

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, ÉNERGIES RENOUVELABLE
ET SCIENCE DE LA TERRE
DÉPARTEMENT DE SCIENCE DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Année : 2021



N° d'enregistrement :
/...../...../...../...../

THESE

pour l'obtention du Diplôme de Doctorat 3^{ème} Cycle en Géologie.
Spécialité : Hydrogéologie

Approche géochimique à l'étude du Système Aquifère du Sahara Septentrional (S.A.S.S), Application à la nappe du Continental Intercalaire de la région Ouest du Sahara : Touat – Gourara – Tidikelt.

Présentée et soutenue publiquement
par :

M. BENHAMIDA Slimane Abdeldjabbar

le 18/01/2021

Devant le jury composé de :

M. ZEDDOURI Aziez.	Professeur	Univ.K.M – Ouargla.	Président.
M. NEZLI Imed Eddine.	Professeur	Univ.K.M – Ouargla.	Directeur de Thèse.
M. BELEKSIER Med Salah.	M.C. "A"	Univ.K.M – Ouargla.	Examineur.
M. BRINIS Nafaâ.	M.C. "A"	Univ. – Batna 2.	Examineur.
M. DJAIZ Fouad.	M.C. "A"	Univ. – Batna 2.	Examineur.
M. SAYED Lamine.	M.C. "A"	Univ. – Annaba.	Examineur.

Table des matières

Citation	i
Avant-Propos.....	ii
Dédicaces	iv
Résumé	v
ملخص	vi
Abstract	vii
Préambule	1
INTRODUCTION GENERALE.....	3

PREMIERE PARTIE :

CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.

Introduction Partie n° 1	7
I. CADRE PHYSIQUE ET CARACTERISTIQUES DU MILIEU	8
I.1. Situation géographique	8
I.2. Cadre physique.....	9
I.3. Aspect géomorphologique et pédologique par région.	11
I.3.1. Région du Gourara (Nord).	11
I.3.2. Région du Touat (Centre).	12
I.3.3. Région du Tidikelt (Sud).	12
II. HYDROCLIMATOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE	13
II.1. Climatologie de la zone d'étude	13
II.1.1. Les Températures	13
II.1.2. Les Précipitations.	14
II.1.3. Diagramme Ombro-thermique de Gaussen.....	15
II.1.4. Les Vents.	16
II.1.5. L'Humidité relative de l'air.....	17
II.1.6. Diagramme pluviothermique d'Emberger.....	17
II.2. Hydrologie et réseau hydrographique de la zone d'étude	19
II.2.1. Historique sur l'hydrographie de la région.....	19
II.2.2. Caractéristiques physiques des 5 sous bassins	21
- Bassin versant du Touat Oriental (S.B n° 01)	22
- Bassin versant du Tidikelt (S.B n° 02).....	22
- Bassin versant du Tademaït Occidental (S.B n° 03)	23
- Bassin versant du Tidikelt Occidental (S.B n° 06).....	23
- Bassin versant du Gourara Occidental (S.B n° 07)	24
III. ETUDE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	25
III.1. Géologie régionale de la zone d'étude.	25
III.2. Stratigraphie de la zone d'étude.	27

Table des matières

III.2.1. Le Primaire (Paléozoïque).....	27
- Dévonien inférieur.....	28
- Dévonien moyen.....	28
- Dévonien supérieur.....	28
- Le Carbonifère.....	29
III.2.2. Le Secondaire (Mésozoïque).....	29
- Le Crétacé Inférieur.	29
- Le Crétacé supérieur	29
III.2.3. Le Tertiaire (Continental Terminal).....	30
- Le Mio-pliocène.....	30
- L'Eocène.....	30
- Le Sénonien.	30
- Le Turonien.....	30
- Le Cénomaniens.	30
III.2.4. Le Quaternaire et les formations récentes.....	30
III.3. Litho-Stratigraphie locale (voir figures n° 26 a-b-c-d).....	30
III.4. Tectonique régionale et locale.....	35
III.5. Paléogéographie de la zone d'étude.....	36
- La Phase marine Carbonifère et régression.....	36
- La Phase d'émersion du Continental Intercalaire.	37
- La Phase de transgression cénomaniens et dépôts marin crétacés.....	37
- Phase d'érosion puis sédimentation Tertiaire et Quaternaire.....	37
IV. ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	38
IV.1. Généralités sur l'hydrogéologie de la région.	38
IV.2. Toit et mur du Continental Intercalaire.....	39
IV.3. Géométrie de l'aquifère.	40
IV.4. Perméabilité, porosité et Transmissivité de la nappe du C.I.....	41
IV.5. Alimentation, circulation et exutoire naturel des eaux du C.I.....	43
V. RESSOURCE EN EAU ET HISTORIQUES DES PRELEVEMENTS	45
V.1. Présentation et interprétation des résultats d'inventaire.....	45
V.2. Evolution du nombre de forages et historique des débits.....	47
Conclusion Partie n° 1	49
<u>DEUXIEME PARTIE :</u>	
MATERIELS ET METHODES.	
Introduction Partie n° 2	52
VI. MATERIELS ET METHODES DE TRAVAIL	53
VI.1. Description des données utilisées.....	53
VI.2. Localisation et mode de choix des points de mesures.	53
VI.3. Mode d'échantillonnage et conditions de mesures.	54
VI.4. Méthodes d'analyses physicochimiques et données de laboratoire.....	55
VI.4.1. Paramètres physiques mesurés sur terrain.....	55

Table des matières

VI.4.2. Paramètres physiques mesurés au laboratoire.....	55
- Résidu Sec	55
- Conductivité électrique	55
VI.4.3. Paramètres physicochimiques mesurés au laboratoire.	56
VI.4.3.1. Méthode potentiométrique.	56
VI.4.3.2. Méthode complexométrique pour dosage du (Ca et Mg).	57
VI.4.3.3. Méthode photométrique a flamme pour dosage du (Na et K).....	58
VI.4.3.4. Méthode pour dosage des Chlorures (Cl ⁻).....	58
VI.4.3.5. Méthode pour dosage des Sulfates (SO ₄ ²⁻).	59
VI.4.3.6. Méthode pour dosage de la Silice (SiO ₂).	60
VI.4.3.7. Méthode pour dosage des Phosphates (PO ₄ ⁻).....	60
VI.4.3.8. Méthode pour dosage des Nitrates (NO ₃).	61
VI.4.3.9. Méthode pour dosage du Fluor (F)	61
VI.5. Les outils informatiques utilisés.	62
VI.5.1. Rockworks v17 (RockWare 1983).....	62
VI.5.2. Xlstat v16 (Addinsoft distributeurs de XLSTAT).	62
VI.5.3. Statistica.v10 (StatSoft, Inc 2011)	63
VI.5.4. Aq-QA (RockWare Application, 2005).	63
VI.5.5. Diagramme v6.59 (Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)	63
VI.5.6. PhreeqC v3.4.0 (Parkhurst and Appelo, 1999)	63
V.5.7. Logiciels de cartographie	63
Conclusion Partie n°2.....	64

TROISIEME PARTIE :

RESULTATS ET DISCUSSIONS.

Introduction Partie n° 3.....	65
VII. APPROCHE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	66
VII.1. APPROCHE GEOLOGIQUE.....	66
VII.1.1. Objectif et résultats	66
VII.1.2. Interprétation des coupes établies	68
- Interprétation des coupes stratigraphiques	69
- Interprétation des coupes Litho-stratigraphiques.....	69
VII.1.3. Validation des résultats avec calcul de la fraction efficace	71
VII.2. APPROCHE HYDROGEOLOGIQUE.....	75
VII.2.1. Variation spatio-temporelle de la piézométrie.....	75
a. Etat actuel de la Piézométrie 2012.....	75
b. Etat de la Piézométrie en 1971	76
VIII. APPROCHE HYDROCHIMIQUE ET ETUDE DE L'I.Q.E.S.	78
VIII.1. APPROCHE HYDROCHIMIQUE	78
VIII.1.1. Caractérisation des éléments mesurés in-situ	78
- La Température (T °C).....	78

- Le Potentiel Hydrogène (pH).....	79
- La Conductivité électrique (Ec).....	79
- Le Potentiel Redox (Eh).....	79
VIII.1.2. Caractérisation des éléments chimiques mesurés au Labo.....	81
- Le Calcium (Ca ²⁺).....	81
- Le Magnésium (Mg ²⁺)	81
- Le Sodium (Na ⁺)	81
- Le Potassium (K ⁺).....	81
- Les Chlorures (Cl ⁻).....	82
- Les Sulfates (SO ₄ ²⁻).....	82
- Les Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).....	82
- Le Silice (Si ⁻)	83
- Le Fluor (F).....	83
- Les Ortho phosphates (PO ₄ ⁻).....	84
- Les Nitrates (NO ₃ ⁻)	84
VIII.1.3. Etude de fiabilité des données hydrochimiques	84
VIII.1.4. Traitement et interprétation des données Physicochimiques.....	85
VIII.1.4.1. Comparaison des résultats avec les normes Algériennes	85
- Les Cations : (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ et K ⁺).....	86
- Les Anions : (HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ et SO ₄ ²⁻).....	87
- Paramètres de pollutions : (NO ₃ ⁻ et F ⁻)	88
- Paramètres physiques : (Conductivité et pH).....	88
VIII.1.4.2. Cartographie hydrochimique des différents éléments	89
- Carte de Calcium (Ca ²⁺).....	90
- Carte de Magnésium (Mg ²⁺)	91
- Carte de Sodiums (Na ⁺)	91
- Carte du Potassium (K ⁺)	92
- Carte des Chlorures (Cl ⁻)	93
- Carte des Sulfates (SO ₄ ²⁻)	94
- Carte d'égaux teneurs en Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	95
- Carte d'égaux teneurs en Silicium (SiO ₂)	96
- Carte d'égaux Conductivités électriques (Ec)	97
- Carte des Nitrates (NO ₃ ⁻)	98
- Carte des Fluors (F ⁻).....	99
VIII.1.5. Identification des différents faciès chimiques	100
a) Faciès hydrochimiques.....	100
b) Evolution hydrochimique spatiale des faciès.....	104
VIII.1.6. Evolution hydrogéochimique des ions majeurs.....	105
- Profil hydrochimique n° 1 (Région du Gourara)	106
- Profil hydrochimique n° 2 (Région du Touat)	107
- Profil hydrochimique n° 3 (Région du Tidikelt).....	109
VIII.1.7. Evolution hydrogéochimique spatiale des faciès	110
- Coupes n° 1-2-3 (Région du Gourara)	111

- Coupes n° 1-2-3 (Région du Touat).....	112
- Coupes n° 1-2-3 (Région du Tidikelt)	112
VIII.1.8. Origine de la minéralisation des eaux	119
VIII.1.8.1. Diagrammes binaires	119
1. Origine de la salinité en fonction de certains paramètres.....	119
a) Diagramme Conductivité, Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}	119
b) Diagramme Conductivité, rapport Cl^- et SO_4^{2-}	120
c) Diagramme Conductivité, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-) / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$	121
d) Diagramme Conductivité, $(\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+})$	122
2. Origine des paramètres à partir des rapports caractéristiques	123
a) Rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ des 470 échantillons	123
b) Rapport $\text{Na}^+ / \text{Mg}^{2+}$	124
c) Diagramme Mg^{2+} versus SO_4^{2-} et Ca^{2+}	126
d) Diagramme Ca^{2+} versus SO_4^{2-}	127
e) Diagramme Ca^{2+} versus HCO_3^-	128
f) Rapport $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$	129
g) Diagrammes Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-}	130
h) Diagramme Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} avec Na^+ , K^+ , Cl^-	132
i) Phénomène d'échange de base entre ions	133
VIII.1.8.2. L'Indice d'échange de Base (I.E.B)	133
VIII.1.8.3. Processus d'acquisition du chimisme.....	135
a) Diagramme d'équilibre (KORJINSKY)	135
b) Diagrammes de GIBBS.....	136
VIII.2. ETUDE DE L'INDICE DE QUALIT2 DES EAUX (I.Q.E.S)	138
VIII.2.1. Définition et principe de l'I.Q.E.S.	138
VIII.2.2. Application sur les eaux de la zone d'étude	140
IX. APPROCHE STATISTIQUE	141
IX.1. Définitions.....	141
IX.2. Méthodes de mesures	142
IX.2.1. Application des statistiques descriptives	142
IX.2.2. Calcul des coefficients de corrélations	143
IX.2.3. Analyse en Composante Principale (ACP)	143
X. APPROCHE THERMODYNAMIQUE ET ISOTOPOQUE	147
X.1. APPROCHE THERMODYNAMIQUE	147
1. Evolution géochimique des eaux de la nappe	147
2. Origine des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+).....	148
a) Origine du Ca^{2+}	150
b) Origine du Mg^{2+}	150
c) Origine du Na^+	151
3. Etude du mécanisme d'acquisition de la minéralisation	153
3.1. Diagrammes de concentrations et molalité des ions	153
a) Zone nord (Le Gourara)	153

b) Zone centre (Le Touat)	154
c) Zone sud (Le Tidikelt)	155
3.2. Relation entre Indice de Saturation et facteur de concentration.....	155
a) Zone nord (Le Gourara).....	155
b) Zone centre (Le Touat)	156
c) Zone sud (Le Tidikelt)	157
3.3. Relation entre I.S et pH des échantillons d'eau prélevés	158
a) Zone nord (Le Gourara).....	158
b) Zone centre (Le Touat)	158
c) Zone sud (Le Tidikelt)	159
3.4. Equilibre Calco-carboniques, pCO ₂ , pH, et I.S des carbonates.....	161
a) Zone nord (Le Gourara).....	161
b) Zone centre (Le Touat)	163
c) Zone sud (Le Tidikelt)	165
3.5. Rapport I.S. Calcite – I.S. Dolomite et temps de séjour	167
a) Zone nord (Le Gourara).....	169
b) Zone centre (Le Touat)	170
c) Zone sud (Le Tidikelt)	171
X.2. APPROCHE ISOTOPIQUE.	175
X.2.1. Résultats d'analyses	178
X.2.2. Relation entre δ ¹⁸ O et profondeur des forages	180
X.2.3. Relation entre δ ¹⁸ O et conductivité de l'eau échantillonnée	181
X.2.4. Comparaison des résultats avec le ¹⁴ C (CONRAD, 1972).....	181
Conclusion Partie n°3	184
<u>QUATRIEME PARTIE :</u>	
CONCLUSION GENERALE.	
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	188
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	193
ANNEXES	204

LISTE DES FIGURES :

Figure n° 01 Situation géographique de la zone d'étude	8
Figure n° 02 Carte de localisation des oasis caractérisant la zone d'étude	9
Figure n° 03 Carte de relief en 3D avec tracé de profil rattachant (Gourara-Touat-Tidikelt)...10	
Figure n° 04 Carte des isohyètes (exprimée en mm) dans le domaine du S.A.S.S.....	13
Figure n° 05 Variations des moyennes mensuelles des températures	14
Figure n° 06 Variations des moyennes mensuelles des précipitations	15
Figure n° 07 Diagramme Ombro-thermique	15
Figure n° 08 Variations des moyennes mensuelles des vitesses des vents	16
Figure n° 09 Rose des vents caractérisant la zone d'étude	17
Figure n° 10 Variations de l'Humidité relative de l'air	17
Figure n° 11 Situation des 3 régions selon le Climagramme d'Emberger.....	19
Figure n° 12 M.N.T de la zone d'étude (USGS, 2018).....	20
Figure n° 13 Le Bassin versant principal avec les 7 sous bassins.....	21
Figure n° 14 Caractéristiques du sous bassin n° 01	22
Figure n° 15 Caractéristiques du sous bassin n° 02	22
Figure n° 16 Caractéristiques du sous bassin n° 03	23
Figure n° 17 Caractéristiques du sous bassin n° 06	23
Figure n° 18 Caractéristiques du sous bassin n° 07	24
Figure n° 19 Extraite de la carte géologique de BUSSON, 1967	26
Figure n° 20 Esquisse géologique de la zone d'étude (D'après BUSSON, 1967).....	27
Figure n° 21 Coupe géologique schématique à Timimoune - Echelle 1/300.000.....	27
Figure n° 22 Coupe schématique du synclinal de fgaguira- Echelle 1/300.000	28
Figure n° 23 Coupe géologique schématique à Auogurout - Echelle 1/200.000	29
Figure n° 24 Croquis schématique de la lithostratigraphique (axe Gourara – Tidikelt)	31
Figure n° 25 Photos prises sur la route Timimoune – Ouled Saïd (Décembre 2018).....	33
Figure n° 26 Logs stratigraphiques des sondages hydrauliques types implantés.....	34
Figure n° 27 Carte schématique structurale - Echelle 1/800.000.....	35
Figure n° 28 Coupe lithostratigraphique Ouest-Est (axe Reggane – In Salah).....	36
Figure n° 29 Extrait de la carte des grandes unités hydrogéologiques	39
Figure n° 30 Carte Isopache de la nappe du Continental Intercalaire	40

Liste des Figures

Figure n° 31 Carte Isobathe de la nappe du Continental Intercalaire.....	41
Figure n° 32 Carte Iso-Transmissivité de la nappe du C.I.	42
Figure n° 33 Carte de situation par commune des points d'eau inventoriés en 2012	45
Figure n° 34 Carte de situation par usages des points d'eau inventoriés en 2012	46
Figure n° 35 Evolution du nombre de points d'eau réalisés entre 1982 et 2012	47
Figure n° 36 Evolution annuelle du volume d'eau soutiré entre 1960 et 2012.....	48
Figure n° 37 Situation des points d'eau sélectionnés pour échantillonnage	54
Figure n° 38 Courbe d'étalonnage des Chlorures (en mg/L)	59
Figure n° 39 Courbe d'étalonnage des Sulfates (en mg/L)	59
Figure n° 40 Localisation des 120 logs de forages sélectionnés	66
Figure n° 41 Bloc diagramme en 3D du modèle lithologique.....	67
Figure n° 42 Bloc diagramme en 3D du modèle Stratigraphique	67
Figure n° 43 Contact entre le Crétacé inférieur et les formations Sous-jacentes.....	68
Figure n° 44 Carte de localisation des logs avec orientation des coupes.....	68
Figure n° 45 Coupes litho-stratigraphiques dressées selon les axes d'orientations	69
Figure n° 46 Coupes litho-stratigraphiques dressées selon les axes d'orientations	71
Figure n° 47 Carte d'égale fraction utile de la formation aquifère du C.I	73
Figure n° 48 Carte Piézométrique de la nappe du C.I (données année 2012).....	75
Figure n° 49 Carte Piézométrique de la nappe du C.I (données ERESS 1971)	76
Figure n° 50 Diagramme de POURBAIX : $\text{pH} = f(\text{Eh})$ d'équilibre de l'Eau du C.I.....	80
Figure n° 51 Balance ionique entre Σ des (anions et cations) des 478 Echant.	85
Figure n° 52 Comparaison des teneurs en Ca^{2+} par rapport aux normes	86
Figure n° 53 Comparaison des teneurs en Mg^{2+} par rapport aux normes	86
Figure n° 54 Comparaison des teneurs en Na^+ par rapport aux normes.....	87
Figure n° 55 Comparaison des teneurs en K^+ par rapport aux normes	87
Figure n° 56 Comparaison des teneurs en HCO_3^- par rapport aux normes	87
Figure n° 57 Comparaison des teneurs en Cl^- par rapport aux normes	87
Figure n° 58 Comparaison des teneurs en SO_4^{2-} par rapport aux normes	88
Figure n° 59 Comparaison des teneurs en NO_3^- par rapport aux normes.....	88
Figure n° 60 Comparaison des teneurs en F^- par rapport aux normes.....	88
Figure n° 61 Comparaison des teneurs du pH par rapport aux normes.....	89

Liste des Figures

Figure n° 62 Comparaison des teneurs de l'Ec par rapport aux normes	89
Figure n° 63 Répartition spatiale des teneurs en $[Ca^{2+}]$ (exprimées en mg/L).....	90
Figure n° 64 Répartition spatiale des teneurs en $[Mg^{2+}]$ (exprimées en mg/L)	91
Figure n° 65 Répartition spatiale des teneurs en $[Na^+]$ (exprimées en mg/L).....	92
Figure n° 66 Répartition spatiale des teneurs en $[K^+]$ (exprimées en mg/L)	93
Figure n° 67 Répartition spatiale des teneurs en $[Cl^-]$ (exprimées en mg/L).....	94
Figure n° 68 Répartition spatiale des teneurs en $[SO_4^{2-}]$ (exprimées en mg/L).....	95
Figure n° 69 Répartition spatiale des teneurs en $[HCO_3^-]$ (exprimées en mg/L	96
Figure n° 70 Répartition spatiale des teneurs en $[SiO_2^-]$ (exprimées en mg/L)	97
Figure n° 71 Répartition spatiale de la conductivité électrique [Ec] (en mg/L)	98
Figure n° 72 Répartition spatiale des teneurs en $[NO_3^-]$ (exprimées en mg/L)	99
Figure n° 73 Répartition des Teneurs en $[F^-]$ (exprimées en mg/L).....	99
Figure n° 74 Pourcentage des concentrations moyennes des différents éléments	100
Figure n° 75 Répartition des faciès chimiques selon la représentation de PIPER.....	103
Figure n° 76 Carte des faciès hydrochimiques caractérisant l'eau de la zone	105
Figure n° 77 Evol. Spatiale des ions majeurs dans le sens d'écoulement (Gourara).....	107
Figure n° 78 Evol. Spatiale des ions majeurs dans le sens d'écoulement (Touat).....	108
Figure n° 79 Evol. Spatiale des ions majeurs dans le sens d'écoulement (Tidikelt).....	110
Figure n° 80 Carte d'orientation des profils hydrogéochimiques élaborés.....	111
Figure n° 81 Evolution des anions (en méq/L) en fonction de l'Ec.....	120
Figure n° 82 Variation des rapports Cl^-/HCO_3^- et SO_4^{2-}/HCO_3^- vs de l'Ec.....	120
Figure n° 83 Rapport Cl^-/SO_4^{2-} en fonction de la C. Electrique.....	121
Figure n° 84 $(Ca^{2+} + Mg^{2+} + HCO_3^-)/(Na^+ + Cl^- + SO_4^{2-})$ vs de la C. Electrique.....	122
Figure n° 85 Rapport (Ca^{2+}/Mg^{2+}) en fonction de la C. Electrique	123
Figure n° 86 Rapport entre Chlorures et Sulfates des 470 échantillons.....	123
Figure n° 87 Répartition spatiale du rapport Cl^-/SO_4^{2-} des 470 échantillons.....	124
Figure n° 88 Rapport entre Sodium et Magnésium des 470 échantillons	125
Figure n° 89 Répartition spatiale du rapport Na^+/Mg^{2+} des 470 échantillons.....	125
Figure n° 90 Diagramme mettant en relation le Mg^{2+} et le SO_4^{2-}	126
Figure n° 91 Diagramme mettant en relation le Mg^{2+} et le Ca^{2+}	126
Figure n° 92 Répartition spatiale du rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} des 470 échantillons.....	127

