits sont habituellement obturés pour éviter la pénétration des sables dans la foggara en dehors de la ville et les déchets à l'intérieur des agglomérations (Voir annexe 3).

4.6.2. La Galerie « N'fad »:

La galerie ou « Nfad » est la pièce cardinale de la foggara, c'est une conduite souterraine de plusieurs kilomètres de longueur composée hydrogéologiquement de deux parties : une partie drainante, qui représente la partie la plus intéressante de la foggara, puisque c'est la partie qui pénètre dans l'aquifère et qui draine l'eau vers la deuxième partie ; non drainante, cette dernière sert à transporter l'eau vers le canal principal. La longueur totale du réseau ramifié de la galerie varie entre 0,07 et 15 km de galerie souterraine (figure 4.3).

La communication entre deux puits, se fait à travers un tunnel, il sert pour le passage à la galerie et à l'accès aux puits le long de la galerie lors de l'entretien et le nettoyage de la foggara, il est de l'ordre de 0,5 à 1,5 m de largeur, et de 1 à 6 m de hauteur (Voir annexe 4).

L'analyse de l'alignement des foggaras (figure 4.4) 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».

4.6.3. 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.

4.6.4. Canal Principal « Majra » :

Le canal principal « Majra » 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.

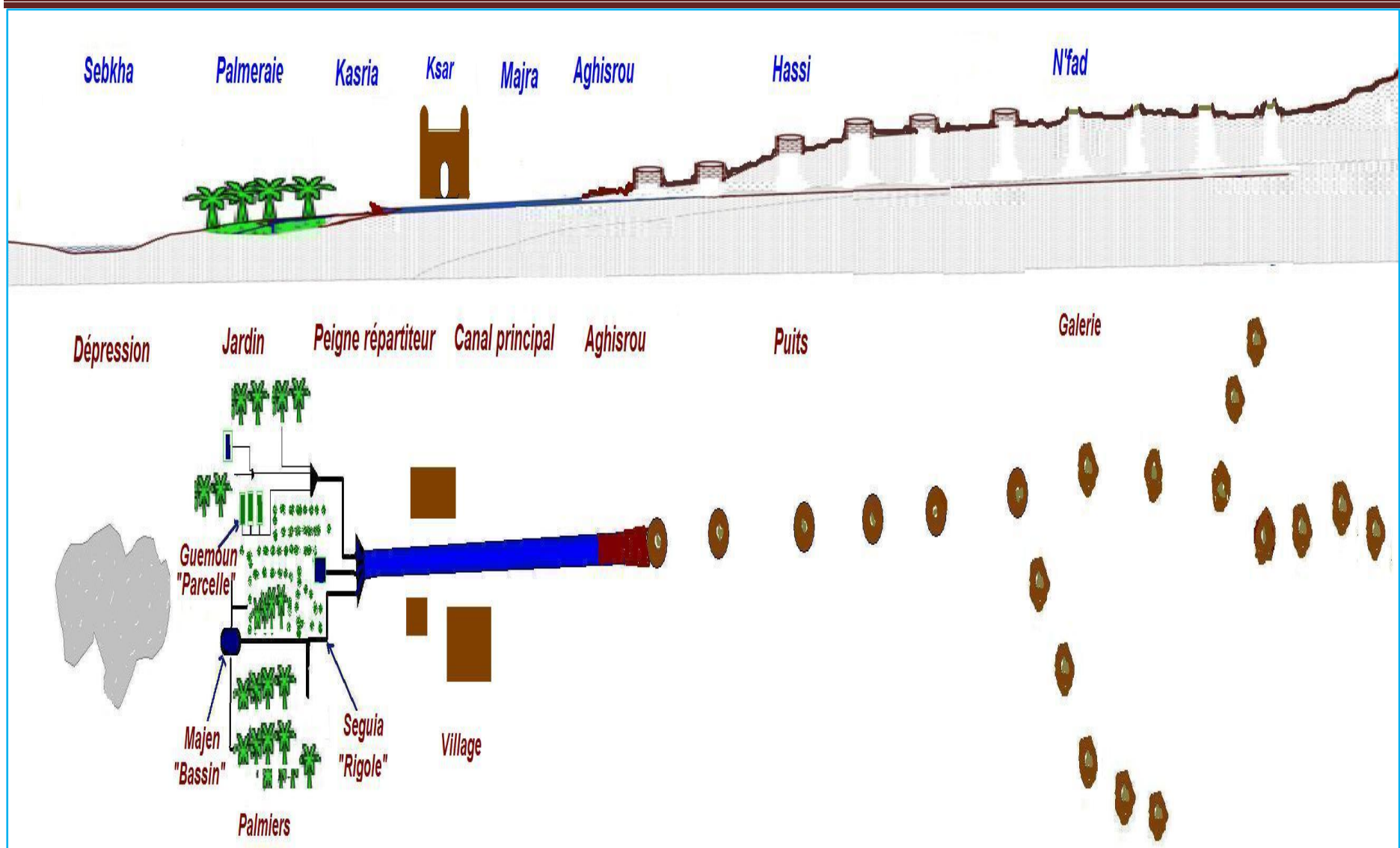


Figure.4.3 Schéma en perspectif d'une foggara.

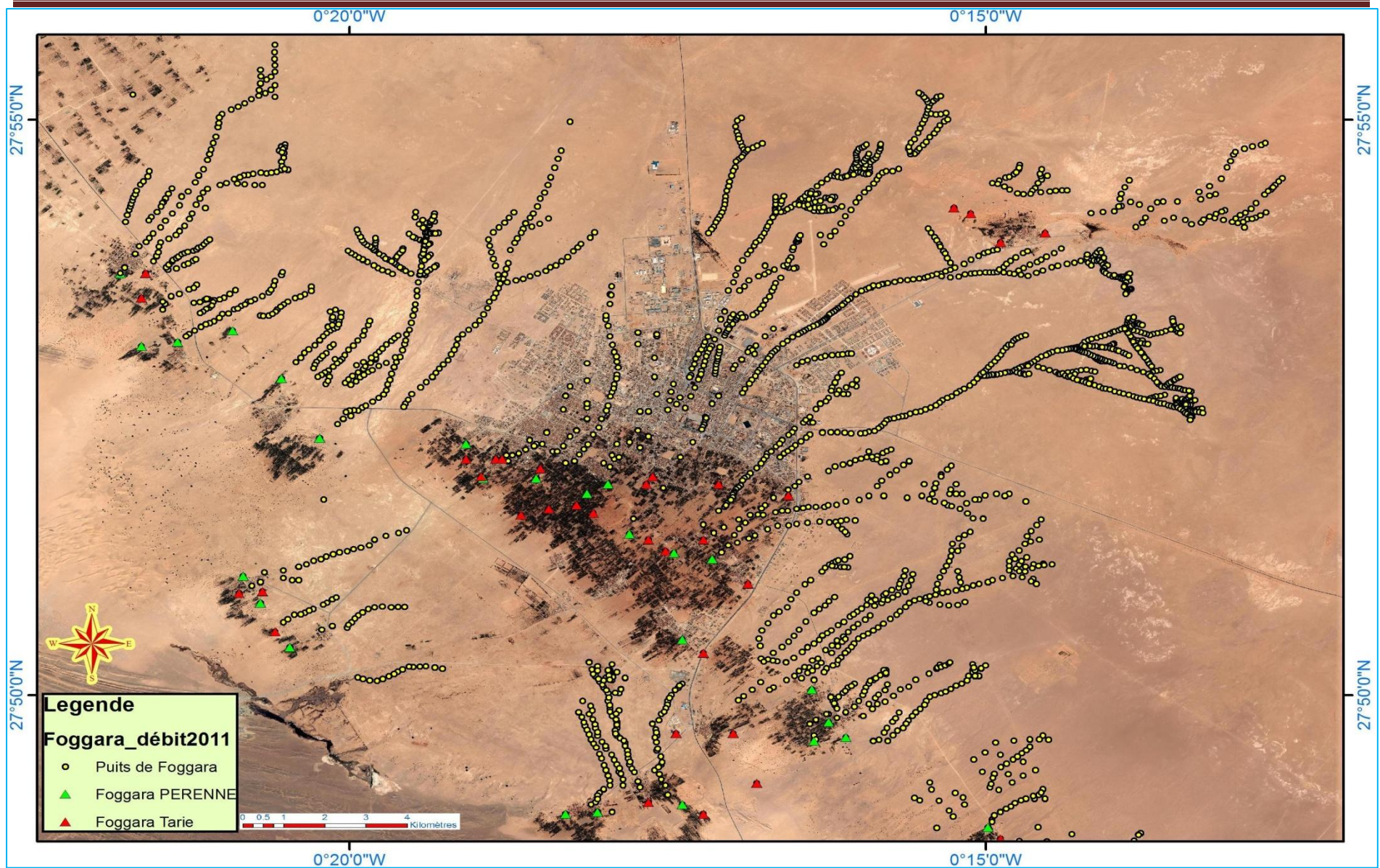


Figure.4.4 Réseau ramifié des foggaras autour de la ville d'Adrar sur image Satellite.

4.6.5. Peigne Répartiteur « Kasria » :

A la fin du canal principal « Majra » se trouve un partiteur appelé « Kasria » ou « Qasri » c'est un bassin de forme triangulaire ou rectangulaire construit par des argiles, actuellement en ciment, muni d'un tranquilisateur pour amortir la vitesse de l'eau 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 (figure 4.5).

La « Kasria El Kébira » ou bien peigne principal représente le point de collecte et de distribution des eaux de la foggara, puisque l'eau de la foggara doit passer par le peigne principal pour être partager équitablement entre les copropriétaires, on trouve aussi des kasrias secondaires et tertiaires pour partager l'eau entre les copropriétaires (Voir annexe 5).

4.6.6. Rigole « Seguia » :

La part d'eau de chaque copropriétaire est canalisée vers son jardin par une rigole à ciel ouvert appelée « Seguia » construite en terre ou actuellement en ciment et même en PVC pour réduire les infiltrations, de forme circulaire ou rectangulaire, les seguias se ramifiées dans tous les sens dans la palmeraie (Voir annexe 6).

4.6.7. Bassin « Majen » :

L'eau acheminée vers le jardin du copropriétaire par une seguia est accumulée dans un bassin appelé « Majen », d'une forme rectangulaire ou carré, situé à un point élevé par rapport au niveau des terres à irriguées, construit en ciment pour minimiser les pertes par infiltration, il sert à l'alimentation permanente du jardin.

4.7. Mesure et partage du débit de la foggara :

Après chaque opération de nettoyage et d'entretien, une opération de remesure et de répartition du débit de la foggara s'effectue.

Chaque foggara possède un registre « Zemam » dont lequel sont inscrits les noms, les parts des copropriétaires ainsi que toute modification, achat, vente ou location d'une ou des parts d'eau de la foggara.

Le Chahed « Témoin » qui détient le registre « Zemam » annonce la mesure du débit d'une Kasria principale ou secondaire à la demande d'un ou des copropriétaires, ou bien après chaque opération de nettoyage et d'entretien d'une foggara.

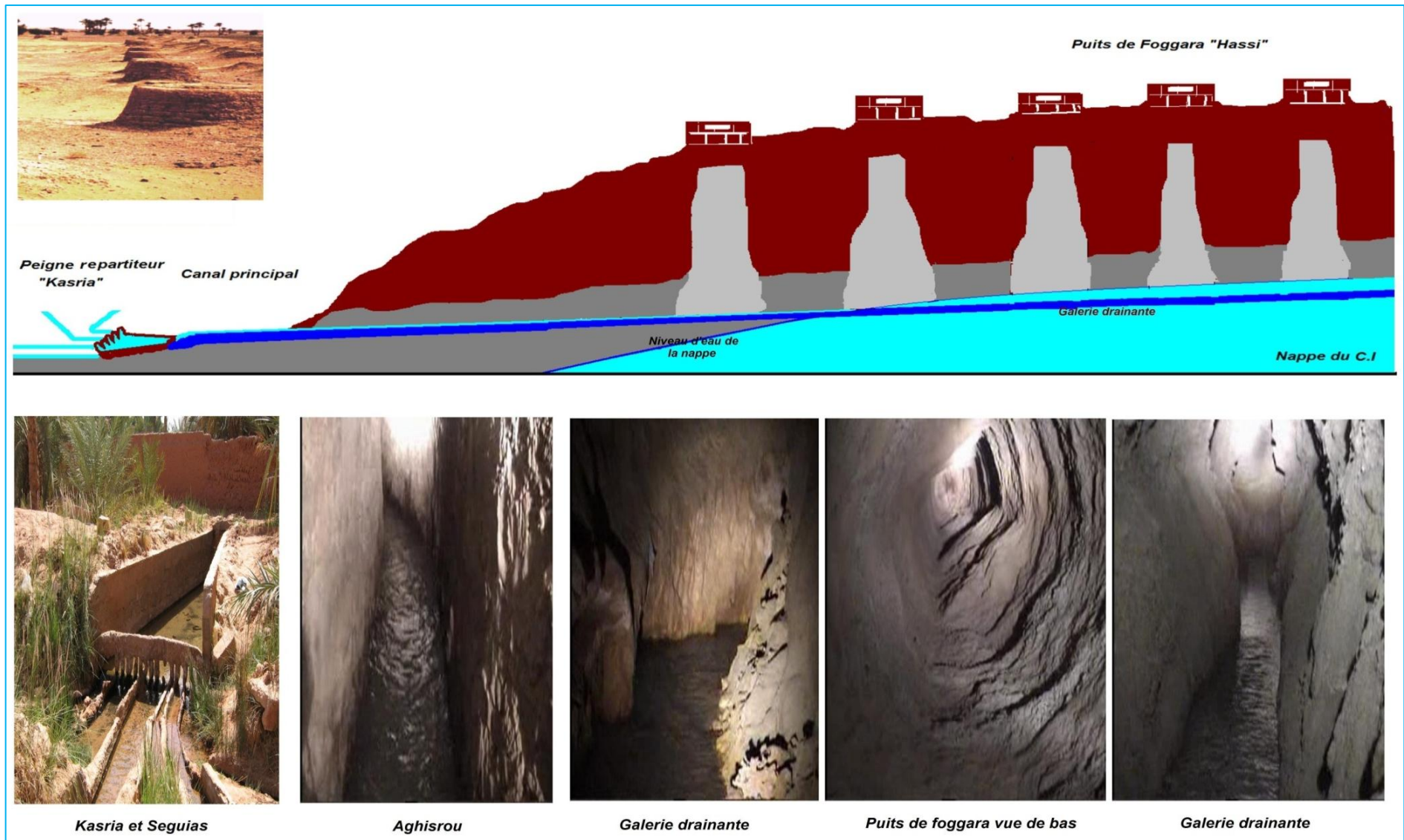


Figure.4.5 Vue d'ensemble des éléments de la foggara.

4.7.1 Outil de mesure :

La mesure du débit de la foggara 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 différentes formes et diamètres, plane au Touat de 57 x 18 cm (figure 4.6) et de forme cylindrique au Tidikelt de 15 cm de haut et de 25 à 30 cm de diamètre (annexe 7), l'outil est percé d'une rangée de trous de différents diamètres qui correspondent aux multiples et sous multiples de l'unité de mesure.

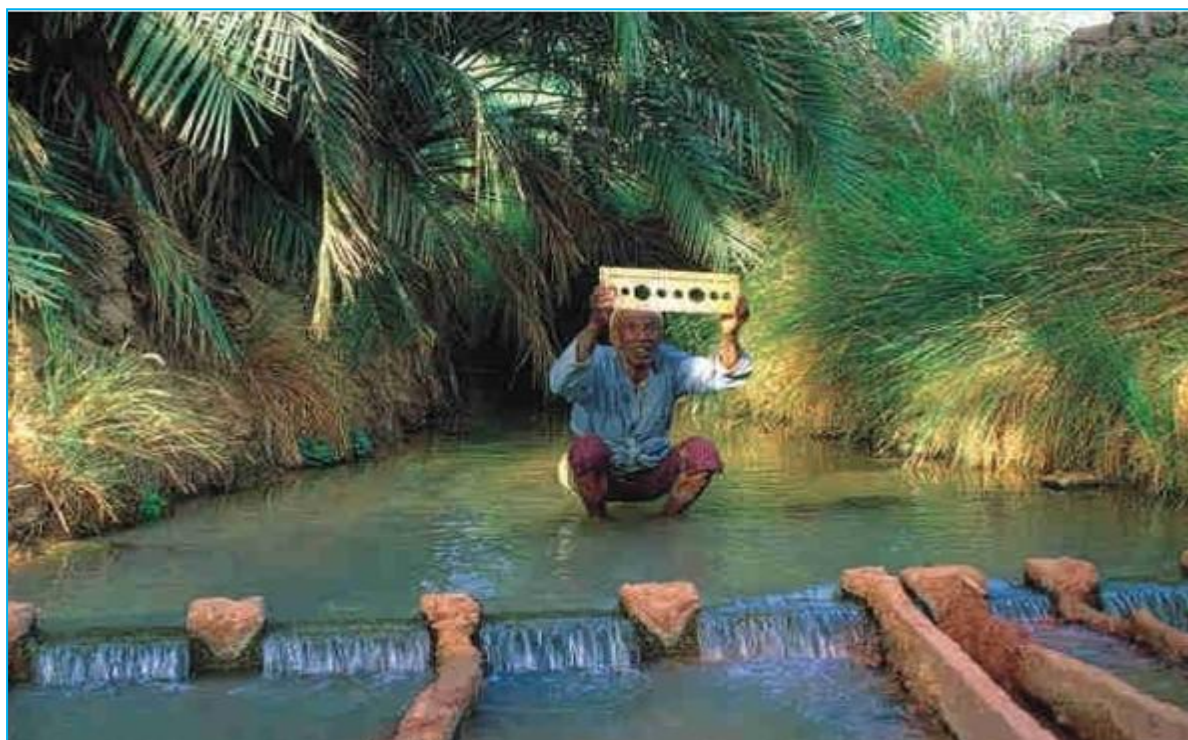


Figure.4.6 Kiel El Ma avec son Louh (Boutadara.Y, 2009).

4.7.2 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 (A.Mehdaoui, 2011), alors qu'elle est de 0.133 l/s dans le Tidikelt (H.A.Hamadi, 1982), le tableau 4.1 ci-dessous donne les différents débits dans la région d'Adrar.

Tableau.4.1 Unités de mesure du débit de la foggara d'après (Remini.B, 2008).

| Palmeraie | Unité | Débit l/s |
|------------|--------|-----------|
| Timimoun | Tmen | 0.0261 |
| Deloul | Majen | 0.0166 |
| Charouine | Sbaa | 0.0833 |
| Tinerkouk | Aud | 0.0633 |
| Aougrouit | Kherga | 0.0683 |
| Ouled Said | Habba | 0.0433 |

La Habba vaut 24 Kirat « Carat » tableau 4.2 et le Kirat vaut 24 Kirat de Kirat tableau 4.3, tellement l'eau est précieux, ils ont utilisé l'unité de mesure de l'or « le carat » pour le partager, la codification suivante utilisée pour la mesure du débit.

Tableau.4.2 Tableau des sous multiples de Habba.

| Valeur | Quantité | Equivalent | Symbole |
|-----------------------------|----------|----------------|---------|
| Habba | 1 | 24 Kirat | • |
| Habba Zerig | 1 | 24 Kirat | • |
| Habba Maaboud | 1 | 24 Kirat | • |
| Un Kirat de Habba | 1/24 | 1/24 de Habba | • |
| Deux Kirat de Habba | 1/12 | 2/24 de Habba | •• |
| Tois Kirat de Habba | 1/8 | 3/24 de Habba | ••• |
| Quatre Kirat de Habba | 1/6 | 4/24 de Habba | |
| Six Kirat de Habba | 1/4 | 6/24 de Habba | •• |
| Huit Kirat de Habba | 1/3 | 8/24 de Habba | |
| Douze Kirat de Habba | 1/2 | 12/24 de Habba | |
| Vingt quatre Kirat de Habba | 1 | 24/24 de Habba | |

Tableau.4.3 Tableau des sous multiples de Kirat.

| Valeur | Quantité | Equivalent | Symbole |
|-----------------------------|----------|-------------------|---------|
| Kirat | 1 | 24 Kirat de Kirat | • |
| Un Kirat de Kirat | 1/24 | 1/24 de Kirat | • |
| Deux Kirat de Kirat | 1/12 | 2/24 de Kirat | •• |
| Tois Kirat de Kirat | 1/8 | 3/24 de Kirat | ••• |
| Quatre Kirat de Kirat | 1/6 | 4/24 de Kirat | — |
| Six Kirat de Kirat | 1/4 | 6/24 de Kirat | — •• |
| Huit Kirat de Kirat | 1/3 | 8/24 de Kirat | = |
| Douze Kirat de Kirat | 1/2 | 12/24 de Kirat | ≡ |
| Vingt quatre Kirat de Kirat | 1 | 24/24 de Kirat | ≡ ≡ |

4.7.3. Mesure du débit :

Le « Kiel El Ma » le mesureur d'eau nommé par la djemaâ du ksar « comité du village » en considération de ses connaissances, son honnêteté et sa conduite irréprochable, procède à l'opération de mesure aidé d'un comptable « El Hassab » et par un ou deux ouvriers.

Kiel El Ma installe l'outil de mesure dans la Kasria El Kebira ou Seghira (la grande ou la petite peigne) ou dans une seguia pour mesurer le débit, il fixe l'outil par des argiles et procède à la fermeture et à l'ouverture des différents trous de l'outil, chaque trou correspond à une fraction du débit que le mesureur les connaissent parfaitement, après plusieurs mesures il donne le débit de la foggara ou de la seguia au comptable « El hassab » qui fait les calculs de division du débit global entre les parts des copropriétaires et compte la part de chaque copropriétaire, à cette instant Kiel El Ma fait le travail de répartition du débit entre les canaux, d'où chaque copropriétaire reçoit sa part d'eau continuellement 24h/24h, il existe une autre méthode de partage du débit appelée « Nouba » où chaque copropriétaire reçoit un débit dans un temps déterminé (par unité de temps), cette méthode est utilisée seulement au village de Tamentit pour la foggara de Hennou. (Voir annexe 7).

4.7.4 Partage du débit :

Le débit initial de la foggara est donné par rapport à « Habba Zrig » c'est-à-dire le débit initial de la foggara après sa mise en exploitation, où chaque propriétaire a son débit de Habba Zrig, après plusieurs des années d'exploitation le niveau de la nappe est abaissé, le débit chute, alors le débit mesuré de la foggara s'appel « Habba Maaboud », donc c'est le débit réelle de la foggara, alors que Habba Zrig c'est le débit fictif de la foggara.

4.8. Fonctionnement de la foggara :

Le niveau statique de la nappe se trouve au dessus de la partie (D-F) dans la figure 4.7, l'eau pénètre dans la galerie et se déplace sous l'effet de la pression atmosphérique et du gradient hydraulique vers la partie (C-D), une stabilisation se fait dans cette partie au point d'intersection du niveau de la nappe et la pente de la galerie, l'eau à partir de ce point s'écoule par gravité vers la partie (B-C).

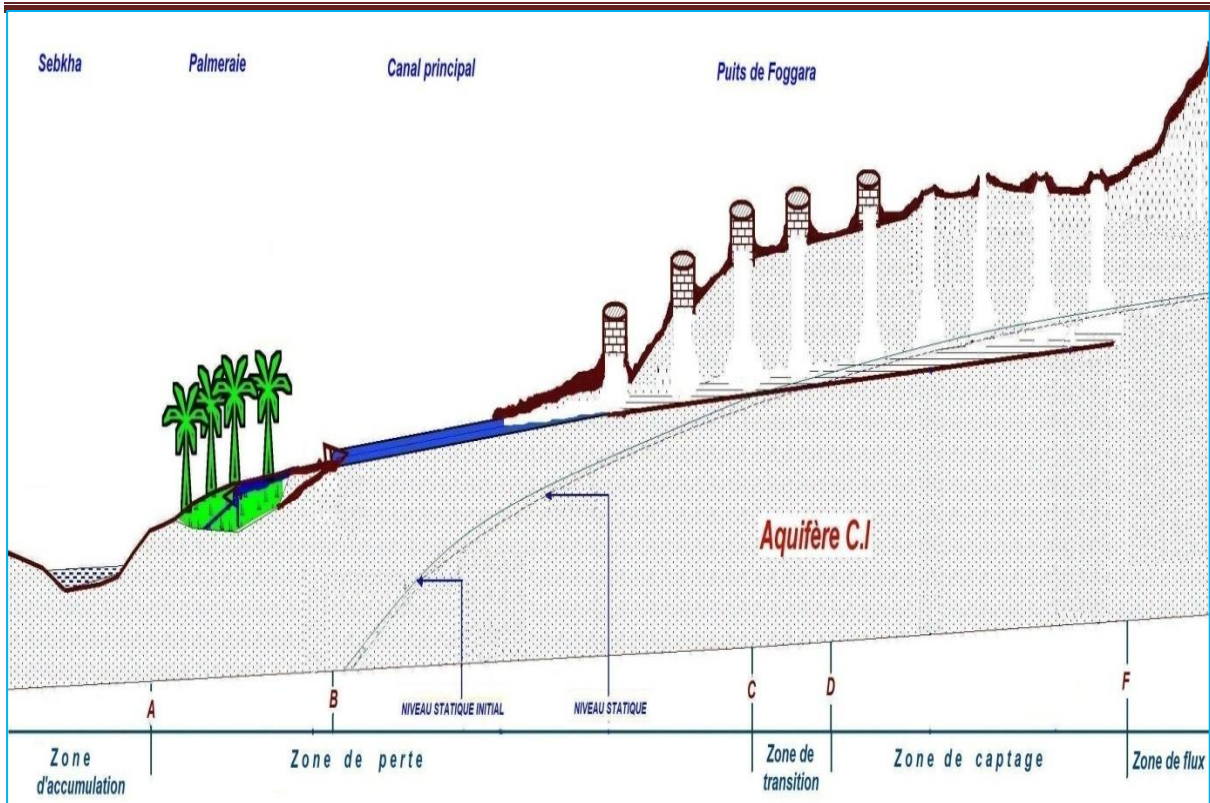


Figure.4.7 Schéma de fonctionnement d'une foggara.

Au cours du temps le niveau de la nappe baisse, le point d'intersection se déplace en amont, de la zone (C-D) vers la zone (D-F), la charge hydraulique diminue et le débit de la foggara chute.

Le tarissement de la foggara est atteint lorsque le débit dans le point B est nul, c'est-à-dire que le débit provenant de la partie (C-F) égal au débit perdu par infiltration et par évaporation dans la partie (B-C), ces pertes sont estimées de 10 à 20 % (A.Salem, PNUD 1988) et de presque 50 % du débit de la foggara (B.Merzougui, ANRH 2004). Lorsque le point d'intersection du niveau de la nappe et de la galerie atteint le point F, à ce point la foggara est « morte ».

4.9 Type de foggara :

Les foggaras ne diffèrent que par leurs longueurs, ramifications et par région d'existence, dans le langage local on désigne une grande foggara par le vocable « Kébira » et une petite foggara par la foggara « Séghira », il n'existe aucune classification de construction ou de creusement, on trouve :

4.9.1 Foggara de l'Erg :

C'est une foggara creusée près de l'Erg, avec l'avancement des dunes de sables durant les siècles de l'existence de la foggara, il est très difficile de trouver le puits amont de la foggara recouvert de sable.

4.9.2 Foggara du plateau :

La majorité des foggaras de la région d'Adrar sont alignées Est-Ouest, ils suivent le sens d'écoulement de la nappe du Continental Intercalaire et de même façon ils sont orientées vers le plateau de Tademaït.

4.9.3 Foggara du Jardin :

C'est une foggara localisée dans la palmeraie, elle est de petite longueur et qui capte les eaux d'infiltration et de drainage des autres foggaras situées en amont.

4.9.4 Groupement de foggaras :

On peut trouver plusieurs foggaras associés dans une seule foggara, c'est une réunion de deux à six foggaras dans une seule kasria.

4.10. Recensement des foggaras

4.10.1. Inventaires des foggaras :

Plusieurs campagnes d'inventaires et de jaugeages de débits des foggaras ont été effectuées durant les années 1670, 1906, 1932, 1960, 1998 et le dernier inventaire en 2011 pour la totalité de la wilaya d'Adrar. Le tableau 4.4 ci-dessous récapitule l'inventaire des foggaras de la zone d'étude qui englobe 10 communes de la wilaya d'Adrar pour les années 1960, 1998 et 2011.

Tableau.4.4 Récapitulative des foggaras de la région d'étude.

| Année | 1960 | | 1998 | | 2011 | | Totaux |
|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|------------|
| | Foggara Pérenne | Foggara Tarie | Foggara Pérenne | Foggara Tarie | Foggara Pérenne | Foggara Tarie | |
| Adrar | 23 | 0 | 9 | 14 | 5 | 18 | 23 |
| Bouda | 23 | 0 | 20 | 3 | 18 | 5 | 23 |
| Fenoughil | 59 | 1 | 40 | 20 | 29 | 31 | 60 |
| In Zeghmir | 64 | 14 | 38 | 40 | 37 | 41 | 78 |
| Reggane | 41 | 7 | 41 | 7 | 36 | 12 | 48 |
| Sali | 31 | 3 | 24 | 10 | 17 | 17 | 34 |
| Tamentit | 50 | 1 | 38 | 13 | 20 | 31 | 51 |
| Tamest | 55 | 10 | 42 | 23 | 23 | 42 | 65 |
| Timmi | 47 | 5 | 41 | 11 | 29 | 23 | 52 |
| Zaouiet Kounta | 105 | 18 | 96 | 27 | 57 | 66 | 123 |
| Totaux | 498 | 59 | 389 | 168 | 271 | 286 | 557 |

4.10.2. Historique du débit :

Les foggaras du Gourara, de Touat et du Tidikelt 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 1960, 1998 et 2011 (Tableau 4.5), le débit global des foggaras a subi une réduction significative, il diminue de 3.758 m³/s en 1960 à 1.827 m³/s en 2011 soit une réduction du débit de 1.931 m³/s qui représente plus que la moitié du débit de 1960 (51.4 %) et de 35.8 % du débit de 1998.

Tableau.4.5 Évolution des débits totaux des foggaras.

| Débit / Année | 1960 | 1998 | 2011 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|
| Débit de foggara en m ³ /s | 3.758 | 2.846 | 1.827 |

Concernant la zone d'étude (Tableau 4.6) le débit est de 1,909 m³/s en 1960 contre 0.918 m³/s en 2011, soit une réduction de 35.48 % par rapport au débit de 1998 et de 51.9 % du débit de 1960 (figure 4.8).

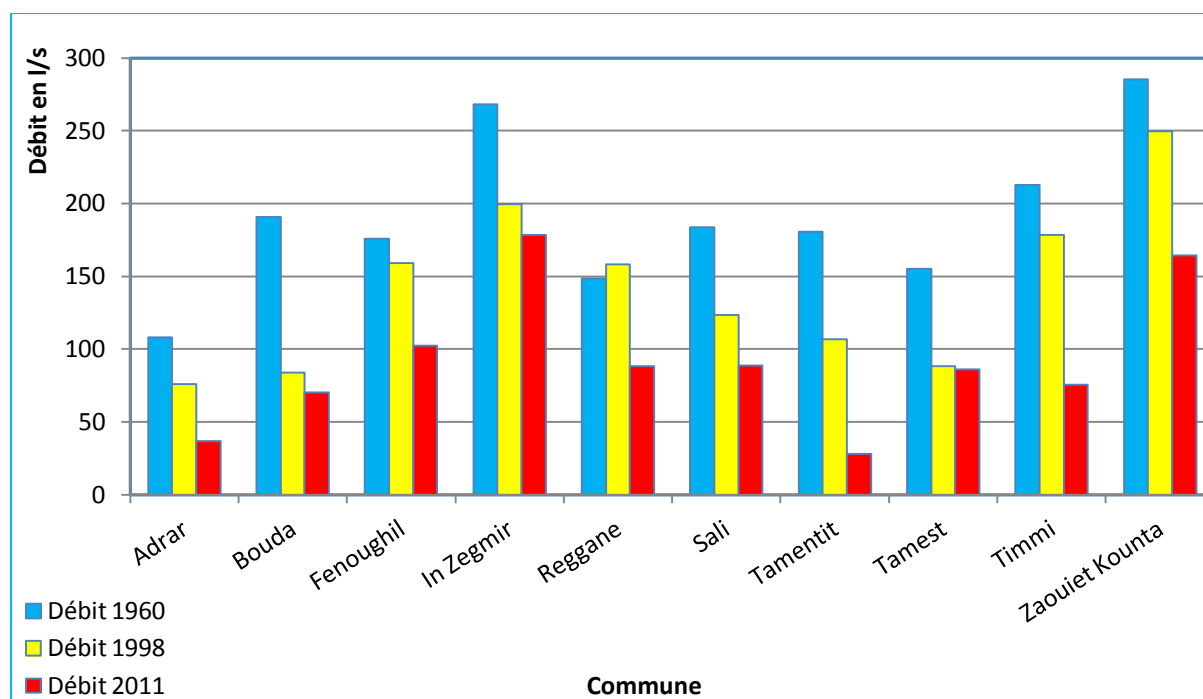


Figure.4.8 Évolution des débits des foggaras par commune (1960-2011).