Liste des Figures

Figure n° 93 Diagramme mettant en relation le Ca^{2+} et le SO_4^{2-}	128
Figure n° 94 Diagramme mettant en relation le Ca^{2+} et le HCO_3^-	128
Figure n° 95 Diagramme du rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$)	129
Figure n° 96 Répartition spatiale du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ des 470 échantillons.....	130
Figure n° 97 Diagramme du couple Na^+ et Cl^-	131
Figure n° 98 Diagramme du couple Na^+ et SO_4^{2-}	131
Figure n° 99 Diagramme du rapport $\text{Ca}^+/\text{SO}_4^{2-}$	131
Figure n° 100 Diagramme ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) - ($\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$) avec ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$)	132
Figure n° 101 Diagramme mettant en évidence la présence d'échange de base.....	133
Figure n° 102 Carte d'I.E..B des 470 échantillonnées eaux prélevés	134
Figure n° 103 Diagramme vis à vis des minéraux silicatés sodiques.....	135
Figure n° 104 Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés	136
Figure n° 105 Diagramme vis à vis des minéraux silicatés magnésiens	136
Figure n° 106 Diagramme de Gibbs.....	137
Figure n° 107 Répartition spatiale des I.Q des eaux albiennes de la région	140
Figure n° 108 Représentation graphique de l'ACP	145
Figure n° 109 Variation des I.S des minéraux pour les 86 échantillons	148
Figure n° 110 Variation spatiale des I.S des minéraux carbonatés et évaporitiques.....	149
Figure n° 111 Test de l'origine du Ca^{2+} par rapport à l'I.S de certains minéraux	150
Figure n° 112 Test de l'origine du Mg^{2+} par rapport à l'I.S de certains minéraux	151
Figure n° 113 Test de l'origine du Na^+ par rapport à l'I.S de certains minéraux.....	151
Figure n° 114 Corrélation des IS Vs (halite, gypse, calcite et dolomite).....	152
Figure n° 115 Diag. de concentrations pour les cations et les anions (Gourara)	154
Figure n° 116 Diag. de concentrations pour les cations et les anions (Touat)	154
Figure n° 117 Diag. de concentrations pour les cations et les anions (Tidikelt).....	155
Figure n° 118 Diagrammes de concentrations vis à vis des minéraux (Gourara).....	156
Figure n° 119 Diagrammes de concentrations vis à vis des minéraux (Touat).....	157
Figure n° 120 Diag. de concentrations vis à vis des minéraux (Tidikelt)	157
Figure n° 121 Relation pH et I.S vis-à-vis des minéraux (Gourara)	158
Figure n° 122 Relation pH et I.S vis-à-vis des minéraux (Touat).....	159
Figure n° 123 Relation pH et I.S vis-à-vis des minéraux (Tidikelt)	159

Liste des Figures

Figure n° 124 Variation des IS des minéraux carbonatés selon le pH	160
Figure n° 125 Relation du log (pCO ₂) avec l'I.S Calcite et l'I.S Dolomite.....	160
Figure n° 126 Diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (Zone du Gourara).....	162
Figure n° 127 Diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (Zone du Touat).....	164
Figure n° 128 Diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (Zone du Tidikelt)	165
Figure n° 129 Carte de répartition de la pression équilibrante du CO ₂	167
Figure n° 130 Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées (Zone du Gourara)	169
Figure n° 131 Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées (Zone du Touat).....	171
Figure n° 132 Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées (Zone du Tidikelt).....	172
Figure n° 133 Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées des 3 zones.....	173
Figure n° 134 Répart. Spatiale des temps de séjour selon le Diag. I.S.D = f (I.S.C)	174
Figure n° 135 Diagr. δ ² H et δ ¹⁸ O des eaux du C.I par rapport à D.M.M & D.E.F.	176
Figure n° 136 Les processus pouvant influencer les compositions en isotopes.....	177
Figure n° 137 Situation des points d'eau sélectionnés pour isotopes	177
Figure n° 138 Tracé de δ ¹⁸ O vs δ ² H pour les eaux du C.I. des 25 forages visités	178
Figure n° 139 Tracé de δ ¹⁸ O vs Profondeur des 25 forages visités.....	181
Figure n° 140 Tracé de δ ¹⁸ O vs Conductivité des eaux du C.I des 25 visités.....	181
Figure n° 141 Variation par régions des teneurs en ¹⁴ C des eaux du C.I.	182

EQUATIONS UTILISEES :

EQ n° 01 Quotient pluviométrique d'après EMBERGER.....	17
EQ n° 02 Quotient pluviométrique d'après STEWART	18
EQ n° 03 formule admise par (M. BESBES) pour le calcul de la fraction utile.....	72
EQ n° 04 Activité protonique en solution (FRITZ et STUMM & MORGAN)	79
EQ n° 05 Equation de Walter Nernst pour le calcul du Eh d'un couple d'oxydo-réduction	80
EQ n° 06 Equation de Walter Nernst pour le calcul du Eh d'un couple d'oxydo-réduction	80
EQ n° 07 formule de balance ionique (B.I).....	85
EQ n° 08 Formule de calcul de la quantité en réaction en pourcent de l'élément	101
EQ n° 09 Expression d'indice d'échange de base (I.E.B.).....	133
EQ n° 10 Calcul d'un poids relatif (Wi) du paramètre chimique	138
EQ n° 11 Attribution d'une échelle d'évaluation de la qualité (qi) à chaque paramètre	138
EQ n° 12 Le sous-indice de chaque paramètre chimique.....	139
EQ n° 13 L'I.Q.E.S. (ou G.W.Q.I)	139
EQ n° 14 L'état de saturation est exprimé par la loi de DEBYE et HÜCKEL	147
EQ n° 15 Rapport R (différence entre isotope lourd sur l'isotope léger).....	175
EQ n° 16 Equation de la Droite Météorique Mondiale.....	175

LISTE DES TABLEAUX :

(Tab. n° 01) Localisation des 03 stations météorologiques (source O.N.M)	13
(Tab. n° 02) Moyennes mensuelles interannuelles de Températures	14
(Tab. n° 03) Moyennes mensuelles interannuelles des Précipitations	14
(Tab. n° 04) Moyennes mensuelles interannuelles de la vitesse des vents	16
(Tab. n° 05) valeurs calculées du quotient pluviothermique.....	18
(Tab. n° 06) Estimation de la recharge du C.I dans le Bassin occidental (O.S.S. 2005)	43
(Tab. n° 07) Répartition par zone du volume d'eau soutiré de la nappe du C.I.....	47
(Tab. n° 08) Evolution annuelle du nombre de points d'eau réalisés de 1965 à 2012.....	47
(Tab. n° 09) Historique des prélèvements soutirés de 1960 à 2012.....	48
(Tab. n° 10) Pourcentage des compositions lithologiques de la matrice aquifère	72
(Tab. n° 11) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Ca^{2+}	90
(Tab. n° 12) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Mg^{2+}	91
(Tab. n° 13) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Na^{+}	92
(Tab. n° 14) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément K^{+}	92
(Tab. n° 15) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Cl^{-}	93
(Tab. n° 16) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément SO_4^{2-}	94
(Tab. n° 17) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément HCO_4^{-}	95
(Tab. n° 18) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément SiO_2^{-}	96
(Tab. n° 19) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Ec	97
(Tab. n° 20) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément NO_3^{-}	98
(Tab. n° 21) Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément F^{-}	99
(Tab. n° 22) Classification des eaux de la nappe Albienne selon STABLER	102
(Tab. n° 23) Poids relatifs des paramètres physiques et physicochimiques.....	139
(Tab. n° 24) Classification qualitative des types d'eau selon l'I.Q.E.S	139
(Tab. n° 25) Statistique descriptive des 470 échantillons caractérisant les paramètres	142
(Tab. n° 26) Matrice de corrélation des variables de la zone d'étude	143
(Tab. n° 27) Valeurs propres et variabilité des axes factoriels retenus pour l'ACP	144
(Tab. n° 28) Corrélation entre les 9 variables et les axes factoriels retenus	144
(Tab. n° 29) Matrice de corrélation entre les cations, les sulfates et les bicarbonates.....	150
(Tab. n° 30) Analyse descriptive des 25 échantillons analysés pour les isotopes.....	178

LISTE DES ACRONYMES :

(AEP)	.....	Alimentation en Eau Potable
(AIEA)	.....	Agence Internationale des Energies Atomique
(ANRH)	.....	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
(BNEDER)	.....	Bureau National des Etudes en Développement Rural
(BRL Ingénierie)	.....	La compagnie d'aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc
(BURGEAP)	.....	Bureau d'études spécialisé en environnement et en gestions des eaux
(CDARS)	.....	Commissariat de développement de l'Agriculture dans les Régions Sahariennes
(CNRS)	.....	Centre Nationale des Recherches Scientifiques
(CRZA)	.....	Centre de Recherche dans les Zones Arides Scientifiques
(DEM)	.....	Modèle d'Elévation Digitale
(DEF)	.....	Droite des Eaux Fossiles
(DEM)	.....	Droite des Eaux Météoriques
(DOM)	.....	Domestique
(E.C)	.....	Conductivité Electrique
(ERESS)	.....	Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional
(GEOPETROLE)	.....	Bureau etude
(GWQI)	.....	Ground Water Quality Index
(IND)	.....	Industriel
(IQES)	.....	Indice de Qualité des Eaux Souterraines
(IRR)	.....	Irrigation
(MXT)	.....	Mixte
(MNT)	.....	Modèle Numérique de Terrain
(ONM)	.....	Office Nationale de Météorologie
(OSS)	.....	Office du Sahara et du Sahel
(PNUD)	.....	Le Programme des Nations Unies pour le Développement
(P)	.....	Précipitation
(RAB)	.....	Projet initié et financé par la banque européenne
(SASS)	.....	Système Aquifère du Sahara Septentrional
(SIG)	.....	Système d'Information Géographique
(T)	.....	Température
(USGS)	.....	United States Geological Survey

« Une goutte d'eau suffit pour créer un monde »
Gaston Bachelard



Quand on veut on peut ;

C'est à travers cette citation qui exprime la volonté d'aboutir que j'ai entrepris ce modeste travail, toutefois de longue haleine, n'aurait jamais abouti sans la participation, la collaboration et le soutien de nombreuses personnes.

Tout d'abord je remercie chaleureusement M. Nezli Imed Eddine Professeur à l'U.K.M de Ouargla, de m'avoir accepté dans son équipe de recherche, de diriger et de prendre en charge la thématique de la présente thèse. Je suis reconnaissant à son égard, pour sa disponibilité, de m'avoir bénéficié de sa grande connaissance dans le domaine de la géochimie des interactions et surtout qu'il m'a énormément accompagné à comprendre l'hydrogéochimie.

Je lui exprime toute ma gratitude d'avoir consacré beaucoup de son temps à la correction et l'enrichissement de différents passages du présent manuscrit. Je ne saurai le remercier assez également pour son aide tant sur le plan scientifique que linguistique le long de l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Mr A. Zedouri, Professeur à l'U.K.M de Ouargla, pour avoir accepté de juger et présider ce travail de thèse. Dans ce jury, je voudrai remercier MM M.S. Belekçir, Maître de conférence à l'U.K.M de Ouargla, N. Brinis, Maître de conférence à l'Université de Batna, F. Djaiz, Maître de conférence à l'Université de Batna et L. Sayed Maître de conférence à l'Université de Annaba, pour avoir acceptés d'examiner et de juger ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à M. M Ould Baba Sy Docteur chercheur, chargé de la base de données au sein de l'Office du Sahara et du Sahel pour avoir accepté la co-direction et surtout de son soutien le long de l'élaboration de cette thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à Mme S. Slimani, Hydrogéologue chargée de la base de données au sein de l'ANRH d'Adrar d'avoir mis à notre disposition les nombreuses données et informations.

Egalement à M. M Bahous Chef de Service du laboratoire, pour sa disponibilité et ses orientations dans le domaine de la chimie des eaux et tout le personnel du laboratoire de la Direction Régionale de l'ANRH à Adrar.

Je ne saurai omettre M. Mehali Chef de Département au niveau du CDARS Ouargla, pour son soutien et sa disponibilité et ce durant les investigations de terrain effectuées en 2018/2019.

Egalement, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants du Département d'Hydrogéologie, particulièrement M.M. Kchiched, Djidel, Medjani, Melouah, Mme et M. Zeddouri, Hacini, Hedane nonobstant

Avant-Propos

tous les assistants et les Enseignants-Chercheurs de l'UKM Ouargla, pour leur soutien qu'ils m'ont offert durant le parcours de cette thèse.

Je tiens également à remercier, amplement M. Brinis Maître de Conférences à l'Université de Batna, pour ses minutieuses orientations et ses précieux conseils en hydrochimie.

Je remercie aussi très sincèrement M. Adlane S. Moula Docteur au CRNA - Alger, pour son soutien physique et surtout d'avoir accepté la réalisation des analyses isotopiques au sein de ses laboratoires.

Toute ma gratitude à M. Abdelhamid Guendouz Professeur à l'Université Saâd Dahleb de Blida, pour son soutien physique, moral et surtout pour les conseils et orientations prodiguées, ô combien très précieuses notamment dans le domaine de la chimie des isotopes.

Ma profonde gratitude à l'égard de Professeur Marie-Solange Oga Yéï Directrice du Laboratoire des S.T.R.M sis à l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody à Abidjan (Côte d'Ivoire), son assistance technique à distance ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la modélisation géochimique en témoignent largement.

Egalement mes vifs remerciements s'adressent à M. Albert Soler Gil Professeur et Directeur du Laboratoire des Isotopes au niveau de la Faculté de Géologie de l'Université de Barcelone – Espagne, pour ses orientations et ses conseils lors de la formation effectuée traitant des isotopes et géochimie des eaux souterraines.

Aussi, à tous mes collègues des Directions Régionales de l'ANRH Ouargla et Adrar, en particulier ; Mme Messai Zineb laborantine à l'ANRH de Ouargla, mes amis et collègues doctorants, respectivement Younes Halassa et Adel Abdelali. Qu'ils trouvent tous mes vifs remerciements.

Je suis reconnaissant pareillement envers mon cousin, frère et beau-frère Hakim Senoussi Professeur et chercheur à l'U.K.M Ouargla, qui n'a cessé de m'encourager à poursuivre mes études post-graduées.

Aussi à M. A. Zahrouna Directeur Régional de l'ANRH de Ouargla, pour son soutien moral et physique sans oublier bien sûr M. A. Boudjema, Maître de Conférence à l'Université de Tlemcen ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'élaboration de cette thèse.

Je voudrais tout spécialement remercier ma femme qui a souffert de mes absences répétées, la première ayant partagé les moments difficiles que nous avons traversés le long de mon parcours doctoral et qui n'a cessé de m'encourager à finaliser le présent travail.

DIEU Merci.

C'est...

À la mémoire de ma mère,

*À la mémoire de mon cousin et beau-frère Badro en voyage éternel,
Que Dieu leurs accorde la paix éternelle et les accueillent dans son vaste
paradis*

*À la mémoire de Mon très cher Père en témoignant de ma grande
reconnaissance, que Dieu puisse l'avoir en sa sainte miséricorde et que
ce travail soit une prière pour son âme. Baa, j'espère que ce travail est le
fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation, ma
formation et mes études.*

À tous les membres de ma famille et belle-famille,

À tous mes frères et sœurs, mes beaux-frères et belles-sœurs,

À tous mes neveux et nièces,

À mes enfants : Lina, Badro et Zekzou,

*À ma très chère épouse Lylia, depuis que je t'ai connue, tu n'as
cessé de me soutenir et de m'épauler.*

...que je dédie ce modeste travail

Résumé :

Pour leurs intérêts géologiques et économiques de ses ressources naturelles, le Sahara occidental a fait l'objet de différentes études depuis bien longtemps où le Touat, Gourara et Tidikelt, constituent cette partie de ce bassin. Parmi ces ressources qui le caractérisent, les niveaux gréseux perméables d'âge Crétacé Inférieur dit "Albien ou Continental Intercalaire" qui constituent de bons réservoirs d'eau tant quantitative que qualitative. Cependant cette nappe qui demeure très exploitée se caractérise par une recharge très insignifiante.

La présente étude axée principalement sur l'analyse hydrogéochimique des eaux de la nappe du Continental intercalaire (C. I) dans la partie occidentale du bassin SASS combinée avec d'autres approches, constitue l'unique étude pluridisciplinaire où de nombreux appuis ont été traités, notamment géologique, hydrogéologique, hydrochimique, géochimique, statistique et isotopique, et ce afin de visualiser à l'échelle régionale le fonctionnement du mécanisme hydrogéochimique de cet aquifère.

L'étude géologique ayant confirmé l'hétérogénéité de l'aquifère, a permis de mettre en évidence les contacts structuraux normaux et anormaux entre les différentes formations géologiques. L'hydrogéologie nous a permis de suivre l'évolution piézométrique et son influence sur la composition chimique des eaux qui indique que l'exploitation de l'aquifère a atteint une limite critique, au-delà de laquelle l'exploitation excessive induirait une dégradation néfaste sur l'état qualitatif de la ressource hydrique. L'hydrochimie, nous a déterminé d'une part, les processus d'acquisition de la minéralisation des eaux suivant les axes principaux des écoulements et d'autre part a ressorti les différents faciès hydrochimiques complexes sur la base de la dominance respective des cations et anions. La géochimie, a joué un rôle important dans la spéciation et l'origine de la minéralisation. Les résultats de l'analyse des isotopes stables de l'environnement (Oxygène O^{18} et Deutérium H^2) sont compatibles et en parfait accord avec ceux issus de l'hydrochimie et des statistiques.

Mots Clés :

Climat aride – Erg occidental – Continental Intercalaire – Ressource peu renouvelable – hétérogénéité lithologique – Hydrochimie – Isotopes stables.

ملخص :

نظراً لأهمية الموارد الطبيعية التي تتميز به منطقة توات - قورارة - تيديكلت والمتواجدة بالجنوب الغربي للصحراء الجزائرية التي هي محل دراستنا، مكنتها منذ مدة بإدراج عدة دراسات علمية قام بها باحثون من الداخل والخارج في جميع الميادين ومن بين هذه الموارد الأساسية، المياه الباطنية المعتبرة للمتداخل القاري المتمركزة بتشكيلات الحجر الرملي التي تكونت في العصر الطباشيري السفلي والتي تسمى عادة بالحوض الالبياني. وما يميز هذا المجمع المائي رغم وفرة مياهه الا انه نضرا للاستغلال الغير عقلاني والمستمر لهذا المورد مع حدودية شحنه وتشبعه طبيعيا، أصبح يطرح اشكالا كبيرا مما أثر سلبيا على نوعية المياه المستخرجة والمستغلة حاليا خاصتا لما نتكلم على الميزة المناخية الحارة والجافة في نفس الوقت لهذه المنطقة.

وتركزت هذه الدراسة أساسا على التحليل الهيدروجيوكيميائي لمياه الحوض في جزئه الغربي للجنوب الصحراوي بالاقتران مع مناهج أخرى. والدراسة التي نحن في صدد معالجتها تعتبر الوحيدة من نوعها حاليا وذلك راجع الى تعدد التخصصات التي طرحت في معالجتها مع الاخذ بعين الاعتبار الكثير من الدعائم، بما في ذلك الدعم الجيولوجي والهيدرولوجي والكيميائي والجيوكيميائي والإحصائي والنظائر، وهذا من أجل وضع صورة شاملة على نطاق إقليمي كيفية عمل الآلية الهيدروجيوكيميائي في هذا الخزان المائي الجوفي.

وكشفت الدراسة الجيولوجية، التي أكدت عدم تجانس طبقات المياه الجوفية عن وجود اتصالات هيكلية طبيعية وغير طبيعية بين مختلف التشكيلات الجيولوجية، اما الدراسة الهيدروجيولوجية فقد سمحت لنا عن طريق الاحتذاء الزمني لتطور المستوى البيوزومتري وتأثيره على التكوين الكيميائي للمياه الباطنية مما يدل على أن استغلال طبقة المياه الجوفية قد وصل إلى حد خطير، ومن ثم فإن الاستغلال المفرط سيؤدي حتما إلى تدهور في نوعية هذا المورد المائي. اما الجيوكيمياء فقد لعبت دوراً هاماً في تحديد أصل الملوحة لهذا المورد الطبيعي اما بالنسبة لنتائج تحليل النظائر المستقرة لعنصري الأوكسجين (O^{18}) وديوتريوم (H^2) فقد بينت النتائج انها متوافقة تماما مع النتائج التي تم الحصول عليها في الدراسة الهيدروكيميائية والاحصائية.

الكلمات الأساسية :

المناخ الجاف – العرق الغربي – المتداخل القاري – مورد مائي قليل التجدد – التباين في نوعية الترسبات – الهيدروكيمياء – النظائر المستقرة.

Abstract:

For the geological and economic interests of its natural resources, Western Sahara has been the subject of various studies for a long time where the Touat, Gourara and Tidikelt make up this part of the basin. Among these resources that characterize it, the permeable sandstone levels of Lower Cretaceous age known as "Albian or Continental Intercalary" that constitute good water reservoirs both quantitatively and qualitatively. However, this water table, which remains highly exploited, is characterized by a very insignificant recharge.

The present study focused mainly on the hydro geochemical analysis of the Continental Shelf (C. I) aquifer in the western part of the SASS basin, combined with other approaches, is the only multidisciplinary study where numerous supports have been treated, including geological, hydrogeological, hydro chemical, geochemical, statistical and isotopic, in order to visualize on a regional scale, the functioning of the hydro geochemical mechanism of this aquifer.