Cette situation a engendré le tarissement des foggaras, d'où le nombre des foggaras tarées a augmenté de 59 foggaras tarées en 1960 à 168 foggaras tarées en 1998 et de 286 foggaras en 2011, soit une augmentation du taux de tarissement de 40 % par rapport à l'année 1960. Le débit des foggaras de la région d'étude varie de 0.02 l/s à 24 l/s, avec des longueurs de 70 m à 15 km.

Tableau.4.6 Débit des foggaras par commune (année 1960,1998 et 2011).

| Commune/Année de mesure | Débit en l/s 1960 | Débit en l/s 1998 | Débit en l/s 2011 |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Adrar | 107.85 | 75.78 | 36.9 |
| Bouda | 190.9 | 83.65 | 70.4 |
| Fenoughil | 175.82 | 159.3 | 102.19 |
| In Zegmir | 268.17 | 199.61 | 178.34 |
| Reggane | 148.45 | 158.38 | 88.05 |
| Sali | 183.92 | 123.45 | 88.64 |
| Tamentit | 180.84 | 106.6 | 27.8 |
| Tamest | 155 | 88.21 | 86 |
| Timmi | 212.97 | 178.63 | 75.4 |
| Zaouiet Kounta | 285.16 | 249.67 | 164.54 |
| TOTAUX | 1909.08 | 1423.28 | 918.26 |

4.11 Nettoyage et entretien de la foggara.

La foggara nécessite un nettoyage et entretien périodique de la galerie, cette opération se fait chaque année ou lorsqu'un événement se produit (crue, éboulement), elle fait appelle à tous les copropriétaires pour la participation dans cette opération, le montant de la participation se fait selon le débit reçu, par un travail au jour ou paiement de la main d'œuvre salariée. Elle consiste au curage de la galerie par l'enlèvement de sables et déblais, ainsi que l'approfondissement de la galerie en cas de chute du débit, cette dernière opération s'appelle « Amazer »

Pour augmenter le débit d'une foggara en ajoute une extension, elle s'appelle « Tarha ou Ratba » des ramifications sont ajoutées alors à la foggara par l'ajout d'une « kraâ » jambe, cette branche « kraâ » part de la foggara principale vers la gauche ou la droite avec un angle jusqu'à 45° et qu'elle ne doit pas dépasser la distance limite entre deux foggaras qui est égale à 100 Khamas, un (01) khamas égal à 02 m, (Hadj Hamadi et Kobori 1982). Donc 200 m entre deux foggaras, on peut trouver plusieurs ramifications dans la même foggara.

Actuellement il est rare qu'une foggara subisse une extension, vue la quantité des travaux à réalisés, c'est à dire que, pour augmenter la longueur d'une foggara de 10 m, il faut forer un puits de 20 à 30 m verticalement et de creuser un tunnel horizontalement de 10 m de longueur et de 02 m de diamètre. Ceci montre la réalisation faraounique des foggaras.

4.12. Relation Palmeraie-Foggara :

La foggara représente l'élément fondamental de l'existence et de l'évolution de la palmeraie. Des précipitations rares, une température très élevée, un vent de sable très violent, sont des conditions défavorables pour toute évolution, c'est grâce à ce système que la pérennité des oasis est maintenue sous ce climat hyper aride.

Pour suivre l'évolution de la palmeraie, nous avons utilisé la carte topographique d'Adrar de l'année 1962 et l'image satellite de l'année 2000 (figure 4.9), la digitalisation des palmeraies sur ces deux cartes a permis une comparaison idéale, les superficies extraites des deux cartes (Tableau 4.7) montrent l'évolution de la palmeraie sur une période de 40 ans, la palmeraie a évolué de 10 % seulement par rapport à la superficie de l'année 1960.

Cartographiquement l'extraction de la différence entre les deux cartes montrent que les palmeraies de la région d'Adrar n'ont subi presque aucune grande extension, mais au

contraire il y a une régression de la palmeraie dans quelque zones en examinant le cheminement des anciens tracés des foggaras tariés vers les zones d'existences des palmeraies, c'est le cas des foggaras tariés au Nord de la ville de Tamentit où on observe sur l'image satellite les vestiges des anciens puits de foggara et les traces des palmeraies éparses.

Cette situation est due à la diminution des débits des foggaras en premier lieu, la palmeraie reçoit l'eau seulement de la foggara, l'unique source d'irrigation, il est très rare donc de trouver un puits traditionnel à l'intérieur d'une palmeraie irriguée par une foggara, la diminution du débit de la foggara provoque une augmentation de déficit hydrique est l'oasis soufre de soif le tarissement d'une foggara condamne toute la palmeraie desservie.

En deuxième lieu l'ensablement de la palmeraie qui nécessite des travaux d'enlèvement des sables et de protections continues contre l'avancement des dunes par la construction des « Afrague » (mur construit par les palmes des palmiers), on ajoute la limite géographique de la palmeraie qui se trouve cernée entre la Sebka en aval et le Ksar avec son extension en amont, cette situation ne permet pas une extension de la palmeraie.

Tableau.4.7 Superficie des palmeraies de la zone d'étude.

| <i>Commune</i> | Superficie_1960 en ha | Superficie_2011 en ha | Différence en ha |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ADRAR | 636.31 | 613.79 | -22.52 |
| BOUDA | 547.98 | 591.93 | 43.95 |
| TIMMI | 994 | 1160.44 | 166.44 |
| TAMENTIT | 477.07 | 515.52 | 38.45 |
| FENOUGHIL | 628.17 | 572.42 | -55.75 |
| TAMEST | 605.67 | 707.86 | 102.19 |
| ZAQUIET KOUNTA | 1331.38 | 1661.33 | 329.95 |
| IN ZEGHMIR | 822 | 925.13 | 103.13 |
| REGGANE | 829 | 954.5 | 125.5 |
| SALI | 1168 | 1168 | 0 |
| Totaux | 8039.58 | 8870.92 | 831.34 |

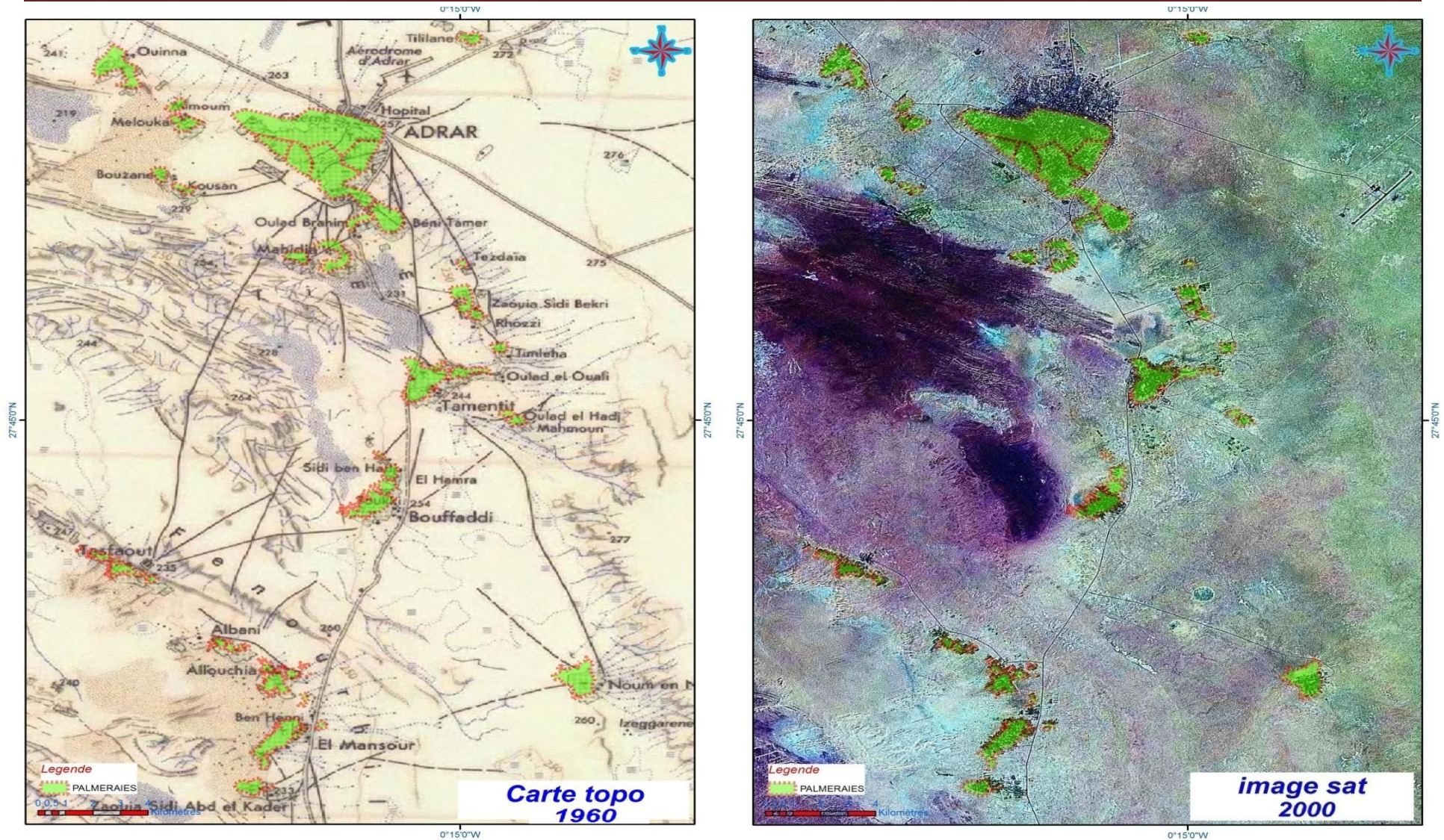


Figure 4.9 Comparaison de l'évolution de la palmeraie sur un fond topographique et Satellitaire.

4.13. Relation Forage Foggara.

L'implantation des forages dans la périphérie des foggaras a engendré une interférence entre les deux systèmes par l'influence de la plus puissante méthode de captage « forage » sur la traditionnelle méthode de captage la « foggara ». La foggara capte seulement les premiers mètres saturés de la nappe du Continental Intercalaire, toute fluctuation du niveau de la nappe influe directement sur la productivité de la foggara.

La consultation de la carte de positionnement des foggaras et forages (figure 4.1) montre que la totalité des forages sont implantés en amont des foggaras, ce positionnement va aggraver le rendement des foggaras lors de l'exploitation simultanément des forages destinés à l'irrigation ou à l'A.E.P, La carte de simulation des rabattements montre que les forages influent sur les foggaras, une étude hydrodynamique pour déterminer le rayon d'influence des forages sur les foggaras est nécessaire.

4.14 Relation Société Foggara :

Le rôle de la foggara dans la société est réduit à l'irrigation d'une palmeraie en dégradation, cette situation a figé l'évolution de la foggara, le vieillissement de la main d'œuvre spécialisée, le manque d'intérêt aux yeux de la nouvelle génération, des concurrents puissants (robinet et pompe à gros débit), réduit l'intérêt de préserver ce patrimoine en condamnant ainsi la pérennité de la palmeraie.

4.15. Cartographie des foggaras.

4.15.1. Carte de tarissement des foggaras :

Les données des foggaras ont permis de positionner spatialement les foggaras et de suivre l'évolution de leur tarissement dans le temps et dans l'espace, la figure 4.10 montre l'évolution de tarissement des foggaras de la région depuis 1960 jusqu'au 2011. Ce qui permet de suivre et de délimiter les zones à fortes risque de tarissement, de déterminer les facteurs de tarissement, soit par l'influence des forages situés en amont des foggaras soit par les limites géologiques naturelles dans la région.

L'analyse de la carte 4.10 a montré que le tarissement des foggaras est bien observé dans la région d'Adrar où toutes les foggaras de la palmeraie de Tilillane sont taries, d'où l'existence du champ captant de la ville d'Adrar, la région d'In Zeghmir connaît le même sort avec l'existence des grands périmètres de mise en valeurs agricoles situées en amont des foggaras qui exploitent la nappe avec des débits de l'ordre de 50 l/s par forage.

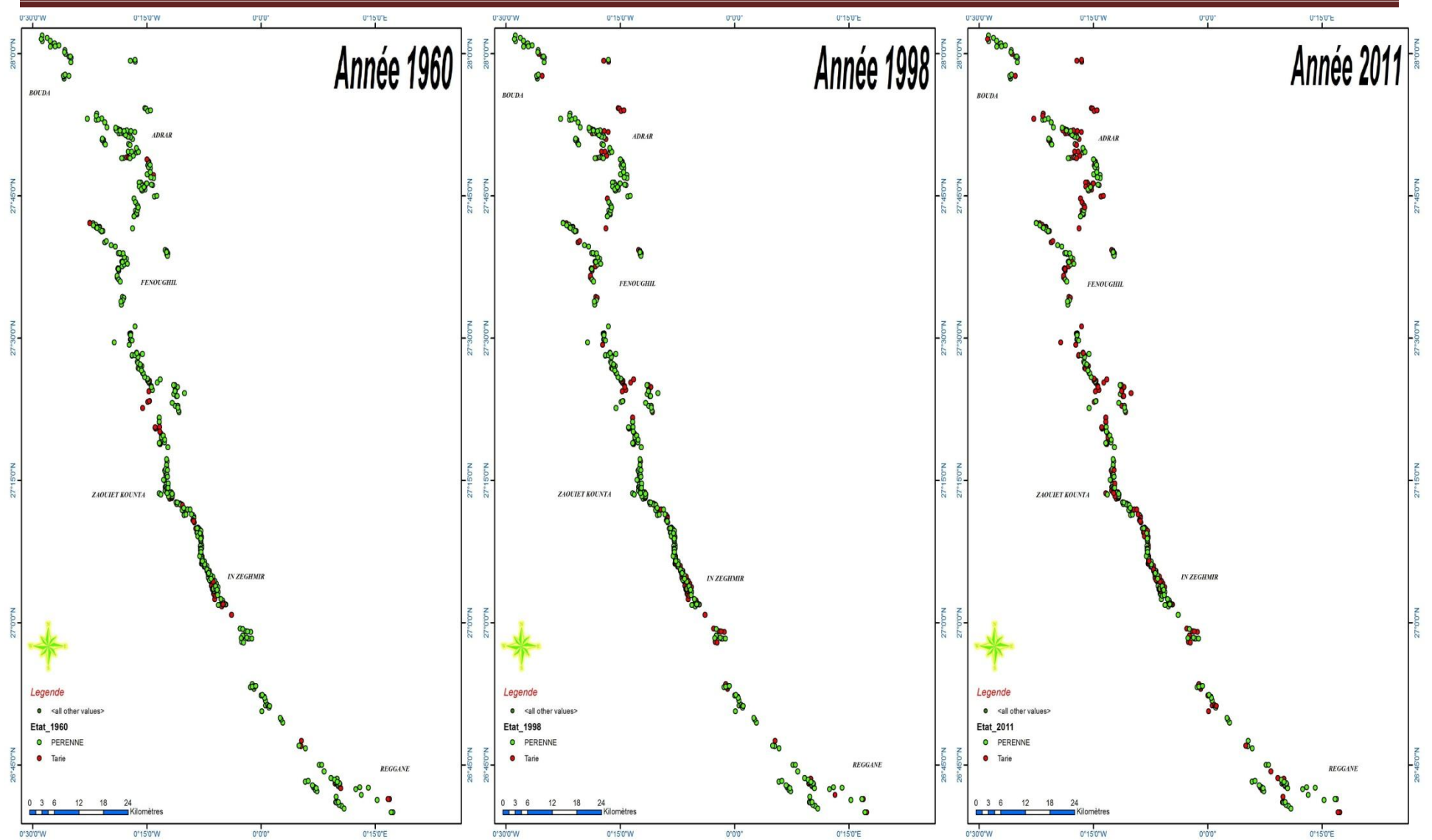


Figure.4.10 Évolution de tarissement des foggaras de 1960-2011.

4.15.2. Carte de profondeur de la galerie:

L'établissement de la carte de profondeur de la galerie permet de bien comprendre l'évolution de la partie non drainante vers la partie drainante et de savoir l'effet de cette évolution sur le tarissement de la foggara.

Pour l'établissement de cette carte nous avons choisi de travailler sur la partie Nord de la zone d'étude puisque nous disposons d'un(e) :

- Piézométrie fiable.
- Réseau de galerie dense.
- Répartition spatiale représentative.
- Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 30 m.

Vue le grand nombre des puits et l'impossibilité de prendre les mesures dans chaque puits, soit par difficulté d'accès ou par interdiction des propriétaires, les mesures sont faites sur quelques puits seulement le long de quelques foggaras, le travail consiste à mesurer.

- La profondeur de puits.
- Les coordonnées géographiques X, Y.
- L'altitude de puits Z.
- Le niveau d'eau dans le puits.

L'établissement de la carte du radier de la galerie de la foggara en premier lieu (figure 4.11.a), l'établissement des cartes piézométriques de la zone pour les années 2007 et 2010 (figure 4.11.b et figure 4.12.b) et en suite la superposition de ces deux cartes, radier et piézométrie (figure 4.11.c et 4.12.c), permettent d'établir la carte des niveaux d'eau par rapport aux profondeurs des puits de foggara (figure 4.11.d et figure 4.12.d).

Cette carte permet de voir le niveau d'eau par rapport à la profondeur de la galerie, ce qui nous aide de suivre le rabattement de la nappe et de prévoir cette influence sur la foggara.

La comparaison des deux cartes (figure 4.11.d et figure 4.12.d) montre que le niveau d'eau diminue progressivement dans la région d'Adrar.

L'exemple de la foggara dite « Cheurfa » dans la commune de Timmi illustre la chute du débit, ce dernier a chuté de 14.4 l/s en 1960 à 0.17 l/s en 2011.

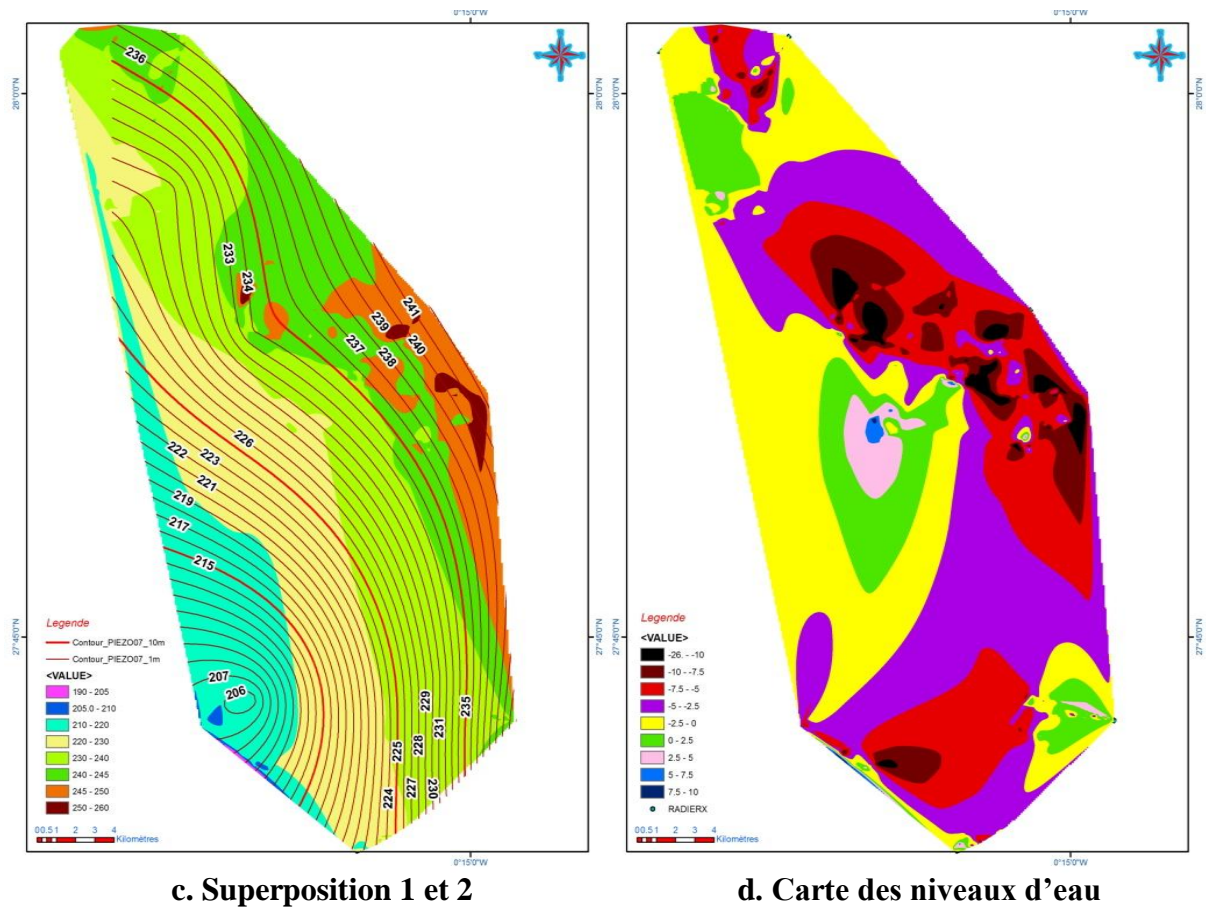
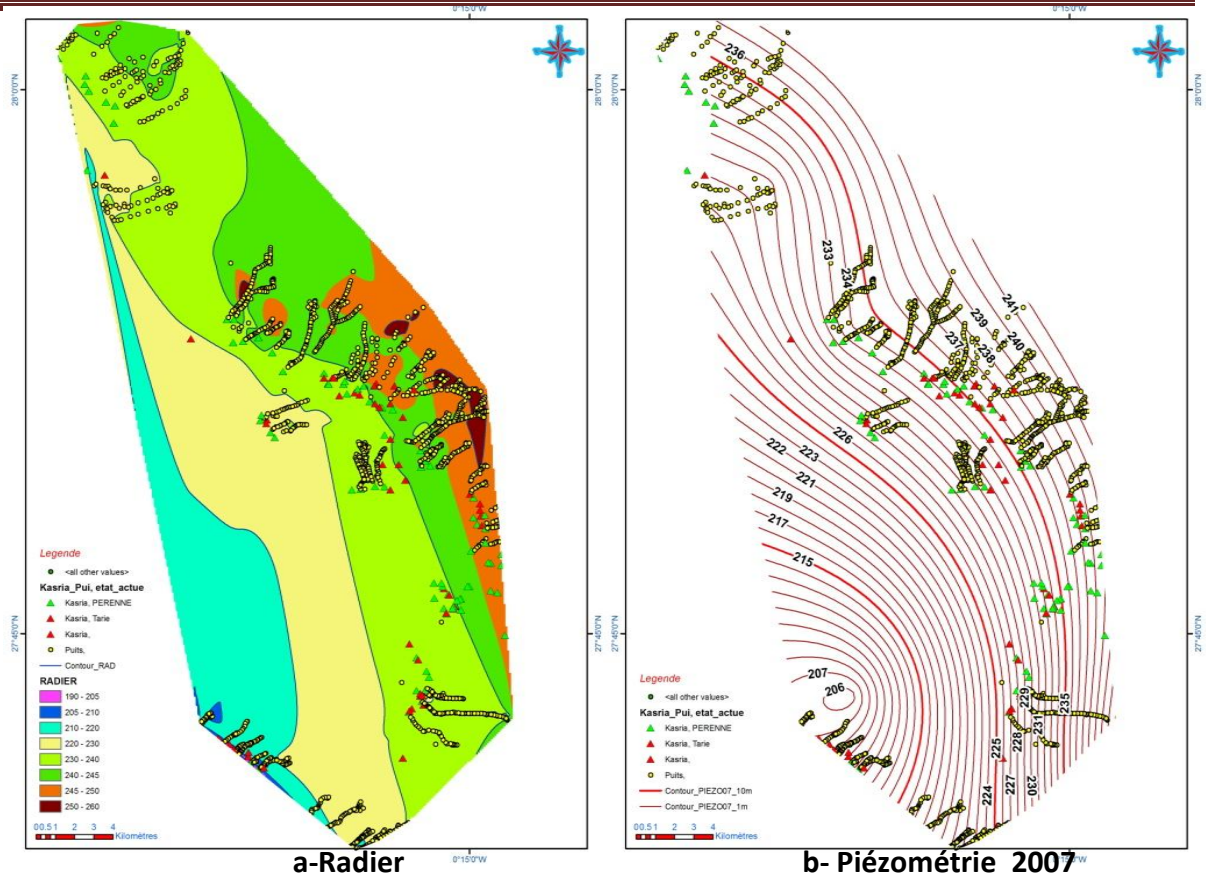
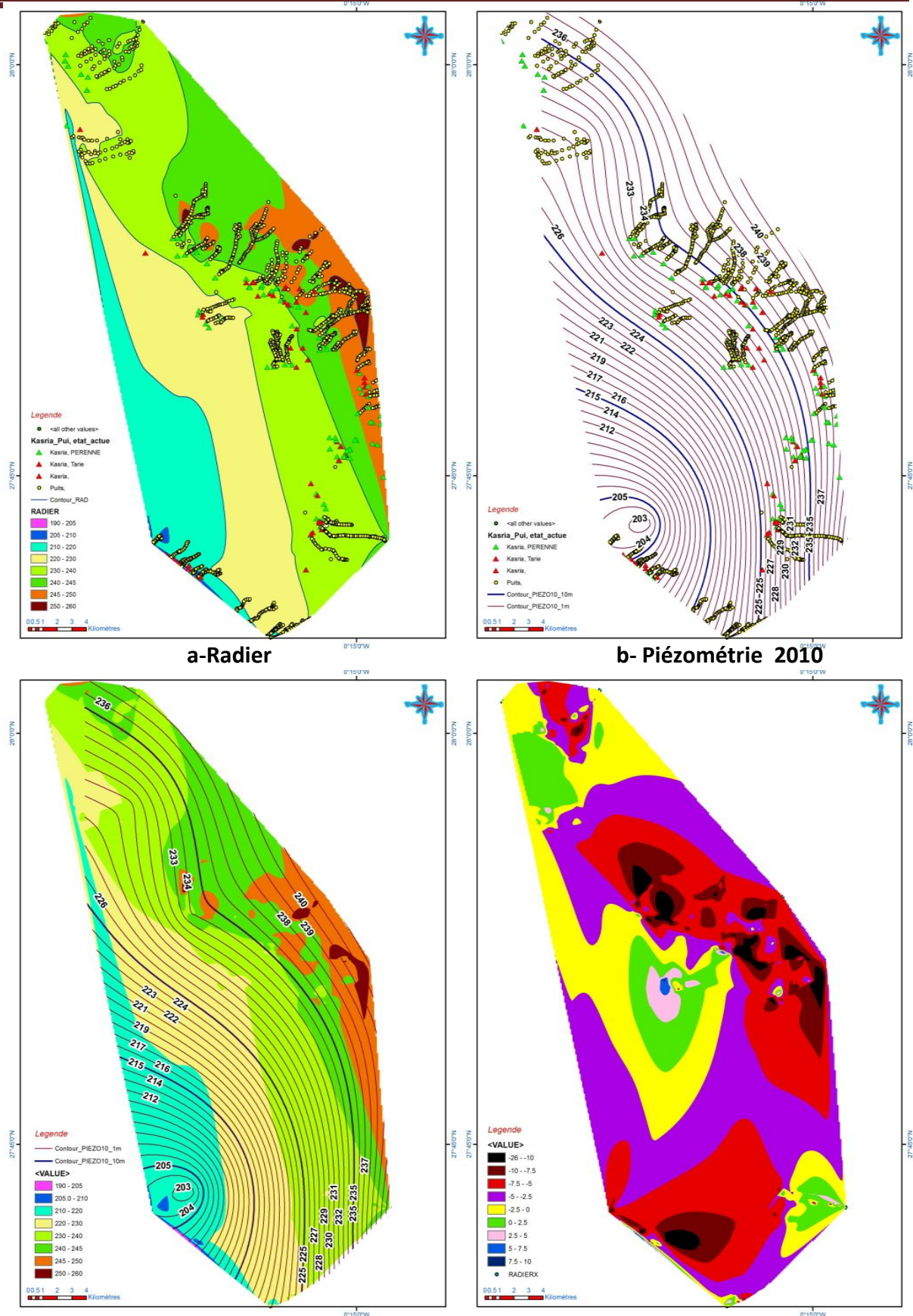


Figure.4.11 Évolution des niveaux d'eau dans les puits des foggaras en 2007.



a. Superposition 1 et 2 **b. Carte des niveaux d'eau**

Figure.4.12 Évolution des niveaux d'eau dans les puits des foggaras en 2010.

La superposition des différents profils, surface du sol, piézométrie de 2007 et 2011 et le tracé du radier de la foggara qui représente la galerie (figure 4.13), montre que le niveau piézométrique est juste au dessus du radier ce qui explique le faible débit de la foggara, d'après ce graphe le niveau piézométrique de 2011 est au dessous du niveau 2007 ce qui confirme que le niveau de la nappe est en baisse.

D'après le profil, cette foggara est condamnée d'un tarissement inévitable dans les prochaines années, si on ne réhabilite pas le niveau de la galerie pour lui permettre de survivre quelque décennie encore si on parle de l'âge séculaire de cette foggara.

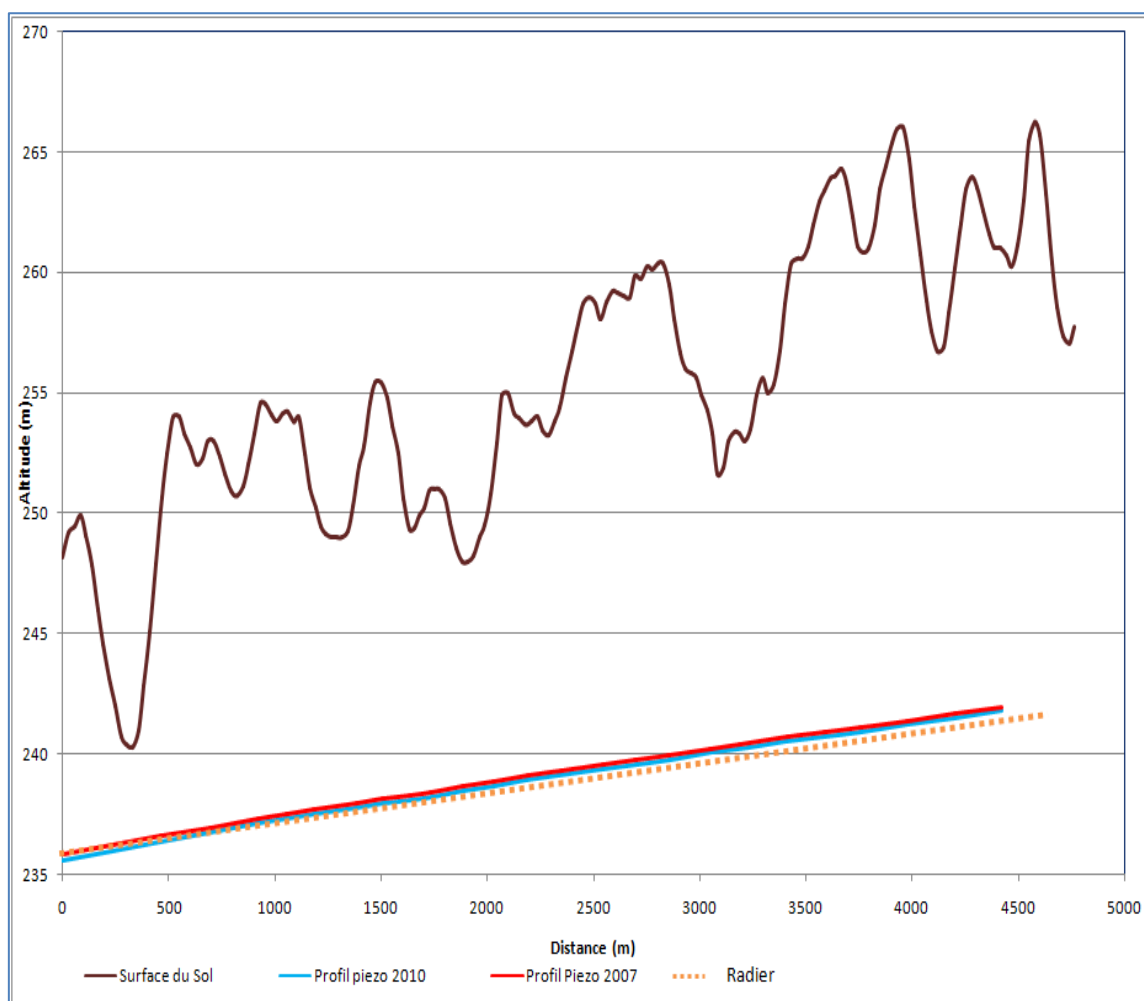


Figure.4.13 Profil le long de la foggara Cheurfa (Ouled Brahim, Commune Timmi).

4.16 Les contraintes qui agissent sur la foggara :

Depuis des siècles la foggara marche comme une horloge suisse, Le rendement des foggaras a subi ces dernières années une baisse fatale, la foggara ne parvient pas à suivre les mutations de mode de vie de la société ksourienne, à ce sujet plusieurs facteurs entre en cause dans la dégradation de la foggara et qui agissent négativement sur la palmeraie :

- Manque d'entretien : la foggara nécessite un entretien périodique et continu, pour qu'elle puisse garder sa pérennité, l'évolution sociale et ou la main d'œuvre esclave n'existe plus, ainsi que les prix onéreux de l'entretien malgré les différents programmes de l'état pour la réhabilitation et la sauvegarde des foggaras.
- Abandon de la foggara : le rôle de la foggara dans la société n'est plus le même, le souci pour cette mère « foggara » qui allaite 24/24 pour subvenir aux besoins de la population ksourienne et l'irrigation de la palmeraie n'existe plus en réalité dans l'esprit de la nouvelle génération, actuellement toute foggara de faible débit endommagée gravement généralement par un éboulement est condamnée à mort sauf dans le cas où l'état intervient.
- le vieillissement de la main d'œuvre chargée de l'entretien de la foggara et le refus de la génération actuelle de travailler la foggara.
- La modernisation de système de pompage par l'utilisation des pompes à gros débit, à favoriser l'exode des agriculteurs vers les grands périmètres de superficie plus vaste qui a négligé le rôle de l'agriculture sous palmiers dans l'oasis.
- Limite géologique naturelle : les foggaras d'Adrar sont situées juste à la limite de la nappe du Continental Intercalaire, la fluctuation du niveau d'eau perturbe le fonctionnement de ce système.

Conclusion

L'étude de l'ensemble des données des foggaras montre que cette dernière est en état de dégradation progressive, la chute du débit est confirmée par les jaugeages réalisés, avec une diminution de plus de 50% du débit et un taux de tarissement des foggaras de 40% par rapport à l'année de référence de 1960.

Le manque d'entretien, l'influence des forages, le rabattement de la nappe à l'échelle régionale sont des facteurs qui influent sur la continuité de ce système de faire le bonheur à la palmeraie, La « foggara » cette magnifique invention qui coule depuis des siècles est condamnée par ses plus proches à un mort inévitable.

CHAPITRE V

HYDROCHIMIE

V. HYDROCHIMIE

5.1 Introduction

Un coup d'œil sur la carte piézométrique globale de la nappe du Continental Intercalaire montre l'immensité de ce système, les eaux de la région d'Adrar proviennent des zones de recharge très lointaines, au cours de ce trajet, l'eau passe par tous les processus chimiques et physiques pour atteindre en fin son exutoire Sud-ouest « les foggaras d'Adrar »

Ce parcours de quelques centaines à un millier de kilomètres, ne passe pas sans incident qui affecte les caractéristiques physico-chimiques des eaux durant le long trajet et séjour dans les différentes formations géologiques.

Durant des siècles l'eau de la foggara est utilisée pour l'alimentation en eau potable des oasis, l'abreuvement des animaux 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.

L'étude des caractéristiques hydrochimiques des eaux des foggaras de la région d'Adrar permet de mieux comprendre l'évolution du chimisme des eaux de la nappe du Continental Intercalaire durant ces dernières décennies et leurs influences sur l'évolution de la palmeraie.

5.2. Les Compagnes d'échantillonnages

Pour cette étude nous avons utilisé les données de deux compagnes, la première effectuée durant la période de 1959-1960 et la deuxième réalisée dans le cadre de l'étude des foggaras en 2011.

Le travail consiste à étudier le chimisme actuel (2011) des eaux des foggaras et de faire une comparaison avec les résultats des anciennes analyses réalisées en 1959-1960 pour les mêmes foggaras à fin de voir l'évolution de la composition chimique des eaux des foggaras.

Le réseau choisi est composé de 116 foggaras à travers la zone allant d'Adrar à Reggane pour l'année 2011, les échantillons sont analysés au laboratoire de l'ANRH d'Adrar, et pour de la période 1959-1960, 76 résultats d'analyses sont extraites des anciens inventaires.

5.3 Analyse de l'eau

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition lithologique des milieux traversés et du temps de séjour. Les analyses effectuées *in situ* concerne les paramètres physiques : Température (T), potentiel d'Hydrogène (pH), le potentiel Redox (Eh), Conductivité Électrique (CE), l'oxygène dissous (O_2) et au laboratoire elle portera sur les éléments majeurs (Cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et Anions : Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) et les éléments d'origine biologique (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et PO_4^-).

5.3.1 Les paramètres physico-chimiques

5.3.1.1 La température (T°):

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 24 et 29°C.

5.3.1.2 La Conductivité (EC):

La conductivité qui est l'inverse de la résistivité traduit une aptitude de l'eau à laisser passer le courant électrique, la mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement, mais approximativement la minéralisation totale de l'eau *in-situ* par une approximation égale au produit de la conductivité électrique à 25°C par un coefficient compris entre 0.55 et 0.95 (Hounslow, 1995).

L'analyse des données de la conductivité montre que les eaux des foggaras de la région d'Adrar ont une conductivité très élevée qui dépasse parfois largement les normes de potabilité, elles sont supérieures à 1250 $\mu s/cm$ et qu'elles atteignent les 8750 $\mu s/cm$.

L'analyse spatiale montre que la conductivité varie selon les régions, elle est entre 1250 à 1500 $\mu s/cm$ au Nord de la zone d'étude vers la ville d'Adrar, alors qu'elle dépasse les 3000 $\mu s/cm$ dans l'extrême Sud dans la région de Reggane, cette augmentation est due à la présence des horizons évaporitiques dans la région de Reggane (Figure 5.1).

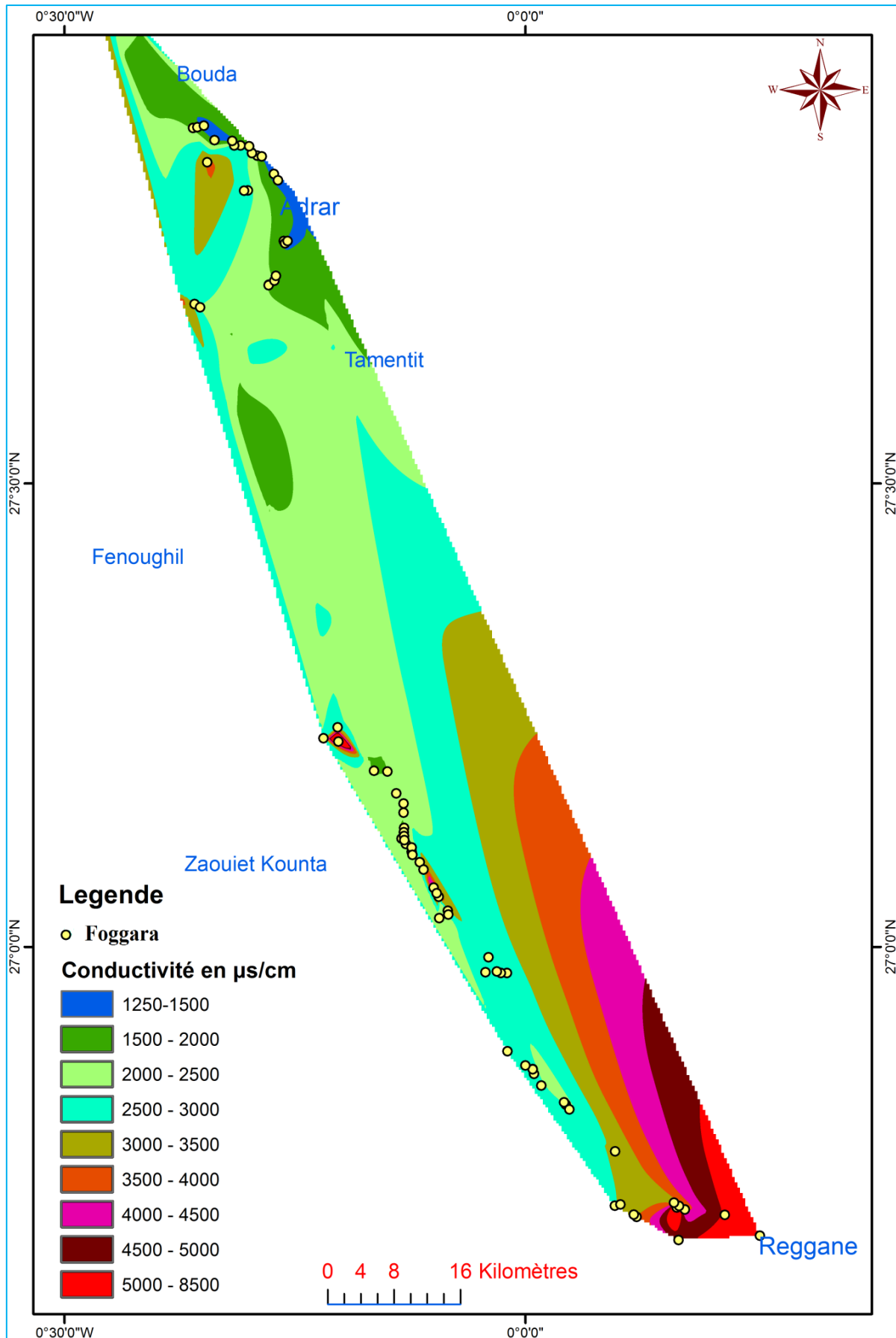


Figure 5.1 Carte de la Conductivité électrique des eaux des foggaras de la région d'Adrar.

5.3.1.3 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 varie de 7 à 8, ils sont dans la norme de potabilité.

5.3.1.4 Résidu Sec :

Le résidu sec est la quantité des sels dissous et la matière organique contenue dans l'eau obtenue par dessiccation de l'eau à 180°C, les résultats montrent que les valeurs de résidu sec autour de la ville d'Adrar sont inférieures à 1 g/l, alors que les régions de Reggane dans l'extrême Sud et Bouda dans l'extrême Nord-ouest présentent des teneurs entre 2 et 4 g/l de résidu sec (Figure 5.2).

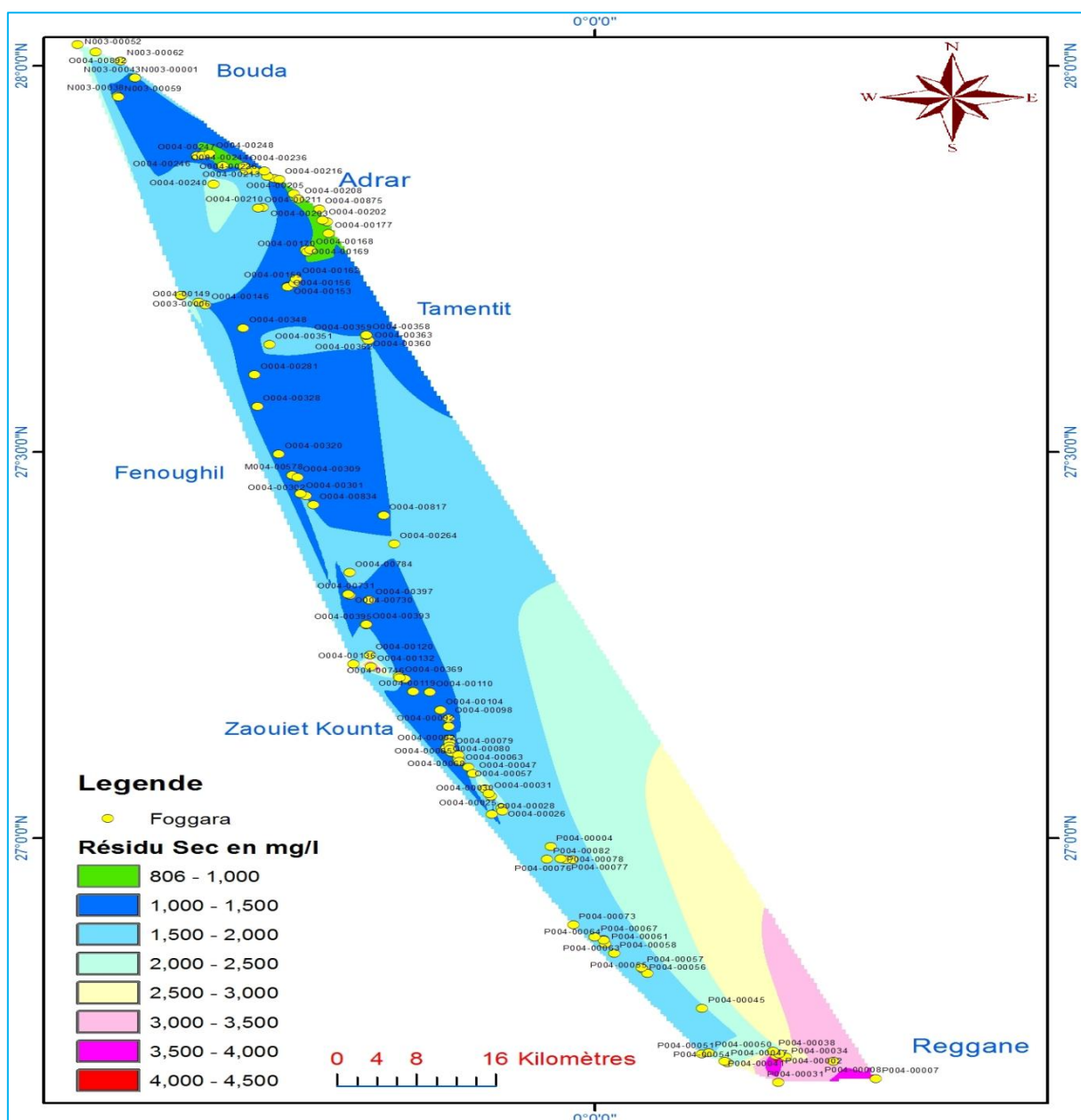


Figure 5.2 Carte de Résidu Sec des eaux des foggaras de la région d'Adrar (Année 2011).

5.3.1.5 Dureté totale :

Elle traduit la somme des teneurs en calcium et magnésium exprimée en degré français (°F), la dureté des eaux des foggaras de la région d'étude (Figure 5.3) se situe entre 21 et 241°F, ces teneurs traduisent des eaux très dures qui sont supérieures à 30°F.

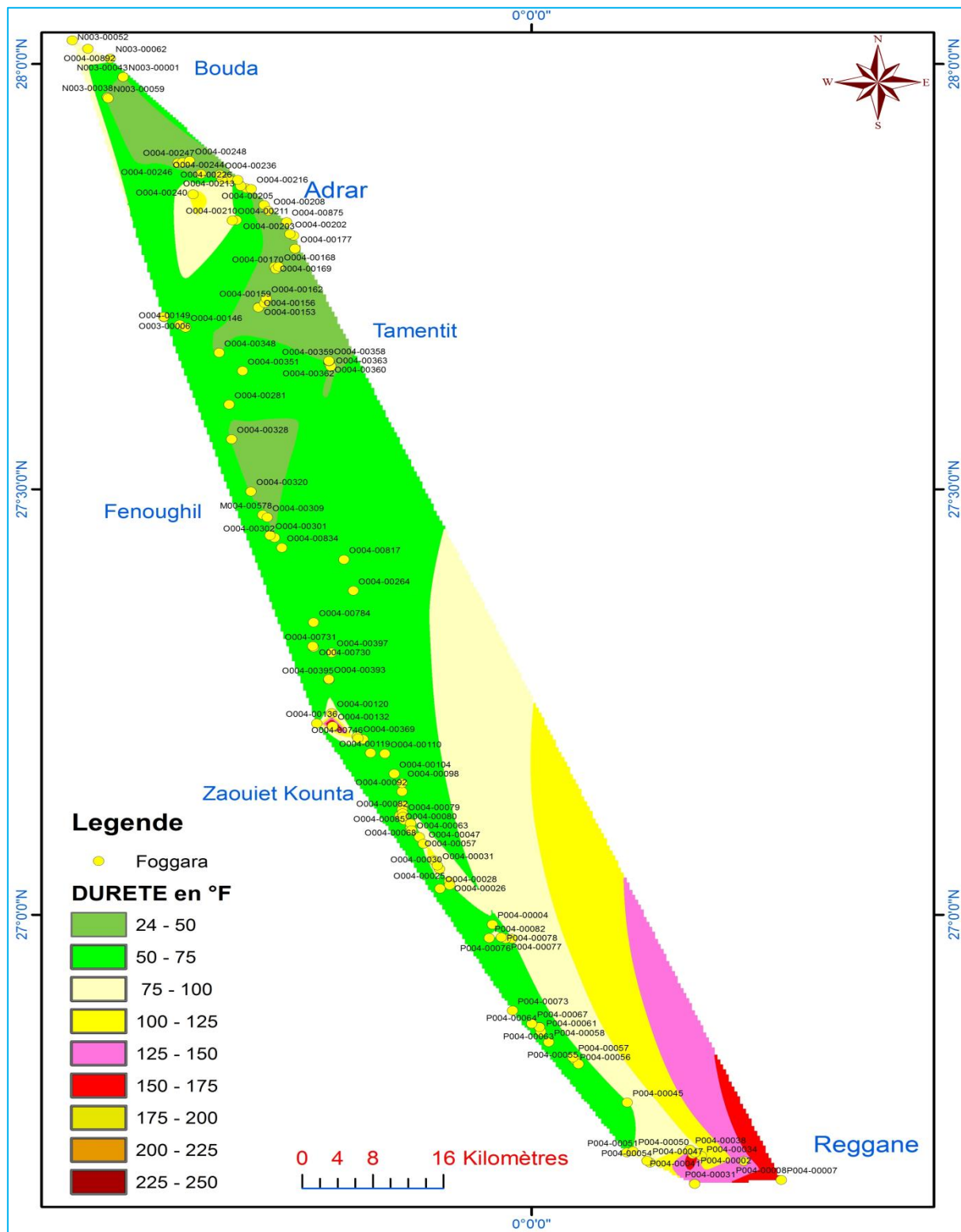


Figure 5.3 Carte de la dureté de l'eau des foggaras dans la région d'Adrar (Année 2011).

5.3.2 Les paramètres chimiques

5.3.2.1 Balance Ionique :

La vérification des résultats d'analyses pour une bonne interprétation et représentation graphique des données est très importante, la vérification de la balance ionique des résultats des analyses de la région d'étude est très bonne, elles présentent une balance dans l'intervalle de $\pm 5\%$.

5.3.2.2 Les faciès chimiques :

Les résultats d'analyses des eaux des foggaras de la région d'Adrar montrent que deux faciès hydrochimiques sont dominants dans toute la région, le chloruré sodique dans la partie Nord de la région et le sulfaté sodique dans la partie Sud de la région d'étude (Figure 5.4).

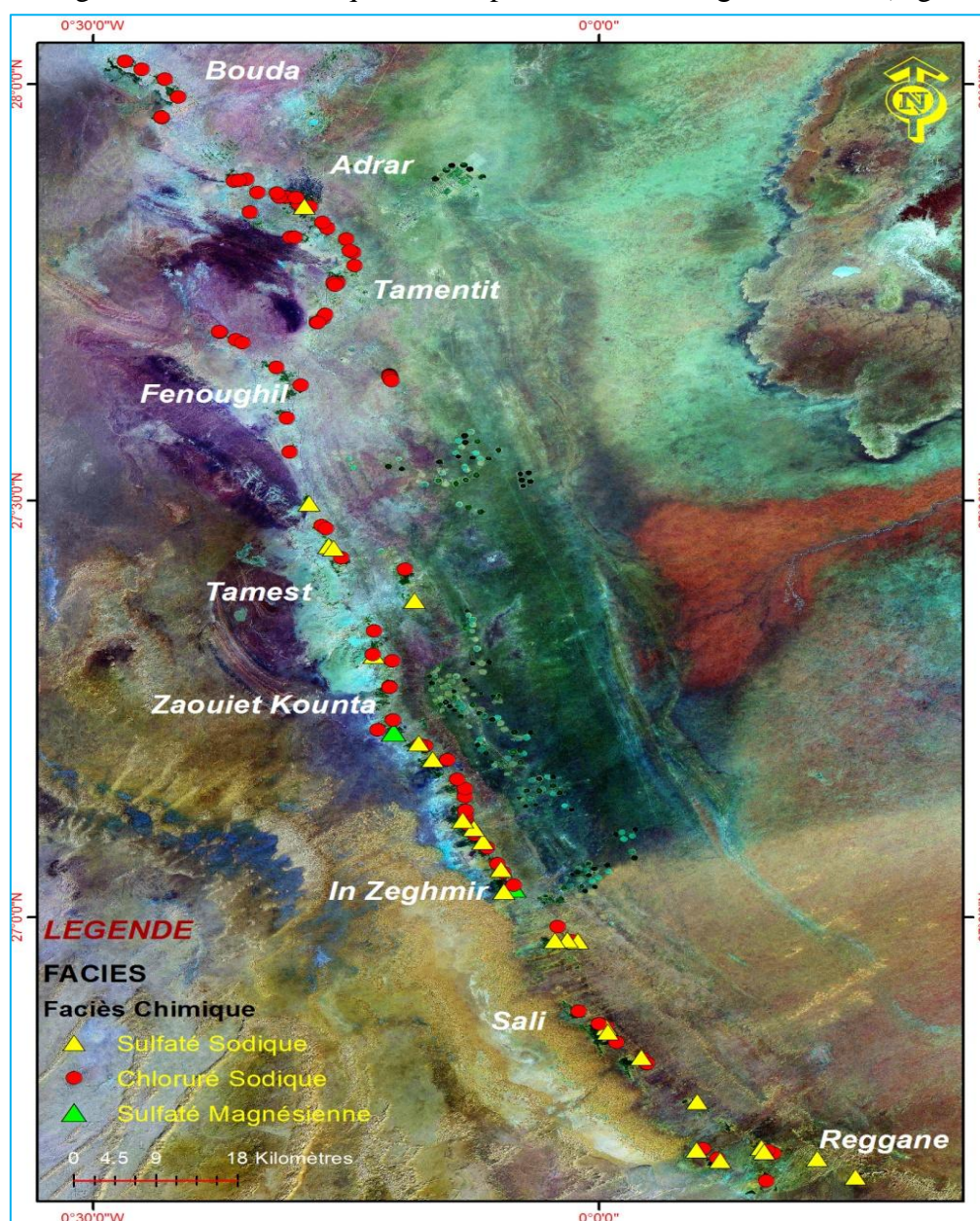


Figure 5.4 Répartition des faciès chimiques des eaux des foggaras dans la région d'Adrar.

5.3.2.3 Les éléments majeurs

3a. Le Calcium (Ca^{++}) :

La présence des ions Ca^{++} dans l'eau indique, soit une dissolution des formations carbonatées, calcite (CaCO_3), dolomie $[(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3]$ ou bien la dissolution des formations évaporitiques, gypse $[\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})]$ et anhydrite (CaSO_4).

Les résultats d'analyses montrent que 90 % des échantillons ont des teneurs inférieures à 200 mg/l, les 10% qui dépassent cette valeur sont localisés dans la région de Reggane (Figure 5.5).

3b. Le Magnésium (Mg^{++}) :

Le magnésium est un élément très abondant, Il est souvent présent dans les roches évaporitiques (sel de Mg), la carnallite ($\text{KMgCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$), la kiesérite ($\text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}$), et carbonatés, la dolomie $[(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3]$, les valeurs de magnésium dans la région varient de 11 mg/l au Nord de la zone d'étude (ville d'Adrar) à 409 mg/l au Sud de la zone (région de Reggane), voir (Figure 5.6).

3c. Le Sodium (Na^+) :

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères très solubles tel que l'halite (NaCl), les teneurs dans la région sont très élevées et indiquent que les eaux des foggaras sont contenues dans des formations salifères qui dépassent largement les 200 mg/l, les valeurs les plus élevées supérieures à 400 mg/l sont localisées dans la région de Reggane et la partie extrême Nord-ouest dans la région de Bouda, alors que les valeurs inférieures à 200 mg/l sont localisées au Nord-est dans la région de la commune d'Adrar (Figure 5.7).

3d. Le Potassium (K^+) :

Les fortes teneurs en potassium peuvent être observées dans les eaux des formations argileuses et dans les eaux ayant traversées des formations évaporitiques riches en sylvite (KCl), et carnallite, les valeurs enregistrées sont entre 10 et 58 mg/l, avec des fortes teneurs qui sont concentrées dans la région de Reggane (Figure 5.8).

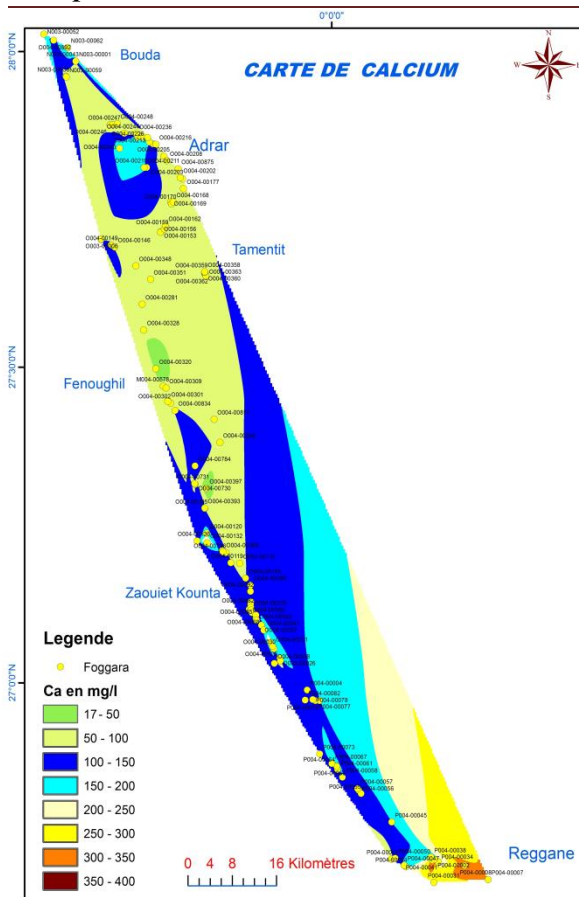


Figure 5.5 Carte de Calcium (2011).

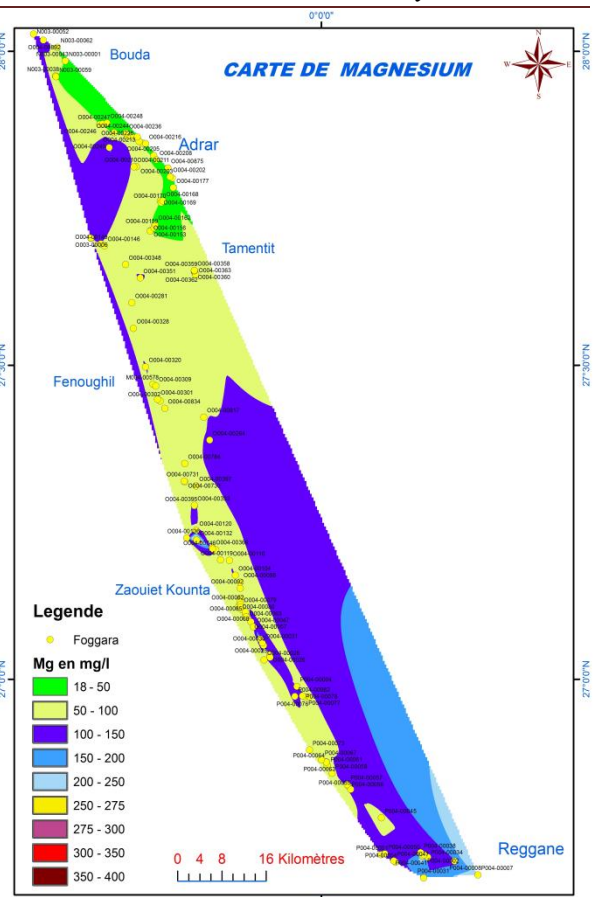


Figure 5.6 Carte de Magnésium (2011).

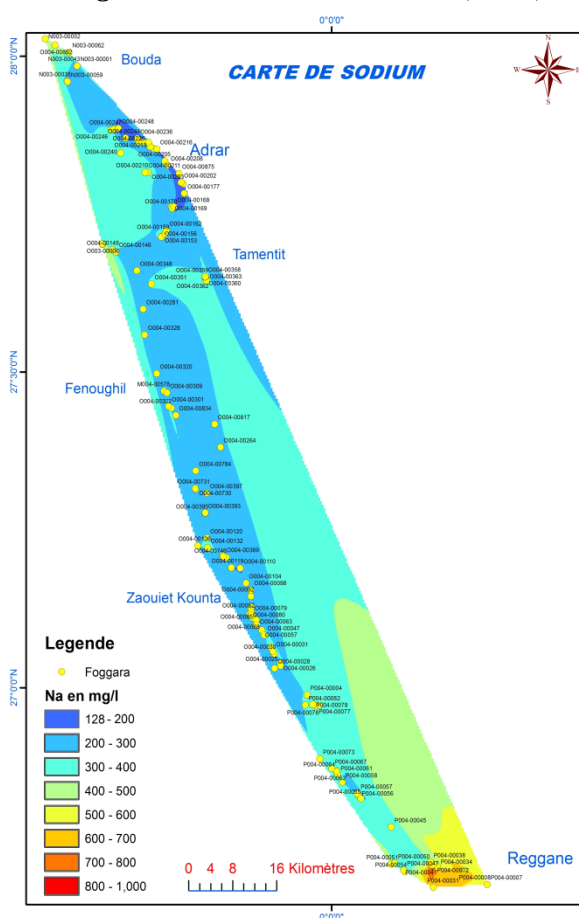


Figure 5.7 Carte de Sodium (2011).

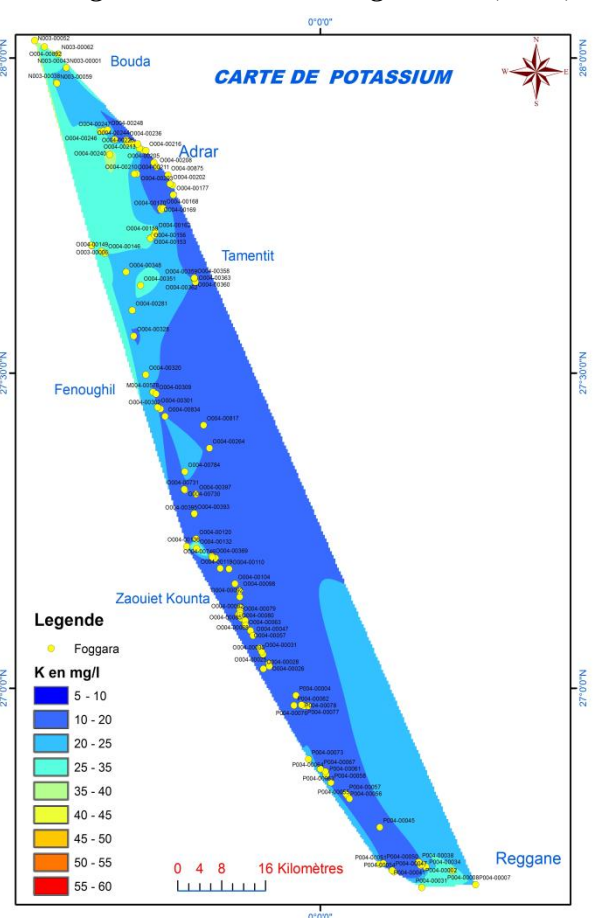


Figure 5.8 Carte de Potassium (2011).