The geological study having confirmed the heterogeneity of the aquifer, the normal and abnormal structural contacts between the different geological formations were revealed. Hydrogeology has enabled us to monitor the piezometric evolution and its influence on the chemical composition of the waters, which indicates that the exploitation of the aquifer has reached a critical limit, beyond which excessive exploitation would lead to a harmful degradation of the qualitative state of the water resource. The hydrochemistry, on the one hand, determined the acquisition processes of water mineralization along the main flow axes and, on the other hand, revealed the different complex hydrochemical facies on the basis of the respective dominance of cations and anions. Geochemistry played an important role in the speciation and origin of the mineralization. The results of the analysis of stable environmental isotopes (Oxygen O18 and Deuterium H2) are compatible and in perfect agreement with those issued from hydrochemistry and statistics.

Keywords:

Arid climate – Western Erg – Continental Intercalary – Hydrochemistry – not very renewable resource – Lithological heterogeneity Hydrochemistry – Stable isotopes – Hydrochemistry and statistics.

Préambule :

La nappe du Continental Intercalaire, connue et exploitée depuis des siècles dans les régions où elle affleure notamment : le Tidikelt, le Touat et le Gourara. Il faudra toutefois attendre les premières explorations géologiques du Sahara (L.Ville 1872) pour qu'une extension géographique beaucoup plus importante de cette nappe soit soupçonnée. C'est probablement les géologues Flamand et Rolland les premiers en 1892, qui ont démontrés l'unité du système hydraulique gréseux rencontré et capté dans tout le Sahara septentrional. Ensuite les études géologiques et de prospections géophysiques ainsi que les forages pétroliers qui ont permis de progresser et de préciser peu à peu les limites stratigraphiques et géographiques de la formation aquifère.

Par la suite avec la naissance de l'hydrogéologie quantitative dans les années 1950 et les travaux de A. Cornet et de son équipe acquiescèrent de disposer d'une image convenable et plus précise de la nappe albiennne et ce dès 1960 malgré l'ampleur de la tâche liée à l'immensité du domaine d'étude.

En 1963, une étude générale de la nappe a été effectuée par le Service de Conservation des Gisements d'Hydrocarbures et le BURGEAP pour le compte de l'Organisme Technique de Mise en Valeur des Richesses du Sous-sol Saharien. Ce travail, essentiellement bibliographique, utilisait la documentation provenant des compagnies pétrolières et des divers Ministères concernés (Reconstruction, Travaux Publics et Transports). Il constitue la première grande synthèse de la nappe et présente l'analyse des différents facteurs géologiques et hydrogéologiques nécessaires à la définition de la géométrie du réservoir et surtout à l'établissement du bilan hydraulique. On y trouve également une réflexion sur les problèmes posés par un accroissement important des prélèvements, par lequel un modèle sur cuve rhéoelectrique a été construit par la compagnie Géo hydraulique en 1965 dans le but de monter un modèle conceptuel afin de déterminer les effets d'exploitations sur la nappe où de gros prélèvements ont été enregistrés dans certains endroit du bassin.

A la suite de l'ensemble de ces travaux, les différents chercheurs commencent à en disposaient d'une bonne connaissance du système aquifère par l'intermédiaire des cartes piézométriques et de celles des paramètres hydrauliques (perméabilité, épaisseur du réservoir, porosité, Transmissivités, etc.). Toutes ces informations l'ont permis de tracer les axes d'écoulements principaux des eaux albiennes, de définir les zones d'alimentation et d'exutoire et d'approcher les différents termes d'estimations de leurs recharges. Cependant, malgré tout, ces connaissances ne permettaient pas de planifier une exploitation plus intensive de la ressource en eau rendue nécessaire par l'accroissement démographique qui augmentait surtout pour les besoins en eau pour l'agriculture.

Face à cette demande sans cesse les responsables des services de l'hydraulique des 2 pays, algériens et tunisiens ont largement collaborés et lançaient entre 1968 et 1972 une étude sous l'égide de l'Unesco intitulée « Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional » éditée en avril 1972. Elle comporte trois parties principales : une synthèse géologique et hydrogéologique remarquable de l'ensemble des données existantes, d'ailleurs c'est encore la meilleure et la plus complète jusqu'à nos jours pour cette nappe (C.I).

La deuxième partie est consacrée à la description et au calage du modèle mathématique de la nappe. Ce modèle fonctionnait en régime permanent et transitoire sur l'épisode 1956-1971. L'utilisation du modèle pour simuler diverses hypothèses de développement fait l'objet de la troisième partie.

Ce modèle a été remis en service en 1983 dans le cadre d'une actualisation de l'étude E.R.E.S.S rendue nécessaire par le changement de certains facteurs techniques et socio-économiques. Cette actualisation a été l'occasion de tester la représentativité du modèle sur la période 1972-1981. Le rapport « Actualisation de l'étude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional » Rapport PNUD Projet RAB/80/011 rend compte de ce travail, qui a été poursuivi dans le même cadre appelé PNUD - 1984.

Ensuite en 1992, l'Observatoire du Sahara et du Sahel (O.S.S) organisait au Caire, le premier atelier sur les aquifères des grands bassins transfrontaliers marquant ainsi le lancement de son programme « Aquifères des Grands Bassins » qui conduira à la naissance du « projet S.A.S.S » en septembre 1997, après une série de séminaires et d'ateliers régionaux.

Et c'est le premier projet qui a pris en considération le bassin dans son intégralité, jusqu'à ses limites naturelles. L'an 2003 correspond à l'année de naissance et de mise en service de ce modèle mathématique (S.A.S.S-2003).

Entre ces différentes années citées précédemment, les études de recherches, les rapports, les thèses d'états, les articles scientifiques, les mémoires d'ingénierats et de masters, traitants ce gigantesque aquifère que ce soit à l'échelle locales et du bassin ne cessent d'apparaître, puisque plus on associe de nouvelles données plus on s'ouvre vers d'autres thématiques et plus on découvre de nouveaux résultats. Et c'est dans ce contexte que se situe le présent travail.

INTRODUCTION GENERALE

L'étude du "Continental Intercalaire" dans le bassin occidental du Sahara a fait l'objet de plusieurs études depuis longtemps pour ses intérêts géologiques, économiques et énergétiques. Les niveaux gréseux d'âge Crétacé Inférieur "Albien dit continental intercalaire ou C.I" constituent de bons réservoirs d'eau, tant quantitatif que qualitatif. Où les régions de Touat, Gourara et Tidikelt, correspondent à cette partie de bassin occidental du Sahara algérien. Ce terme oasien composé de trois noms, se distingue pertinemment de toutes les autres zones d'oasis sahariennes par l'extrême développement d'un système spécifique à la région souvent appelé foggaras : (sources captées à fleur du sol), et qui dit Foggara dit : eau, agriculture, source de vie. Ce système traditionnel découvert depuis plusieurs centaines d'années est pris en compte comme étant l'unique moyen de mobilisation de la ressource hydrique pour les besoins en eau des agglomérations. Par ailleurs, et avec le développement technologique ainsi que la découverte de l'énergie et des techniques de forages modernes on a fait appel au forage rotary qui a permis la mobilisation de cette ressource en eau qualifiée de bonne qualité (700 à 1100 mg/L de Résidu sec) avec un niveau hydrostatique plus ou moins proche de la surface du sol.

Ces opportunités accompagnées d'un développement démographique rapide et d'une extension urbaine et agricole élevée, enregistrée ces dernières années vue la vocation agricole de la zone d'étude, les besoins en eau n'ont cessé de croître. On enregistre actuellement plus de 1000 forages implantés le long de l'axe reliant le Tidikelt au Sud-Est jusqu'au Gourara au Nord-Ouest en passant par le Tout à Adrar, sans compter les centaines de puits des Foggaras, dont la plupart sont actuellement en services. En face à cette demande sans cesse et en l'absence d'une gestion rationnelle de cette ressources peu renouvelable, soumise à un climat aride et sec, dominée à un climat aride et sec, les conséquences ont été néfastes sur l'état qualitatif et quantitatif des eaux et des sols de la région. En effet, nous avons enregistré : la disparition de l'artésianisme de la nappe dans plusieurs régions de la zone d'étude, tarissement d'un nombre important de foggaras, rabattement intense du niveau hydrostatique de la nappe suite à l'exploitation excessive, dégradation de la qualité chimique de l'eau, contamination par les polluants organiques marquée au niveau de nombreuses foggaras.

Les études antérieures effectuées le long des 2 bassins (oriental et occidental) ont montré une large différence du point de vue caractéristique de l'aquifère de C.I dans chacun d'eux. Parmi les particularités qui diffèrent la nappe albienne dans cette partie occidentale, la faible profondeur (toit ne dépasse pas les 250m), la température (aux alentours de 28°C), l'hétérogénéité lithologique qui caractérise la matrice aquifère (grès argileux, grès sableux, sables gréseux, grès calcareux,...etc.), l'hétérogénéité des faciès influencée par le chimisme de l'eau, l'aspect structural qui caractérise le Crétacé inférieur ; affecté par des failles orientées Nord-Sud, aussi l'existence d'anomalies stratigraphiques mettant en contact anormal les formations primaires avec celles du secondaire (absence de l'Aptien dans certains endroits).

Au vu de l'absence d'une étude hydrogéochimique de la nappe du CI à l'échelle du bassin occidental regroupant les principales localités en l'occurrence les Touat, Gourara et Tidikelt, nous avons jugé utile de mettre en exergue les aspects géochimiques de la minéralisation des eaux de la nappe étudiée. Le but principal de cette étude est de contribuer à l'étude de l'origine du chimisme des eaux au contact avec la lithologie de la matrice aquifère faisant appel à une approche pluridisciplinaire, notamment géologique, hydrogéologique, hydrologique, hydrochimique, géochimique, statistique et isotopique, dans le but de comprendre le fonctionnement hydrogéochimique des de ce système aquifère l'échelle locale et régionale.

Le présent travail vient compléter les travaux antérieurs, telles que les approches s'articles sur :

a) L'étude géologique régionale : en s'appuyant sur l'outil informatique et les données sur les logs de forages pour élaborer 2 modèles en 3D, l'un lithologique et l'autre stratigraphique, afin de ressortir d'une manière corrélative le mode de superposition et de contacts litho stratigraphique entre les différentes formations et éventuellement de repérer les anomalies structurales en relation avec le système aquifère.

b) L'étude des caractéristiques hydrochimiques des eaux pour déterminer l'origine du chimisme et la source de chaque élément chimique, en s'appuyant sur des mesures in situ paramètres physiques (pH, CE...) et des analyses chimiques portant sur les éléments Na, Ca, Mg, SO₄, Cl...etc. ainsi que des analyses isotopiques portant sur le deutérium et l'oxygène18.

c) L'étude géochimique des eaux est basée sur la modélisation thermodynamique chimique, par l'outil informatique (PhreeqC I 3.4) afin de déterminer les molalités et les activités ioniques des éléments chimiques analysés ainsi que les indices de saturation des minéraux prépondérants qui rentrent dans la composition de la matrice minéralogique de l'aquifère.

Cette thèse subdivisée en cinq parties y compris l'introduction et la conclusion générale, est structurée comme suit :

1) Une première partie consacrée aux généralités sur la zone d'étude. Elle fournit un aperçu général sur les connaissances à l'échelle de la zone d'étude.

Elle résume le cadre physique de la zone d'étude, suivi du volet géographique, géomorphologique, hydroclimatologique, géologique et hydrogéologique. Elle englobe les chapitres (I, II, III, IV et V).

2) Une deuxième partie qui correspond au chapitre (VI), portant sur la méthodologie de travail. On étudiera dedans, l'origine ou la source des différentes données avec lesquelles on a pu élaborer le présent travail, sans oublier les programmes et logiciels informatiques utilisés ainsi que la définition de certains concepts théoriques.

3) Et une troisième partie qui sera consacrée aux résultats issus par le biais de l'étude de différentes approches pouvant y contribuer à expliquer certains mécanismes hydrogéochimiques qui caractérisent les eaux albiennes dans la partie occidentale du bassin SASS. En effet, cette partie rassemble les chapitres suivants :

Chapitre VII, consacré à l'approche géologique et hydrogéologique dans le but d'établir le modèle géologique de la région ainsi que d'étudier l'évolution dans l'espace et dans le temps de la piézométrie de la nappe.

Chapitre VIII, consacré à l'approche hydrochimique et à l'application de la méthode de calcul des indices de qualités des eaux (GWQI) utilisée pour les eaux souterraines de la région d'étude.

Chapitre IX, dans lequel on étudiera l'approche statistique descriptive avec l'application de l'ACP. Cette méthode nous permettra de mettre en évidence la répartition spatiale des différents éléments chimiques lors de leur évolution ainsi que la ressemblance et la relation que peut se présenter entre eux.

Et chapitre X, consacré à l'approche géochimique et isotopique, où des concepts en géochimie devront être traités dans le but de définir l'origine du chimisme des eaux de cet aquifère.

4) Une quatrième et dernière partie sous forme d'une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus qui aboutira à des recommandations et des perspectives de recherche.

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a notepad. The image is partially obscured by a rounded rectangular frame that contains the text.

Première partie

Cadre physique

Introduction de la Partie n° 01.

Cette partie très utile dans le présent travail, puis qu'elle situe d'une manière générale toutes les généralités qui caractérisent la zone d'étude. Cette partie scindée cinq chapitres, d'où dans le Chapitre I, on évoquera le cadre physique de la zone à savoir la superficie de l'aire de l'étude, aussi la situation géographique, le relief et toutes les généralités et informations géographique à l'échelle de la zone d'étude.

Le Chapitre II, résumera les spécificités hydro-climatiques de la région. Ce dernier a été scindé en deux parties (Climatologie et Hydrographie), la 1^{ère}, sera consacrée sur les paramètres climatiques des 3 régions (Gourara, Touat et Tidikelt) notamment la température, les précipitations, les vents, l'évaporation et l'humidité relative. La seconde sera axée sur l'étude hydrographique dans laquelle on ressortira les différents sous bassins spécifiques à la zone et surtout l'ensemble des oueds qui longent la partie occidentale du bassin.

Le Chapitre III, sera consacré aux caractéristiques géologiques de la zone d'étude. Ce chapitre, vu son importance dans le présent travail résumera en détail l'ensemble des particularités géologiques tels que les différents étages géologiques qui affectent la région, ainsi que les caractéristiques structurales, paléogéographiques et tectoniques de cette partie occidentale du Sahara.

Le Chapitre IV, dans lequel on évoquera toutes les particularités hydrogéologiques de la zone d'études notamment les caractéristiques physiques (épaisseur, profondeur, extension latérale, ...etc.), hydrodynamiques de la nappe (piézométrie, débit, rabattement, perméabilité, coefficient d'emmagasinement, ...etc.), et lithologie de l'horizon aquifère.

Le dernier Chapitre n° V, sera consacré à l'étude de la ressource hydrique à l'échelle régionale. Où on exposera les résultats obtenus lors du dernier inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits, effectué dans la zone d'étude en 2012. Et dans le but de visualiser l'état actuel de cette ressource et son évolution dans le temps et dans l'espace, une étude de synthèse comparative a été faite.

CHAPITRE I.

I. CADRE PHYSIQUE ET CARACTERISTIQUES DU MILIEU.

I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.

Située en plein cœur du Sahara algérien, la région d'étude (figure n° 01) est située au Sud-Ouest du pays à plus de 1200 km d'Alger. Géographiquement, la zone d'étude se situe entre les méridiens X1 : 1° 22' W et X2 : 3°14'E, et les parallèles : Y1 : 26° 28'et Y2 : 30° 19' Nord.

Caractérisée par une superficie totale de l'ordre de près de 200.000 Km², la zone d'étude est découpée en 03 régions bien distinctes : le Gourara au Nord, le Touat au centre et le Tidikelt au Sud.

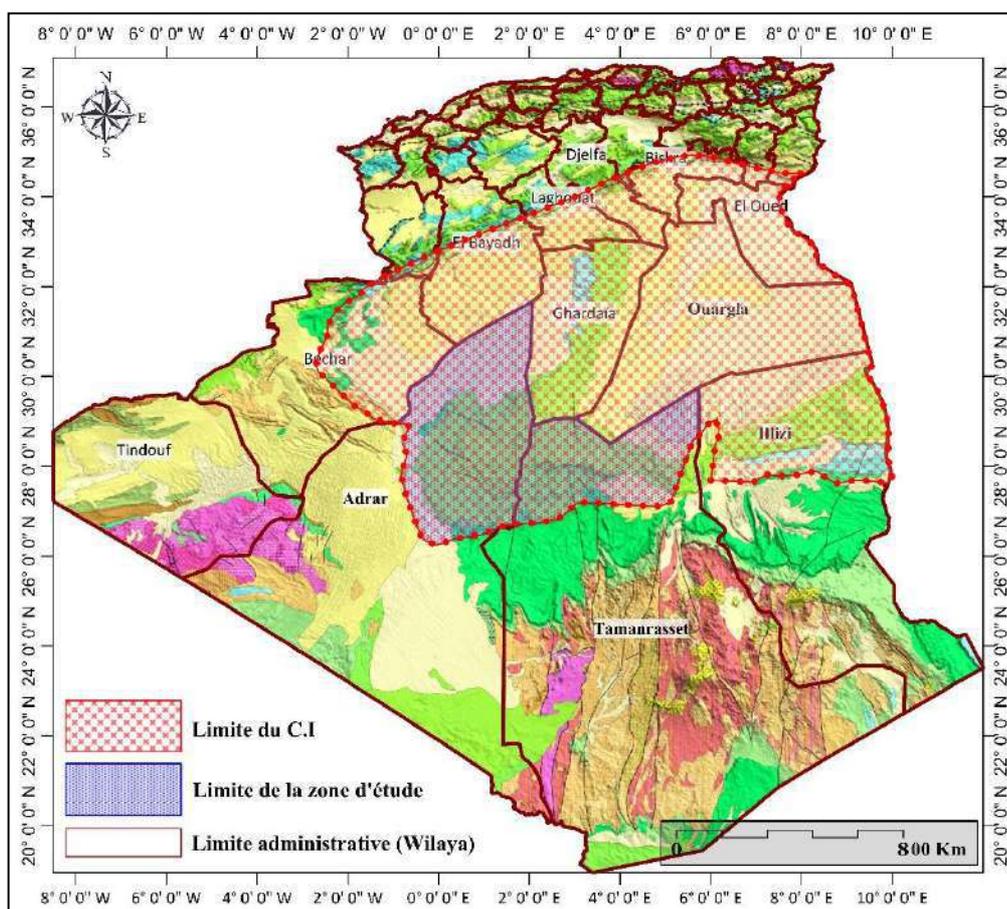


Fig. n° 01. Situation géographique de la zone d'étude.

Ces 3 entités géographiques qui chevauchent entre deux wilayas, Adrar et Tamanrasset (figure n° 01), sont cernées par :

- Le Grand Erg occidental et la Saoura au Nord-Ouest.
- L'Erg Chèche au Sud.
- Le plateau de Tademaït au Nord-Est.

Comme l'illustre la carte ci-après (figure n° 02), la zone d'étude est constituée d'une chaîne d'oasis en forme de croissant. Dont tous sont implantés sur des massifs dunaires.

Ils sont soumis à un processus continu d'instabilité du sol suite au phénomène d'ensablement. Le plus grand nombre d'oasis se concentre principalement dans la région de Touat on compte près de 150 Oasis et Ksars, le reste est éparpillé à travers les autres régions (Gourara et Tidikelt).



Fig. n° 02. Carte de localisation des oasis caractérisant la zone d'étude.
(Carte extraite de l'Atlas des colonies françaises, P. PELET, 1900, Carte n°07)

I.2. Cadre physique.

L'analyse du M.N.T (Model Numérique de Terrain) permet de mettre en évidence les différentes formes morphologiques du relief qui caractérisent la zone d'étude.

Comme l'indique-le model numérique de terrain traité à résolution de 30 m (figure n° 03), on constate que l'aire de l'étude qui ressemble à une grande zone allongée sensiblement orientée Nord-Sud se caractérise par les quelques traits morphologiques suivants :

a) L'Erg.

Correspond aux massives dunes de sables situées au Sud-Ouest de la région à s'avoir l'Erg E'Cheche et au Nord-Ouest par le Grand Erg Occidental, d'autres petits Ergs abritent une végétation provisoire où se sont formés artificiellement suite aux obstacles installés contre l'envahissement des palmeraies par les dunes de sable dispersés dans l'étendue de la région.

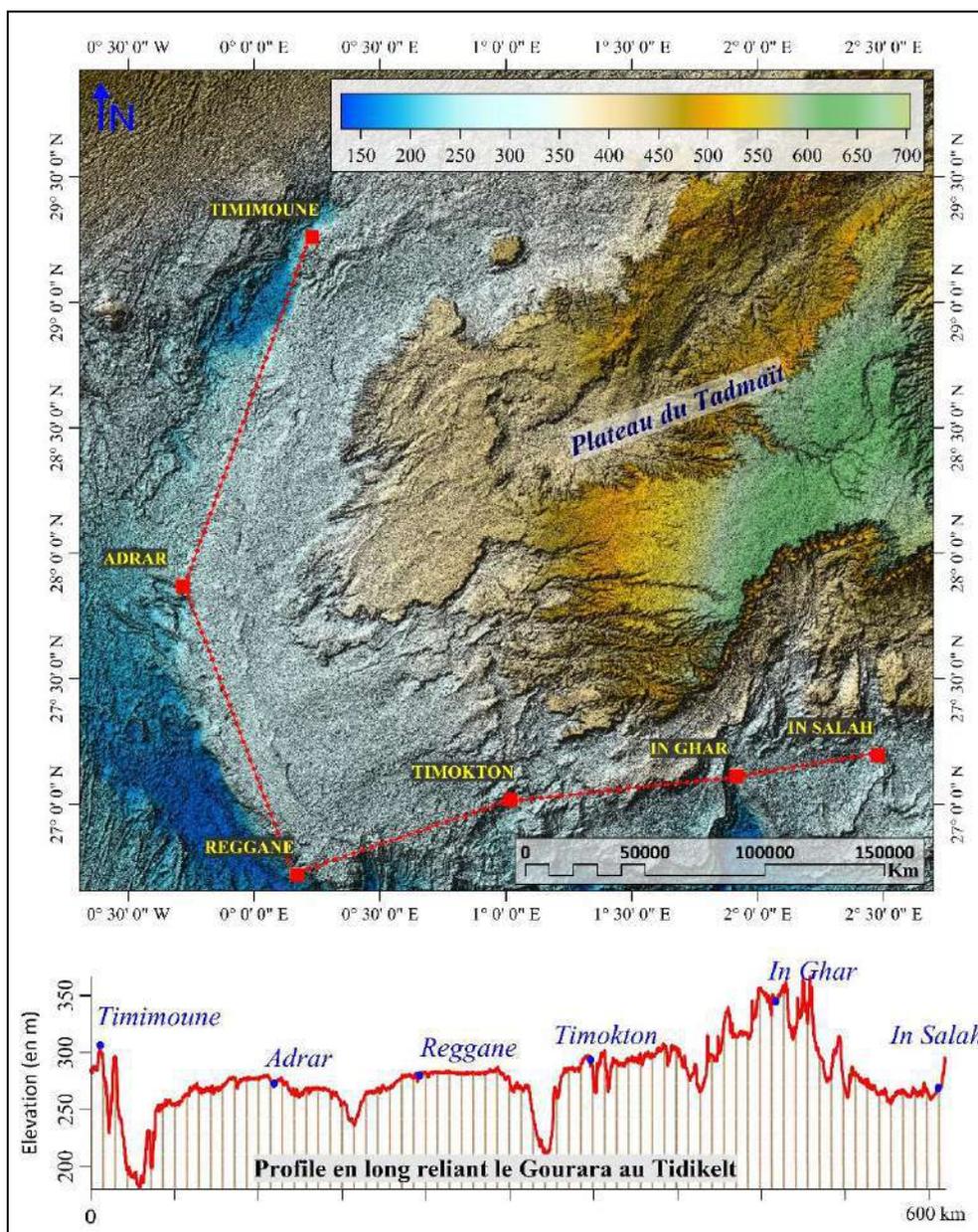


Fig. n° 03. Carte de relief en 3D avec tracé de profil rattachant :
Le (Gourara – Touat – Tidikelt)

b) Le Reg.

C'est une surface plane couverte de graviers, de sables et de débris de roches, il limite l'extrémité Ouest du piedmont du plateau de Tademaït. On le rencontre sur toute l'étendue Sud de la zone d'étude.

c) Les Dépressions.

Elles se localisent généralement en aval des palmeraies des assises. Elles se représentent sous forme de sebkhas qui s'étalent tout le long de la rive gauche de la zone d'étude.

La plus grande dépression qui caractérise la zone, se situe à l'Ouest de la région de Timimoune, souvent appelée par la sebkha de Timimoune est définie par une superficie estimée à 50195 Km² (après digitalisation). Cette sebkha est probablement est la plus pittoresque, et ce par sa bordure de falaises et de dunes, avec ses 40 Km de long sur 6 à 7 Km de large, qui serait probablement alimentée par les Oueds Sud atlasiques passant sous le Grand Erg occidental et aussi par la nappe albiennne. En plus Cette dernière peut correspondre à une zone de recharge de la nappe albiennne dans cette partie du bassin. D'après des écrits de E. GAUTIER et A. MEYENDORF, les ancêtres du Touat racontaient qu'il y'avait des lacs et que les habitants circulaient en bateau d'un ksar à l'autre.

d) Le Plateau.

Qui correspond au relief le plus dominant de la zone d'étude, il constitue le relief de ces régions, ce dernier qui a une forme tabulaire rocheuse, couvre de très vastes surfaces. En général, il limite la zone d'étude au Nord et au Nord-Est (souvent appelé le plateau de Tademaït).

Quant à l'altitude moyenne de la zone d'étude par rapport au niveau de la mer, et selon le profil en long tracé, on remarque que cette altitude n'est pas uniforme et le terrain qui lui caractérise est très accidenté. En moyenne, elle varie entre 150 et 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.

e) Les vallées.

Puis qu'il s'agit d'une zone semi-aride, le réseau hydrographique est peu développé et les écoulements de surfaces étant rares et sporadiques. Toute fois les principales vallées qui longent l'aire de l'étude sont celles qui descendent du Tademaït : O. Tilia qui coule vers le Touat, O. Souf qui se perd dans les sables de l'erg er Rih, au nord d'In Rhar. Au sud d'Aoulef s'étend la longue dépression de la sebkha Mékerrhane, parcourue par l'oued Djaret dont le cours est très ensablé. Les oueds Sidi Moussa et Botha qui parcourent le massif de l'Immidir sont plus humides et offrent des pâturages plus intéressants.

Il est à signaler également que le Gourara et le Touat rentrent dans le bassin de l'oued Messaoud. De ce côté le bassin est limité par l'Atlas et le Tademaït. On sait pourtant que la plus grande partie du Tademaït déverse vers les oasis ses eaux d'orages. On connaît aujourd'hui l'existence de très grands oueds, tout à fait comparables à celui de l'oued M'Ya. Ils coulent tous à l'opposé de ce dernier, notamment, les oueds : Tilia, Ilatou, R'zellan, Sbaa, Aflissès, etc. (Cette partie sera développée avec plus de détails dans les chapitres suivants).

I.3. Aspect géomorphologique et pédologique par région.

I.3.1 Région du Gourara (Nord).

Le Gourara représente la région de contact entre le Grand Erg et le plateau du Tademaït. Elle est organisée pour l'essentiel autour de la sebkha de Timimoune. Sur ses bords s'accrochent plusieurs oasis. Au nord le plateau disparaît sous le Grand Erg Occidental, au Nord-Ouest on observe de nombreux palmiers disséminés entre les dunes de sables pour marquer le pays du Taghouzi.

Cependant au Nord-Est se trouve le Tinerkouk et au sud, à mi-chemin avec le Touat on rencontre les palmeraies de l'Aougrouit.

C'est finalement une région très plane à environ 300 m d'altitude, parsemée de placages sableux qui deviennent plus nombreux à mesure qu'on s'approche de l'Erg. Ce qui caractérise le Gourara c'est le couvert végétal qui est peu importante voire nulle sur la hamada.

Dans le cadre de l'élaboration du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes par le B.R.L - Ingénierie et BNEDER (1994), on dénombre environ 5 000 ha de palmeraies, dont les plus importantes se trouvent à Timimoune (1 447 ha) et Charouine (1 100 ha).

I.3.2. Région du Touat (Centre).

Cette région qui se situe entre le plateau de Tademaït à l'Est et la série de dépression plus ou moins continue le long de laquelle se localisent les Ksars et les palmeraies du Touat. Schématiquement il s'agit d'un plateau avec une pente très faible. D'après l'étude B.R.L - Ingénierie et BNEDER (1994), lors de leurs prospections pédologiques effectuées dans la région, ils ont enregistré ce qui suit :

- Des encroûtements gypso-calcaires dans les zones relativement basses.
- Les vestiges d'une croûte superficielle de calcaire gréseux complètement fragmentée dans les zones hautes du plateau générant une charge de surface très grossière (paysage de reg).
- Des traces de sel et de gypse à travers les fissures des niveaux compacts (dalle gréso-calcaire) et dans les interstices de sable limoneux et les niveaux graveleux.
- Des dépressions, qui dans certains cas semblent évoluer vers des Sebkhas (forte concentration des sels et du gypse).

I.3.3. Région du Tidikelt (Sud).

Cette zone limitée au Nord par la bordure du plateau de Tademaït, se trouve cernée respectivement entre la commune d'Inghar au Sud et au Sud-Ouest et la localité de Foggaret E'Zoua au Sud-Est.

Morphologiquement, il s'agit d'un plateau légèrement bouclé, comportant des dépressions à accumulation gypseuses et des parties plus hautes qui correspondent soit à l'accumulation de graviers donnant naissance à un reg très fin, soit à l'affleurement d'une croûte gypseuse fragmentée. Tandis qu'au Sud, au Sud-Ouest et au Centre, de cette partie de la zone d'étude on constate des fortes concentrations de sables sous forme de dunes vives.

D'après le même rapport de l'étude B.R.L, 1994, l'analyse pédologique effectuée à travers les sols de la région, a donné les résultats suivants :

- Des efflorescences salines et des encroûtements salins dans les dépressions qui semblent évoluer vers des Sebkhas.
- Une croûte gypseuse à gypso-calcaire qui affleure au Sud de la localité de In Salah et par endroit recouverte par un léger voile sableux.
- Des buttes témoins localisées en bordure et à une certaine distance du plateau de Tademaït.
- Des sables dunaires concentrés surtout aux alentours d'In Salah et à la limite Sud, Sud-Ouest de la zone d'étude.

CHAPITRE II.

II. HYDROCLIMATOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.

II.1. CLIMATOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.

La région d'étude est caractérisée par un climat saharien, hyper aride avec des pluies très faibles et très irrégulières, l'étude du climat a été réalisée sur la base des données récupérées auprès des 3 stations météorologiques de l'ONM situées respectivement au niveau de Timimoune, d'Adrar et d'In Salah.

Tab. n° 01. Localisation des 03 stations météorologiques (source O.N.M).

Stations	Code	Long. déc.	Lat. déc.	Z (m)	Années d'observations
Adrar	606 - 2000	-0,283 W	27,883 N	279	de 2010 à 2014
In-Salah	606 - 3000	0,246 E	27,200 N	268	
Timimoune	606 - 0700	0,283 E	29,250 N	312	

La carte ci-dessus (figure n° 04), illustre que la région d'étude se situe dans une zone caractérisée par un apport pluvial annuel très faible. Les données climatiques traitées sont établies à partir des observations des 05 dernières années (allant de 2010 à 2014), issues des trois (03) stations sus indiquées.

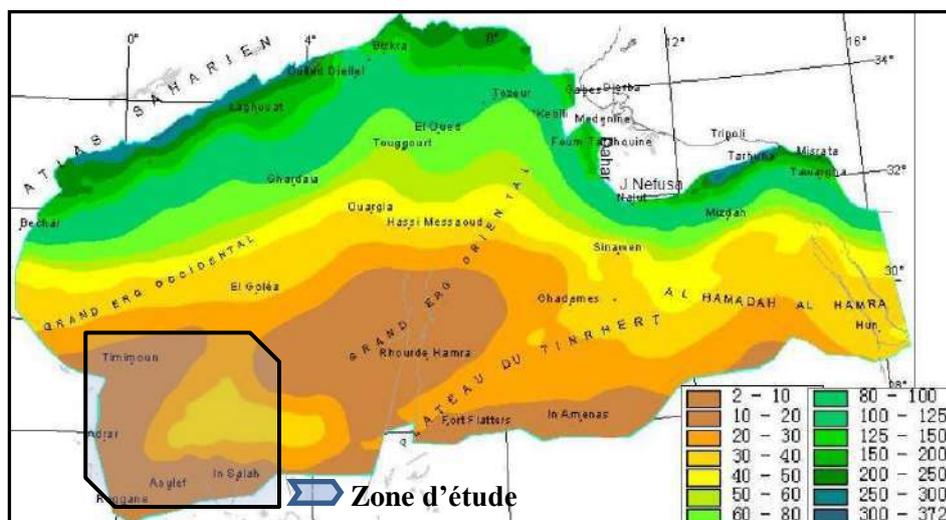


Fig. n° 04. Carte des isohyètes (exprimée en mm) dans le domaine du S.A.S.S (D'après DUBIEF, modifié par l'O.S.S. 2003).

II.1.1. Les Températures.

La température qui est un facteur essentiel pour la détermination du régime climatique de la région, joue un rôle prépondérant dans l'établissement du bilan hydrologique. Il faut signaler également que les écarts de variation de cette température influent d'une manière efficace sur le facteur évaporant et par conséquent sur le comportement du chimisme de l'eau que ce soit en surface ou dans le sous-sol.

Sans oublier les autres facteurs qui peuvent influencer sur les variations de températures telles que le couvert végétal et les champs pétroliers (tels que les torches de flammes) qui accentuent la température de l'aire. Les données illustrées sur le (tableau n° 02), reportées sur l'histogramme (figure n° 05), nous indique que le mois de Juillet représente celui le plus chaud pour les 03 zones avec des moyenne mensuelles qui s'échelonne entre 38,1 et 38,9°C alors que le mois le plus frais c'est Janvier, avec une moyenne d'écart qui oscille entre 12,7 et 14,5°C. Une légère variation de températures à la hausse a été constatée entre d'In Salah et les deux autres régions.

Tab. n° 02. Moyennes mensuelles interannuelles des Températures enregistrées au niveau des trois stations (Année 2010 à 2014).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jui.	Aou.
Timimoune	32,9	26	18,2	12,8	12,8	14,8	19,98	25	29,3	34,4	38,1	36,4
Adrar	33,5	27,6	19,5	14	13,4	14,9	20,88	25,5	30,8	35,5	38,9	37,4
In Salah	35,3	28,3	18,4	11,8	13	16,7	22,48	27,3	31,6	36,3	38,8	37,8

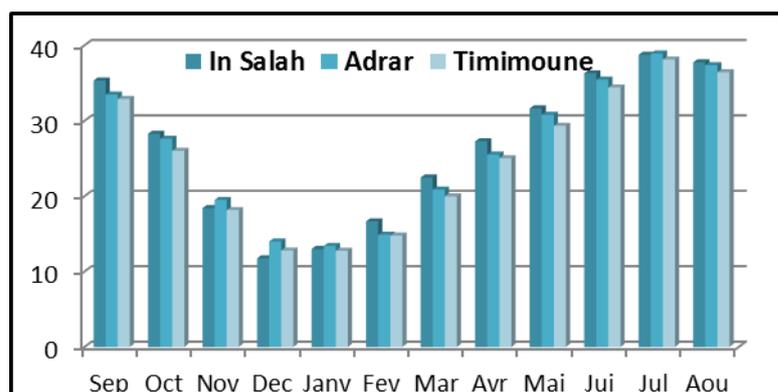


Fig. n° 05. Variations des moyennes mensuelles des températures (en °C)

II.1.2. Les Précipitations.

Les précipitations constituent la composante principale de l'hydrologie. La connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour apprécier l'état des réserves en eau du sol, la recharge et le régime des cours d'eau, néanmoins la faiblesse des précipitations c'est l'une des facteurs qui caractérisent le climat Saharien. Ces précipitations rares, irrégulières et parfois violentes, leur moyenne ne dépasse guère les 25 mm/an.

Tab. n° 03. Moyennes mensuelles interannuelles des Précipitations (en mm) enregistrées au niveau des 3 stations - Année 2010 à 2014).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jui.	Aou.
Timimoune	5,23	3,40	1,17	2,79	4,01	0,31	0,41	1,12	1,22	0,05	0,00	0,00
Adrar	0,81	0,79	2,44	0,61	0,36	0,00	1,68	0,00	0,20	0,41	0,00	0,00
In Salah	0,71	0,31	0,51	0,00	0,61	0,20	2,24	0,00	0,15	0,41	0,20	0,20

L'histogramme (figure n° 06), illustre les variations des moyennes mensuelles des 03 stations sur 5 années d'observations, où le mois de Septembre est le mois le plus arrosé avec une moyenne de l'ordre de 05 mm (valeur enregistrée au niveau de la zone de Timinoune à Gourara). Tandis que la plus faible qui est de 0,05 mm a été signalée au niveau de la station de In Salah (au Tdikelt).

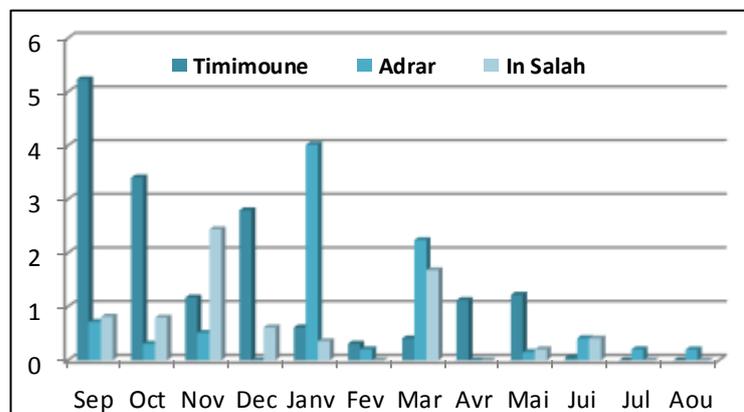


Fig. n° 06. Variations des moyennes mensuelles des précipitations (en mm)

II.1.3. Diagramme Ombro-thermique de Gaussen.

Le Diagramme Ombro-thermique de Gaussen (figure n° 07), qui met en évidence la moyenne mensuelle de températures en fonction des précipitations, où l'allure de la courbe permet de définir la durée de la période humide de celle de la période sèche.

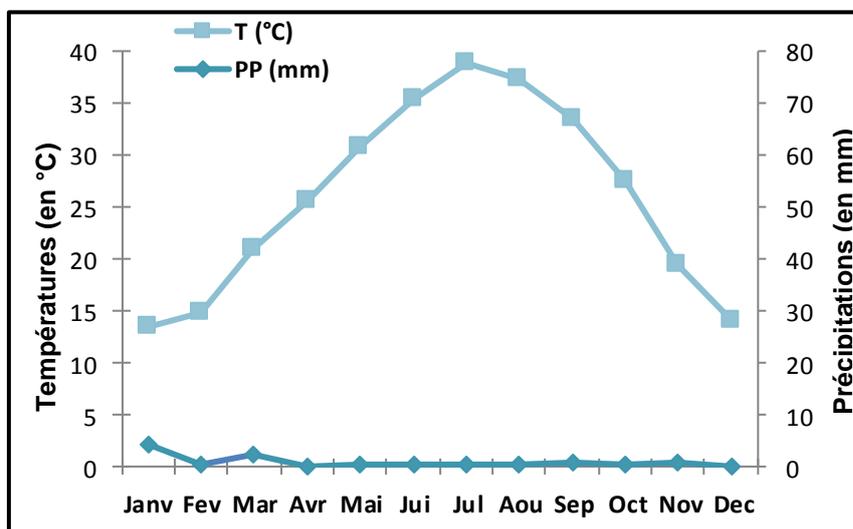


Fig. n° 07. Diagramme Ombro-thermique
Données enregistrées au niveau de la station d'Adrar (de 2010 à 2014).

Dans le cas de notre étude où le climat est similaire pour les 03 zones, nous avons pris comme exemple le cas de la station d'Adrar. L'allure de la courbe indique que les précipitations passent largement au-dessous de la courbe des températures, cette allure permet de constater que la période sèche s'étale sur toute l'année.

C'est le même cas pour les deux autres stations, vu la ressemblance entre les données climatologiques.

II.1.4. Les Vents.

Les vents sahariens sont en relation directe avec les mécanismes climatiques et les perturbations qui peuvent s'y développer. Les vents liés au champ barométrique soufflent surtout plus pendant le jour que durant la nuit.

En général, les vents dominants varient en force et en direction suivant les lieux et les saisons. Les vitesses moyennes mensuelles du vent sont généralement plus ou moins violentes (tableau n° 04). Elles vont de 14 Km/h pour Timimoune à plus de 20 à 21 Km/h respectivement pour Adrar et In Salah.

Tab. n° 04. Moyennes mensuelles interannuelles de la vitesse des vents
(Enregistrées au niveau des 3 stations - Année 2010 à 2014).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jui.	Aou.
Timimoune	13,20	14,26	16,60	16,16	16,88	14,00	10,16	11,98	13,20	13,30	13,20	14,16
Adrar	19,84	21,90	21,84	22,94	23,26	21,36	21,96	22,38	18,78	20,14	19,00	20,82
In Salah	16,22	16,76	18,62	20,74	22,28	20,98	23,60	24,36	20,66	19,80	16,32	19,36

Comme l'indique le graphique (figure n° 08), la période la plus ventée de l'année s'étale du mois de Mars jusqu'à la fin Avril (Printemps) avec une moyenne de 23 à 25 Km/h enregistrée respectivement au niveau des stations d'Adrar et In Salah.

Par contre à Timimoune, la vitesse moyenne des vents est modérée pendant toute l'année.

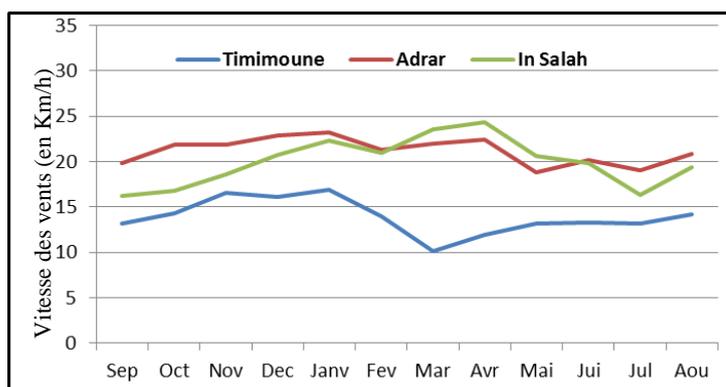


Fig. n° 08. Variations des moyennes mensuelles des vitesses des vents (en m/s)

Comme l'indique la rose des vents (figure n° 09), les vents les plus dominants sont généralement orientés Nord-Est, avec une fréquence équivalente à 25%.

La fréquence de la direction (Est) est de 14% par contre celle du Sud, elle est de 11%.

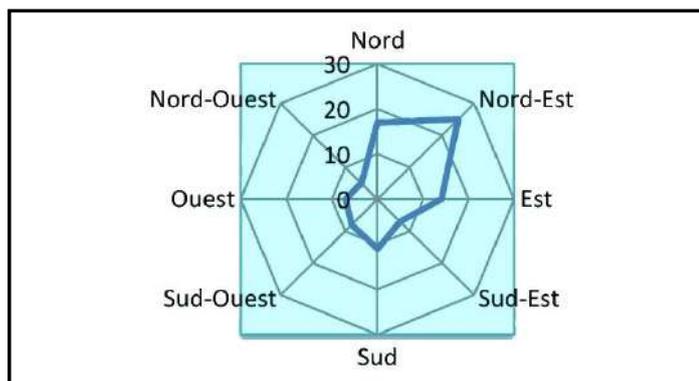


Fig. n° 09. Rose des vents caractérisant la zone d'étude.

II.1.5. L'Humidité relative de l'air.

L'humidité relative de l'air moyenne annuelle qui caractérise la zone d'étude est faible variant entre 22% à Timimoune et 24% à In-Salah et Adrar.