3e. Les Chlorures (Cl⁻) :

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportions très variables, leur présence dans l'eau souterraine résulte de la dissolution des sels naturels par la dissolution de la sylvite (KCl) et de l'halite (NaCl).

Les teneurs en chlorures sont très élevées dans notre région qui dépassent les 1400 mg/l, les fortes teneurs sont localisées dans la région de Bouda dans l'extrême Nord Ouest et au Sud de la région d'étude vers Reggane où les teneurs dépassent largement les 700 mg/l, (Figure 5.9).

3f. Les Bicarbonates (HCO₃⁻) :

Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son l'infiltration dans le sous sol.

Les teneurs en bicarbonates dans les eaux de la zone d'étude varie de 40 à 480 mg/l, avec 95 % des teneurs sont entre 100 et 200 mg/l, les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la région de Reggane au Sud et la région de Bouda à l'extrême Nord-ouest (Figure 5.10).

3g. Les Sulfates (SO₄⁻) :

La présence des sulfates est généralement liée au lessivage des formations évaporitiques, tel que le gypse (CaSO₄, 2(H₂O)) et l'anhydrite (CaSO₄), ils peuvent provenir également de l'oxydation de la pyrite (FeS₂).

Les teneurs des sulfates dans les eaux de la région varient de 170 mg/l à plus de 2000 mg/l, les teneurs les plus élevées sont observées dans la région de Reggane (Figure 5.11).

5.3.2.4 Les éléments de pollution**4a. Les Nitrates (NO₃⁻) :**

L'ion nitrate est la forme oxydée de l'azote, les sources naturelles de nitrate sont principalement la pluie et les interactions avec le sol et la végétation (Jacques.B, 2008), l'origine artificielle des nitrates sont les contaminations par des engrais et les rejets domestiques. La concentration des nitrates dans les eaux des foggaras sont très élevées, ils dépassent les 50 mg/l dans presque la totalité de la zone d'étude et qui atteignent les 160 mg/l, excepté la partie Nord (ville d'Adrar) où les teneurs sont inférieures à 50 mg/l (Figure 5.12).

4b. Les Nitrites (NO₂⁻) :

Les nitrites représentent la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium. Il s'agit d'une forme toxique, dans l'ensemble, les teneurs en nitrites sont inférieures à 0.1 mg/l.

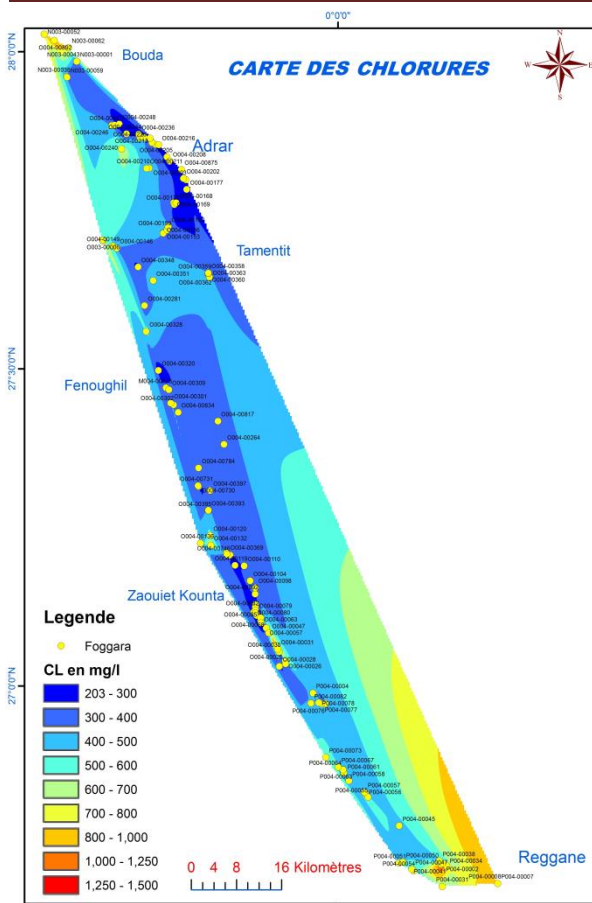


Figure 5.9 Carte des Chlorures (2011).

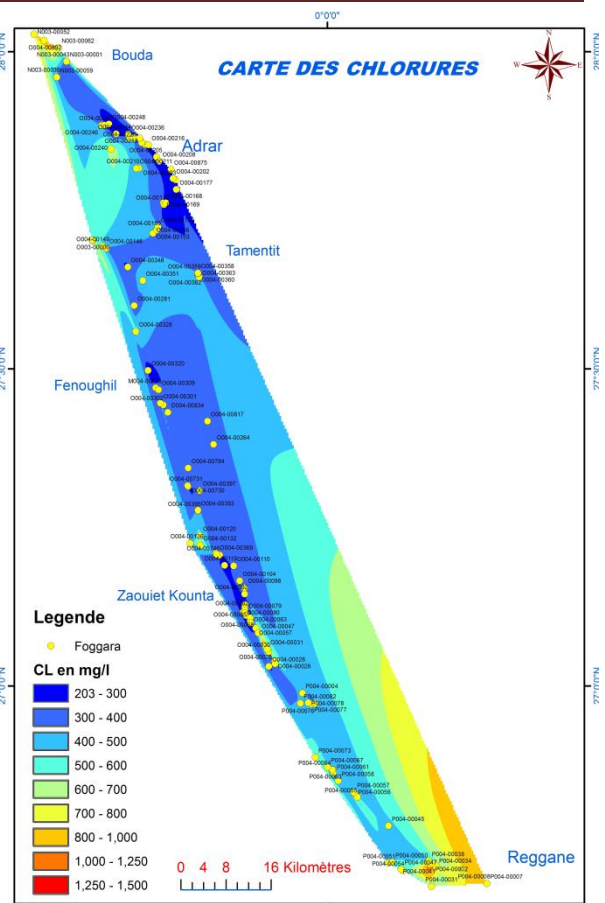


Figure 5.10 Carte des Sulfates (2011).

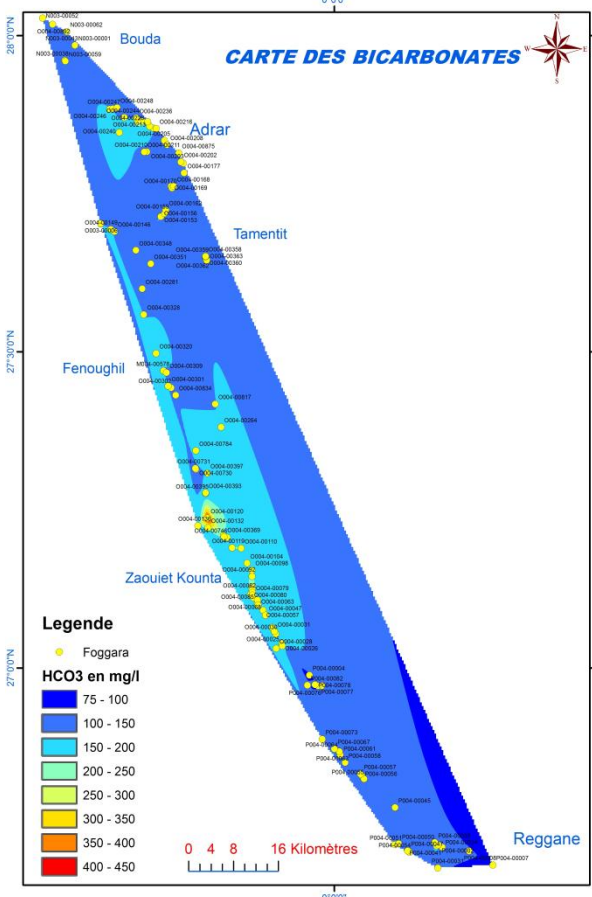


Figure 5.11 Carte des Bicarbonates (2011).

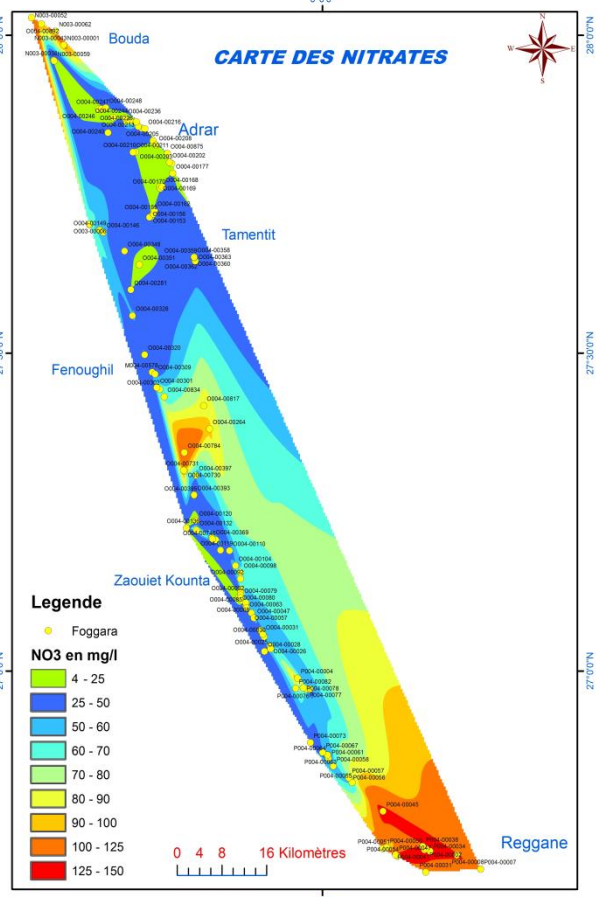


Figure 5.12 Carte des Nitrates (2011).

4c. L'Ammonium (NH_4^+) :

L'Ammonium est la forme d'azote la plus toxique, sa présence dans l'eau est liée à une contamination urbaine ou industrielle, les teneurs en ammonium dans les eaux des foggaras de la zone d'étude sont dans la totalité inférieures à 0.06 mg/l, (Figure 5.13).

4d. Les Phosphates (PO_4^-) :

L'origine des phosphates dans les eaux est liée aux rejets urbains ou à la dissolution des engrais chimiques, les teneurs en phosphates des eaux des foggaras sont inférieures à 0.5 mg/l (Figure 5.14).

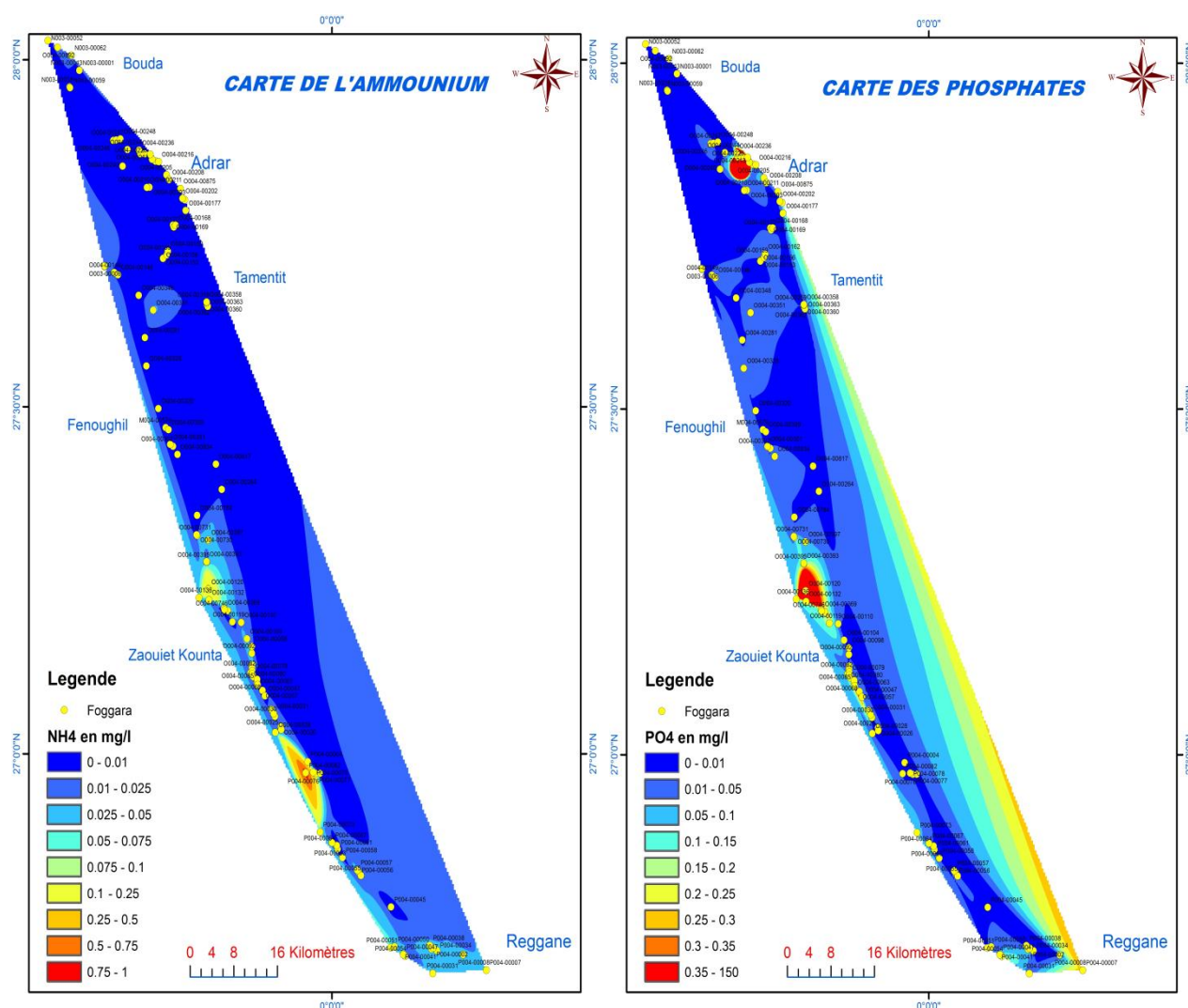


Figure 5.13 Carte de l'Ammonium (2011).

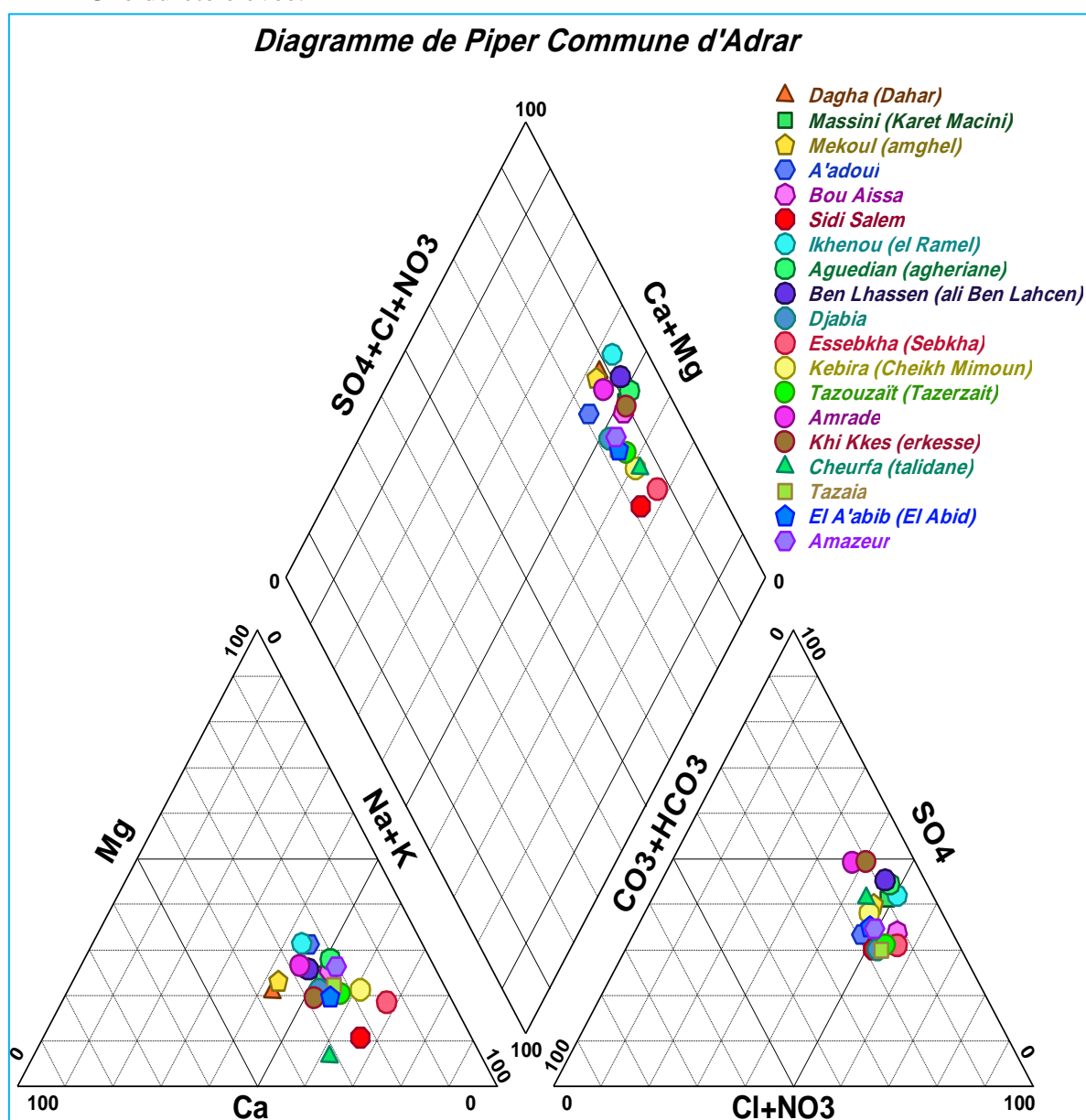
Figure 5.14 Carte des Phosphates (2011).

5.3.3 Représentation graphique

5.3.3.1 Digramme de PIPER :

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de différencier les familles d'eaux, l'examen des représentations graphiques (Figure 5.15 à 5.21) des différents diagrammes obtenus permet de déduire les interprétations suivantes :

- L'allure générale des diagrammes pour les différentes régions et la même.
- Domination du magnésium et sodium dans le triangle des cations sur le calcium.
- Domination des chlorures et sulfates dans le triangle des Anions sur les bicarbonates.
- Une dureté élevée.



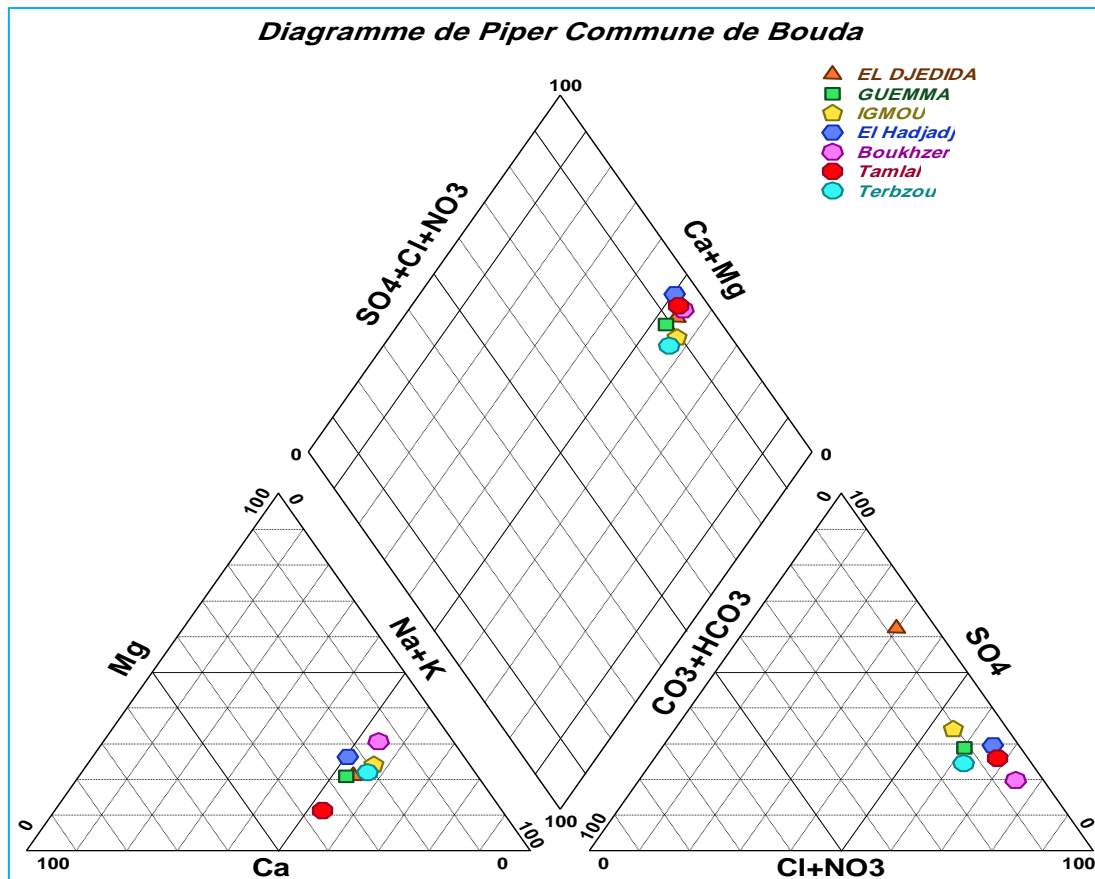


Figure 5.16 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Bouda.

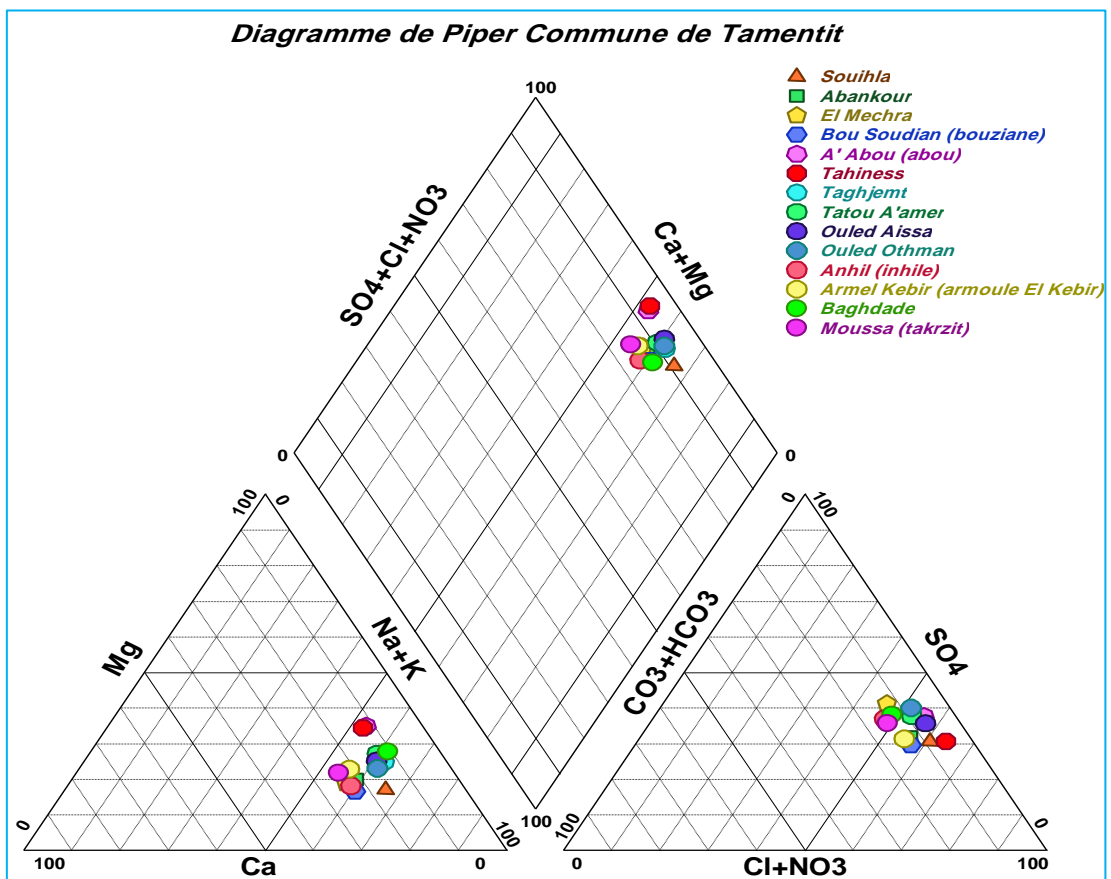


Figure 5.17 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Tamentit.

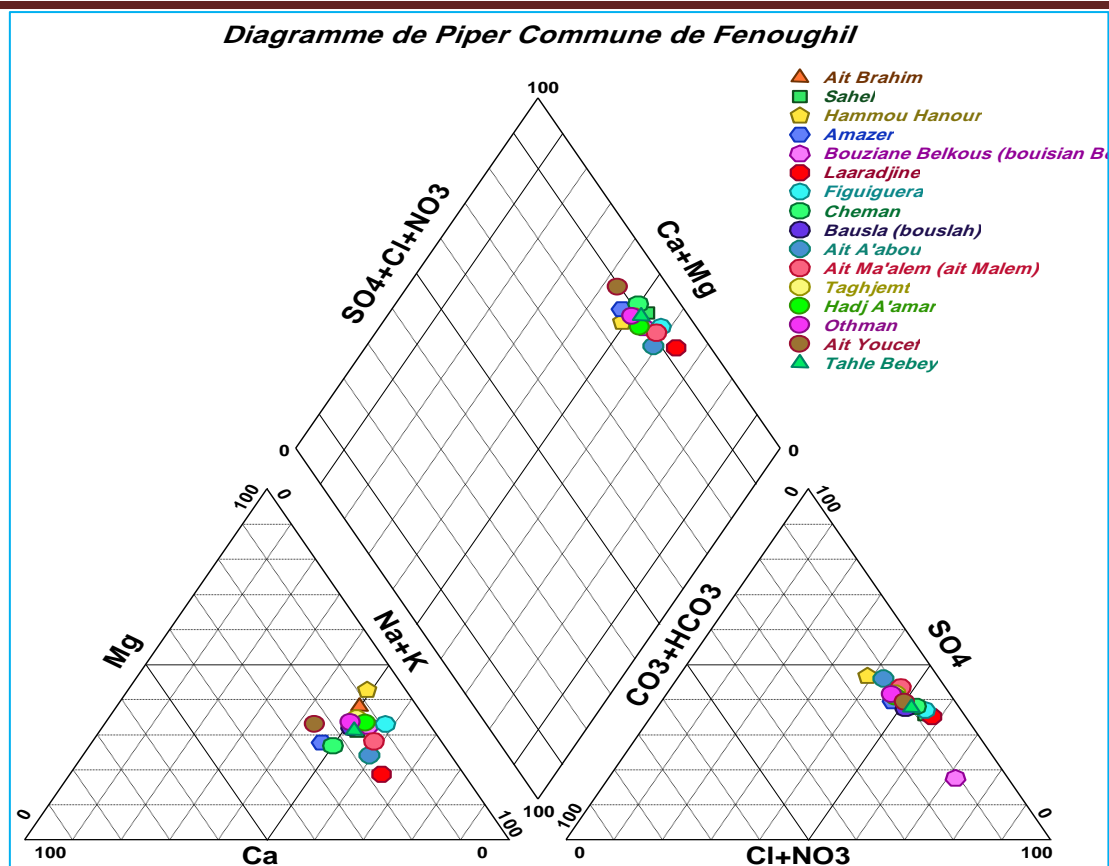


Figure 5.18 Diagramme de Piper des eaux des foggaras des communes de Fenoughil et Tamest.

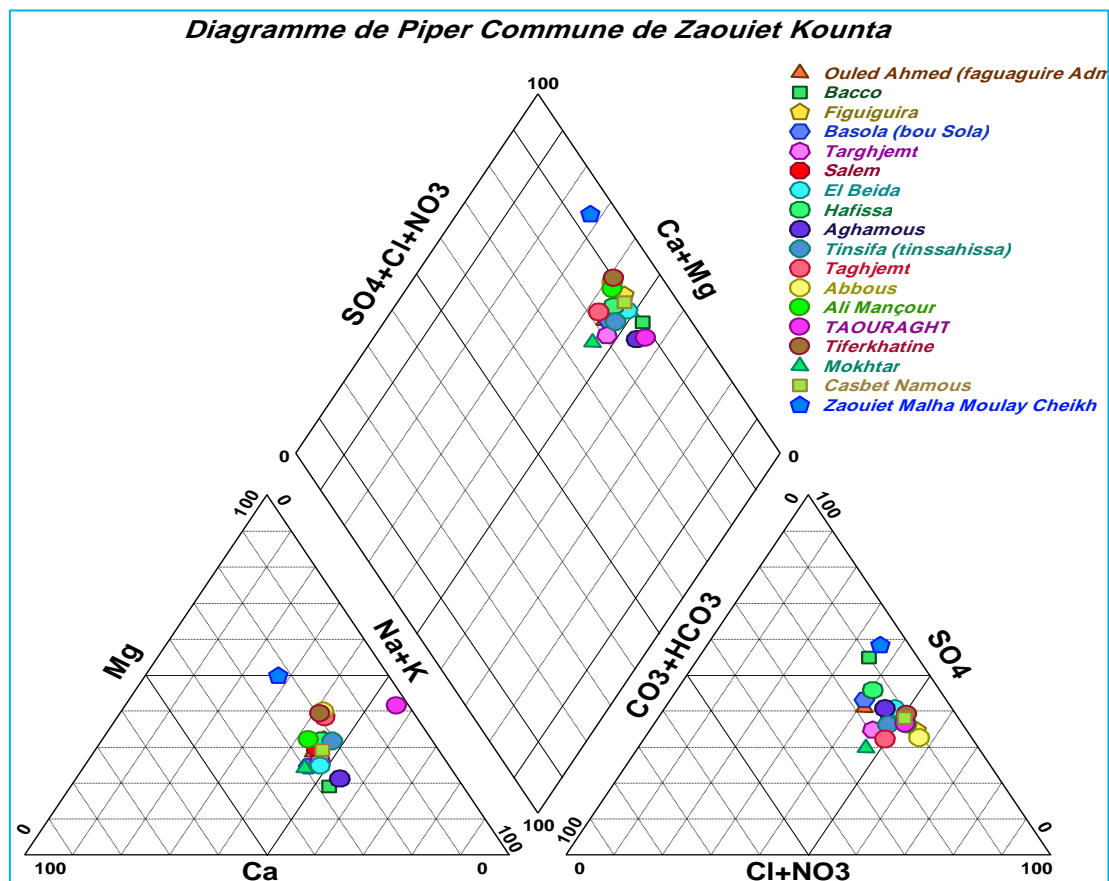


Figure 5.19 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Zaouiet Kounta.

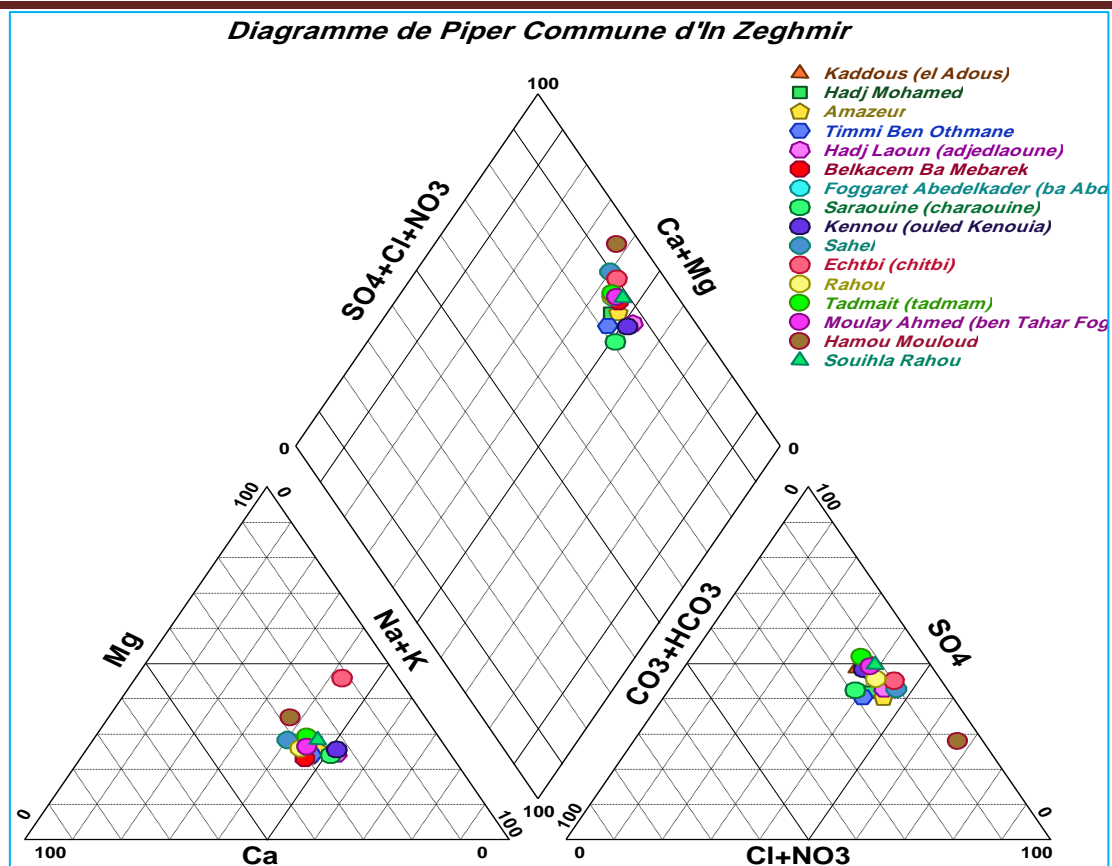


Figure 5.20 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune d'In Zeghmir.

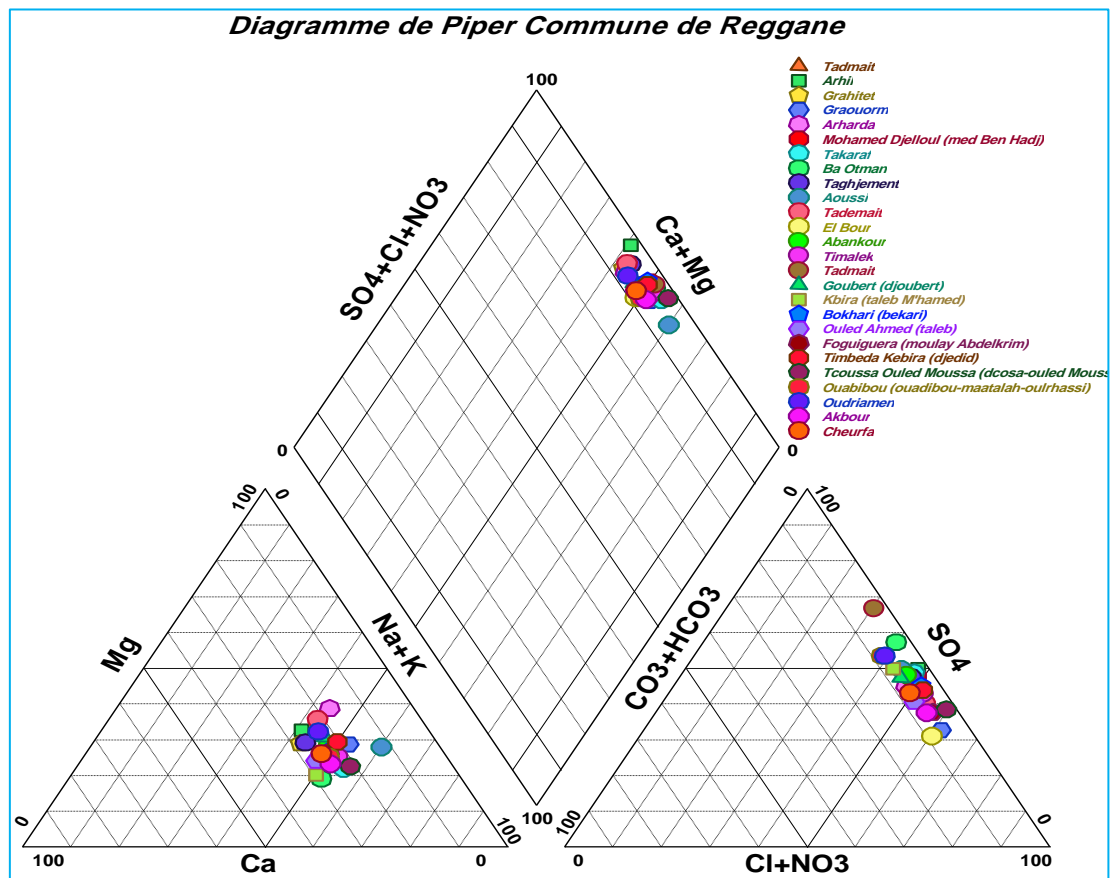


Figure 5.21 Diagramme de Piper des eaux des foggaras des communes de Reggane et Sali.

5.3.3.2 Diagramme de SCHOELLER BERKALOFF

Le diagramme de Schöeller Berkaloff permet de représenter les faciès chimiques de plusieurs échantillons d'eaux dans un seul graphe. Les figures (5.22 à 5.28) des différentes Communes de la wilaya d'Adrar montrent :

- La domination des sulfates pour les anions dans les eaux de la partie sud de la zone d'étude (Commune Zaouiet kounta, In Zeghmir, Sali et Reggane), alors que les chlorures dominent dans la partie nord de la zone d'étude (Commune Adrar, Timmi, bouda, Tamentit et Fenoughil).
- La domination pour les cations du sodium sur les autres éléments dans toute la zone d'étude.
- La domination de faciès Chloruré sodique dans la partie Nord de la zone d'étude.
- La domination de faciès Sulfaté sodique dans la partie Sud de la zone d'étude.

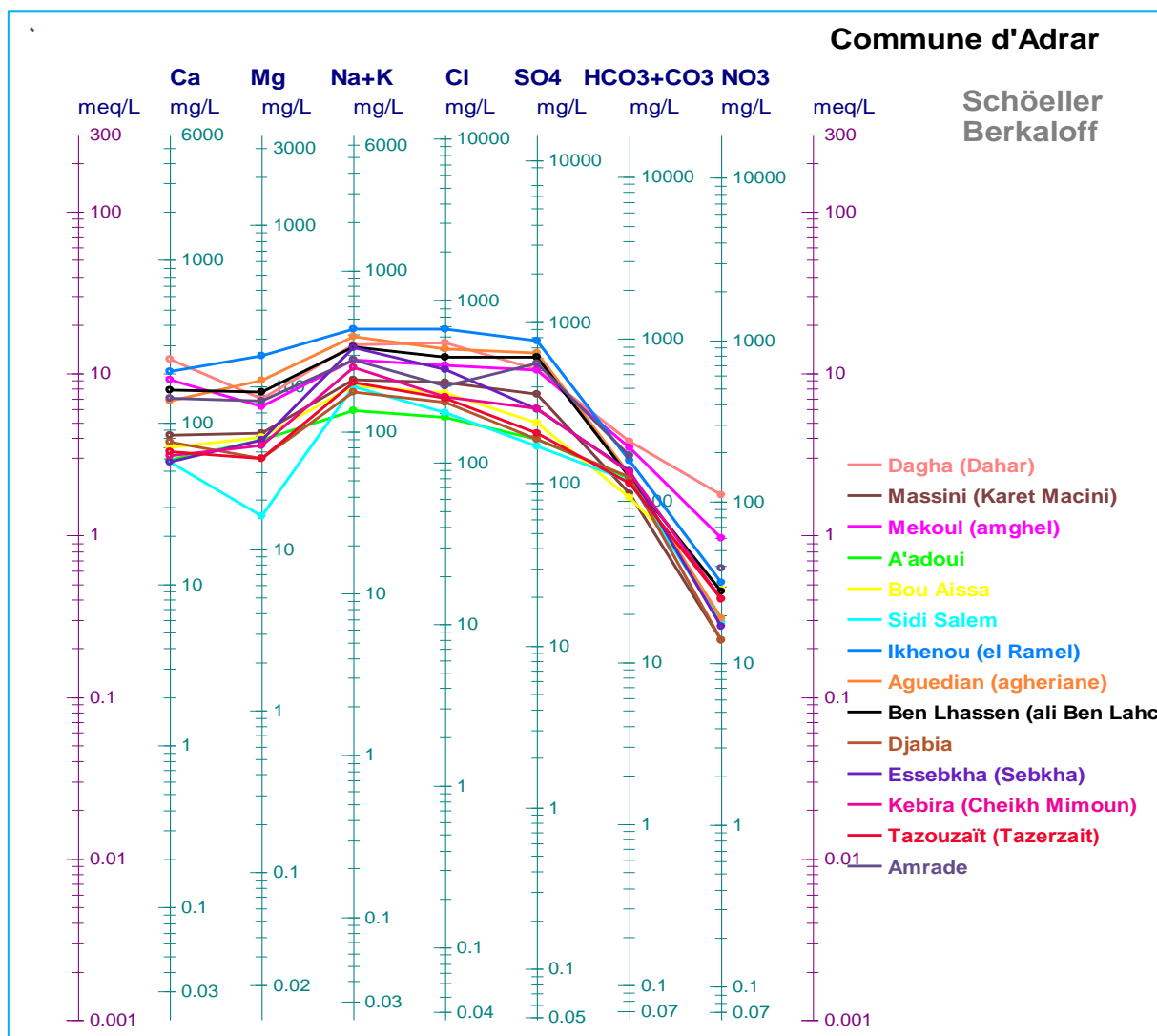


Figure 5.22 Diagramme de Schöeller des eaux des foggaras des communes d'Adrar et Timmi.

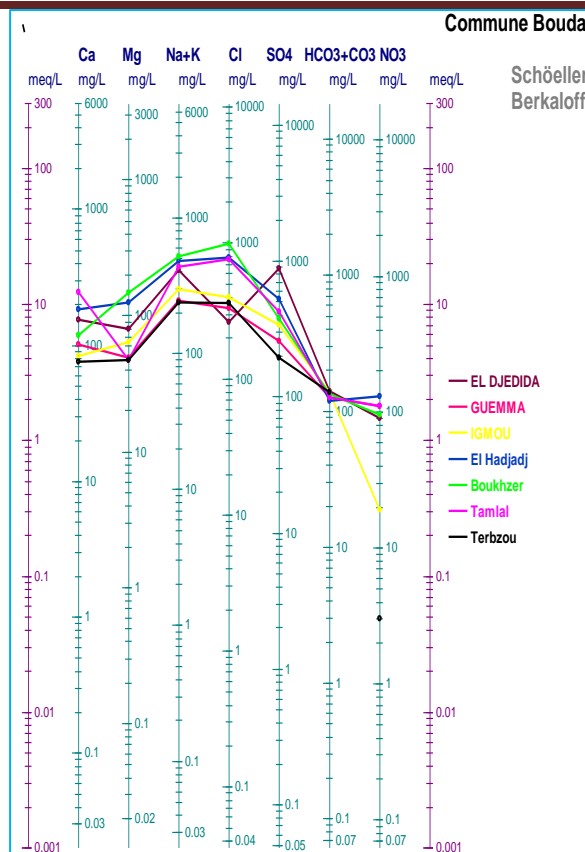


Figure 5.23 Diagramme Schöeller

Commune de Bouda

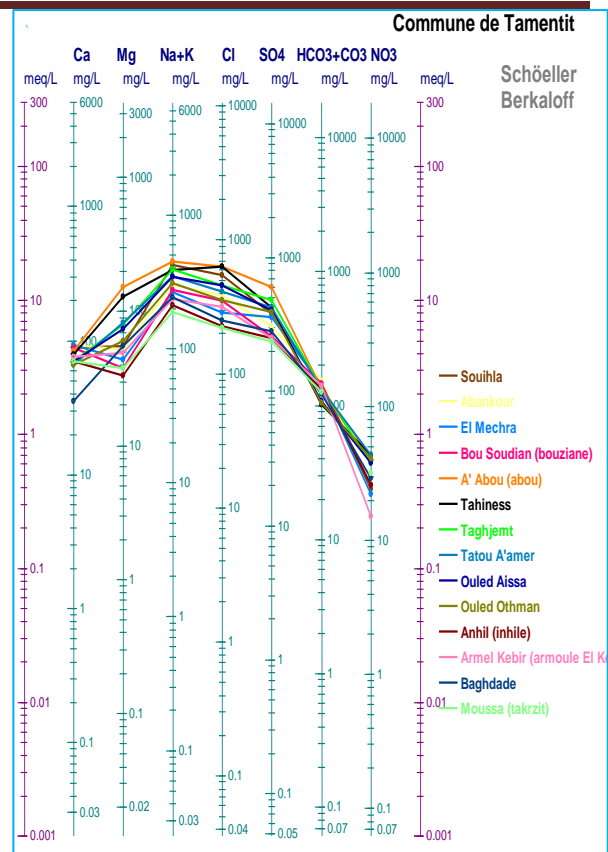


Figure 5.24 Diagramme Schöeller

Commune de Tamentit

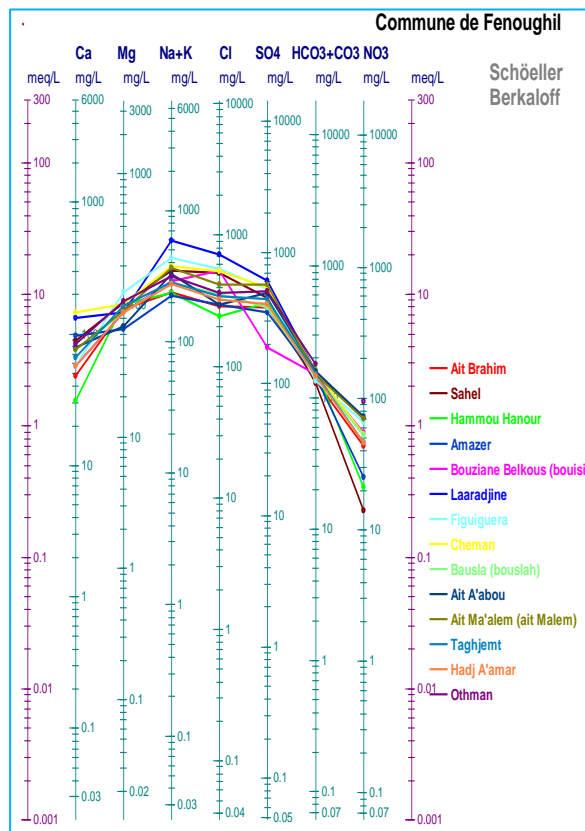


Figure 5.25 Diagramme Schöeller

Communes de Fenoughil et Tamest

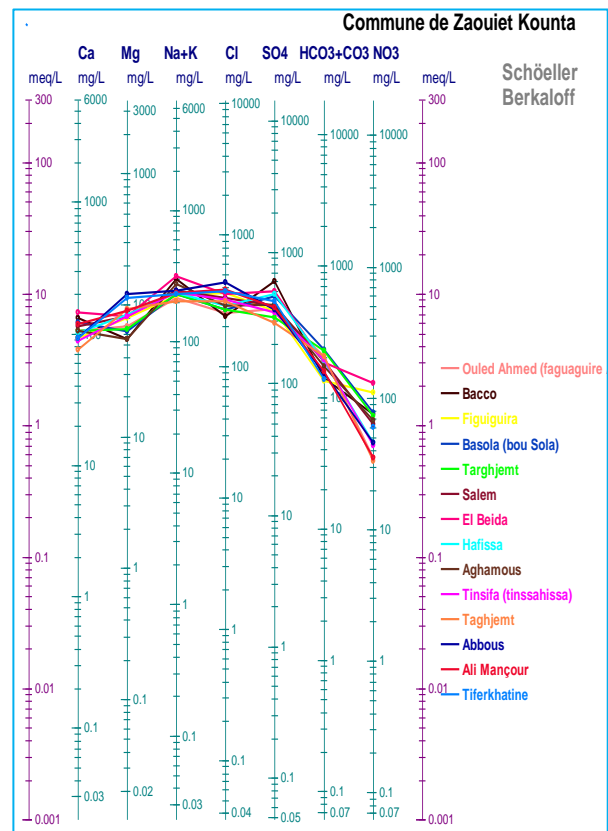


Figure 5.26 Diagramme Schöeller

Commune de Zaouiet Kounta

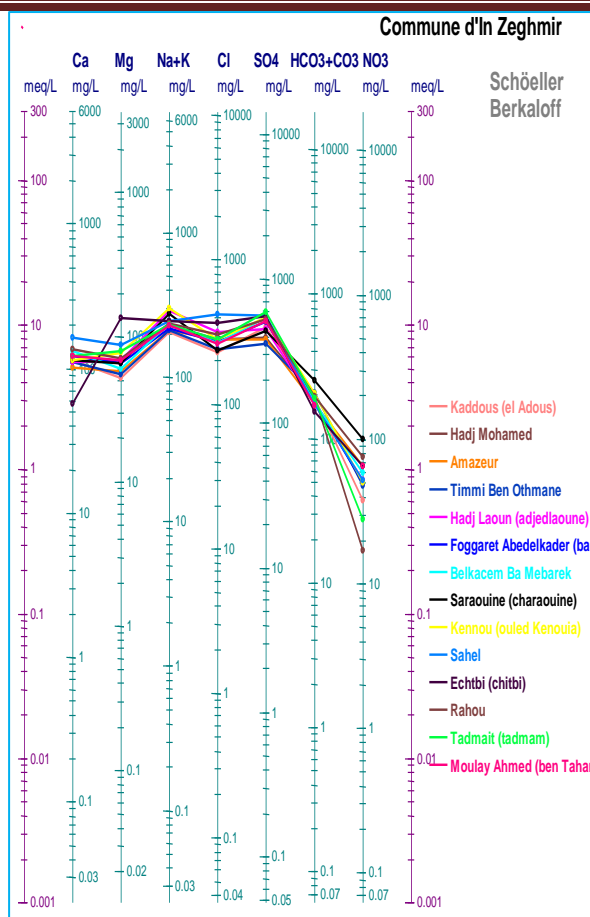


Figure 5.27 Diagramme Schöeller
Commune d'In Zeghmir

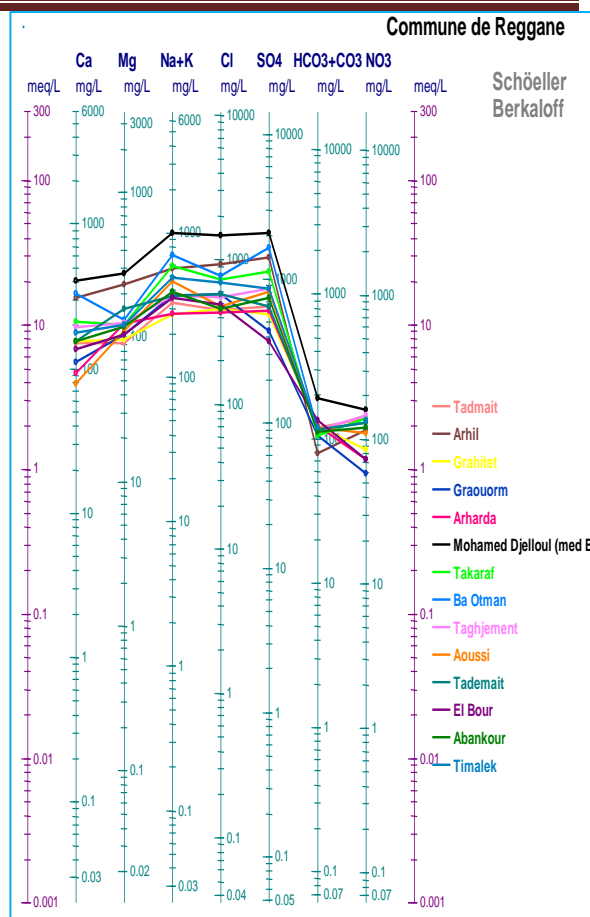


Figure 5.28 Diagramme Schöeller
Communes de Reggane et Sali

5.3.4 Relation chimiques

4a- Sodium-Chlorure (Na-Cl):

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle entre le sodium et les chlorures (Figure 5.29) 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 0.85.

4b- Sulfate-Calcium (SO₄-Ca):

Les sulfates ont une relation proportionnelle avec le Calcium, donc ils ont des origines communes, soit du gypse (CaSO₄, 2HO₂) 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 0.82 (Figure 5.30).

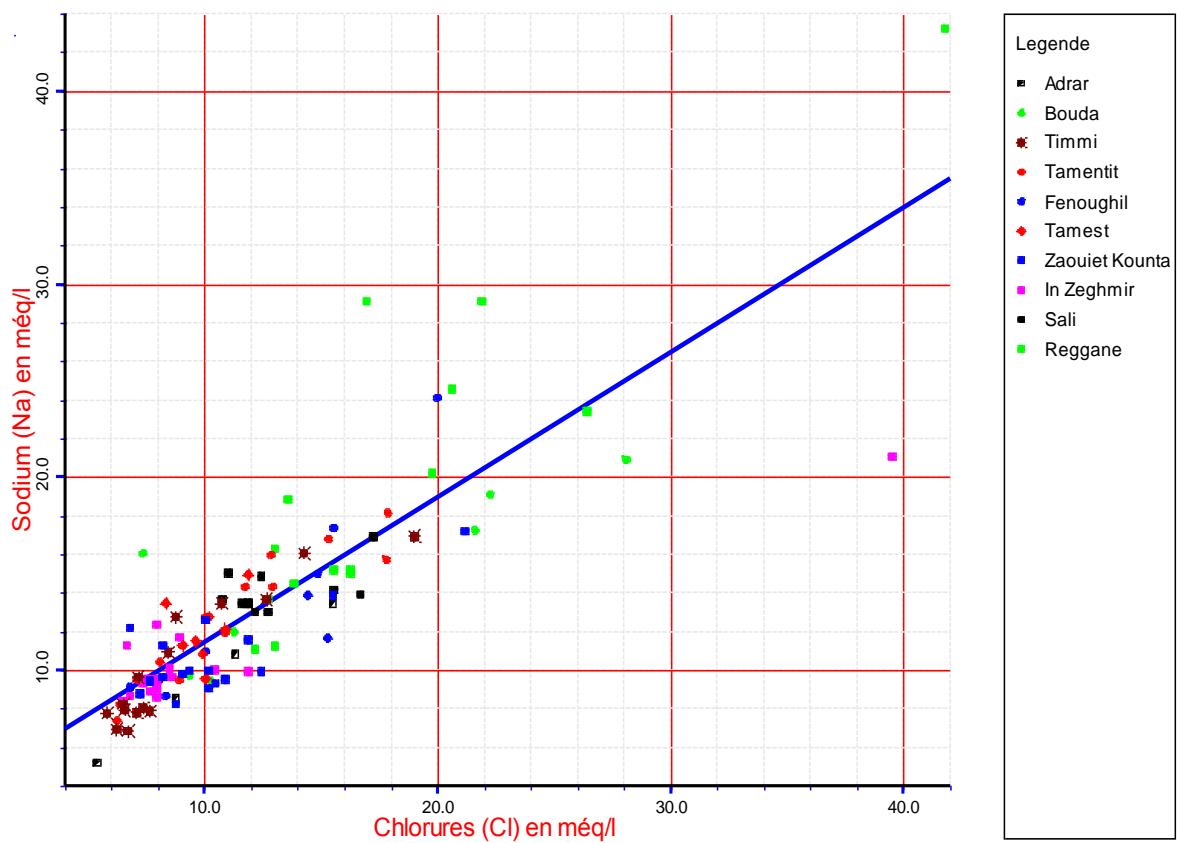


Figure 5.29 Relation Na-Cl

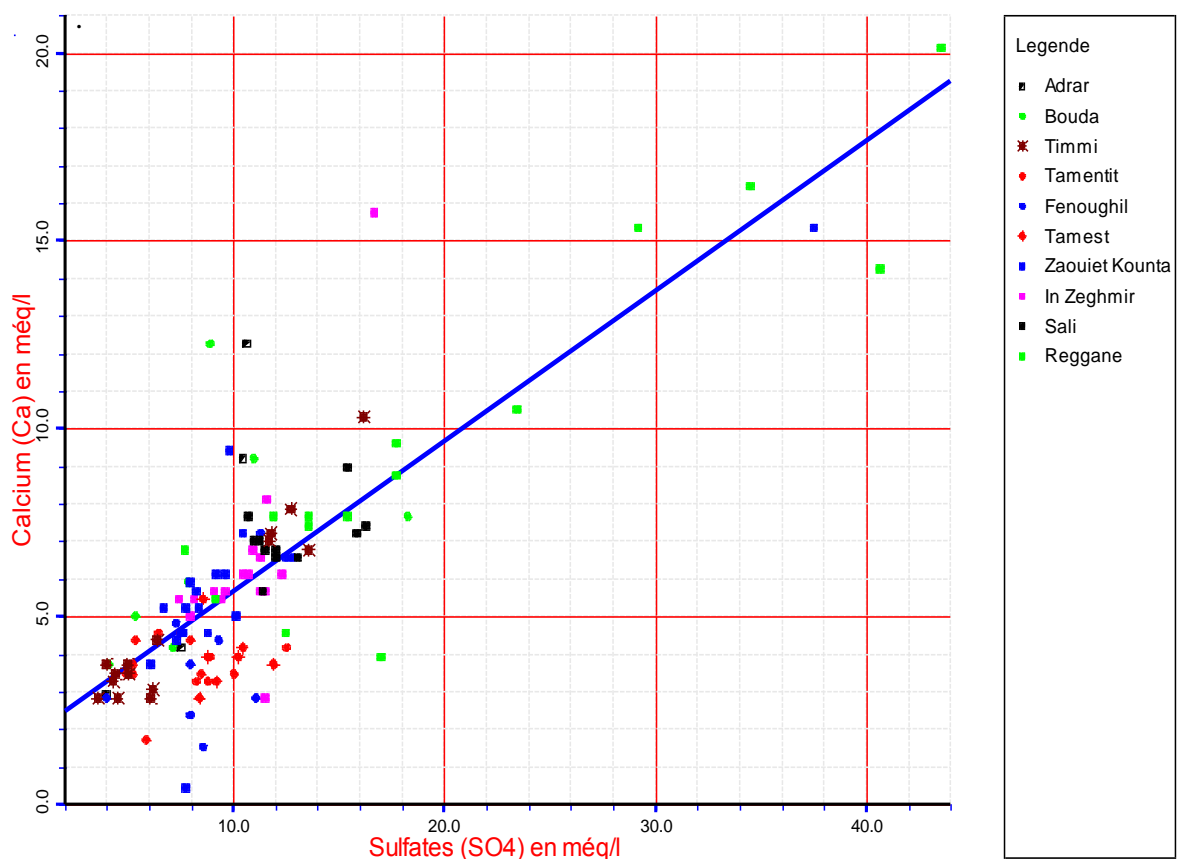


Figure 5.30 Relation SO₄-Ca

4c- Sodium-Calcium (Na-Ca):

La figure 5.31 montre une relation entre le sodium et le calcium, mais l'existence aussi d'une autre source pour le sodium par un échange de base des formations argileuses de la région d'où l'existence d'un excès de sodium, d'après (Hounslow, 1995) la formule d'échange de base :

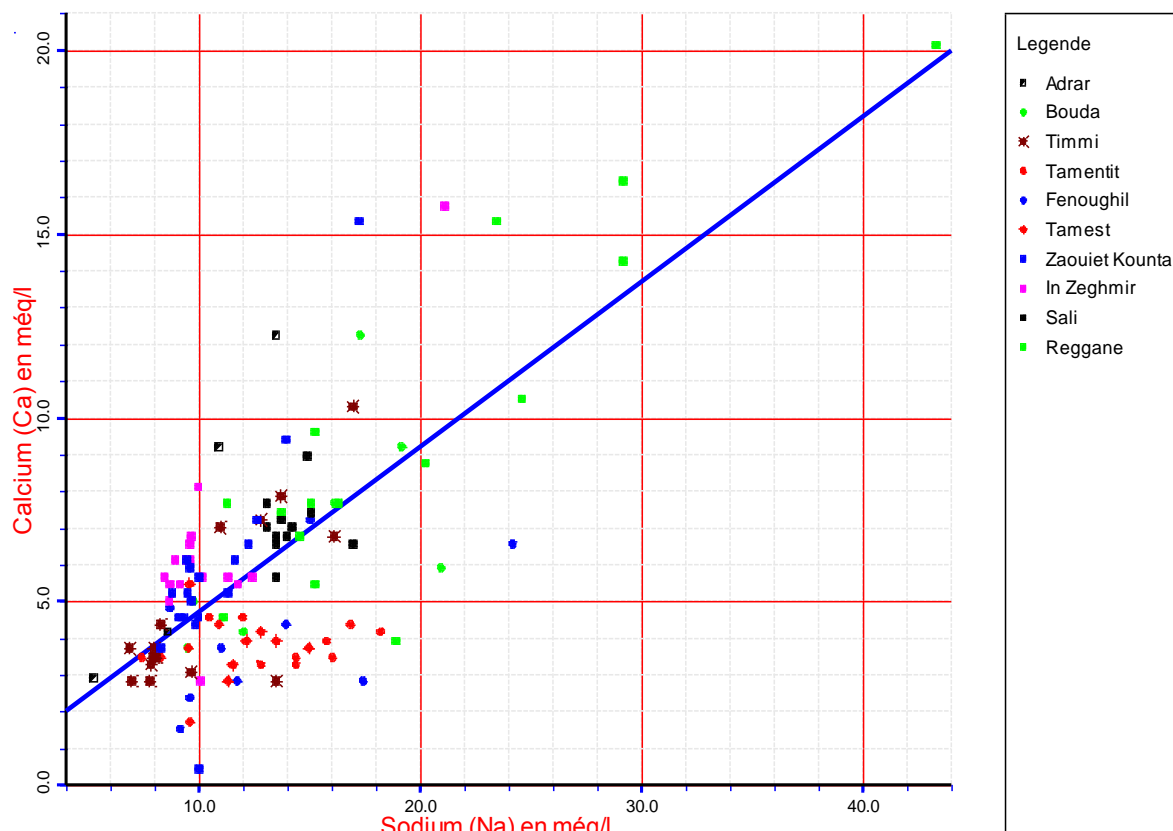
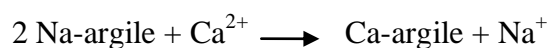


Figure 5.31 Relation Na-Ca

Le coefficient de corrélation de la régression linéaire du sodium et calcium est de 0.72.

4d- Sulfate-Sodium (SO₄-Na):

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle du sulfate et du sodium, cette proportionnalité confirme la domination du faciès sulfaté sodique des eaux des foggaras dans la région d'Adrar, le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0.82 (figure 5.32).