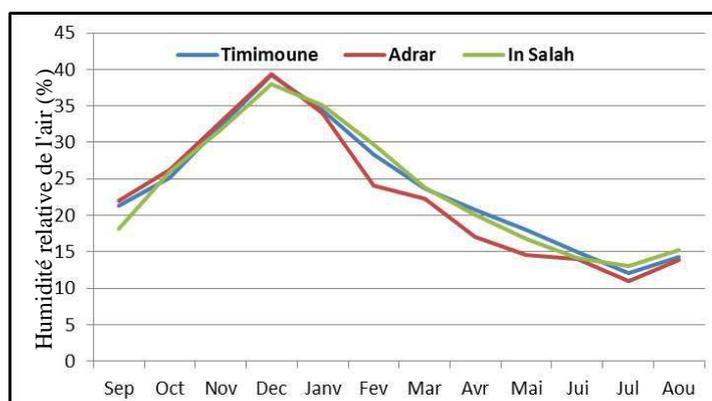


Fig. n° 10. Variations de l'Humidité relative de l'air (en %) enregistrées au niveau des 03 stations (de 2010 à 2014).

Cette humidité est inférieure à 35% au moins durant les 8 mois de l'année soit de février à octobre. Comme l'illustre le diagramme (figure n° 10), les valeurs minimales sont observées en Juin et Juillet, les maximales en Décembre.

II.1.6. Diagramme pluviothermique d'Emberger.

Par définition le quotient pluviothermique ou d'EMBERGER permet le classement des régions par type de climats, ce dernier nous a situés les 3 régions d'études dans l'étage bioclimatique qui lui correspond (figure n° 11).

On admet que l'évaporation croît avec l'amplitude thermique annuelle exprimée par la différence entre la moyenne M du mois le plus chaud et la moyenne m du mois le plus froid (Cette différence $M-m$ représente aussi le degré de continentalité du climat), et comme la moyenne des températures annuelles T est peu différentes de $(M+m)/2$. Pour cela (EMBERGER, 1951) propose d'utiliser pour les régions méditerranéennes le quotient pluviométrique défini par l'expression suivante :

$$Q_3^{44} = (1000 * P^{45}) / (2((M + m)/2)(M^{46} - m)^{47}) \quad (1)$$

On peut simplifier en : $Q_3 = 1000 P / (M_2 - m_2)$ où le coefficient 1000 étant destiné à étaler l'échelle pour éviter les valeurs fractionnaires. Ce quotient est de l'ordre de 100 pour les climats méditerranéens humides et de 20 pour les climats steppiques.

Ensuite, STEWART, 1968) a repris le quotient pluviométrique d'Emberger pour une meilleure application dans les conditions de l'Algérie, c'est un abaque qui comporte :

En ordonné les valeurs du quotient pluviométrique Q_2 , et en abscisse celles de la moyenne des minimas de la saison froide (°C). Et ce selon la relation suivante :

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

Avec :

- **M** : moyennes des maximums du mois le plus chaud en degré absolu (Tmax en °C).
- **m** : moyenne minimum du mois le plus froid en degré absolu (Tmin en °C).
- **p** : précipitation moyenne annuelle en (mm).

D'après les résultats de calcul des indices Q_2 déduits à partir de l'application de la formule d'Emberger modifiée par Stewart, sur les données des 03 stations, figurent sur le tableau suivant (tableau n° 05) :

Tab. n° 05. Valeurs calculées du quotient pluviothermique
(Données enregistrées au niveau des 3 stations - Année 2010 à 2014).

	P (mm)	M (°C)	m (°C)
Timimoune	16,31	45,64	05,84
Adrar	08,95	46,68	05,92
In Salah	07,30	46,42	07,52

Comme l'indique le Climagramme d'Emberger (figure n° 11), les régions de Timimoune (le Gourara) et d'Adrar (le Touat) dont la moyenne des minimas de la saison froide respectivement est égale à 5,84 °C et 5,92 °C, avec un quotient de 08,34 et 14,77 montre que d'après les positions des 2 points obtenu sur l'abaque, situent les 2 régions dans le même étage des climats saharien à hiver doux. Alors que la région d'In Salah, se situe dans la classe des climats arides et chauds avec un quotient de 06,94.

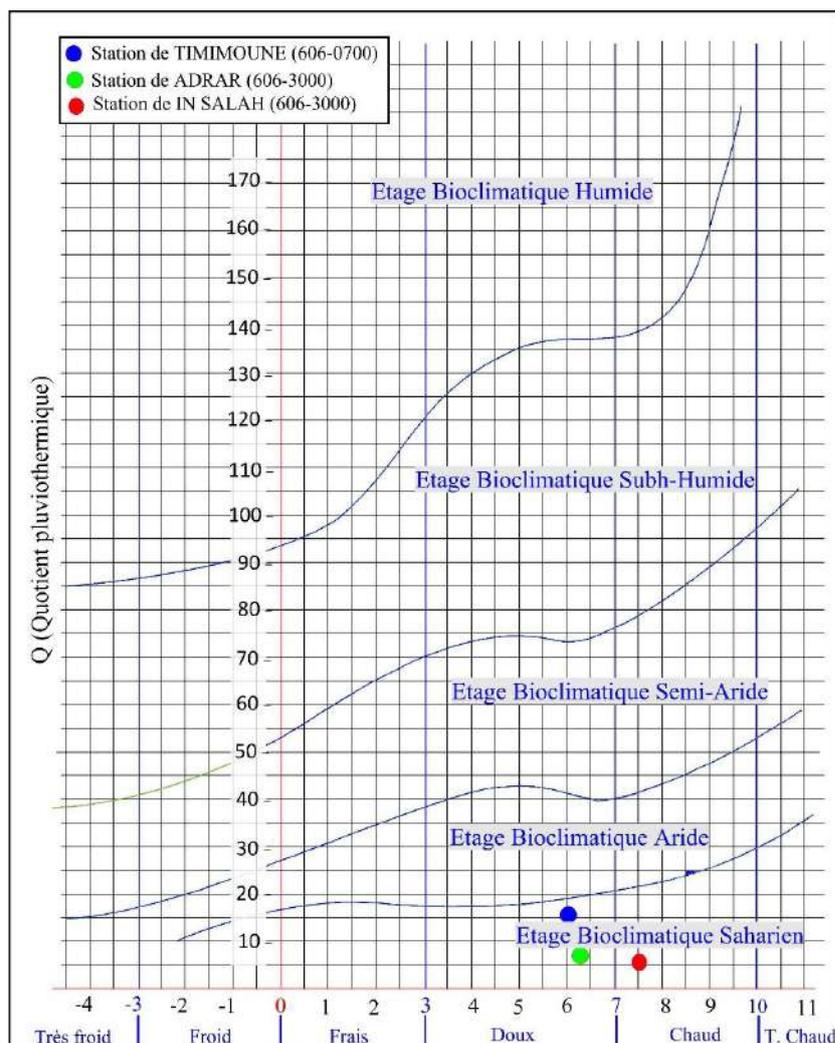


Fig. n° 11. Situation des 3 régions selon le Climagramme d'Emberger. (Données enregistrées au niveau des 3 stations - Année 2010 à 2014).

II.2. HYDROLOGIE ET RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.

II.2.1. Historique sur l'hydrographie de la région.

Le réseau hydrographique est peu développé et que son impact sur l'organisation de la région est très insignifiant, les écoulements étant rares et irréguliers. Les principales vallées sont celles qui descendent du Tademaït notamment : l'Oued Tilia qui coule vers le Touat, Oued Souf qui se perd dans les sables de l'erg er Rih, au nord d'In Rhar. Au sud d'Aoulef s'étend la longue dépression de la sebkha Mékerrhane, parcourue par l'Oued Djaret dont le cours d'eau est très ensablé. On rencontre également l'Oued Sidi Moussa et celui Botha qui parcourent le massif de l'Immidir situé au Nord-Ouest du Hoggar, ces Oueds sont plus humides et offrent des pâturages plus intéressants. Il est sûr qu'aucune crue ne parcourt actuellement, la totalité de l'ancien trajet des oueds. Les écoulements pérennes, plus faciles à mesurer, n'ont qu'une faible importance dans cet ensemble car ils sont rares et ne s'observent que sur de courtes distances (BRL, 1998a). Nous étudierons ici les grands ensembles hydrologiques qui caractérisent cette partie occidentale du bassin du S.A.S.S

D'après les études menées par J. Dubief et R. Capot Rey en 1953, ils subdivisent le bassin occidental en 2 grand bassins versants :

Le versant de M'Guiden-Gourara qui regroupe l'Oued E'Dibba, l'Oued M'Guiden (des crues ont été enregistrées en 1942 et 1945, ayant causées des dégâts aux oasis de l'Aougrout) et l'Oued Tilia qui coule vers les regs du Touat oriental pour se perdre dans les sebkhas situées au niveau de Zaouïat Kountale. Ses affluents tous actifs sont les Oueds : In Belbel, Matioreg, l'En Nezoua et El Abiodh. Ils ont connu des crues en Octobre 1951 et en Janvier 1952. Le second, c'est le bassin versant des d'aïets du Tademaït. Constitué de petits sous bassins fermés occupant une vaste gouttière allongée NE-SW. Parmi les Oueds qui les constituent, on compte l'Oued M'Zarou, E'Zeraffa, M'Ekramla, Sid Ahmadou et Oued l'Ahmara, eux également ont connus des crues exceptionnelles respectivement en 1945, 1951 et 1952. Cependant avec la disponibilité des nouveaux outils notamment les S.I.G, il est devenu pratique de ressortir réellement les différents bassins versants et les principaux oueds qui les constituent.

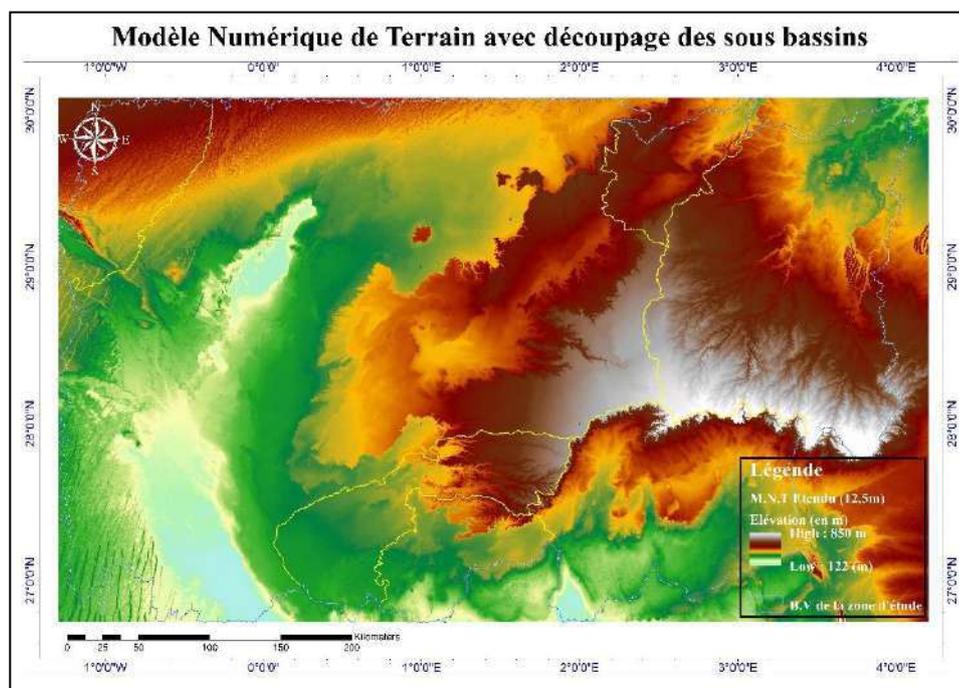


Fig. n° 12. M.N.T de la zone d'étude (USGS, 2018).

Pour mettre en évidence les principaux Oueds qui caractérisent notre zone d'étude, qui peuvent éventuellement participer à l'alimentation directe ou indirecte de la nappe du C.I, et dans le but de délimiter les sous bassins constituant cette partie occidentale, nous avons utilisés comme support un modèle numérique de terrain (M.N.T) avec une haute résolution de 12,5 m téléchargé à partir du site web : <https://www.usgs.gov/core-science-systems/ngp/3dep> (figure n° 12).

Après correction et traitement sous (ArcGis v10.4) du M.N.T correspondant, on a eu le résultat suivant (figure n° 13) :

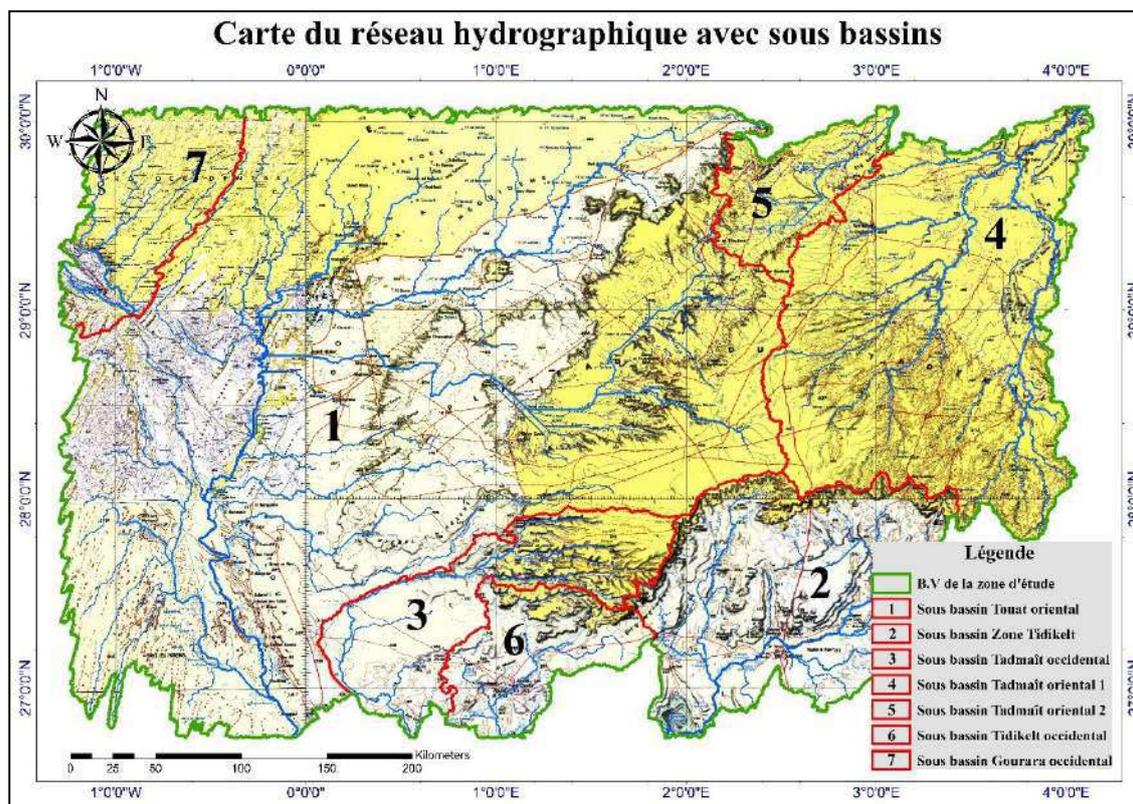


Fig. n° 13. Le Bassin versant principal avec les 7 sous bassins.

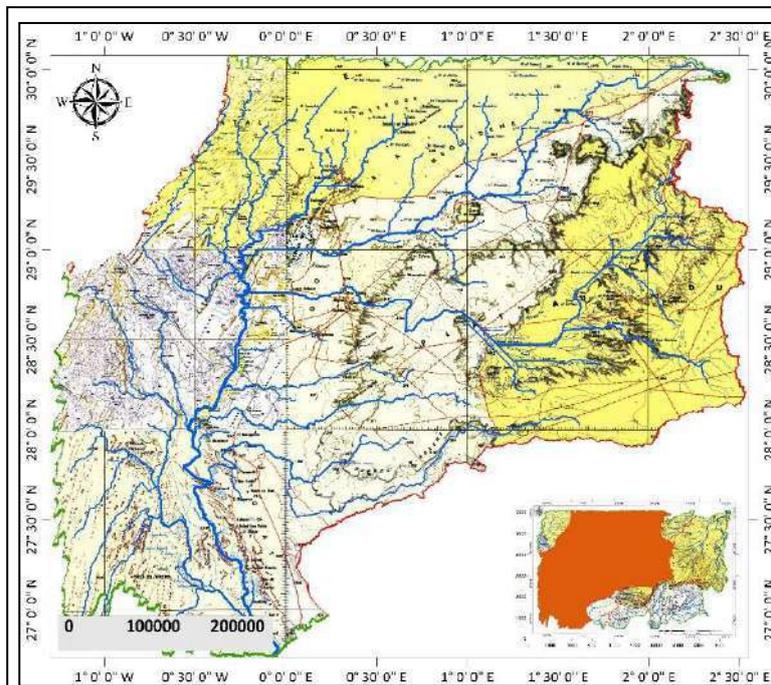
Comme l'indique la carte ci-dessous, il s'avère que le découpage du bassin versant principal est tout à fait différent de celui indiqué par Dubief (1953). On remarque l'existence de 2 grands bassins versants limités par une ligne de partage des eaux fluviales, l'un oriental composé de 2 sous bassins (4 et 5) caractérisés par l'existence de 2 Oueds : M'Ya et Berrick.

Néanmoins d'après l'orientation des affluents, ces Oueds ne participent pas à l'alimentation de la nappe dans la zone d'étude puisqu'ils déversent vers le N-E de plateau du Tademaït. L'autre occidental subdivisé en 5 sous bassins (1, 2, 3, 6 et 7), et qui participent tous à la recharge naturelle de la nappe. Du point de vue étendue, on constate que le S.B n° 01 c'est lui qui occupe la plus grande superficie de l'aire de l'étude (plus de 75% de la superficie totale).

II.2.2. Caractéristiques physiques des 5 sous bassins.

Dans cette partie nous allons exposer les caractéristiques des 5 sous bassins représentatifs de la zone d'étude notamment : les limites géographiques, le périmètre, la superficie totale aussi le nom de l'Oued qui le caractérise ainsi que leurs spécificités notamment : la longueur totale, l'amont et l'aval de chaque Oued.

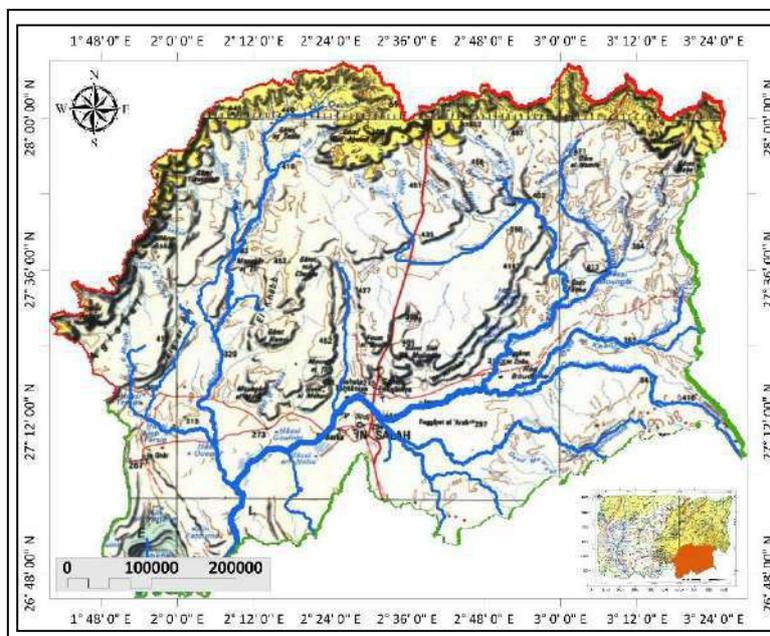
1. Bassin versant du Touat Oriental (S.B n° 01).



- Périmètre : 2675.4 km.
- Superficie totale: 93987 km².
- Limites géographiques entre:
 $X_1 = 1^{\circ} 17'24''W - Y_1 = 26^{\circ}43'48''N$
 $X_2 = 2^{\circ} 32'24''E - Y_2 = 30^{\circ}04' 43''N$
- Nom de l'Oued : - O^d Messaoud.
 - Od Tsebat.
- Longueur Totale = 910,50 km
- Amont = Saoura et P. Tademaït
- Aval = Sud du Touat

Fig. n° 14. Caractéristiques du sous bassin n° 01.

2. Bassin versant du Tidikelt (S.B n° 02).



- Périmètre : 1032,5 km.
- Superficie totale: 18472 km².
- Limites géographiques entre:
 $X_1 = 1^{\circ} 40'00''E - Y_1 = 26^{\circ} 40'08'' N$
 $X_2 = 3^{\circ} 29' 15''E - Y_2 = 28^{\circ} 09'02'' N$
- Nom de l'Oued : - O^d Souf.
 - O^d Sid Ahmed.
- Longueur Totale = 476,50 km
- Amont = S-W du Pt. Tademaït
- Aval = Sud du Tidikelt.

Fig. n° 15. Caractéristiques du sous bassin n° 02.

3. Bassin versant du Tademaït Occidental (S.B n° 03).

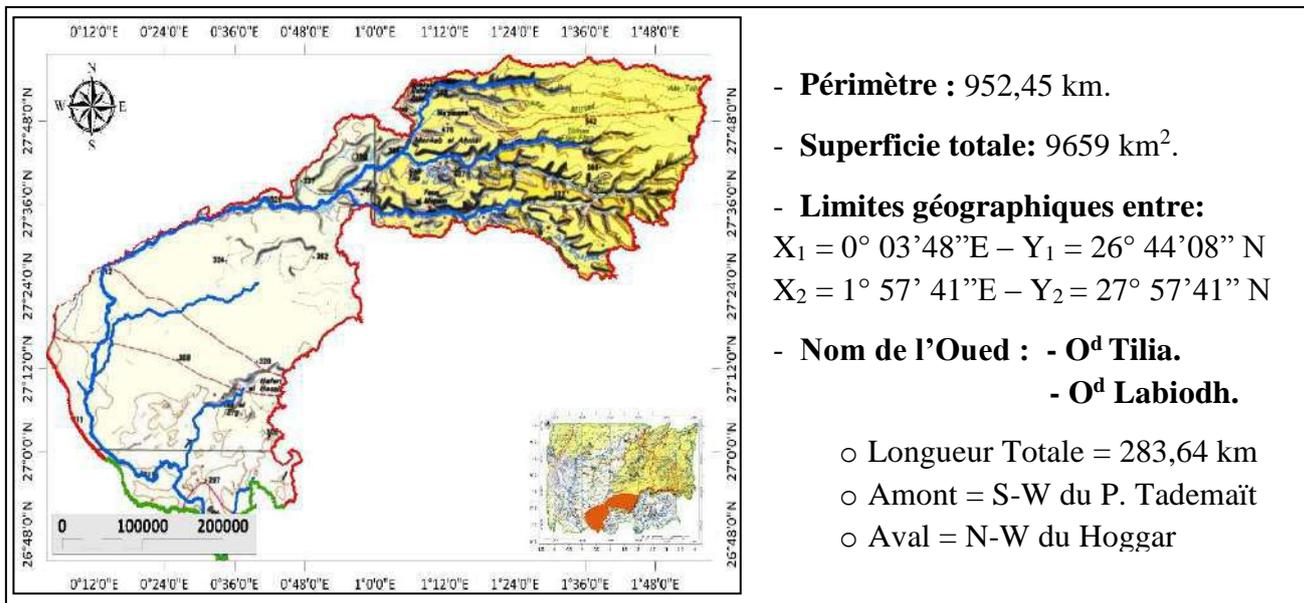


Fig. n° 16. Caractéristiques du sous bassin n° 03.

4. Bassin versant du Tidikelt Occidental (S.B n° 06).

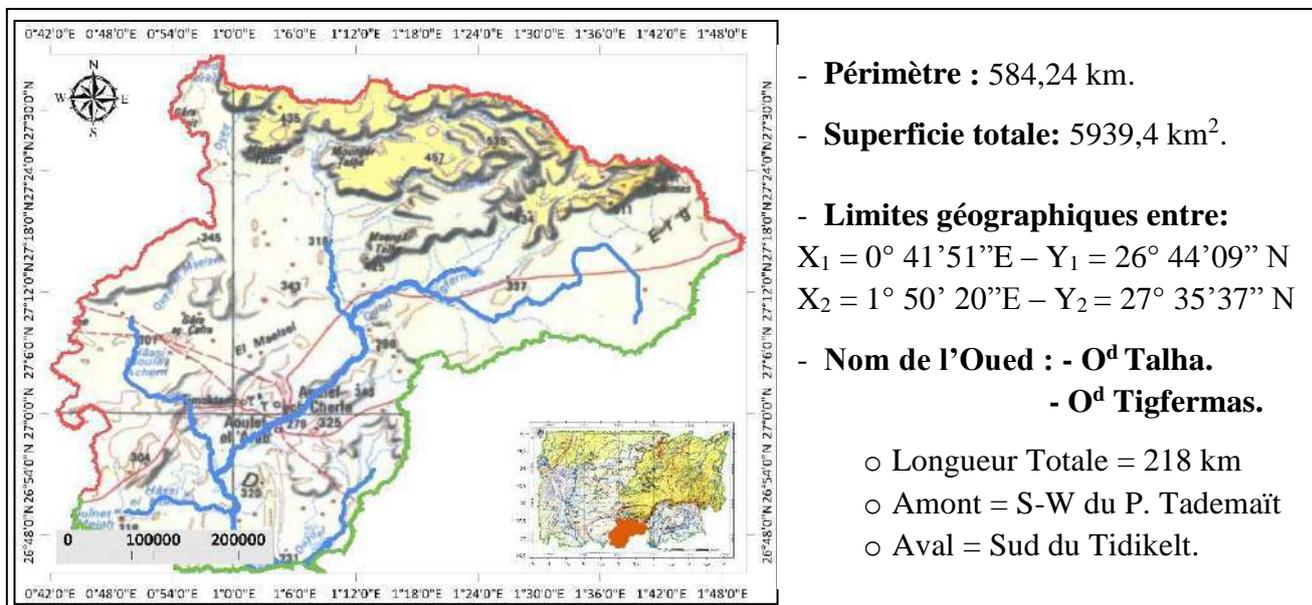
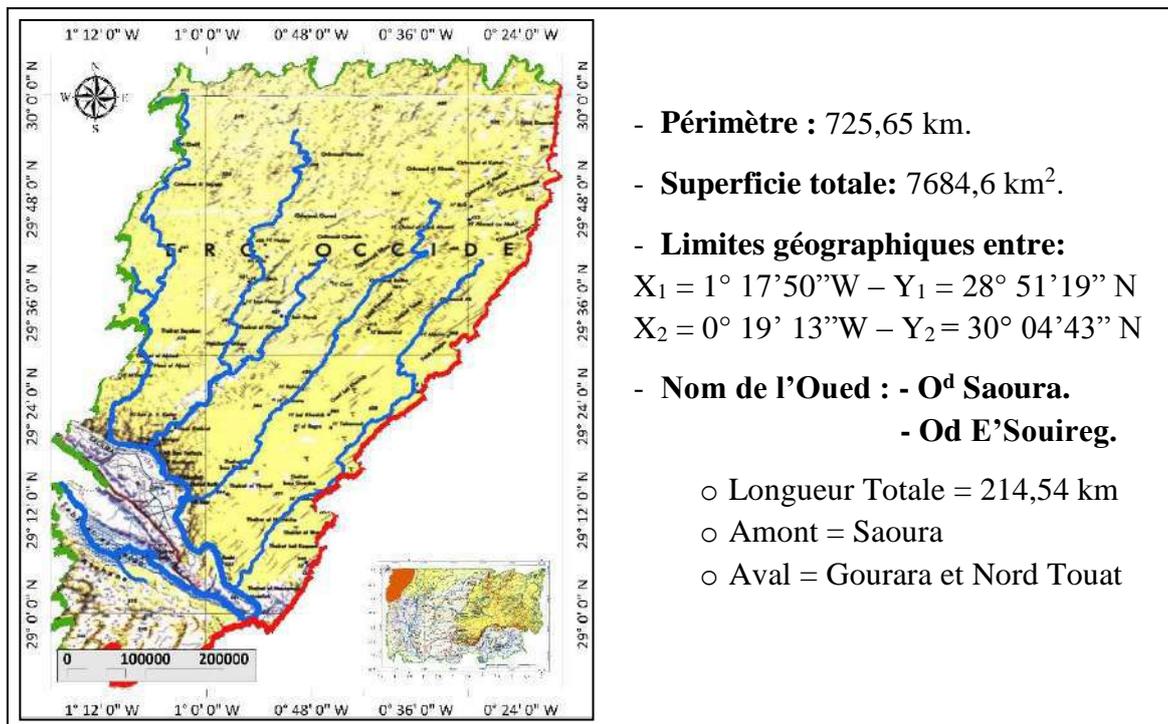


Fig. n° 17. Caractéristiques du sous bassin n° 06.

5. Bassin versant du Gourara Occidental (S.B n° 07).



Fi. n° 18. Caractéristiques du sous bassin n° 07.

CHAPITRE III.

III. ETUDE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.

L'étude géologique est primordiale pour toute étude hydrogéologie, elle permet de faire une approche sur le comportement hydrogéologique des différentes formations, ainsi que sur la nature lithologique, morphologique et structurale. Une telle étude permet donc d'identifier les zones susceptibles d'être aquifère. Cependant la paléogéographie, qui s'intéresse à l'historique géologique et la genèse de la géologie actuelle, nous informe sur l'appartenance du territoire est ce à un ensemble de terrains très anciens, anciens ou récents.

La zone d'étude appartient à la plateforme Saharienne, qui elle-même 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 séparés par des zones hautes. La synthèse de nombreuses coupes litho stratigraphiques (forages, logs, master-logs), montrent que le socle primaire peu remanié a été recouvert successivement par les formations suivantes :

a) Le Crétacé continental : il s'agit d'un dépôt infra crétacé. Un terrain constitué, essentiellement, d'argiles et de grès affleurant en surface sur une partie importante du Tidikelt.

b) Le Crétacé marin : une série de couches plus ou moins étendues représentant cet étage :

- Grès et argiles à gypse du Cénomaniens supérieur,
- Calcaires dolomitiques du Turonien,
- Calcaires du Sénonien.

c) A la fin du Crétacé, la mer cénomaniens recouvre la région. Les dépôts marins sédimentent sur toute la surface du Tidikelt actuel. Les mouvements orogéniques de la fin du Tertiaire qui correspondent aux plissements alpins (cycle Alpin) n'ont eu aucune répercussion notable sur l'architecture du Sahara Central.

Dans ce chapitre, nous allons développer tout d'abord la géologie locale (Gourara, Touat et Tidikelt) en suite on évoquera une étude structurale et tectonique et en fin la paléogéographie de cette zone d'étude.

III.1. Géologie régionale de la zone d'étude.

Géologiquement, comme l'indique la carte ci-dessous (figure n° 19), la région d'étude fait partie de la zone qui se situe sur le rebord Sud occidental du vaste bassin secondaire qui s'étend d'une part de l'Atlas Saharien au Nord à hamada du Tinhert au Sud, et du Touat – Gourara à l'Ouest jusqu'au golf de Gabès à l'Est, d'autre part.

Les forages de reconnaissances ainsi que les logs litho stratigraphiques et les masters logs, réalisés à l'échelle de la région d'étude, montrent que les formations géologiques qui dominent cette zone sont soit de types continentaux gréseuses d'âge Crétacé inférieur ou de types marines d'âge Crétacé supérieure. Egalement des formations continentales d'âge Mio-Pliocène caractérisent la région.

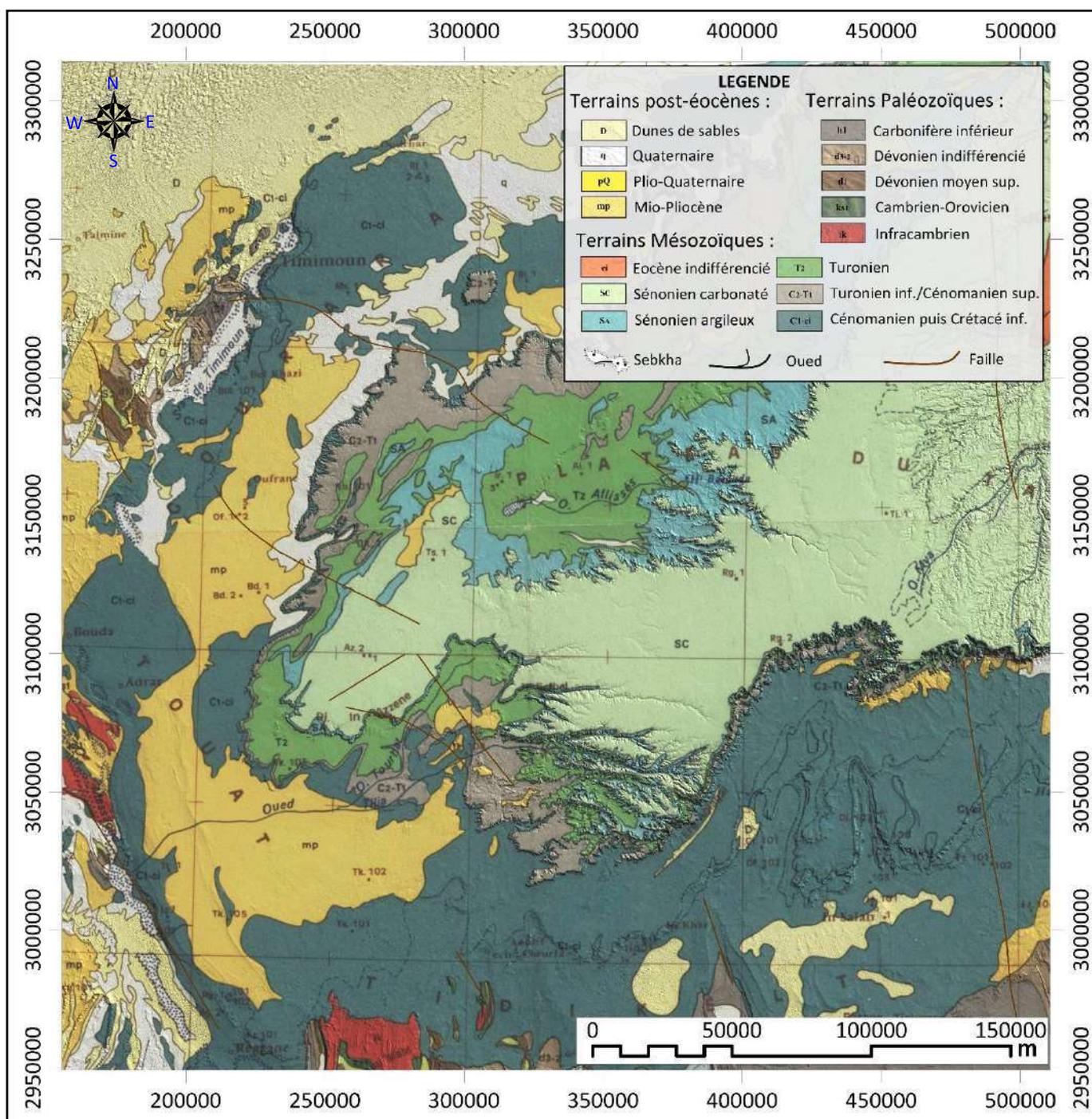


Fig. n° 19. Extraite de la carte géologique de BUSSON, 1967.
(Reconstituée par nos soins)

Comme l'indique l'image illustrant la géologie régionale en 3D (figure n° 20), on remarque clairement la différence d'altitude qui caractérise les 4 entités représentatives de notre zone d'étude : le Gourara à (Timimoune), le Touat à (Adrar), le Plateau au (Tademaït) et le Tidikelt à (In Salah).

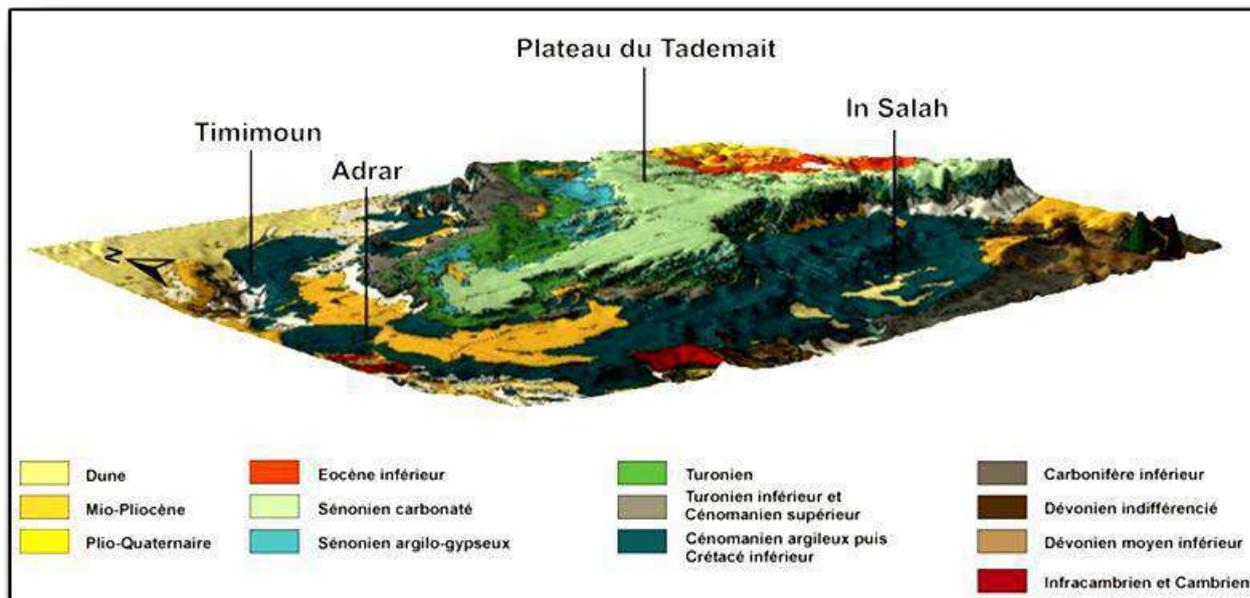


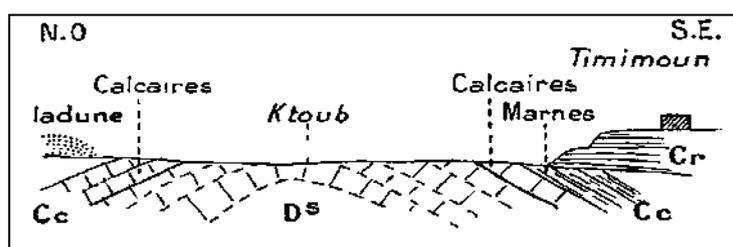
Fig. n° 20. Esquisse géologique de la zone d'étude (D'après BUSSON, 1967), (Drapée par M. BENHAMZA à un D.E.M-90m).

III.2. Stratigraphie de la zone d'étude.

Du point de vue stratigraphie, du plus ancien au plus récent on distingue les formations suivantes :

III.2.1. Le Primaire (Paléozoïque).

Les sédiments du paléozoïque sont largement développés dans le Sahara. Mais dans la zone d'étude on remarque que le paléozoïque est profond et moins affleurant par rapport à d'autres régions au sud de la zone d'étude, et ce à cause de l'élargissement du continental intercalaire. Ce dernier est formé d'un ensemble très largement plissé par les mouvements hercyniens, de direction générale NW-SE.



Ds : Dévonien sup - Cc : Carbonifère – Cr : Crétacé inférieur

Fig. n° 21. Coupe géologique schématique à Timimoune - Echelle 1/300.000 (Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration 1951)

Cet ensemble a été érodé, arasé, ensuite raviné, il n'en subsiste que quelques massifs perçant actuellement le manteau sédimentaire plus récent et grossièrement horizontal.

Le Primaire constitue le socle imperméable de cette zone, il est formé de terrains sédimentaires d'âge Cambrien – Namurien, constitués à base de grès, de schistes, d'argiles, de marnes et de calcaires. Référence : Le Sahara Algérien – Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration 1951. Dans le Gourara on le rencontre au NW de la sebkha de Timimoune (en grande partie couvert par le grand Erg oriental) et surtout au SW de cette sebkha jusqu'au Sud de Charouine. Dans le Touat il en subsiste que quelques lambeaux à l'Ouest, la majeure partie ayant été recouverte par l'Erg E'Cheche dans la dépression d'Oued Messaoud.

a. Dévonien inférieur.

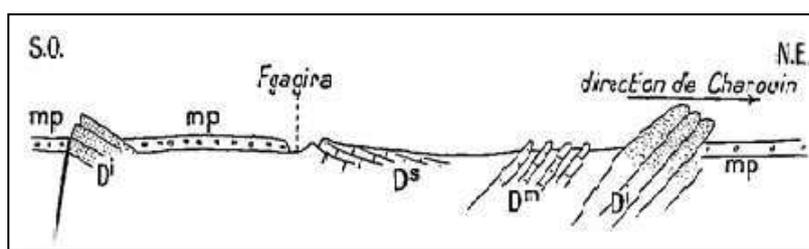
Entre Ksabi et Timimoune les grès dévoniens sont rencontrés une première fois à la Gara Zaleg (et au sud de cette Gara), une seconde fois à mi-chemin entre Tesfaout et Timimoune. Ces deux apparitions affleurent au cœur d'un anticlinal hercynien. En somme, ce Dévonien ne s'étale plus largement, il est masqué presque partout par des couches moins anciennes. Des Logs consultés montrent que la succession de bas en haut des formations se présente comme suit :

- Un ensemble argilo-gréseux, composé d'argiles plus au moins silteuses et micacées, des grès fins à très fin.
- Un horizon essentiellement quartzique ou siliceux quartzique compacte.
- Et en fin une constituée à la base par des argiles silteuses et au sommet par un banc de grès propre à grains fins et moyens.

b. Dévonien moyen.

La présence du Dévonien moyen est constatée authentiquement dans la région étudiée. Il est représenté par des calcaires qui contiennent de nombreux fossiles. Il est moins épais que l'inférieur mais dominé par les faciès marins, Il est composé de bas en haut par :

- Des argiles carbonatées et marnes avec des passages de calcaires et de grès.
- Des calcaires compacts à passées d'argile.



Dm : Dévonien moyen – Ds : Dévonien supérieur – Di : Dévonien inférieur – Mp : Mio-pliocène

Fig. n° 22. Coupe schématisée du synclinal de Fgaguira- Echelle 1/300.000 (Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration 1951).

c. Le Dévonien supérieur.

On connaît dans la région considérée au moins deux gisements du Dévonien supérieur. A Fgaguira, les fossiles se trouvent dans des calcaires en bancs minces intercalés dans des bancs d'argiles beaucoup plus puissants. Au sud de Charouine, route d'Ouled Rached, la formation est constituée à la base par du calcaire violacé très compact, et au-dessus par des schistes mous en minces feuillets rougeâtres.

Les deux gisements ne sont pas contemporains ; tous deux sont du Dévonien supérieur, mais celui de Charouine représente un niveau incontestablement plus élevé. Il est à signaler que cet étage est caractérisé essentiellement par la présence d'argile schisteuse et argiles versicolores dans tous les niveaux, néanmoins on peut remarquer à la base, des argiles schisteuses riches en matière organique surmontées par des argiles gréseuses, quelques graviers et gypses, tandis qu'au milieu, il un ensemble gréseux à stratification variée, avec un mélange de graviers ou d'argile et gypse.

d. Le Carbonifère.

Le Carbonifère correspond au cycle sédimentaire final du paléozoïque. On peut l'observer dans les domaines occidentaux et orientaux. Les faciès de ce dernier varient entre marin profond et continental. De même, que les épaisseurs varient entre 900m à l'est pour atteindre les 2800m à l'ouest. Les coupes de forages montrent que cet âge est constitué essentiellement de formations argileuses.

III.2.2. Le Secondaire (Mésozoïque).

a. Le Crétacé Inférieur.

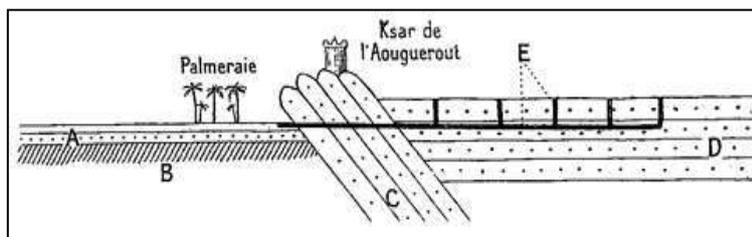
Discordant sur le Paléozoïque, il est représenté par les dépôts salifères du Trias et argilo-gréseux du Crétacé. Le Mésozoïque est développé dans les zones les plus déprimées des bassins sahariens, principalement dans le Sahara septentrional.