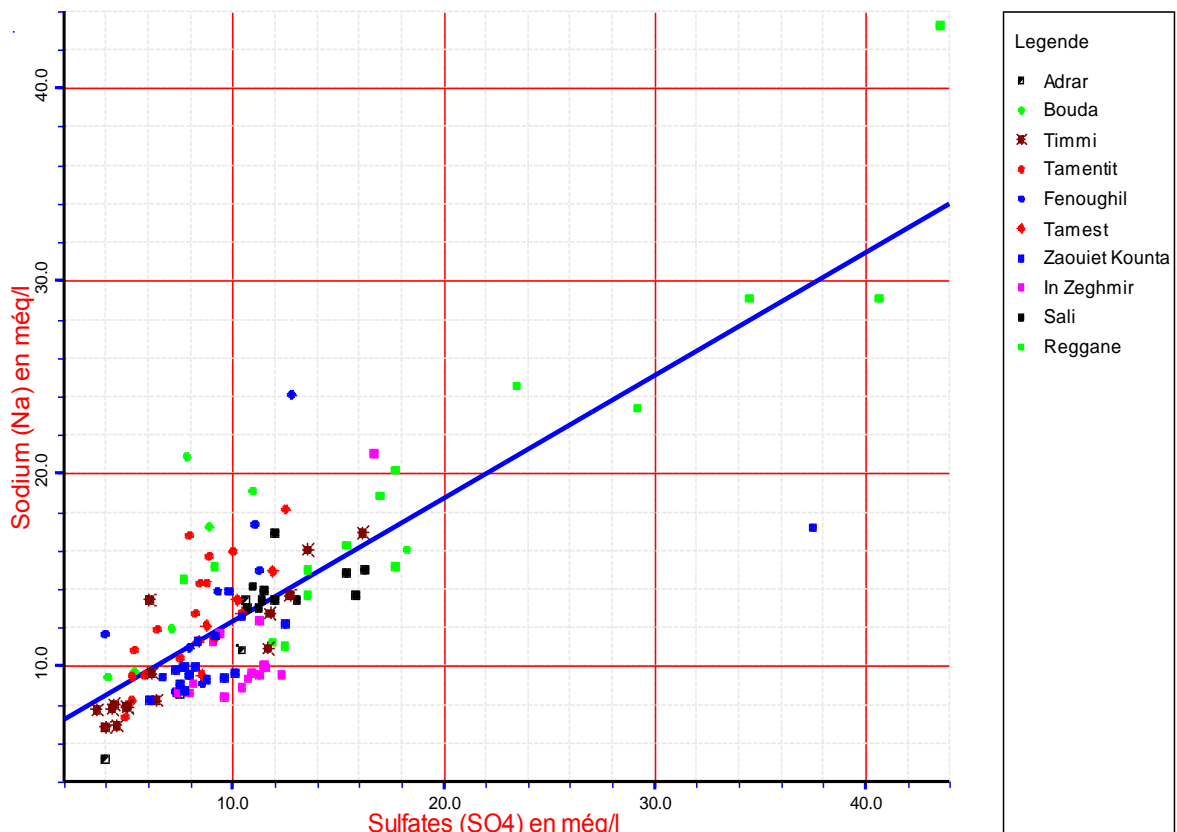


Figure 5.32 Relation SO_4 -Na

4e- Sulfate- Magnésium (SO_4 -Mg):

La figure 5.33 indique que la relation sulfate magnésium est bien liée avec une évolution proportionnelle, donc l'origine et probablement du sel de magnésium la kiesérite ($MgSO_4$). Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0.77.

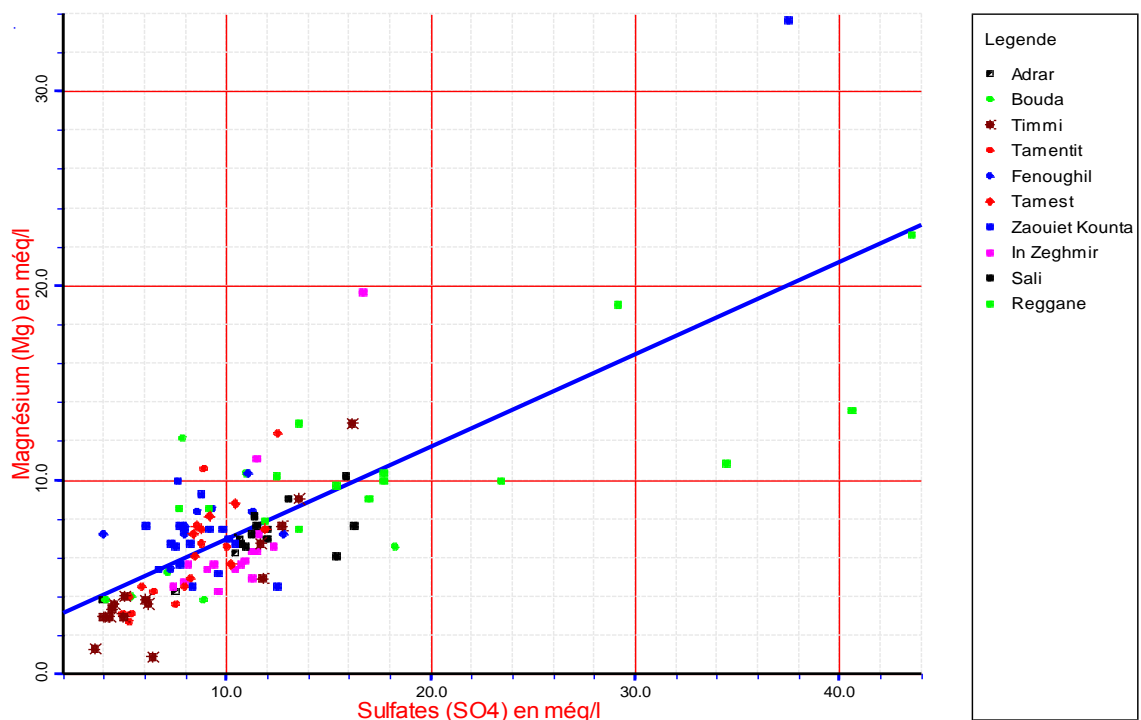


Figure 5.33 Relation SO_4 -Mg

4f- Potassium-Chlorure (K-Cl):

La figure 5.34 ci-dessous montre une dispersion des points indiquant que les deux éléments chimiques ont des origines différentes, les chlorures ont une faible relation avec le potassium, mais ils indiquent un excès donc une autre origine pour les chlorures.

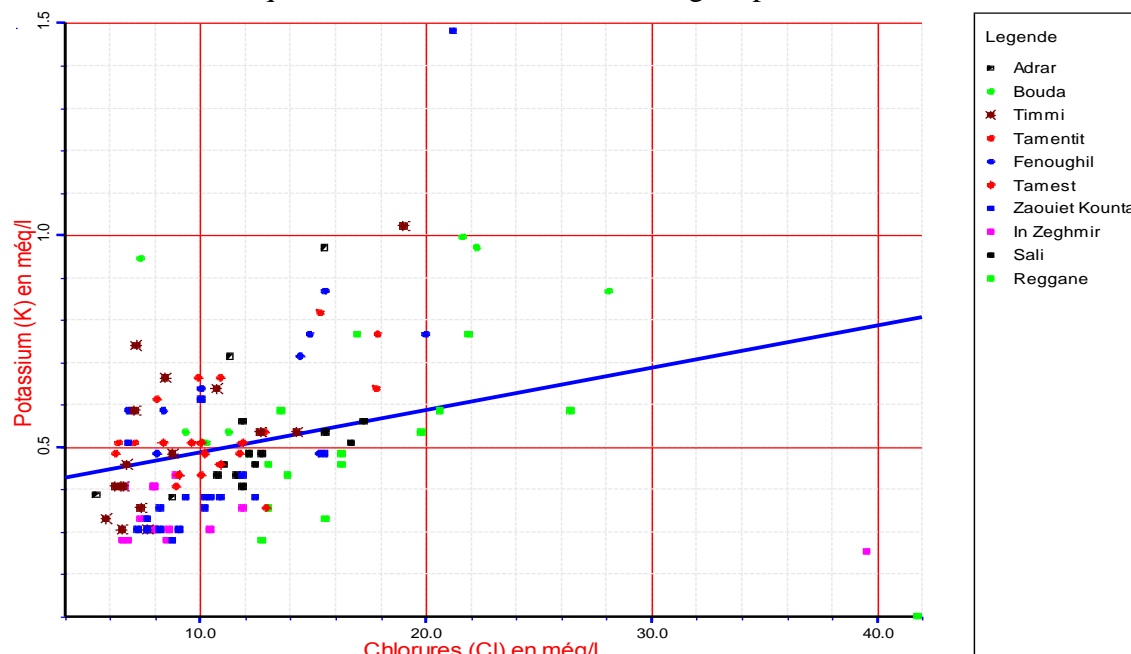


Figure 5.34 Relation K-Cl

4g- Conductivité – Dureté (EC-TH) :

La relation est bien visible sur la figure 5.35 entre la dureté et la conductivité, avec un coefficient de corrélation de la régression linéaire de 0.97, qui confirme le classement de diagramme de Piper où les eaux sont classés d’une dureté très élevée et d’une salinité très élevée.

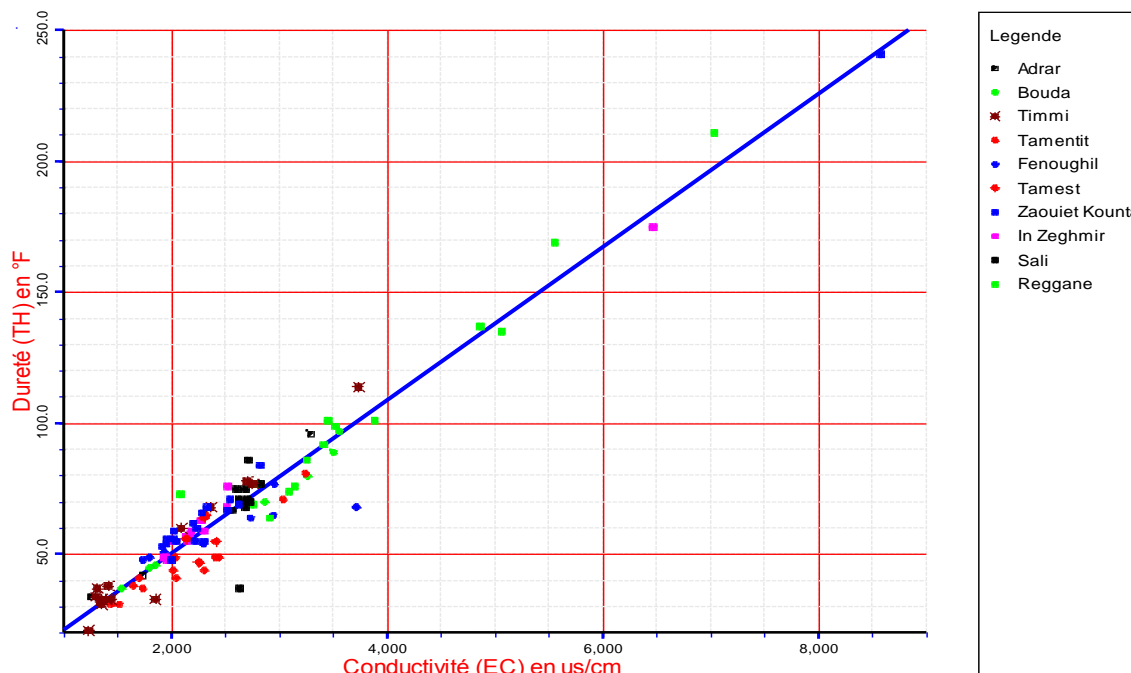


Figure 5.35 Relation EC-TH

5.4 Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le but d'analyse en composantes principales (ACP) est de faire ressortir les différents points d'eau qui possèdent des mêmes caractéristiques est de voir l'évolution des concentrations en éléments chimiques par rapport à l'ensemble des points d'observation.

5.4.1 Compagne de l'année 2011 :

La matrice des données comporte huit (08) variables et 116 individus, qui expriment 100% des renseignements.

Tableau 5.1 Valeur propre de l'année 2011

| Axe | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 |
|-----------------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Valeur propre | 5.295 | 1.105 | 0.614 | 0.396 | 0.333 | 0.215 | 0.030 | 0.013 |
| Variabilité (%) | 66.192 | 13.808 | 7.674 | 4.946 | 4.163 | 2.685 | 0.375 | 0.157 |
| % cumulé | 66.192 | <u>80.000</u> | 87.674 | 92.620 | 96.783 | 99.468 | 99.843 | 100.000 |

Nous limitons notre interprétation au cercle formé par les deux axes F1 et F2, puisqu'il fournit le maximum d'information (80%) ce qui rend l'analyse fiable, le tableau 5.2 ci-dessous présente la matrice des différentes corrélations entre les variables.

Tableau 5.2 Matrice de corrélation de l'année 2011

| Variables | Cond (CE) | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na+K ⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|-------------------------------|--------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Cond (CE) | 1 | | | | | | | |
| Ca ²⁺ | <u>0.848</u> | 1 | | | | | | |
| Mg ²⁺ | <u>0.917</u> | 0.648 | 1 | | | | | |
| Na+K ⁺ | <u>0.807</u> | 0.724 | 0.649 | 1 | | | | |
| Cl ⁻ | <u>0.839</u> | 0.725 | 0.735 | <u>0.853</u> | 1 | | | |
| SO ₄ ²⁻ | <u>0.862</u> | <u>0.824</u> | 0.767 | <u>0.815</u> | 0.631 | 1 | | |
| NO ₃ ⁻ | 0.571 | 0.562 | 0.473 | 0.570 | 0.458 | 0.596 | 1 | |
| HCO ₃ ⁻ | 0.032 | 0.124 | 0.041 | -0.146 | -0.092 | -0.037 | -0.166 | 1 |

L'axe horizontal F1 qui exprime 66,19% des informations et oppose les eaux fortement minéralisées riche en Cl, SO₄, Ca, Mg, Na et K aux eaux faiblement minéralisées riche en HCO₃.

L'axe vertical F2 qui exprime 13,81% des informations et oppose les eaux sulfatées calciques et magnésiennes aux chlorurés sodiques avec présence des nitrates (Figure 5.36)

La représentation par individu (figure 5.37) montre trois catégories, la catégorie "A" représente le faciès sulfaté sodique, la catégorie "B" représente le faciès chloruré sodique, avec un résidu sec inférieur à 1500 mg/l, la troisième catégorie "C" regroupe les deux premiers mais avec un résidu sec supérieur à 1500 mg/l, et que le résidu sec augmente sur le facteur 2 en allant de gauche à la droite.

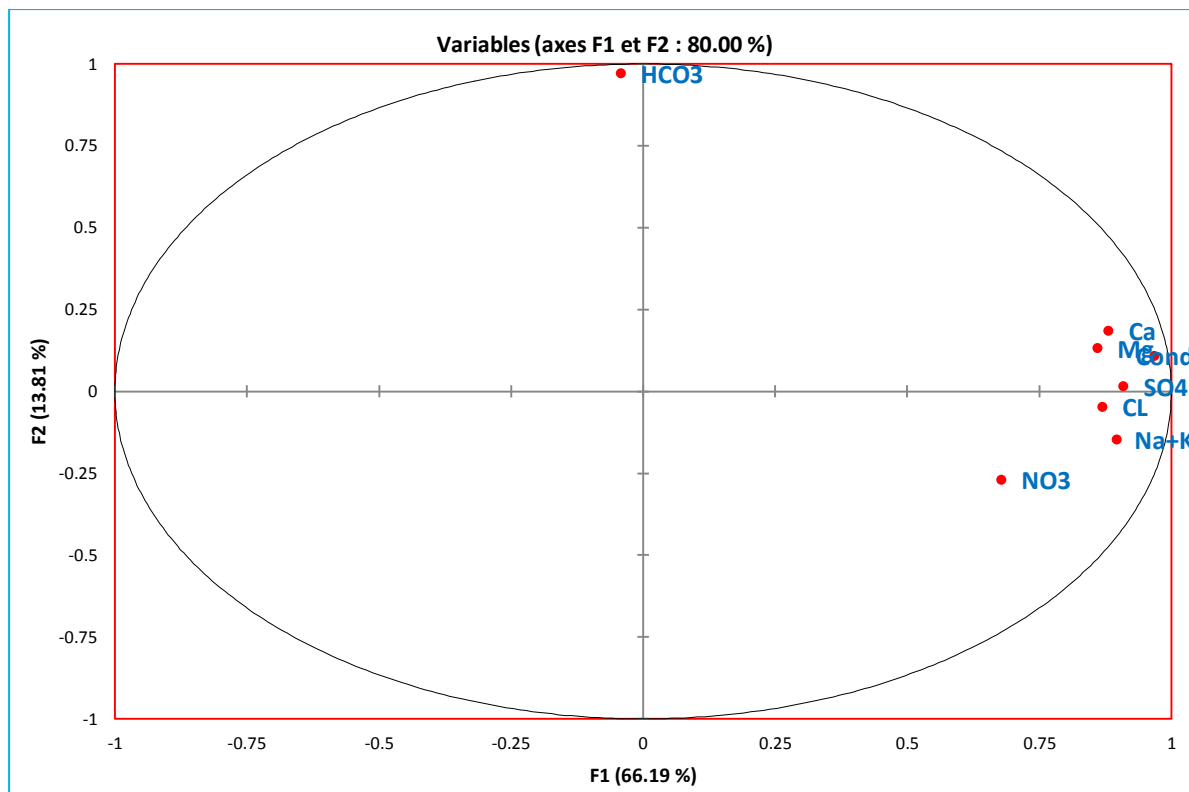


Figure 5.36 Représentation graphique en ACP des eaux des foggaras 2011.

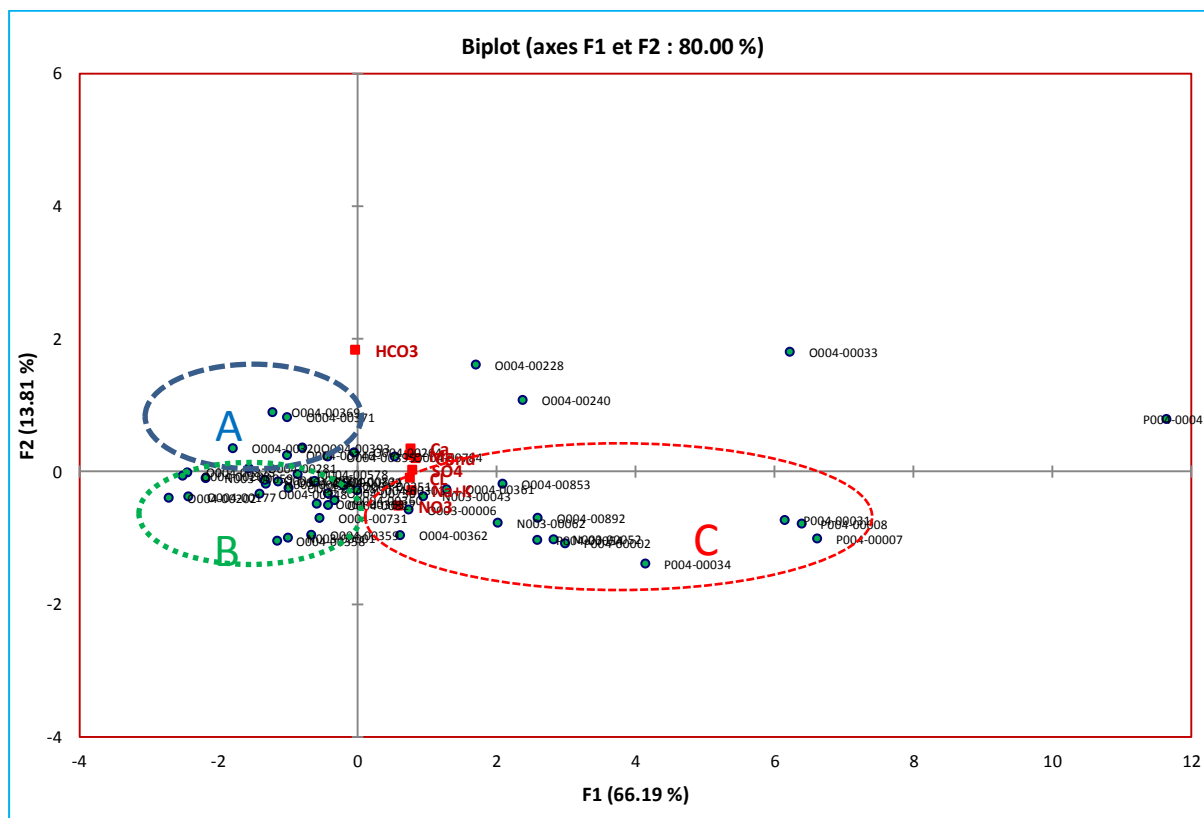


Figure 5.37 Représentation graphique des Individus, 2011

5.4.2 Compagne de l'année 1960 :

Pour suivre l'évolution du chimisme de l'eau des foggaras nous avons utilisé les données des analyses de 1960 pour les comparées avec les résultats obtenues des données de 2011.

Nous avons utilisé une matrice des données qui comporte six (06) variables et 76 individus, qui expriment 100% des renseignements.

Tableau 5.3 Valeur propre de l'année 1960

| axe | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
|-----------------|--------|---------------|--------|--------|--------|---------|
| Valeur propre | 4.670 | 0.861 | 0.227 | 0.122 | 0.094 | 0.027 |
| Variabilité (%) | 77.834 | 14.345 | 3.776 | 2.027 | 1.571 | 0.446 |
| % cumulé | 77.834 | <u>92.179</u> | 95.955 | 97.983 | 99.554 | 100.000 |

Les axes F1 et F2 représentent 92.18% des renseignements, le tableau 5.4 ci-dessous présente la matrice des différentes corrélations entre les variables.

Tableau 5.4 Matrice de corrélation de l'année 1960

| Variables | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na + k | CL ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|-------------------------------|------------------|------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Ca ²⁺ | 1 | | | | | |
| Mg ²⁺ | <u>0.881</u> | 1 | | | | |
| Na + k | <u>0.848</u> | <u>0.811</u> | 1 | | | |
| CL ⁻ | <u>0.957</u> | <u>0.902</u> | <u>0.908</u> | 1 | | |
| SO ₄ ²⁻ | <u>0.900</u> | <u>0.892</u> | <u>0.787</u> | <u>0.893</u> | 1 | |
| HCO ₃ ⁻ | -0.319 | -0.285 | -0.381 | -0.409 | -0.295 | 1 |

La première constatation est que l'allure est le même du cercle de l'année 2011, l'axe horizontal F1 exprime 77,84% des informations et oppose les eaux fortement minéralisées riche en Cl, SO₄, Ca, Mg, Na et K aux eaux faiblement minéralisées riche en HCO₃.

L'axe vertical F2 exprime 14.34% des informations et oppose les eaux sulfatées calciques et magnésiennes aux chlorurées sodiques (Figure 5.38).

La représentation par individu (figure 5.39) est similaire à celle de l'année 2011, elle montre aussi trois catégories, "A" et "B" représente respectivement le faciès sulfaté sodique et chloruré sodique et une troisième catégorie "C" regroupe les deux premiers mais avec un résidu sec supérieur à 1500 mg/l.

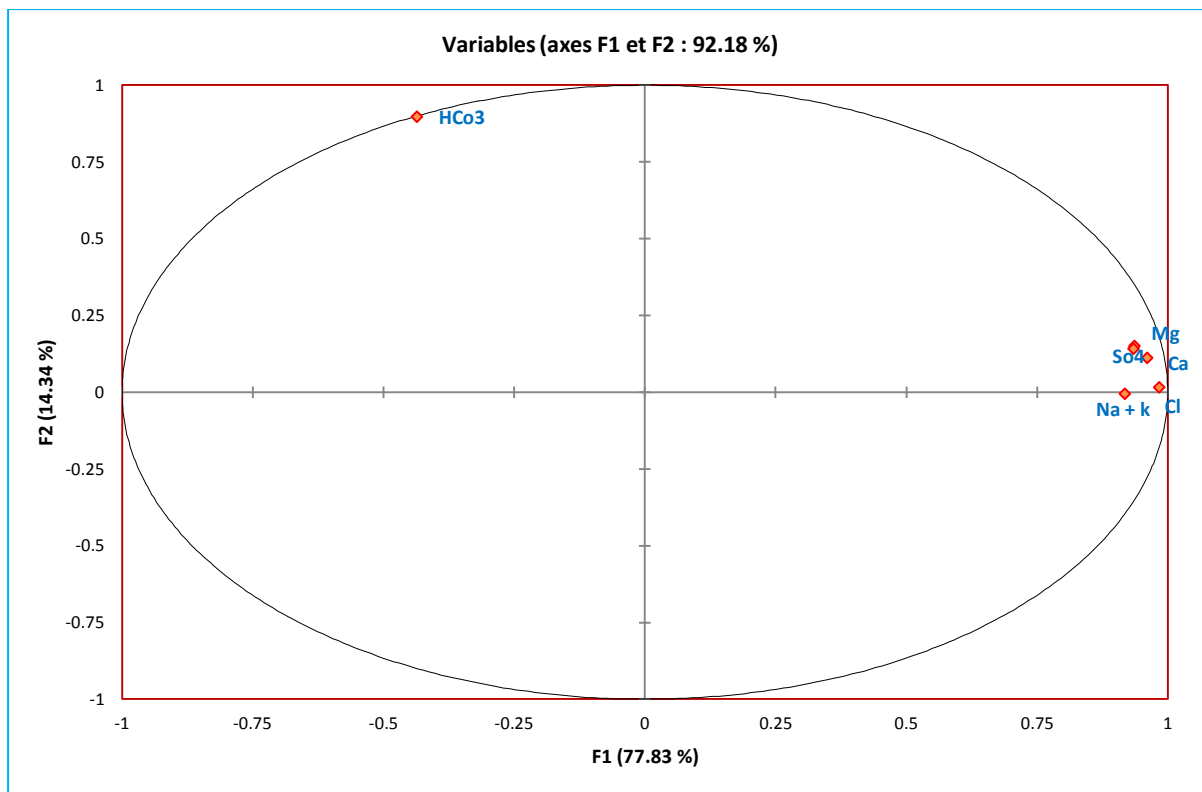


Figure 5.38 Représentation graphique en ACP des eaux des foggaras 1960.

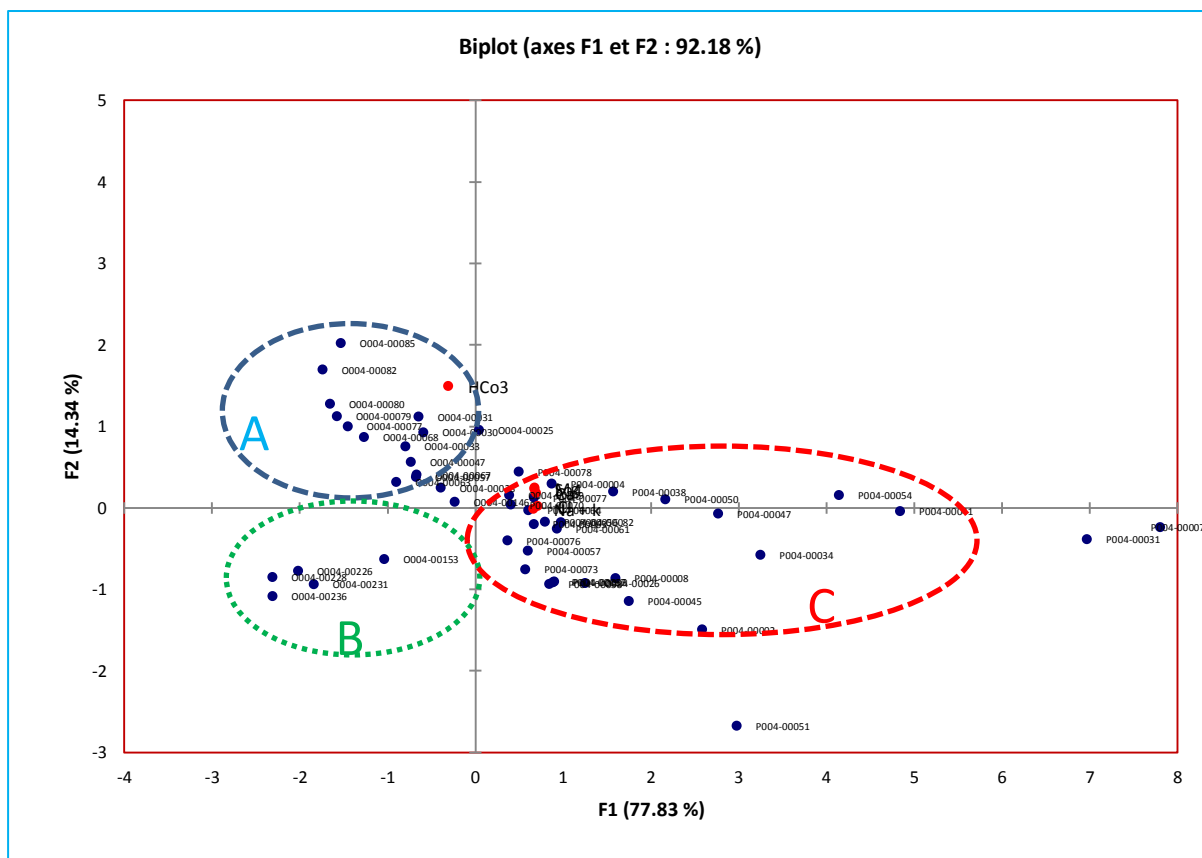


Figure 5.39 Représentation graphique des Individus, année 1960.

5.5 Eau d'Irrigation :

Les eaux des foggaras sont utilisées pour l'irrigation de la palmeraie, l'évolution des caractéristiques chimiques des eaux influent sur les différentes cultures sous palmiers dattiers cultivées par les oasiens, l'étude chimique des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que présente certains éléments chimiques, pour les plantes qui supportent mal les sols saturés en sodium, une classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau (méthode de Richards) permet de bien classer les eaux (tableau 5.5) en fonction de la conductivité électrique et le SAR (Sodium Adsorption Ratio) dans l'eau, défini par la formule ci-dessous :

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

Tableau 5.5 Classification des eaux d'irrigation (méthode Richards).

| N° | Qualité | Classe | Utilisation |
|----|------------|-------------------------|---|
| 1 | Excellente | C1-S1 C1-S2 | Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols. |
| 2 | Bonne | C2-S1 C2-S2 | Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles. |
| 3 | Admissible | C2-S3 C3-S1 C3-S2 | La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés. |
| 4 | Médiocre | C3-S3 C4-S1 C4-S2 | En général, Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité. |
| 5 | Mauvaise | C3-S4 C4-S3 C4-S4 | Eau ne convenant pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisé sous certaines conditions, soit plantes très résistantes aux sels dont le sol et une bonne perméabilité. |

Selon les figures 5.40 à 5.46 les eaux de la région d'étude se répartissent en différentes classes, le tableau 5.6 ci-dessous montre cette classification :

Tableau 5.6 Classification des eaux de la région d'étude.

| N° | Commune | Classe |
|----|----------------|------------------------------|
| 1 | Adrar | C3-S1, C3-S2 et C4-S2 |
| 2 | Bouda | C3-S2, C4-S2 |
| 3 | Tamentit | C3-S1, C3-S2 et C4-S2 |
| 4 | Fenoughil | C3-S1, C3-S2 et C4-S2 |
| 5 | Zaouiet Kounta | C3-S1, C3-S2, C4-S1 et C4-S2 |
| 6 | In Zeghmir | C3-S1, C3-S2, C4-S1 |
| 7 | Reggane | C4-S2, C4-S3 |

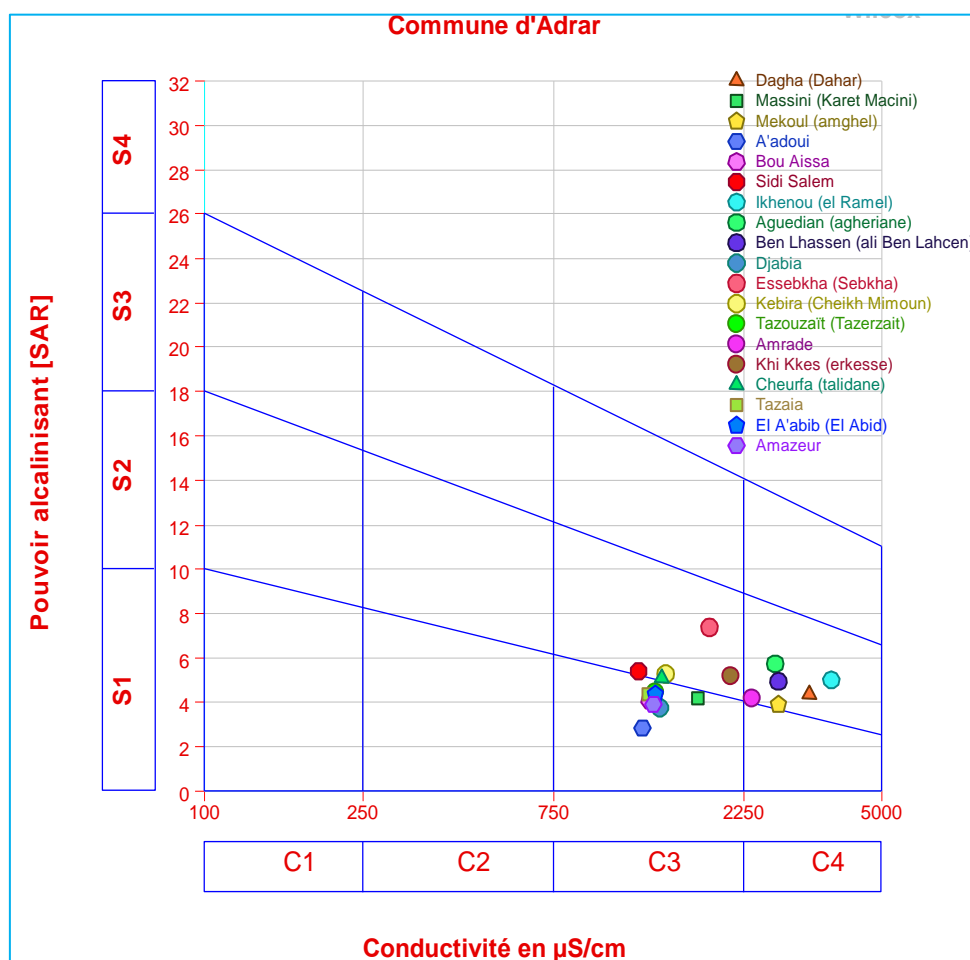


Figure 5.40 Diagramme de Richards des eaux des communes d'Adrar et Timmi.