Cette formation est souvent affectée aux grès albiens, mais son âge est imprécis. Il repose en discordance sur le socle primaire, constitué principalement par de grès et d'argile continentaux d'une puissance variant entre 150 et 200m et sont grossièrement subhorizontaux, d'après les coupes de forages consultées, schématiquement on distingue 3 niveaux dont la variation lithologique de bas en haut est comme suit :

- Argiles rougeâtres.
- Grès tendres à stratification entrecroisées.
- Une dalle de quartzite à bois silicifiés.

b. Le Crétacé supérieur.

Vers le Sud-Est du Gourara, le plateau du Tademaït montre en concordance sur l'Albien continental un ensemble marin constitué par des argiles marneuses à la base correspondant ainsi au Cénomaniens tandis qu'au sommet par des calcaires d'âge Turonien-Sénonien.



A : Quaternaire - B : Primaire - C : Crétacé redressé - D : Crétacé horizontal - E : foggaras.

Fig. n° 23. Coupe géologique schématique à Auogureront - Echelle 1/200.000
(Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration 1951)

III.2.3. Le Tertiaire (Continental Terminal).

A l'Ouest du Gourara et sur toute la lisère du grand Erg en se poursuivant vers le Sud jusqu'à l'oued Messaoud, le Mio-pliocène repose directement sur le socle Primaire ou sur les grès albiens. Ces terrains sont toujours horizontaux d'épaisseur et de faciès très hétérogènes, généralement grèso-argileux à la base puis grèso-calcaire et se terminent par la dalle calcaire blanchâtre de la Hamada d'âge Pliocène.

a. Le Mio-pliocène.

Les formations du Mio-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.

b. L'Eocène.

Constitué de deux ensembles lithologiques, l'Eocène évaporitique au sommet à base de d'anhydrite et de marne, et celui carbonaté à la base, formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques.

c. Le Sénonien.

Il s'individualise en deux faciès, Sénonien supérieur (carbonaté) constitué essentiellement de dolomie et de calcaire fissuré. Et Sénonien inférieur à sédimentation lagunaire caractérisé par des formations argileuses et salifères à anhydrite.

d. Le Turonien.

Lui-même est subdivisé en deux faciès : Turonien supérieur : formé par des calcaires jaunes dolomitiques et d'argiles, et Turonien inférieur : formé par des calcaires blancs dolomitiques et marneux.

e. 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 Timimoune, il forme la base du plateau de Tademaït, on constate aussi que le Cénomaniens inférieur est argileux alors que le Cénomaniens supérieur est calcaire.

III.2.4. Le Quaternaire et les formations récentes.

Comme dans tout l'étendue du Sahara, durant le Quaternaire ces régions ont connu un climat oscillant entre une grande aridité et un régime semi tempéré à semi tropical, où ces oscillations ont influencé sur la surface de la région et seraient responsable des formations de terrasses, des éboulis et des modifications des grandes lignes actuelles du relief. Ces formations reposent sur l'ensemble décrit précédemment ; ce sont les dunes des grands Ergs (occidentale et E'Cheche), aussi les dépôts gypso-salins des sebkhas et les sols actuels formés par les dépôts éoliens.

III.3. Litho-Stratigraphie locale (voir figures n° 26 a-b-c-d).

Albert F. de Lapparent, selon une mission qu'il a effectuée à pied et à chameau en 1947 sur une distance de 800 km en allant d'El Goléa à In Salah (Tidikelt) en passant par le

Gourara en suite au Touat puis au plateau du Tademaït, a pu décrire d'une manière détaillée la description lithostratigraphique de l'ensemble des terrains parcourus de ces régions. C. Killian a désigné sous le nom de Continental Intercalaire la grande série argilo-gréseuse du Sahara algérien qui repose en discordance sur le primaire et se trouve surmontée en concordance par le crétacé supérieur.

Selon ALBERT LAPPARENT les grès albiens couvrant tout le crétacé inférieur à l'exclusion du Jurassique, du Trias et du Permien, ils se terminent par un ensemble d'argiles rouges d'origine lacustre, qui doivent monter jusque dans le Cénomaniens inférieur (1947). Toujours selon (ALBERT LAPPARENT, 1947), il est difficile de subdiviser cette série gréseuse et argileuse, et ce à cause des variations de faciès assez fréquentes. Toutefois, sur une distance de 500 km et en se référant à un croquis qui l'a dressé (figure n° 24), stratigraphiquement il a pu partager cette vaste étendue en 4 séries bien distinctes :

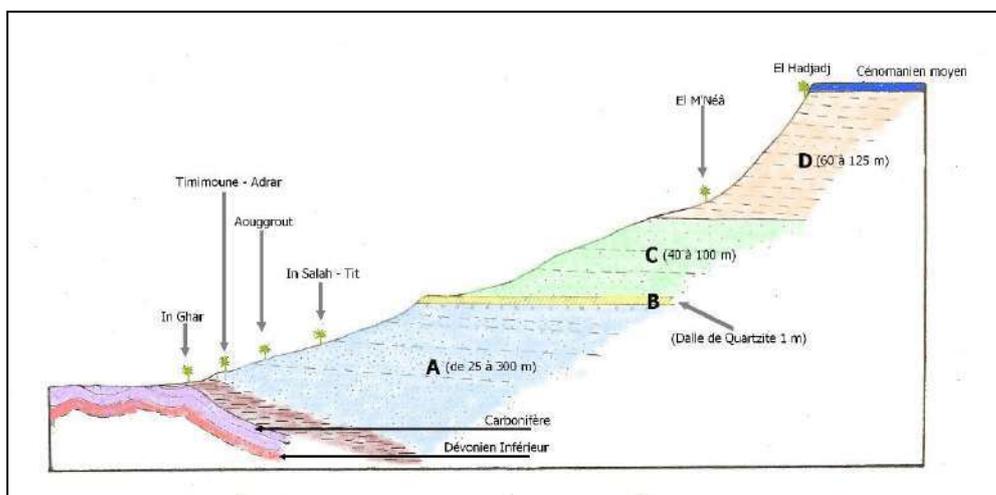
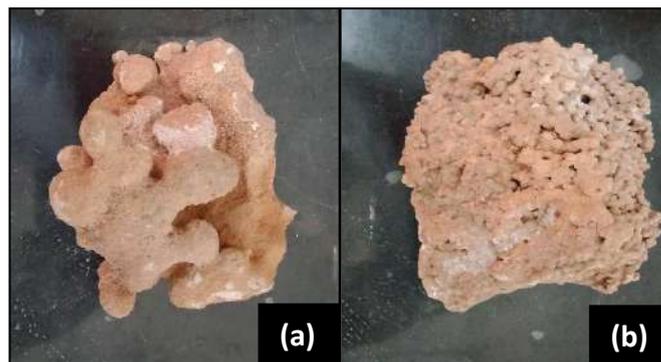


Fig. n° 24. Croquis schématique de la lithostratigraphie (axe Gourara – Tidikelt)
(Coupe reproduite du Rapport A. CORNET – Ressources artésiennes, 1947)

1- La série A : qui correspond à la base. C'est une série d'argiles rouges, de grès roses et blancs, de grès rouges à stratification entrecroisée, avec des lentilles de graviers et dragées de quartz réparties un peu partout dans la masse de grès. Dans ces lits de graviers, on rencontre des dents et ossements de poissons et surtout des reptiles, c'est le cas au niveau de Timimoune et Aoulef.

2- La série B : qui correspond à une dalle de grès très dur, véritable quartzite, uniforme et très constante avec à la base on rencontre des conglomérats à bois silicifiés, c'est le cas à Reggane. Ce repère avait été repéré par A. MEYENDORFF sous le nom de dalle quartzite, ce dernier on le suit fort bien de Timimoune à Adrar, à Reggane, à Aoulef et à In Salah déterminant ainsi des plateaux.

3- La série C : Au-dessus de cette dalle quartzite, viennent de nouveau des grès dragées, des grès argileux, des grès en nodules dites kerboub (voir photos ci-après) ; bien que de petits nodules se rencontrent dans des grès rouges de la série A surtout à Timimoune et Tindjilet. Il est à noter que les plus régulières, les plus grosses et les abondantes ne sont vraiment bien développées que dans la série C.



Echantillons de Grès albien prélevés en 2018 : (a) de Timimoune – (b) d'Adrar

4- La série D : Le talus de la falaise du Tademaït est partout constitué par des argiles rouges, très constantes également. Elles sont ordinairement coupées de bancs gréseux un à l'Est de Timimoune ou plusieurs au Nord d'In Salah. A El Goléa, elles se présentent sous un faciès purement argileux en alternance avec quelques bancs de calcaires.

Ces quatre séries de couches A, B, C et D peuvent toujours être reconnues et cartographiées malgré les variations latérales de faciès et d'épaisseur que chacune d'elles peut subir.

Quant à la variation des faciès et de l'épaisseur de ces séries, il faut mentionner que les faciès énumérés sont bien représentés dans la région de Timimoune (Gourara) où les épaisseurs évaluées aux affleurements sont approximativement comme suit :

La série A (60m), la série B (1m), celle C (40m) et D (70m). La dalle quartzite qui correspond à la série B, le faciès qui le caractérise ne change pas notablement. Ce sont toujours des grès durs, gris (Gourara), verts (Est de Taourirt et Reggane), blancs et un peu plus épais (1,5m) à (Aoulef E'Chorfa), cependant noirs et scoriacés au Nord Est d'Aoulef E'Chorfa. Au-dessous de ce repère, si à Timimoune et Adrar, ce sont les argiles rouges qui dominent les reliefs de la pénélaine hercynienne, par contre le crétacé début par des grès gris dur avec des grains de quartz, et ce entre Akabli et In Ghar (épais d'une dizaine de mètres).

A Reggane et Aoulef, l'épaisseur de la série (A) (uniquement à base de grès sans niveau argileux) est de 100m environ. Elle est couronnée par un conglomérat à trocs d'arbres silicifiés. Néanmoins elle réduit de puissance au fur et à mesure en allant vers Gour Ouled Yahia (25m en moyenne).

Au Sud d'Aoulef, l'anticlinal dévono-silurien est ceinturé par des formations conglomératiques envahissant la base du crétacé inférieur, qui passe latéralement aux grès et argiles rouges compactes bien développées à Aoulef Lârab.

Quant à la série (C), on remarque qu'elle paraît bien plus épaisse à In Salah (Tidikelt) qu'à Timimoune (Gourara) à peu près 100 mètres d'épaisseur en moyenne.

En fin la série des argiles rouges (D), elle montre également des variations en matière d'épaisseur. Elle est de 70 m à Timimoune (Gourara), 60 m à Aoulef (Sud de Touat) pour atteindre les 120 m à In Salah (Tidikelt).

Il faut signaler qu'au Nord de la zone du Tidikelt, l'unique série qui domine est celle (A), avec une épaisseur totale de 300 m en moyenne.

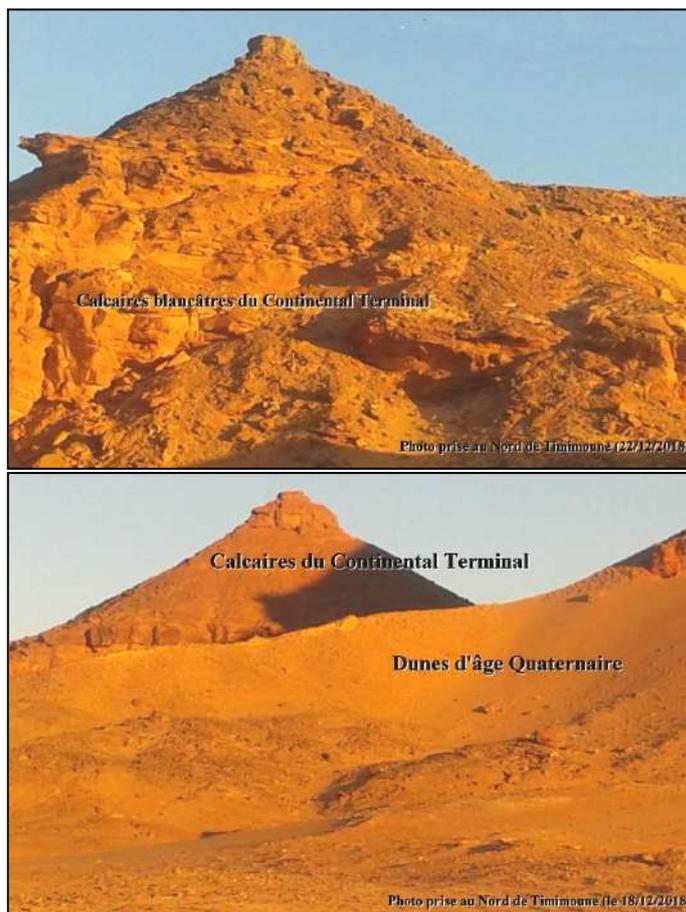
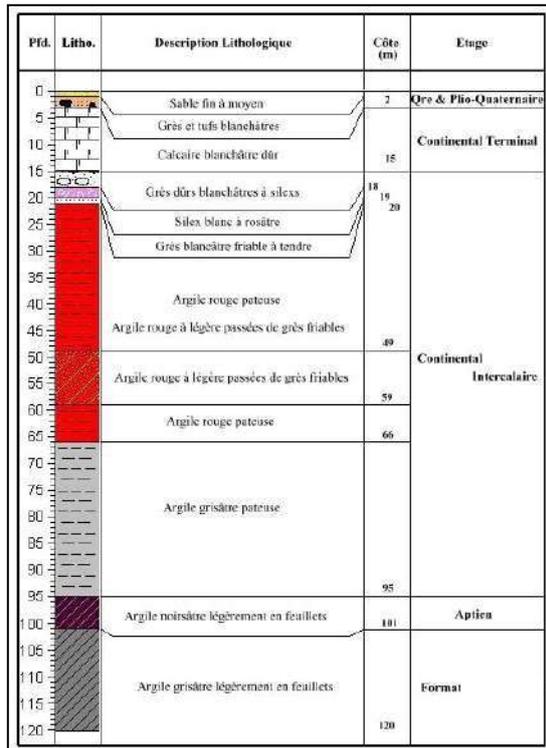
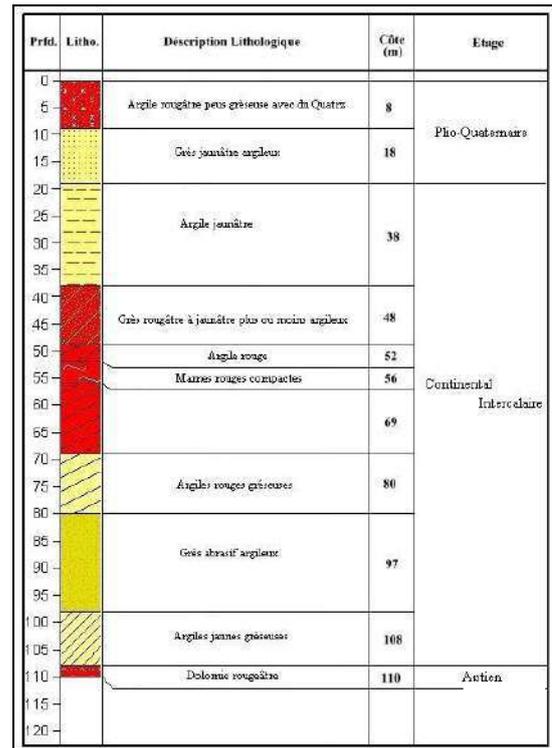


Fig. n° 25. Photos prises sur la route Timimoune – Ouled Saïd (Décembre 2018).



(Sondage M04 - 329 à Timimoune)



(Sondage O04 - 527 à Adrar)

(Sondage KIT - 102 à Tademaït)

(Sondage M04 - 112 à In Salah)

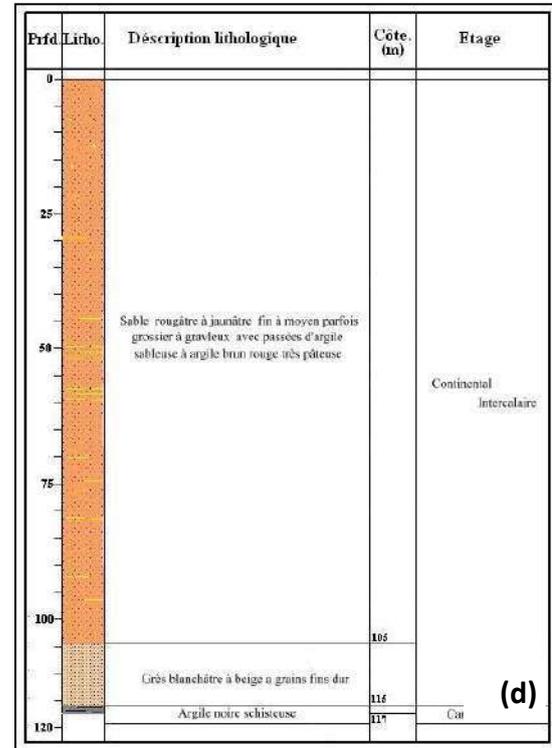
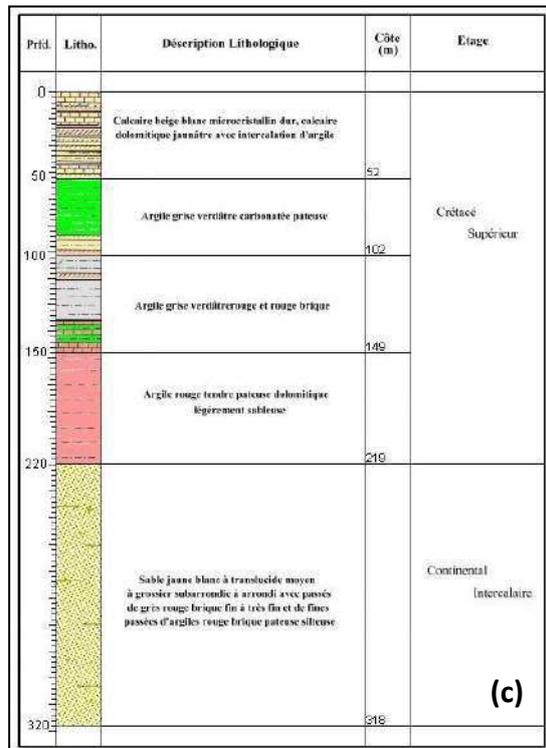


Fig. n° 26. Logs stratigraphiques des sondages hydrauliques types implantés à travers (Le Gourara – Touat – Tademaït – Tidikelt).

III.4. Tectonique régionale et locale.

La tectonique précambrienne et la phase panafricaine sont à l'origine d'un grand réseau de fractures caractérisées par des accidents subméridiennes verticaux. Ces accidents sont traduits comme des décrochements à rejet horizontal, les accidents dextres sont décalés par un réseau de faille conjugué Nord-Ouest Sud Est, ce système est le résultat des contraintes compressives horizontales Est Ouest qui se traduit par une pénétration du bouclier Est africain par craton Ouest africain, ces accidents sont d'âge panafricain tardif et peuvent être plus anciens.

On cite quelques mouvements tectoniques qui ont joué un rôle dans l'évolution de la structure du bassin de la région (figure n° 27) :

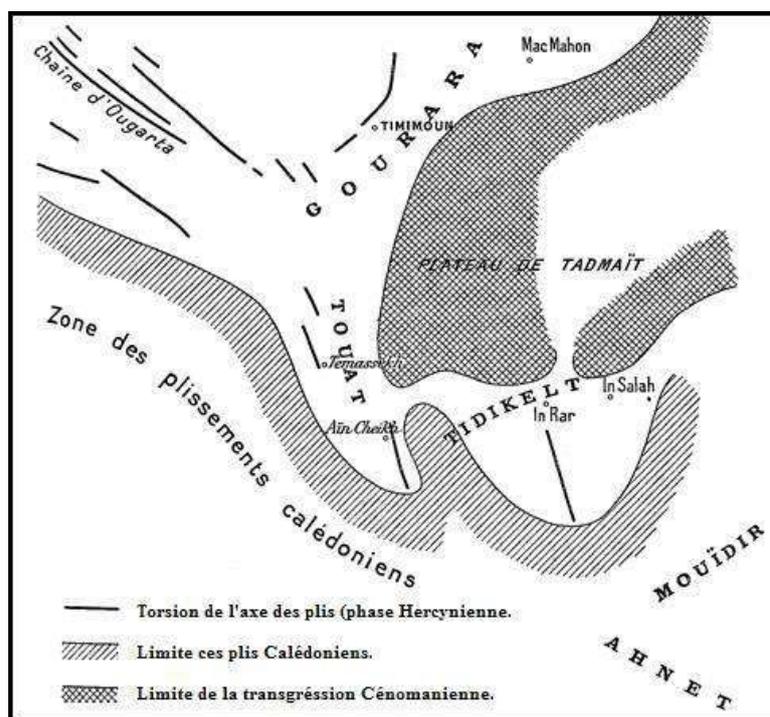


Fig. n° 27. Carte schématique structurale - Echelle 1/800.000
(Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration, 1951)

- Distension Silurienne : Caractérisée par une transgression générale traduit par la sédimentation des argiles noires.
- Compression Calédonienne : Les discordances locales sont signes de la phase tectonique fin Silurien et début du Dévonien, cette phase est traduite par des soulèvements généraux qui entraînent cette phase, suivi d'une période d'érosion et dénivellement des structures.
- Les mouvements Hercyniens : sont divisés en deux mouvements précoces (Viséen) et majeur au paléozoïque final (Post Stéfanien d'âge Carbonifère sup).
- Mouvement majeur : La sédimentation du carbonifère provoqué par cette phase majeure est annoncée par une discordance à la base des calcaires du Westphalien (Carbonifère sup), ce mouvement à un rôle important sur la constitution des autres bassins sédimentaires.

Localement, selon (ALBERT LAPPARENT, 1947 et CORNET, 1948), le carbonifère, tandis qu'il s'enfouissait légèrement en son centre, les bords avaient tendance à se relever. Cet exhaussement des terrains primaires est visible entre Timimoune et Charouine (Gourara).

Il apparaît nettement au Touat sous forme d'avancée des affleurements paléozoïques des 2 extrémités d'Adrar et Reggane. Cette disposition a entraîné une légère inclinaison du Crétacé au Gourara et au Touat. Incontestablement, les couchent plongent vers l'Est ou le Nord Est de 1° environ.