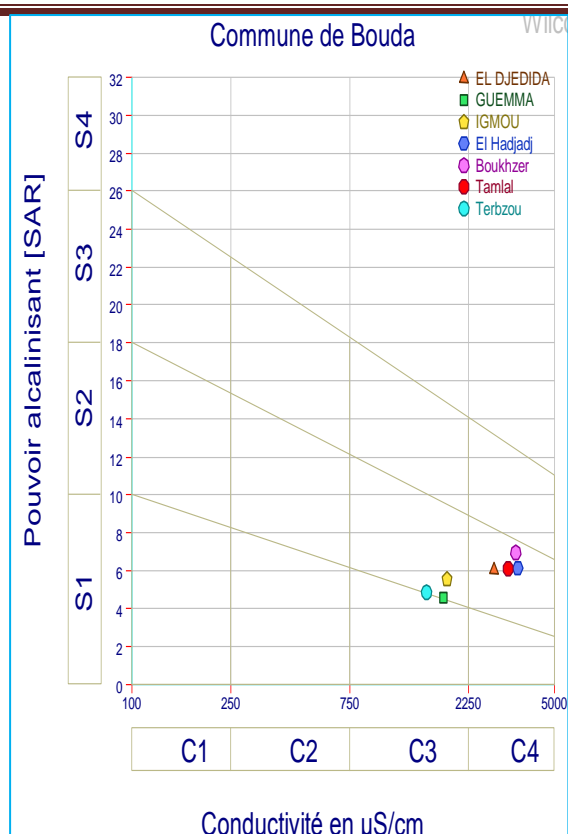


Figure 5.41 Diagramme de Richards
Commune de Bouda.

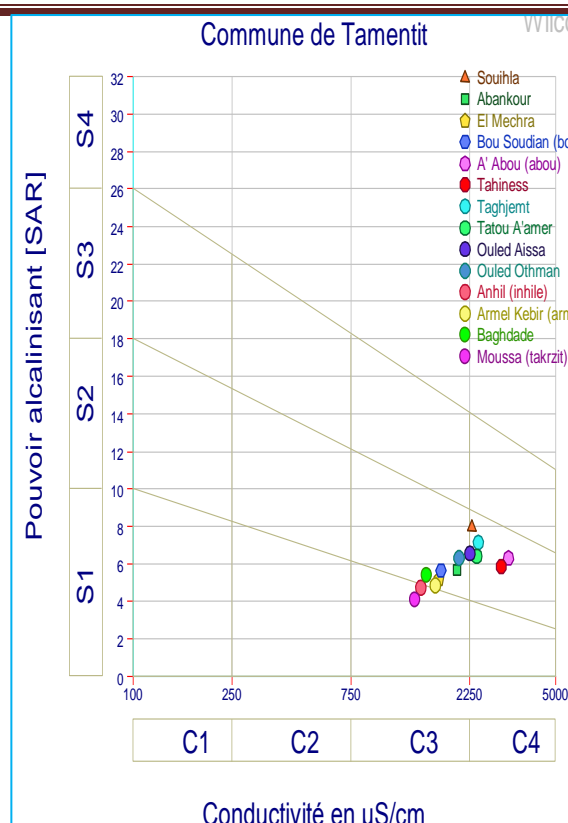


Figure 5.42 Diagramme de Richards
Commune de Tamentit.

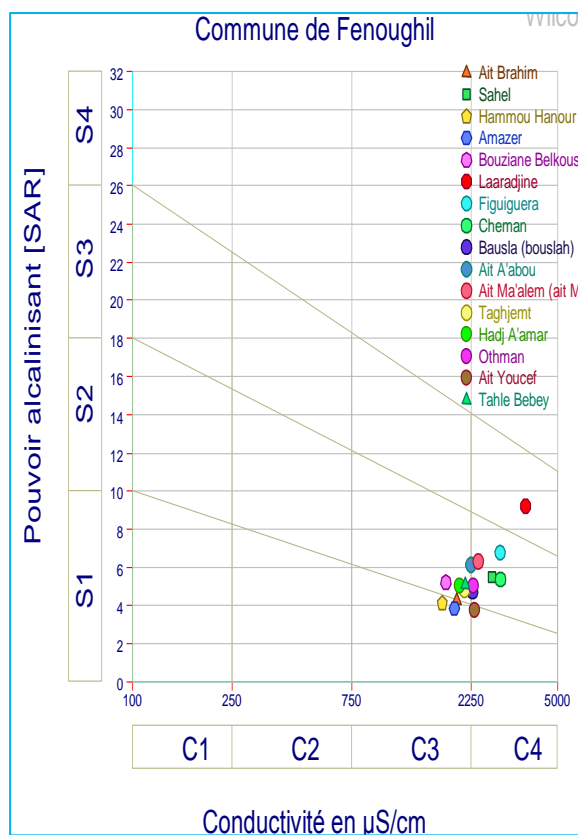


Figure 5.43 Diagramme de Richards
Communes de Fenoughil et Tamest.

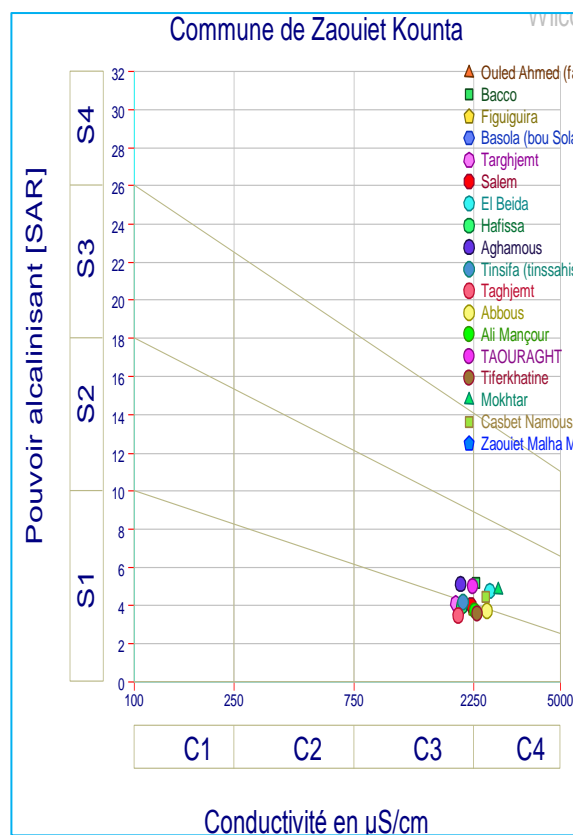
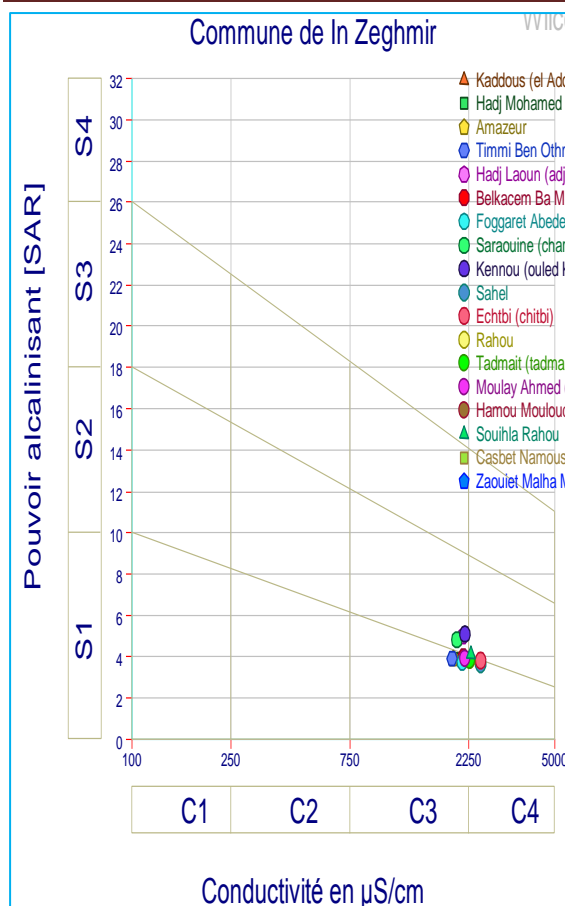
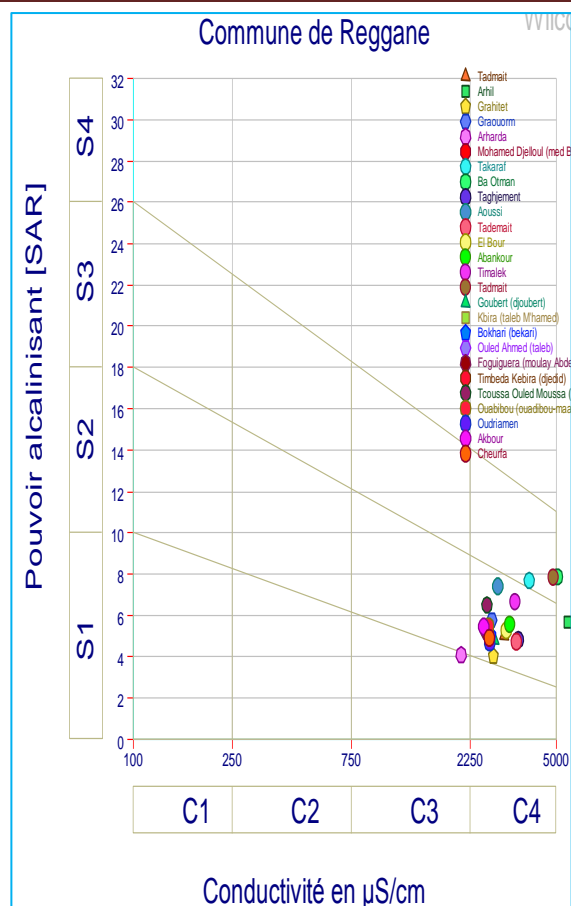


Figure 5.44 Diagramme de Richards
Commune de Zaouiet Kounta.



**Figure 5.45 Diagramme de Richards
Commune d'In Zeghmir.**



**Figure 5.46 Diagramme de Richards
Communes de Reggane et Sali.**

D'après le tableau 5.6 ci-dessus, la région d'étude se caractérise par 4 classes C3-S1, C3-S2, C4-S1 et C4-S2.

- Les classes C3S1 et C3S2: généralement ces deux classes renferment des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée. Cette classe se trouve dans presque toute la région.

- Les classes C4S1 et C4S2: elles représentent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Cette classe caractérise les eaux de la région en général et elle est bien présente dans la région de Reggane.

Selon cette classification les eaux des foggaras de la région d'Adrar ont un risque de salinité très élevé à l'irrigation.

5.6 Étude comparative :

Pour mieux voir dans l'espace et dans le temps l'évolution de la composition chimique des eaux des foggaras, nous avons essayé de faire une comparaison basée sur les résultats de 76 analyses réalisées durant la période 1959-1960 dans la région d'étude et les résultats des analyses réalisées en 2011 pour les mêmes foggaras, pour les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et pour les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-).

Le tableau 5.7 ci-dessous récapitule les variations des éléments entre 1960 et 2011, cette variation est très lisible dans la Figure 5.47 où on remarque l'augmentation de la concentration des éléments chimiques des eaux des foggaras.

Tableau 5.7 Variation des Éléments Chimiques entre 1960 et 2011.

| <i>Élément</i> | <i>Classe</i> | <i>Année 1960</i> | <i>Année 2011</i> |
|--------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Ca^{2+} | Min | 67 | 35 |
| | Moy | 141.1 | 136.3 |
| | Max | 362 | 404 |
| Mg^{2+} | Min | 16 | 11 |
| | Moy | 57.28 | 92.44 |
| | Max | 141 | 409 |
| Na^+ | Min | 120 | 120 |
| | Moy | 279.78 | 300.93 |
| | Max | 695 | 995 |
| K^+ | Min | 0 | 4 |
| | Moy | 7.19 | 18.93 |
| | Max | 26 | 58 |
| Cl^- | Min | 146 | 190 |
| | Moy | 393.67 | 428.67 |
| | Max | 981 | 1480 |
| SO_4^{2-} | Min | 100 | 170 |
| | Moy | 476.02 | 575.65 |
| | Max | 1370 | 2090 |
| HCO_3^- | Min | 32 | 40 |
| | Moy | 83.17 | 153.32 |
| | Max | 121 | 467 |

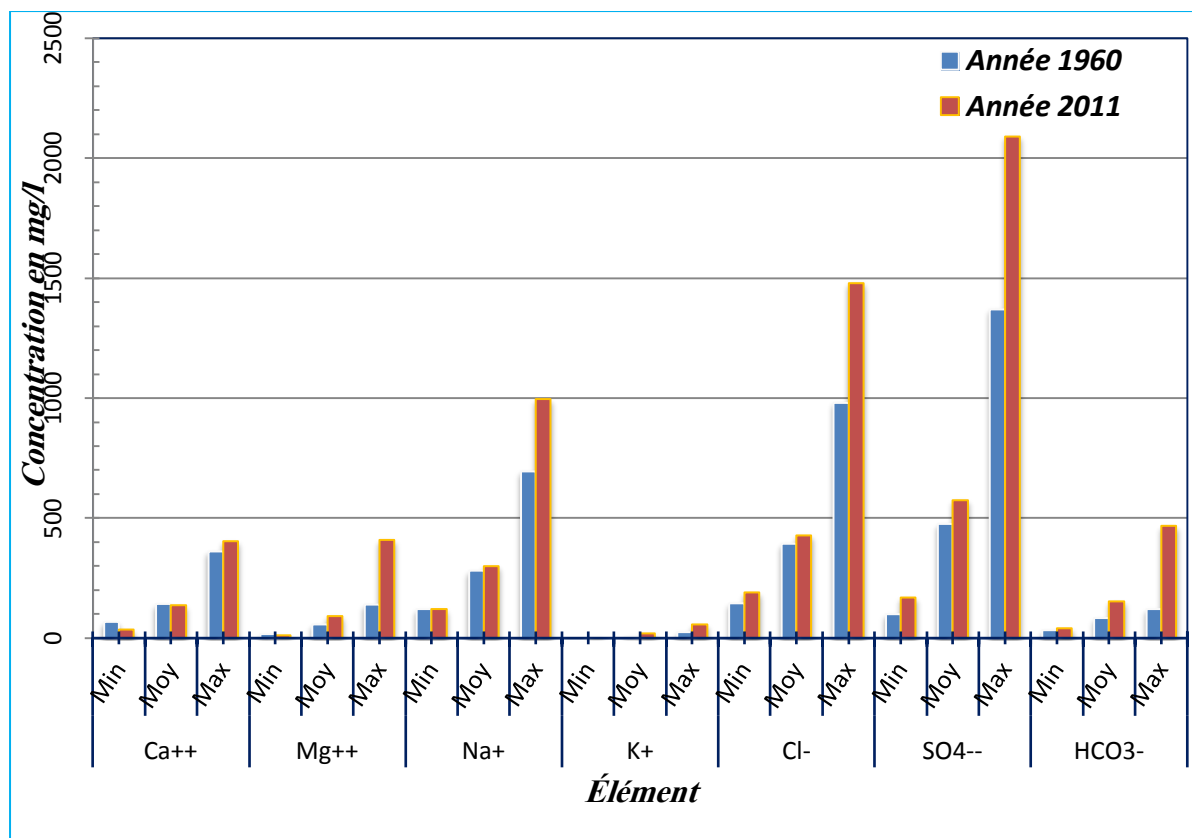


Figure 5.47 Variation des Éléments Chimiques des eaux des Foggaras entre 1960 et 2011.

La comparaison cartographique a permis de voir les différents changements des concentrations des éléments dans la région d'Adrar.

La carte de Calcium (figure 5.48) montre que les fortes concentrations sont localisées dans la région de Reggane et les faibles concentrations dans la région d'Adrar, l'évolution est orientée nord-sud avec une valeur d'augmentation de 42 mg/l.

La carte de magnésium (figure 5.49) montre une diminution du magnésium au nord de la zone et une augmentation vers le sud.

La carte de sodium (figure 5.50) montre aussi une augmentation au sud et à l'extrême nord de la zone d'étude.

La carte des chlorures (figure 5.51) montre une diminution vers le nord et une augmentation vers le sud de la zone.

La carte des sulfates (figure 5.52) montre une augmentation excessive dans la région de Reggane qui atteint les 1400 mg/l et aussi la partie de Bouda qui dépasse les 500 mg/l.

La figure 5.53 des bicarbonates indique une augmentation au centre de la zone d'étude.

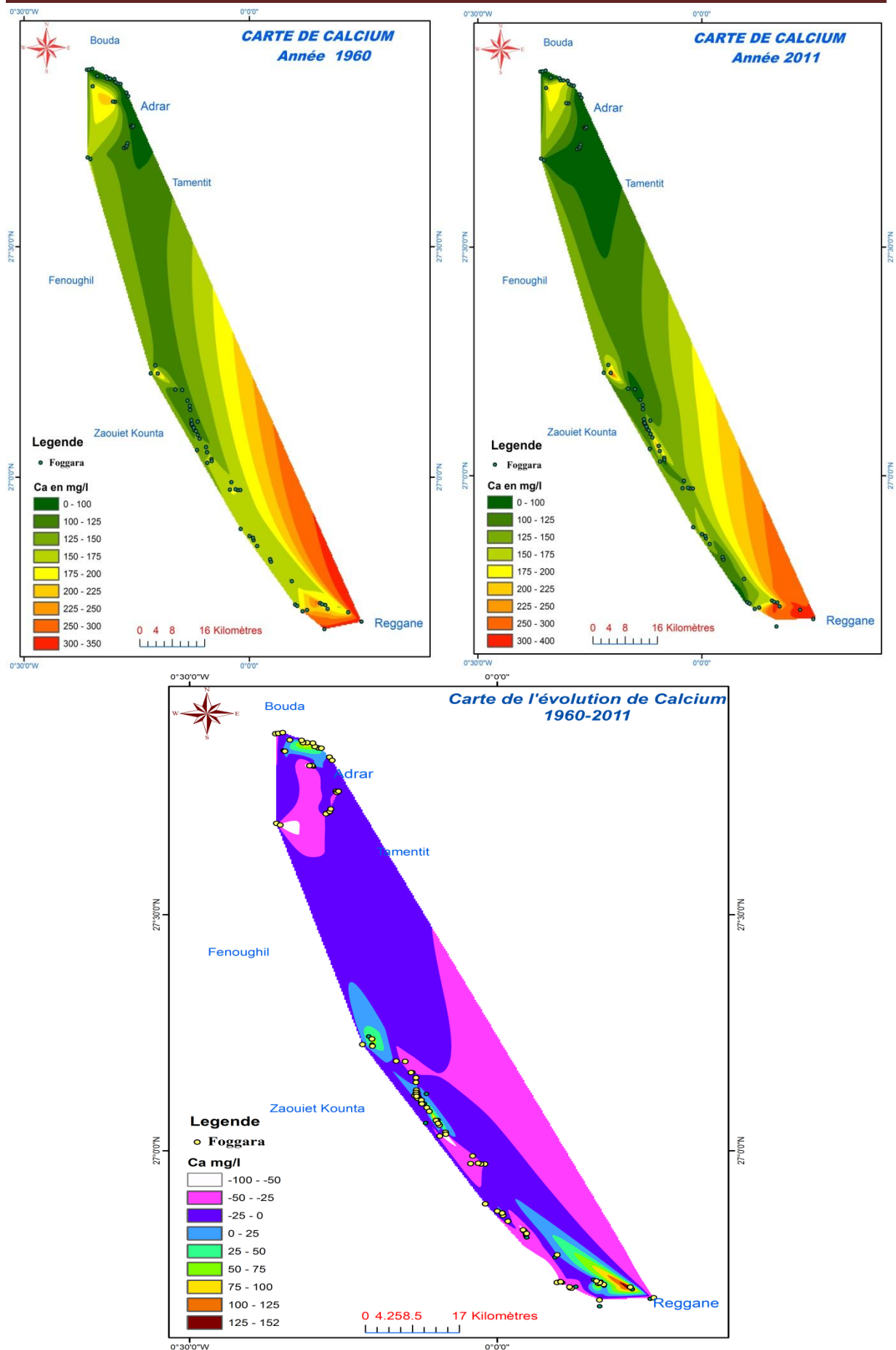


Figure 5.48 Cartes de l'évolution du Calcium (1960 - 2011).

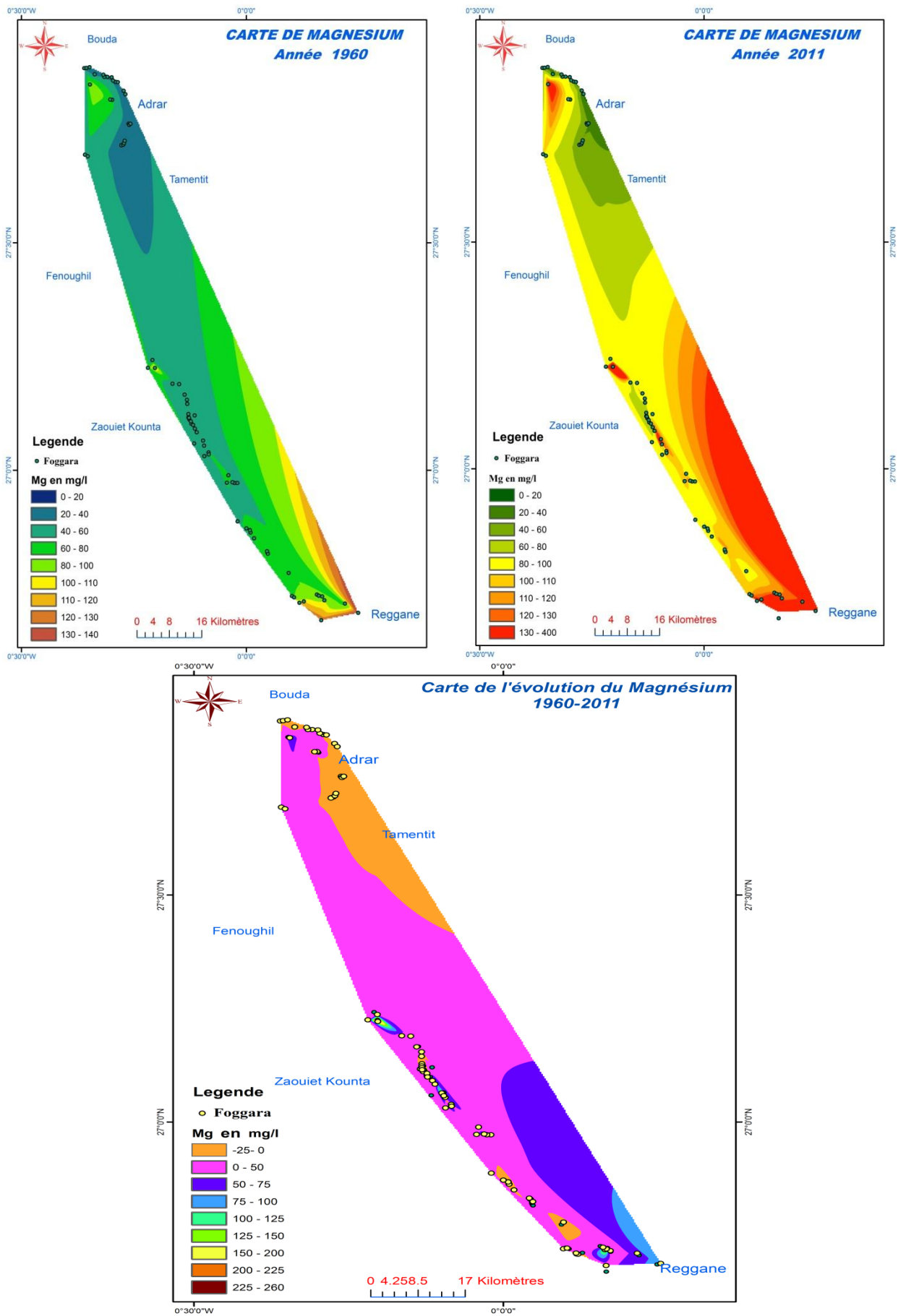


Figure 5.49 Cartes de l'évolution du Magnésium (1960 - 2011).

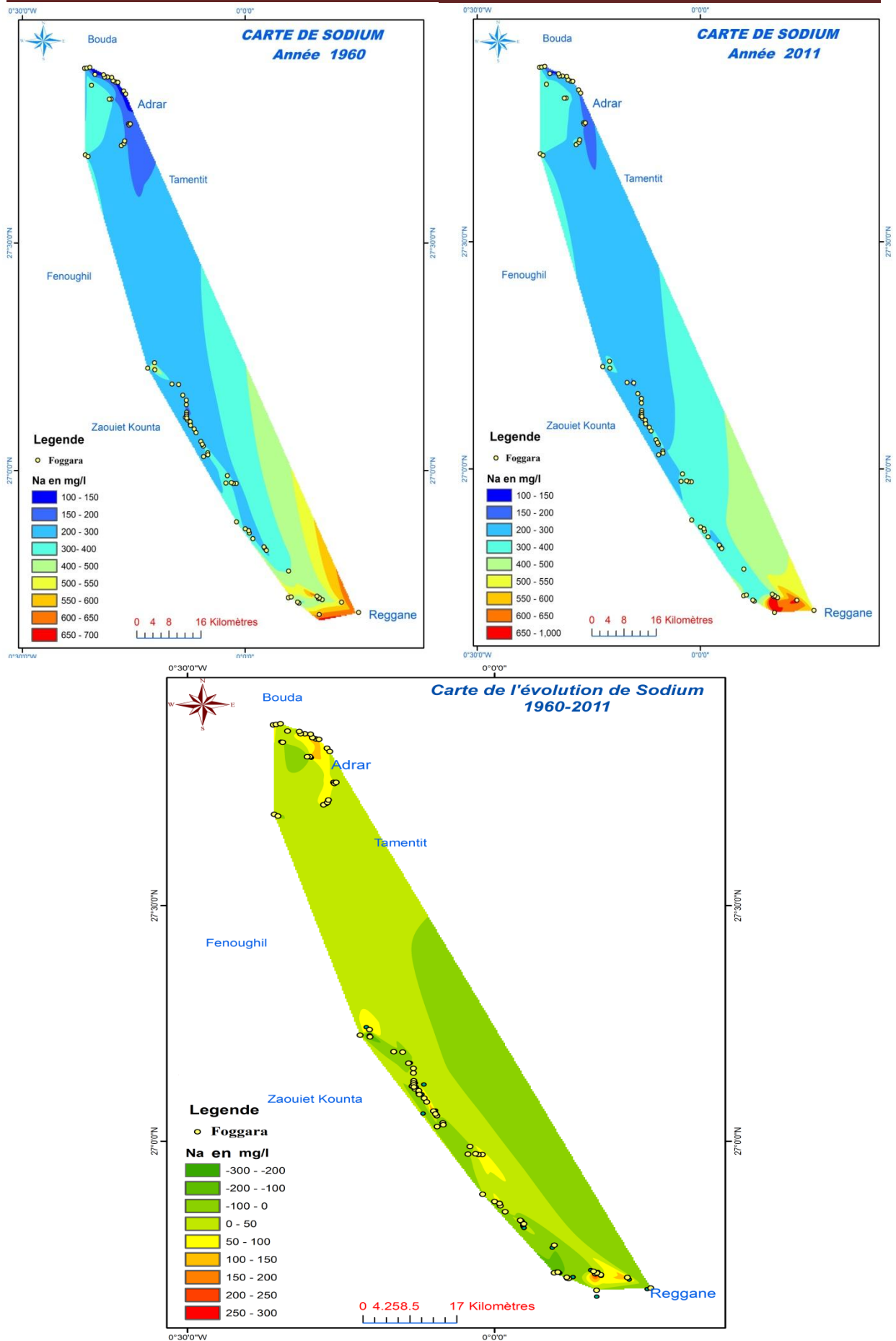


Figure 5.50 Cartes de l'évolution de Sodium (1960 - 2011).

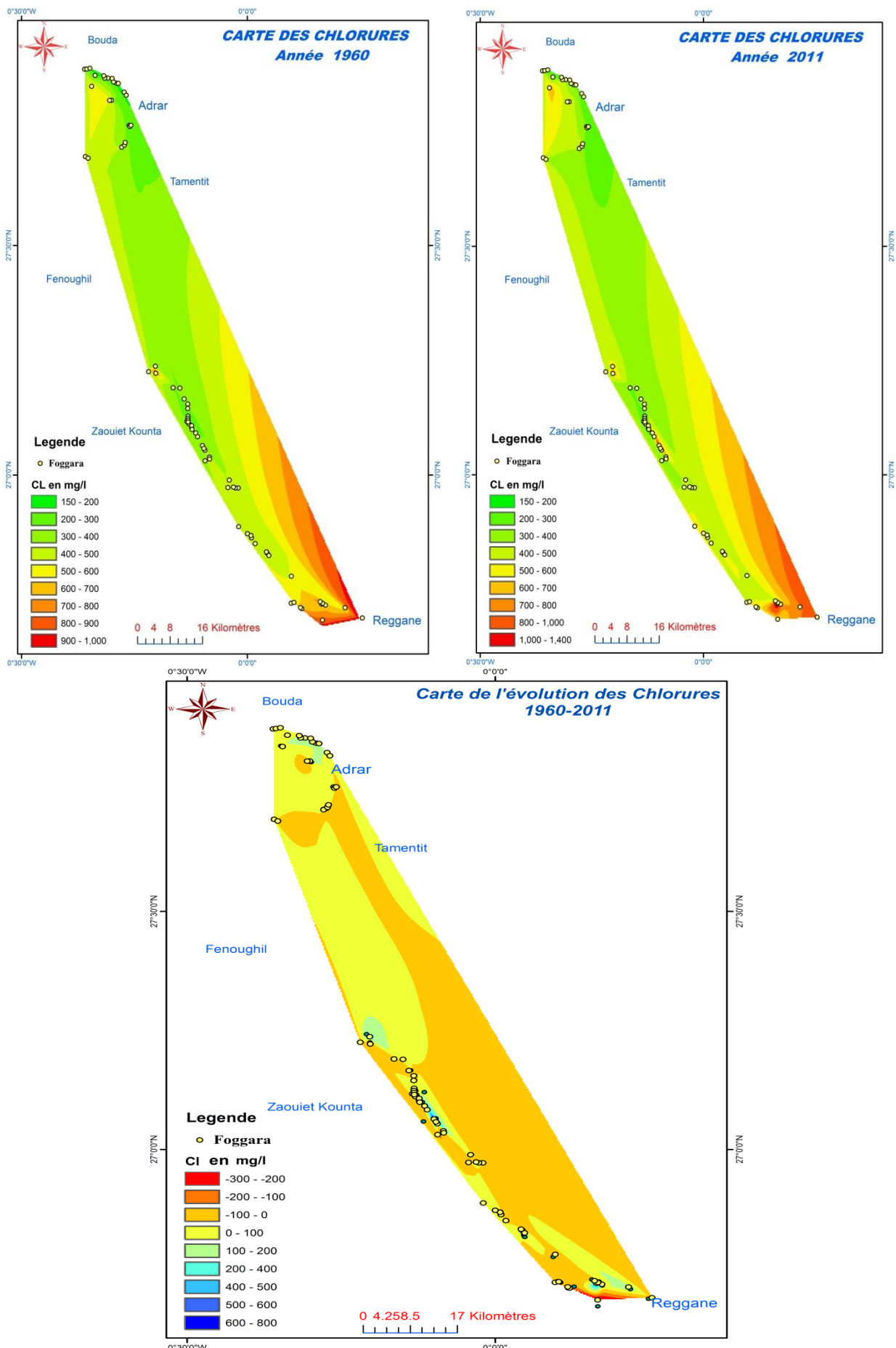


Figure 5.51 Cartes de l'évolution des Chlorures (1960 - 2011).

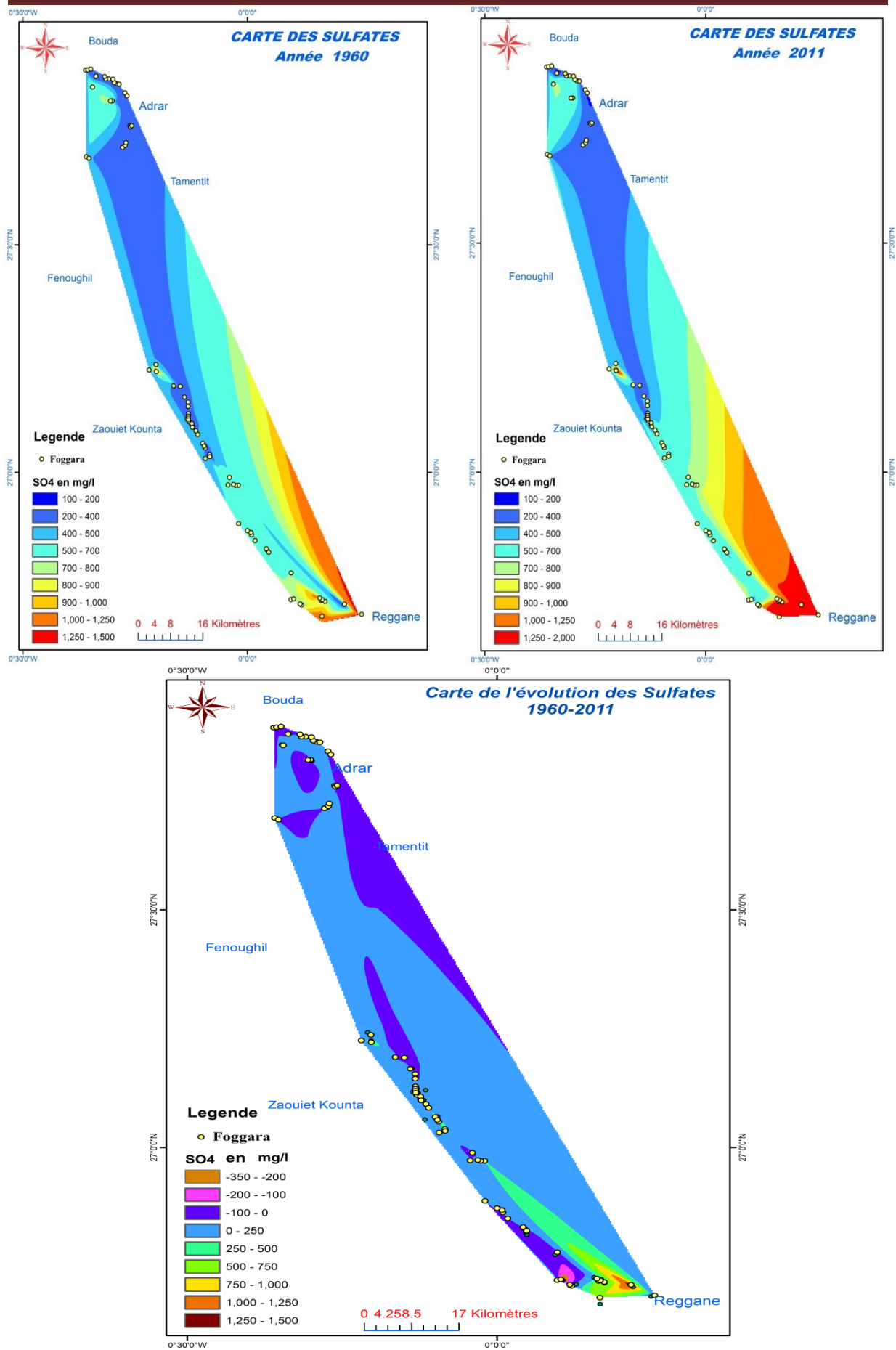


Figure 5.52 Cartes de l'évolution des Sulfates (1960 - 2011).

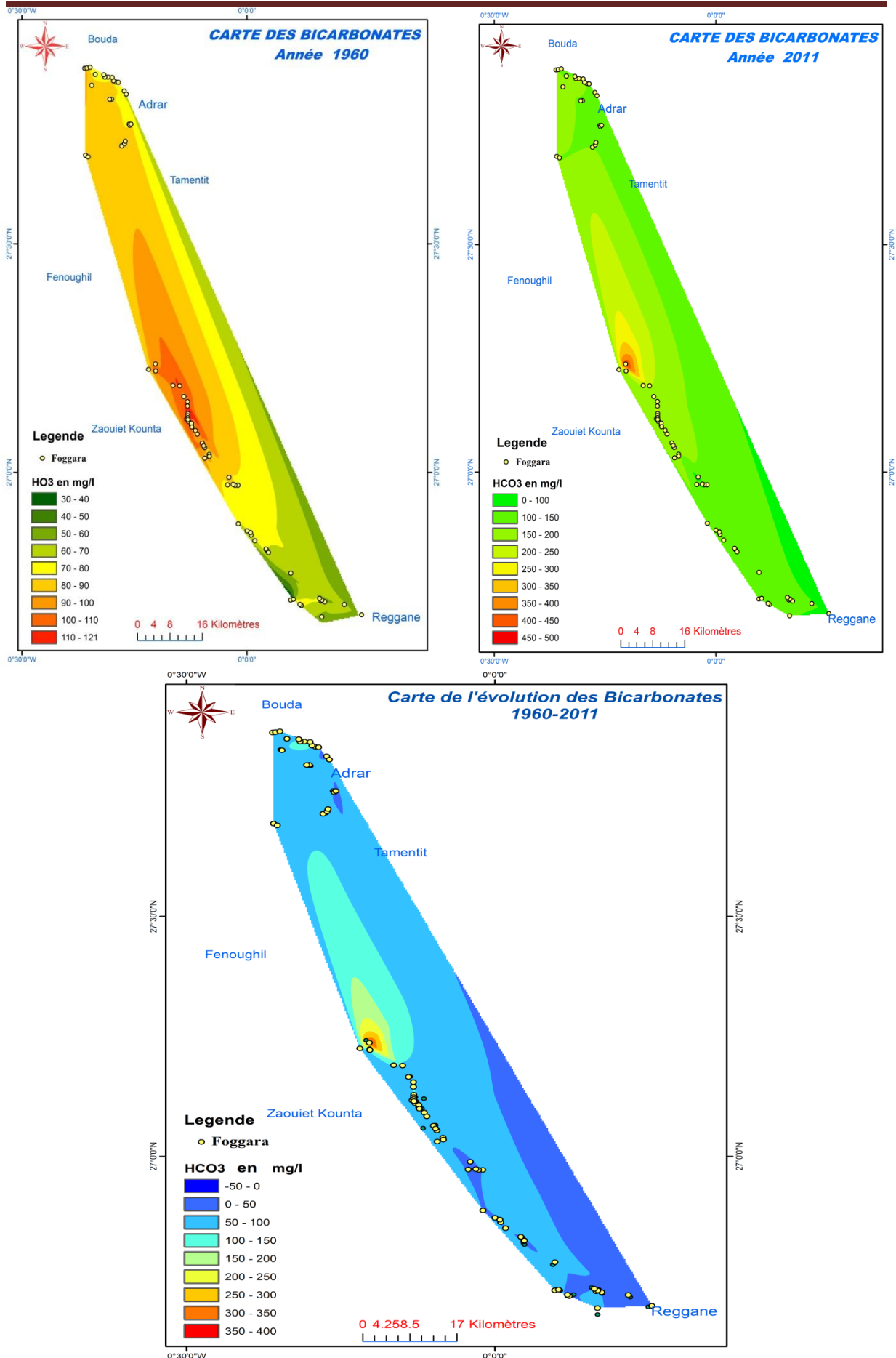


Figure 5.53 Cartes de l'évolution des Bicarbonates (1960 - 2011).

Les figures 5.54 et 5.55 montrent qu'il y a une augmentation des concentrations des éléments chimiques, les éléments sont dispersés ce qui traduit par un changement de concentration par rapport à 1960 où les éléments sont bien concentrées.

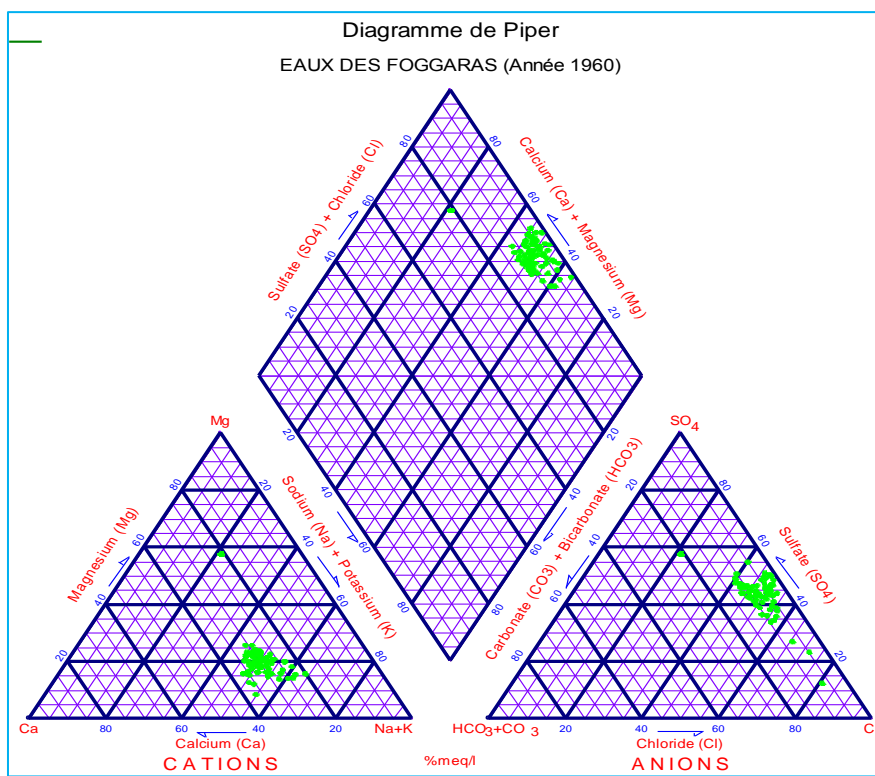


Figure 5.54 Diagramme de Piper des eaux des foggaras Année 1960.

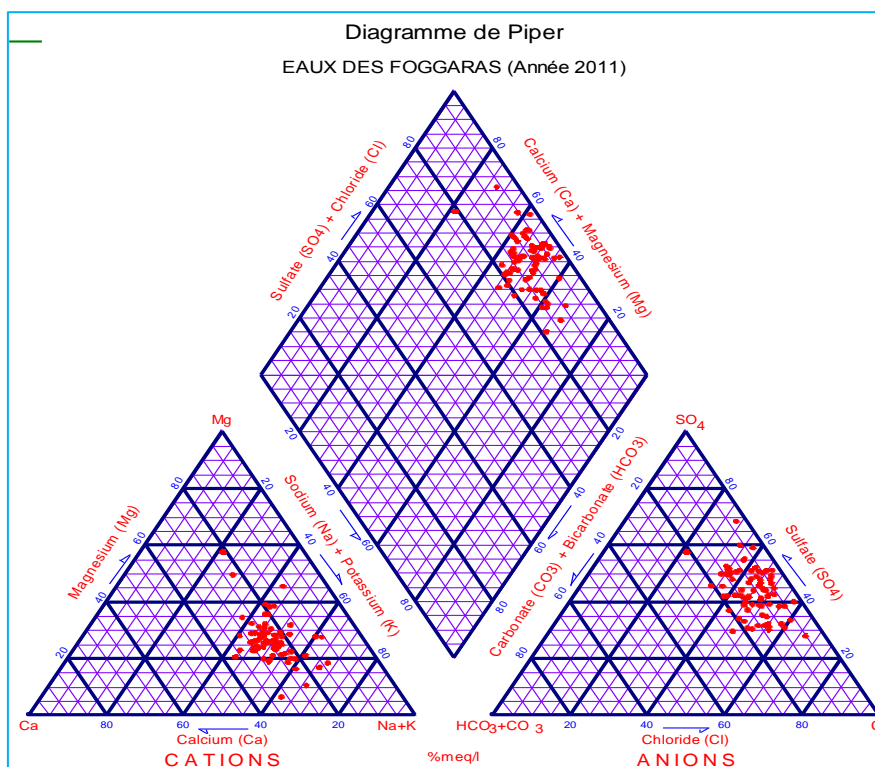


Figure 5.55 Diagramme de Piper des eaux des foggaras Année 2011.

Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux des foggaras de la région d'Adrar permet de dire que :

- Les eaux sont caractérisées par une forte salinité.
- La domination de deux faciès, le sulfaté sodique et le chloruré sodique.
- La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme des eaux des foggaras est lié à la lithologie de la nappe du Continental Intercalaire, la dissolution des formations évaporitiques dans la région de Reggane et de Bouda est responsable des fortes teneurs du résidu sec des eaux.
- La classification de Richards montre la dégradation de la qualité des eaux pour l'irrigation.
- Les résultats des corrélations de l'analyse en composantes principales (ACP) et les relations entre éléments montrent une concordance des résultats, la domination des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport aux ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) qui confirme le type de faciès et la salinité élevée des eaux.
- La comparaison entre les résultats des analyses de 1960 et 2011 montrent une forte évolution des éléments chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) des eaux des foggaras, ce qui traduit la forte salinité des eaux de la région.

Conclusion générale

La région d'Adrar est située dans la partie sud de l'Algérie, elle représente la limite Sud-ouest du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS).

La consultation de la carte des altitudes montre le choix idéal de l'implantation des foggaras sur une pente douce, juste à la limite Sud-ouest de la nappe du Continental Intercalaire et qui permet ainsi à un écoulement gravitaire, le réseau hydrographique est inexistant dans la région d'étude résulte la rareté des précipitations estimées à 14 mm par ans, les températures sont très élevées avec une moyenne annuelle de l'ordre de 26 °C et un vent qui souffle durant toute l'année avec quelque fois des tempêtes de sable violentes, ces conditions ont favorisé l'installation d'un climat de type Saharien hyper aride, le bilan hydrique est déficitaire et la région souffre d'un stress hydrique.

L'étude géologique nous a permis de voir l'ensemble des formations géologiques par la réalisation de diagramme, carte et profils géologiques en 3D qui permettent de visualiser et de comprendre facilement la succession des couches géologiques dans la zone d'étude d'une part et de voir les affleurements, les limites et les extensions de la nappe du Continental Intercalaire d'autre part. Les coupes et profils géologiques réalisés sur ce diagramme confirment que la nappe est peu épaisse dans la région d'Adrar, elle est de l'ordre de 250 m, ils montrent aussi le plongement de la nappe sous le recouvrement du crétacé supérieur du plateau de Tademaït et qu'elle devient ainsi captive et plus profonde.

L'étude hydrogéologique a permis de schématiser le bassin de l'Erg Occidental par la réalisation des cartes en 3D qui ont permis de voir la superposition des deux nappes constituant le SASS, à savoir le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI) le CI est composé des formations meubles (grès, argiles et sables avec des intercalations évaporitiques au Sud), la reconstitution de la carte piézométrique de l'année 1971 et l'établissement des deux cartes piézométriques de l'année 2007 et 2010 ont permis de déduire l'abaissement des niveaux piézométriques avec plus de 8 mètres de rabattement durant les 40 dernières années, le niveau statique varie de 10 à 30 m par rapport au sol, un sens l'écoulement orienté Nord-est Sud-ouest avec un faible gradient hydraulique de l'ordre de 0.003 à 0.0008 en allant de l'Ouest à l'Est. Les paramètres hydrodynamiques sont estimés à 1

10^{-2} m²/s pour la transmissivité et 0,05 pour le coefficient d'emmagasinement, la nappe est sollicitée par 2651 points d'eau cumulent un débit extrait de 4.038 m³/s.

Le rabattement engendré par les différentes méthodes d'exhaures est simulé à 35 m durant les vingt prochaines années.

Nous avons consacré une partie pour la description des différents éléments de la foggara pour donner au lecteur plus information sur la naissance, le fonctionnement et le partage du débit de ce système avec un diagnostic des problèmes qui agissent sur le bon fonctionnement de la foggara, l'état actuelle de la foggara nous rend pessimiste de l'avenir de ce système avec l'existence d'un concurrent puissant « le Forage ». Les jaugeages réalisés en 1998 et 2011 indiquent la diminution de débit des foggaras, estimée de 50% par rapport au débit de 1960, cette situation a engendré un taux de tarissement de 40% des foggaras, et de figer l'évolution de la palmeraie avec 10% d'extension. La réalisation de la carte des niveaux d'eau dans les foggaras autour de la ville d'Adrar nous a permis de faire point sur la nécessité de faire le nivellement des puits des foggaras pour la réalisation d'une carte de bonne précision, malgré que c'est un travail colossal.

Dans le volet hydrochimique nous avons évoqué le problème du chimisme des eaux des foggaras, la cartographie hydrochimique a visualisé les zones de forte concentration à l'extrême Nord Ouest (région de Bouda) et au Sud (région de Reggane), où la quasi-totalité des éléments chimiques présente des teneurs élevées, confirment ainsi, le sens d'écoulement de la nappe NE-SW, l'étude a permis aussi de bien définir la répartition des faciès chimiques sur l'ensemble de la zone d'étude, deux faciès sont dominants le chloruré sodique dans la partie Nord de la région et le sulfaté sodique dans la partie Sud de la région, cette constatation nous ramène à la lithologie de l'aquifère dans les deux zones où les deux régions (Reggane et Bouda) se caractérisent par l'intercalation des dépôts évaporitiques dans les formations aquifères captées dans ces zones.

L'étude des relations chimiques et l'analyse en composantes principales montrent les liens des éléments chimiques de même famille et de même origine par la domination des éléments évaporitiques (sulfates) et salines (chlorures).

L'étude hydrochimique 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 par une comparaison des anciens données hydrochimiques aux résultats des données actuelles, l'augmentation de la salinité a participé à la dégradation de la palmeraie de la région d'Adrar.

Recommandations

Un certain nombre de recommandation peut être proposée, à fin de participer à la protection et à la sauvegarde de cette merveille qui représente un patrimoine non seulement national mais c'est un bien commun de l'humanité, d'une conception ingénieuse :

- Convaincre les décideurs pour la sauvegarde et la protection des foggaras.
- Sensibilisation de la jeune génération (écoliers) du rôle de la foggara pour la préservation et le maintien de la palmeraie.
- Incitation et encouragement des jeunes pour travailler la foggara.
- Interdiction de toute implantation de forage ou puits en amont de la foggara.
- Imperméabilisation de la zone non drainante de la foggara pour diminuer le volume d'eau perdu par infiltration et évaporation.
- Prolongement de la partie drainante de la foggara.
- Curage et nettoyage des galeries de la foggara.
- Nivellement des puits des foggaras.
- Interdiction d'utiliser les foggaras comme lavoirs publics par la dispersion des détergents dans la palmeraie.
- Consolidation des alentours des puits des foggaras a l'intérieur des villes qui présentent un danger sur les habitations et sur les passagers (piéton, véhiculé).
- Modélisation mathématique du système d'écoulement des foggaras.

« Hommage au bras qu'ils ont construisent »

***RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES***

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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 d'état université de Bordeaux1, 297p

Askri H. et al, (2001) : Géologie de l'Algérie, Contribution de SONATRACH Division Exploration, Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement. 93p.

A.G .P Martin, (1908) : Les oasis sahariennes (Gourara-Touat-Tidikelt), Ed. Imprimerie d'Algérienne, Alger, 406p.

Baali. F, (2007) : Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi aride, Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien, Thèse de Doctorat université Annaba, 152p.

Benhamza.M, (2011) : Séquestration Gaz Carbonique à Kerchba In Salah, Rapport Interne ANRH Adrar, 2011.

Benhamza.M, et Merzougui.B, (2007) : Champ Captant d'In Salah, Rapport Interne, ANRH Adrar, 62p.

Besbes.M et al, (2005) : Bassin Occidental ; Hydrogéologie et Modèle conceptuel, OSS, Tunis, 64p.

Boutadara.Y, (2009) : Étude hydrogéologique des systèmes de captage traditionnels dans les Oasis Sahariennes Cas des Foggaras de la région du Touat (Adrar) mémoire magister, université d'Oran, 118p.

British Geological Survey BGS, (2010): The Continental Intercalaire of Krechba and the Algerian Sahara: application of a 2D/3D GIS and 3D seismic for geological characterization Groundwater Science Programme, Internal Report CR/11/015 Keyworth, Nottingham, UK.

Castany G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod université Bordas Paris. France, 237 p.

CDARS, (1999): Étude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, Ressources en eau : Connaissances d'ensemble, Ouargla, 154p.

Conrad G. (1969) : L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p

Conrad G. (1975) : Les isotopes dans les eaux du sahara nord-occidental (Algérie), Rapport IAEA, 74p.

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

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

Follot J. (1952) : Monographie Régionale, Ahnet et Mouydir, XIX congrès géologique international, Alger.

Hounslow.A.W (1995): Water quality data analysis and interpretation, Ed LEWIS PUBLISCHERS, 420p.

Jacques.Boudin (2008): Cours de Lithologie et Chimie des Eaux Souterraines, Module de géologie département Géosciences, Université de Poitier, Fichier PPT, 34p.

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

Khodjaoui A, (2008) : Dévonien inférieur du bassin de Reggane (sahara occidentale) algérien) : sédimentologie, bio-stratigraphie, stratigraphie séquentielle, mémoire magister, université de Boumerdès, 130p.

Mehdia.M. (2008) : Caractérisation de la décharge publique de Tiaret Algérie et son impact sur la qualité des eaux souterraines, Thèse de Doctorat, université Annaba, 252p.

Merzougui.B, (2004): Étude de tarissement des foggaras. Rapport interne, ANRH Adrar,52p.

Moussaoui.A, (2011) : Systèmes hydrauliques traditionnels dans le Gourara et le Touat, AREA-ED brazakh, 62p.

Mohamedou Ould Baba Sy. (2005) : Recharge et Paléorecharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse Doct, Univ, Tunis El Manar, 271p.

O.S.S (2004): Système aquifère du sahara septentrional, Modèle Mathématique, Volume4, 271p.

UNESCO. (1972) : Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. Plaquette 2, La nappe du continental intercalaire- modèle mathématique, 122p.

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

UNESCO. (1972) : Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. Plaquette 7 Captage et utilisation des eaux souterraines, les forages et le refroidissement des eaux.77p.

Remini.B, (2008) : La Foggara, OPU, 131p.

Robert M.W. et al, (1973): Hydrogeology of the Albian formation, Submitted to the graduate Faculty of Texas Tech University in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor in Philosophy.157p.

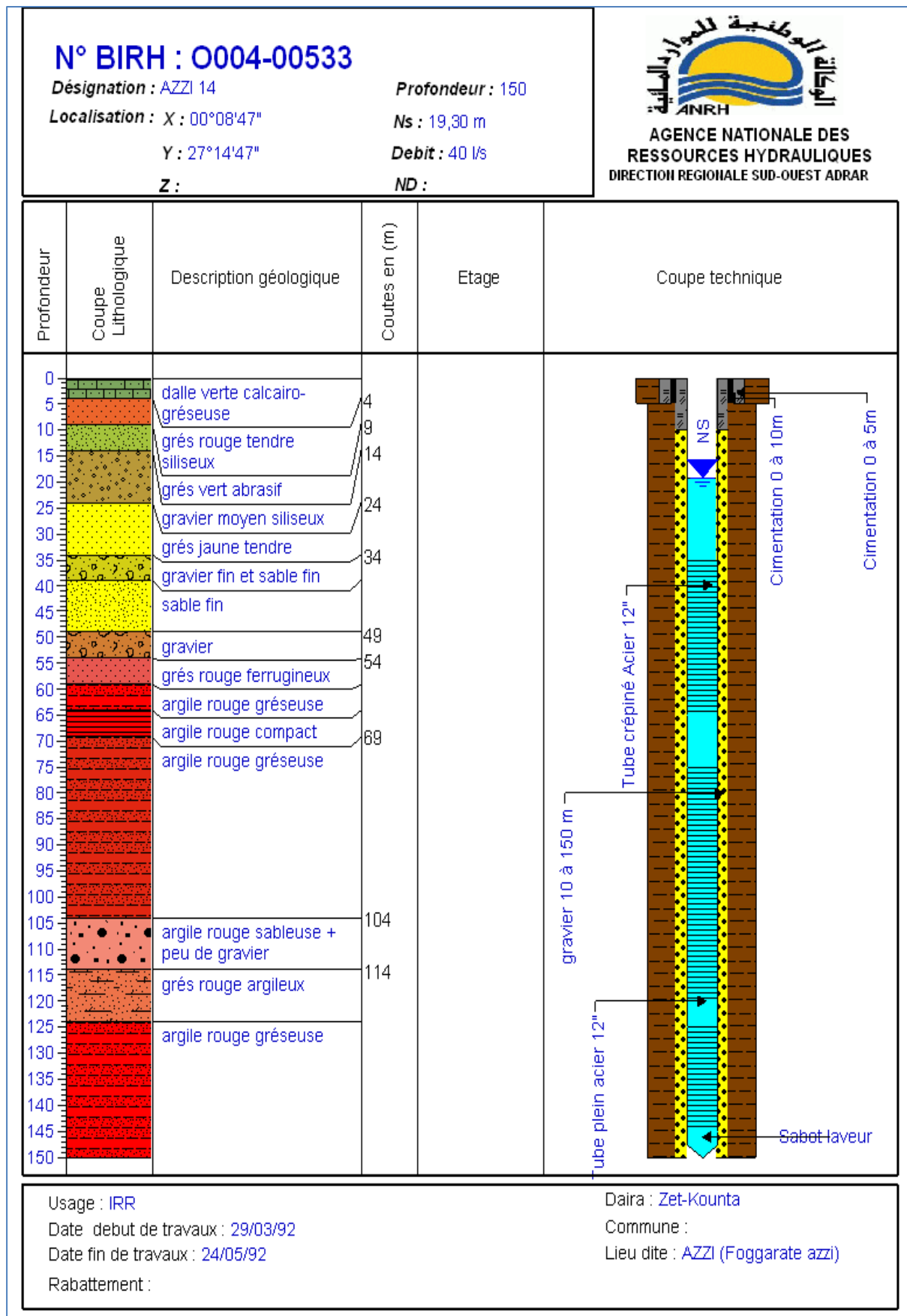
Rodier.J et coll (2005) : L'Analyse de l'eau, 8^e Edition, Dunod, Paris, 1383p.

Rouabhia. AEK, (2006) : Vulnérabilité et risqué de pollution des eaux souterraines de la nappes des sables miocènes de la plaine d'EL MA EL ABIOD Nord-est Algérien, thèse Doctorat, Université Annaba.197p.

Zafar Adeel et al, (2008) : WATE MAKES TRADITIONAL TECHNOLOGIES TICK? A Review of Traditional Approaches for Water Management in Drylands, Desertification Series N°8 UNITED NATION UNIVERSITY (UNU-INWEH), Hamilton, Ontario, 84p.

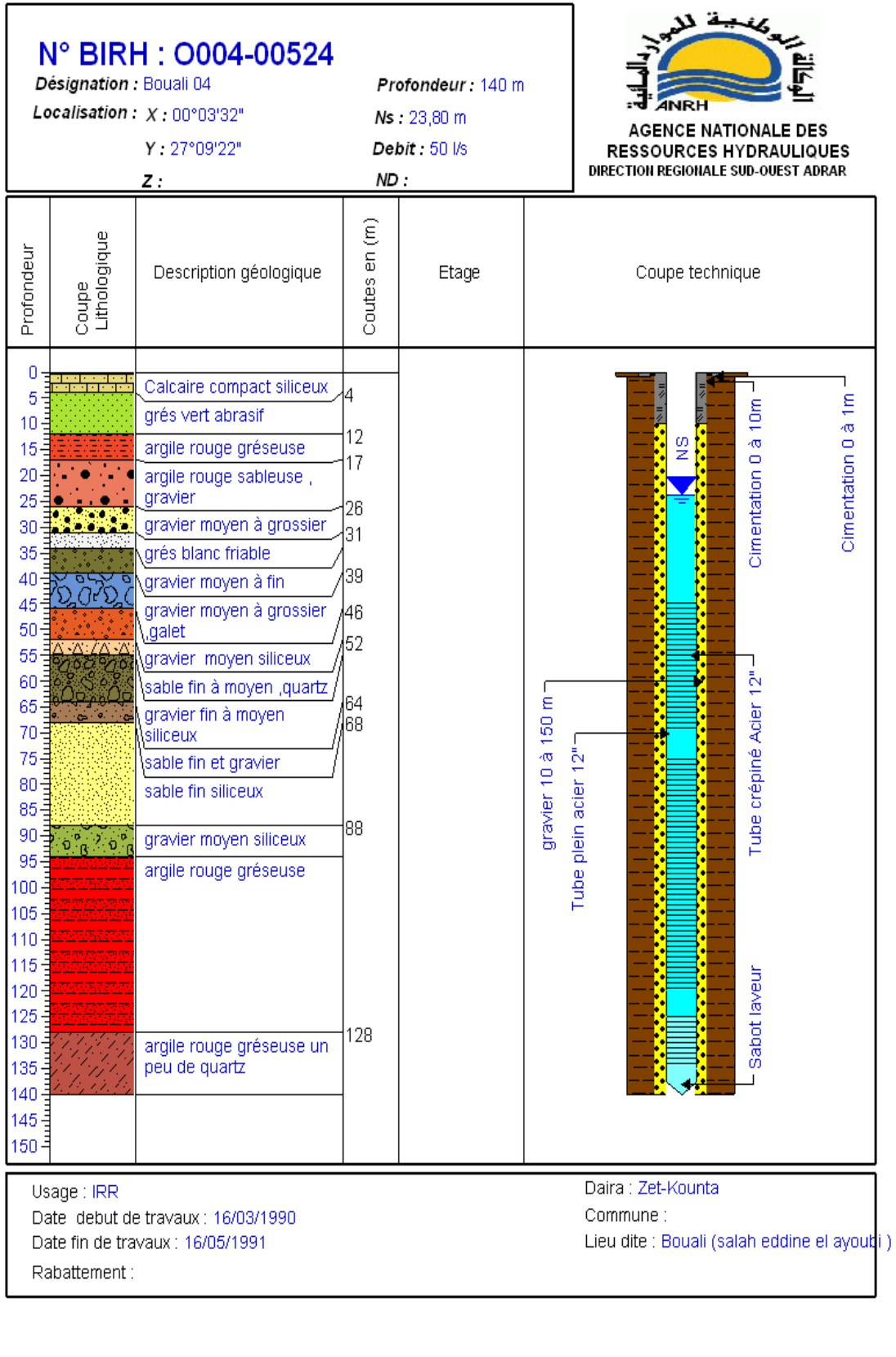
ANNEXES

Annexes



Annexe.1. Coupe technique de forage 0004-00533

Annexes



Annexe.2. Coupe technique de forage 0004-00524



Annexe.3. Vue à l'extérieur d'une foggara (Image 1, Kobori, 1982)



Annexe.4. Vue à l'intérieur de la foggara.



Annexe.5. Différents types de Kasria.



Annexe.6. Différents types de Séguia.



Annexe.7 « Chegfa » Outil de mesure du débit.