Entre Sali et Reggane, puis au niveau du Tidikelt, le pendage des grès crétacés est un peu accentué et se tient entre 1° et 2°, de manière à être perceptible de loin.

D'un autre côté, au Tidikelt, des anticlinaux de terrains primaires orientés Nord Sud ont entraîné la naissance de 3 petits bassins à savoir : le bassin de Taourirt situé entre Reggane et Chebbi, le bassin de Tit localisé entre Aoulef et In Ghar et en fin le bassin d'In Salah reliant l'axe d'In Ghar à Djebel Azaz.

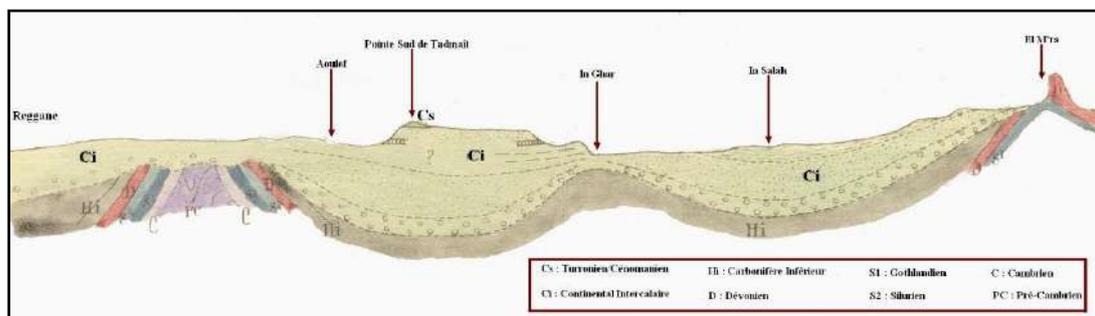


Fig. n° 28. Coupe lithostratigraphique Ouest-Est (axe Reggane – In Salah)
(Reprise du rapport A. Cornet – Ressources artésiennes, 1947)

Quant aux pendages signalés à Aougrouit (Gourara), ils les interprètent comme si des apparences due à la stratification entrecroisée d'origine fluviale.

III.5. Paléogéographie de la zone d'étude.

L'histoire géologique de ce vaste ensemble caractérisant cette partie de la plate-forme saharienne (partie occidentale du bassin SASS), repris à la fin de l'ère primaire, peut se résumer ainsi, selon (CORNET, 1947) :

a) La Phase marine Carbonifère et régression :

Durant l'époque Carbonifère, une large mer s'étendait sur l'ensemble du Sahara à l'exception du Hoggar ainsi que ses annexes qui pouvaient constituer un vaste archipel. Vers le Nord, la mer rejoignait les eaux occupant l'emplacement de la méditerranée actuelle. D'épais sédiments ont été déposés durant cette phase, donnant naissance aux calcaires et grès carbonifères visibles au piedmont des falaises qui limite le Tidikelt vers le Sud.

Les mouvements hercyniens les ont plissés partout où ils ne reposaient pas sur le socle rigide du Hoggar et ont amené une subsidence de tout le bloc saharien, rejetant ainsi la mer vers le Nord.

b) La Phase d'émersion du Continental Intercalaire :

Cette phase, durant laquelle le Sahara a été soumise à un plissement et une émergence sous l'action du nivellement des éléments atmosphériques. L'érosion s'exerçait violemment amenant une désagrégation des massifs montagneux dont les produits détritiques notamment les sables et argiles, étaient transportées dans les parties basses (dépressions du primaire).

Ces dernières se trouvent comblées par d'épais sédiments argileux et sableux. Alors que dans les petites montées du substratum (au Nord du Hoggar), l'épaisseur des alluvions est beaucoup plus faible. (CORNET et LAPPARENT, 1947) résumant que la plate-forme Saharienne a très bien pu être un vaste désert envahi à cette époque par la savane et la forêt ça se confirme avec les restes qui appartiennent au règne végétal (bois silicifiés) particulièrement rencontrés en abondance au Tidikelt.

c) La Phase de transgression cénomanienne et dépôts crétacés :

Au cours du Cénozanien, la mer envahit à nouveau le plateau Saharien où des argiles et des calcaires marneux se déposent, contenant ainsi des fossiles marins d'eau profondes indiquant la présence de lagunes et marais attestées par des intercalations gypseuses. Le résultat de cette transgression marine durant le Cénozanien, est la naissance d'une formation d'un épais manteau argilo-marneux couvrant les alluvions grésosableux du Continental Intercalaire.

Plus tard durant le Turonien, la mer s'approfondit légèrement pour donner naissance aux dépôts de calcaires dolomitiques franchement marins. Le plateau du Tademaït à base de ces calcaires d'âge qui s'étend du Turonien au Sénonien, correspond à une plate-forme ayant résisté à l'érosion.

En fin pendant la fin du Secondaire et le début du Tertiaire, la mer s'est donc retirée du Sahara algérien, laissant naissance d'une nouvelle phase d'érosion suivie d'une sédimentation.

d) Phase d'érosion puis sédimentation Tertiaire et Quaternaire :

Tandis que le continent émergé après le retrait de mers primaires, ayant été plissé par les mouvements tectoniques durant la phase hercynienne, le Sahara tertiaire au contraire, elle se présentait sous l'aspect d'une plate-forme à base de calcaire horizontale exposée à l'attaque de l'érosion hydrique, donnant naissance à des fleuves creusant de profondes vallées découpant ainsi les dalles calcaires et déblaient de larges dépressions.

Plus tard, à la suite de l'émergence de l'Atlas une nouvelle phase de sédimentation alluvionnaire réapparaît donnant naissance aux dépôts des couches miocènes et pliocènes. Après cette phase de transgression suivie d'une sédimentation puis une régression, il y a eu la genèse du Plio-quaternaire puis enfin le Quaternaire actuel.

CHAPITRE IV.

IV. ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.

IV.1. Généralités sur l'hydrogéologie de la région.

Il est judicieux de donner un bref rappel historique sur les différentes étapes qui marquent l'évolution du terme et la subdivision du "Continental-Intercalaire" du Sahara occidental. Les premiers renseignements qui ont été rapportés sur le Crétacé inférieur des environs du Gourara et de Meguidene, remontent à 1890 par le capitaine M. ALMAND (in FLAMAND, 1911) qui a signalé la présence du Crétacé dans ces régions. En 1896, G.B.M. FLAMAND a effectué des missions dans ces mêmes régions, puis dans le Tidikelt (1899-1900) où il a décrit les grès à bois silicifiés qu'il l'attribue à l'Eo-crétacé. En 1904, E. HAUG, a signalé des grès albiens à Dinosauriens dans la vallée du Djoua, falaise de Tinrhert. Une année plus tard, E.F. GAUTIER et R. CHUDEAU (in MAZROU, 2010) attribuaient les grès Eo-crétacés du Tidikelt à l'Albien en continuité avec ceux que G.B.M. FLAMAND l'a signalé dans les régions du Gourara et du Touat. Le terme Continental Intercalaire d'origine géologique, désigne les formations continentales qui se sont déposées entre le cycle marin du Paléozoïque (clôt par l'orogénèse hercynienne qui a rejeté la mer hors de la plate-forme saharienne), et la grande transgression marine du Cénomani. Le Continental Intercalaire couvre donc une large période qui va du Trias à l'Albien. (J. FABRE, 2005, Géologie du Sahara occidental et central).

Dans la région d'étude, le Continental Intercalaire qui se présente sur toute l'étendue de l'aire de l'étude, se présente sous la forme d'une succession de bancs gréseux, de sables fins et de niveaux argileux ; les niveaux perméables prédominent largement. Les grès sont tendres, friables, souvent mal cimentés, de teinte rose à brune On y observe souvent une stratification entrecroisée typique des dépôts fluviaux ou d'estuaires. Leur grain est variable, parfois assez fin souvent grossier (grès à dragées de 20 à 30 mm) on trouve même des concrétions sphériques de quelques centimètres de diamètre. Le ciment est le plus souvent calcaire, il est parfois siliceux ou argileux. Les argiles sont rouges, brunes ou vertes, toujours sableuses et forment des intercalations de quelques centimètres d'épaisseur (M.L.O Babassy 2005, L'hydrogéologie du SSAS et la recharge de la zone d'étude, thème de recharge et paléo recharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional).

Cette nappe partagée entre les 3 pays en l'occurrence l'Algérie, la Tunisie et la Lybie, occupe une superficie totale de 600.000 Km², dont 60% se trouvent en Algérie (avec 85 % de la superficie totale), un peu moins de 10% en Tunisie, et 30% en Libye. Sa profondeur qui varie en moyenne entre 150 m au niveau du bassin occidental plonge jusqu'à 2500 m et parfois même plus au nord du grand Erg oriental. Cet aquifère fossile, non ou peu renouvelable qui englobe près de 50.000 milliards de mètres cubes d'eau douce, la température de ses eaux varie entre 25 à 28 °C dans le bassin occidental pour atteindre les 60 °C dans le reste du bassin. La carte suivante (figure n° 29) élaborée par (CORNET, 1952), illustre la situation de cet aquifère (nappe du Continental Intercalaire) par rapport aux grandes unités hydrogéologiques qui caractérisent le pays.

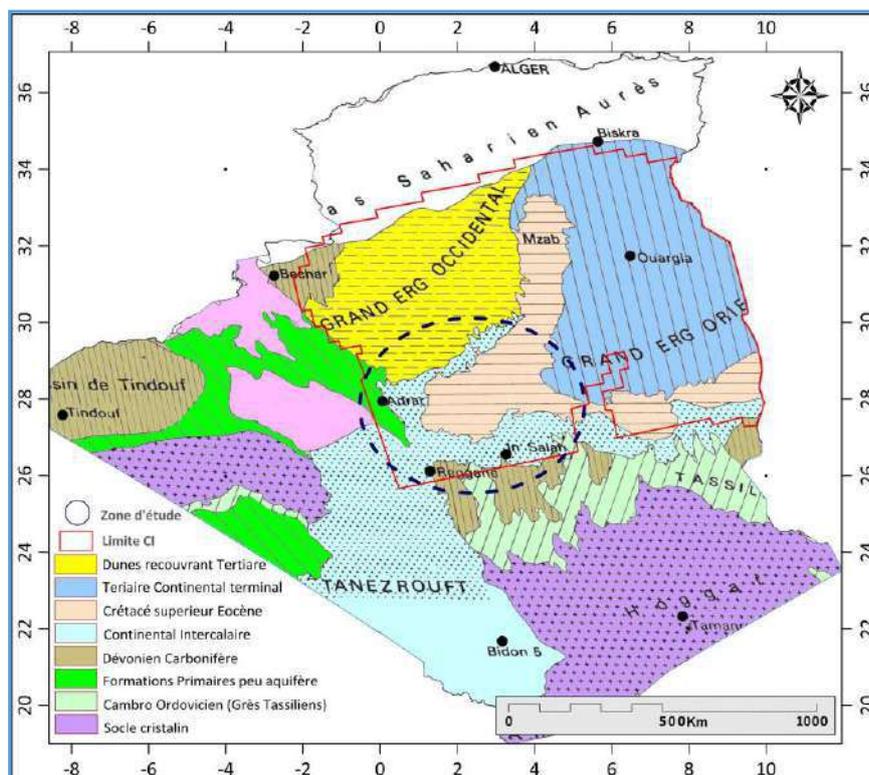


Fig. n° 29. Extrait de la carte des grandes unités hydrogéologiques (CORNET, 1952)

IV.2. Toit et mur du Continental Intercalaire.

En principe, le Continental Intercalaire est bien défini : il s'agit de formations argilo-sablo-gréseuse d'origine continentale dont les limites extrêmes dans la série stratigraphique sont le mur du Cénomaniens et le toit du Primaire. En fait, des épisodes lagunaires et marins étant intervenus, il n'est pas toujours facile de situer dans les forages les limites de cette formation, surtout le mur. D'après l'étude ERESS, UNESCO, fascicule 2 ; 1972, on différencie le toit et le mur de cet aquifère comme suit :

- Le Toit de la nappe :

Sur les bordures du grand Erg occidental et sous les plateaux du Tademaït, le Continental Intercalaire est considéré comme Crétacé inférieur. Sur le plateau du Tinrherth, la série est tantôt argilo-gréseuse, tantôt argilo-calcaire ou argile-gypseuse ; contrairement à certains auteurs, on ne l'a fait entrer dans le Continental Intercalaire qu'aux forages où elle est à prédominance argilo-gréseuse. Dans le reste du Sahara, le Continental Intercalaire débute presque toujours au toit de l'Albien. Dans la zone d'étude, le toit est défini comme étant la base du Cénomaniens.

- Le Mur de la nappe :

Le mur du Continental Intercalaire coïncide avec la discordance hercynienne sous les plateaux du Tademaït et du Tinrherth. Au niveau du prolongement nord de la dorsale d'Amguid, le Continental Intercalaire repose également sur le Primaire. Alors qu' autour et sous le Grand erg occidental, le Continental Intercalaire recouvre le Lias.

IV.3. Géométrie de l'aquifère.

L'analyse des sondages hydrauliques, pétroliers et de reconnaissances, nous a permis de cartographier l'épaisseur du réservoir (figure n° 08). Egalement de nombreux forages d'eaux creusés, dans leur totalité dans des terrains secondaires, nous renseignent sur l'épaisseur totale et la lithologie du Continental Intercalaire ainsi que sur la variation spatiale de la profondeur de cette nappe le long de la zone d'étude.

- Carte Isopache ou d'égale épaisseur utile :

L'épaisseur des formations gréseuses perméables (grès, grès argileux et grès calcareux) atteinte par la zone d'alimentation de ces sondages, est très irrégulière. Elle change d'un endroit à l'autre, mais en général elle augmente du Nord au Sud et de l'Ouest à l'Est. D'après la carte Isopache du C.I (figure n° 30), on constate que pour la zone de Gourara (Timimoune), cette épaisseur oscille entre 125 et 250 m et même plus dans certains endroits bien localisés pour atteindre les 600 m. Plus au Sud, au Tidikelt (In Salah), la moyenne des épaisseurs varie entre 45 et 150 m et peut même atteindre les 280 m cas su forage (O005-00034). On remarque également que l'unique endroit où les isopaches enregistrent des valeurs élevées se localise au niveau du plateau du Tademaït.

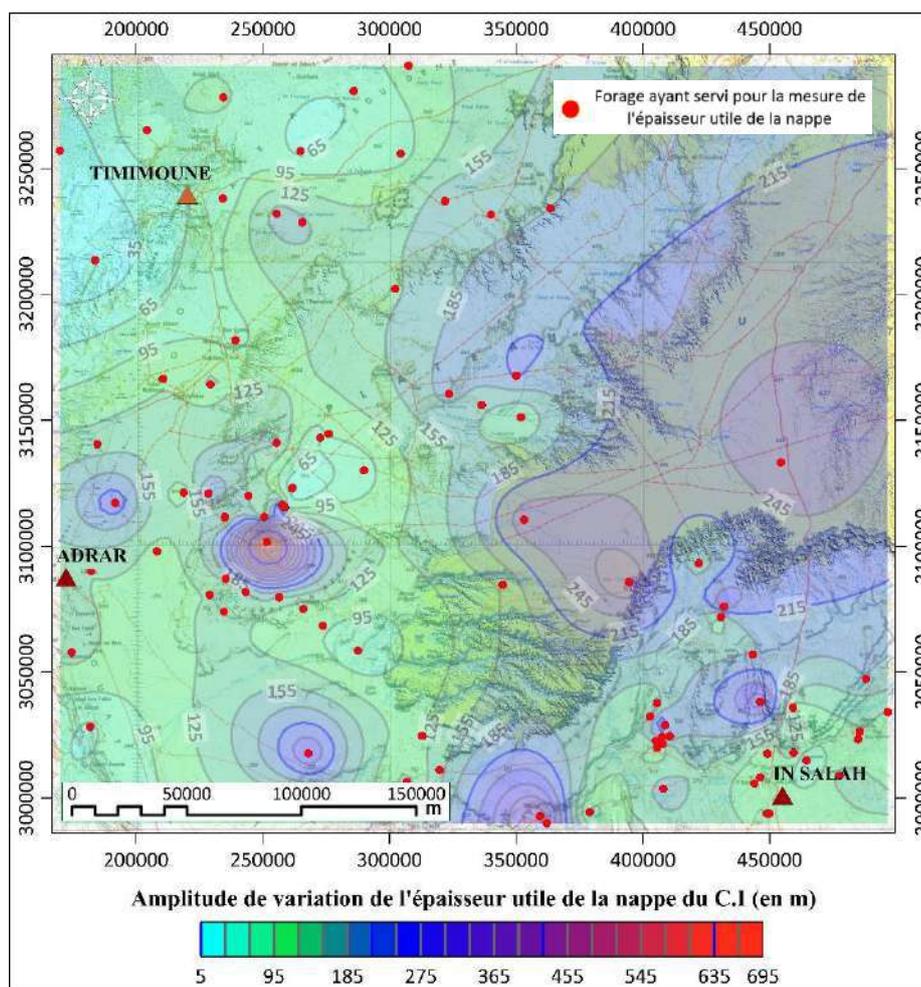


Fig. n° 30. Carte Isopache de la nappe du Continental Intercalaire (Touat – Gourara & Tidikelt).

- Carte Isobathe ou d'égal profondeur totale :

La synthèse de la carte Isobathe (figure n° 31), indique que la profondeur moyenne de cette nappe dans la zone d'étude varie entre 20 m et 400 m. Elle s'immerge du Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est, conformément à la variation des épaisseurs. L'unique sondage ayant enregistré une valeur importante de la profondeur le (E.ODZ – 101), se situe à l'Est d'Adrar. La profondeur totale de ce forage ayant atteint les formations primaires est de 800 m, alors que celle du C.I est de 700 m.

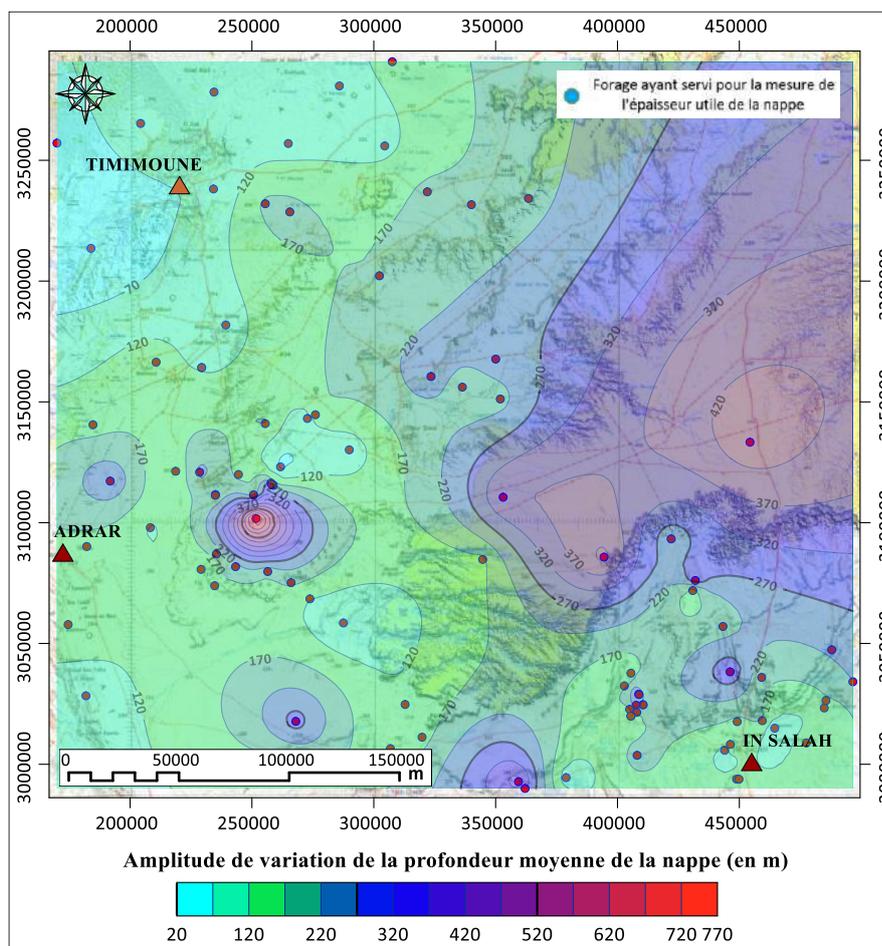


Fig. n° 31. Carte Isobathe de la nappe du Continental Intercalaire (Touat – Gourara & Tidikelt).

IV.4. Perméabilité, porosité et Transmissivité de la nappe du CI.

Les terrains du Continental Intercalaire se caractérisent des de grandes différences dans leur perméabilité. Elles sont dues à la très forte hétérogénéité de la formation.

En effet dans le cas des terrains du (Touat – Gourara – Tidikelt) où la dominance de grès et de grès argileux est très répandue, révèle que la variation de la proportion entre grès et argiles est relativement importante. Dans des forages on a enregistré :

- 48% de grès dans la zone du Touat.
- 80% de grès dans le Gourara.
- 65% de grès dans le Tidikelt.

Des mesures de perméabilités effectuées respectivement sur des puits de Foggaras ainsi que sur des piézomètres ont données les résultats suivants :

- $1,42 \times 10^{-2}$ cm/s au voisinage des foggaras.
- $7,30 \times 10^{-3}$ cm/s au voisinage des puits.
- Entre $1,65 \times 10^{-2}$ cm/s et $2,90 \times 10^{-3}$ cm/s au voisinage des piézomètres.

On peut admettre comme valeur moyenne de cette perméabilité pour toute l'étendue de la zone d'étude, une amplitude de variation qui oscille entre $1,53.10^{-2}$ et $5,10.10^{-3}$ cm/s.

Quant aux Transmissivités et comme le montre la carte suivante (figure n° 32), les terrains du Continental Intercalaire se caractérisent par des valeurs de T très variables, elles diminuent du Sud vers le Nord. Par exemple les terrains dans le Tidikelt se caractérisent par des valeurs de Transmissivités beaucoup plus importantes que ceux au niveau de Touat et Gourara. Ceci peut être expliqué soit à cause de la lithologie du terrain soit par le fait que les terrains à In Salah et environs sont caractérisés par des puissantes épaisseurs utiles de la nappe par rapport aux autres zones soit par l'importance de la conductivité hydraulique des terrains gréseux dans cette zone. Il est à noter que la présente carte a été élaborée à partir des essais de pompages.

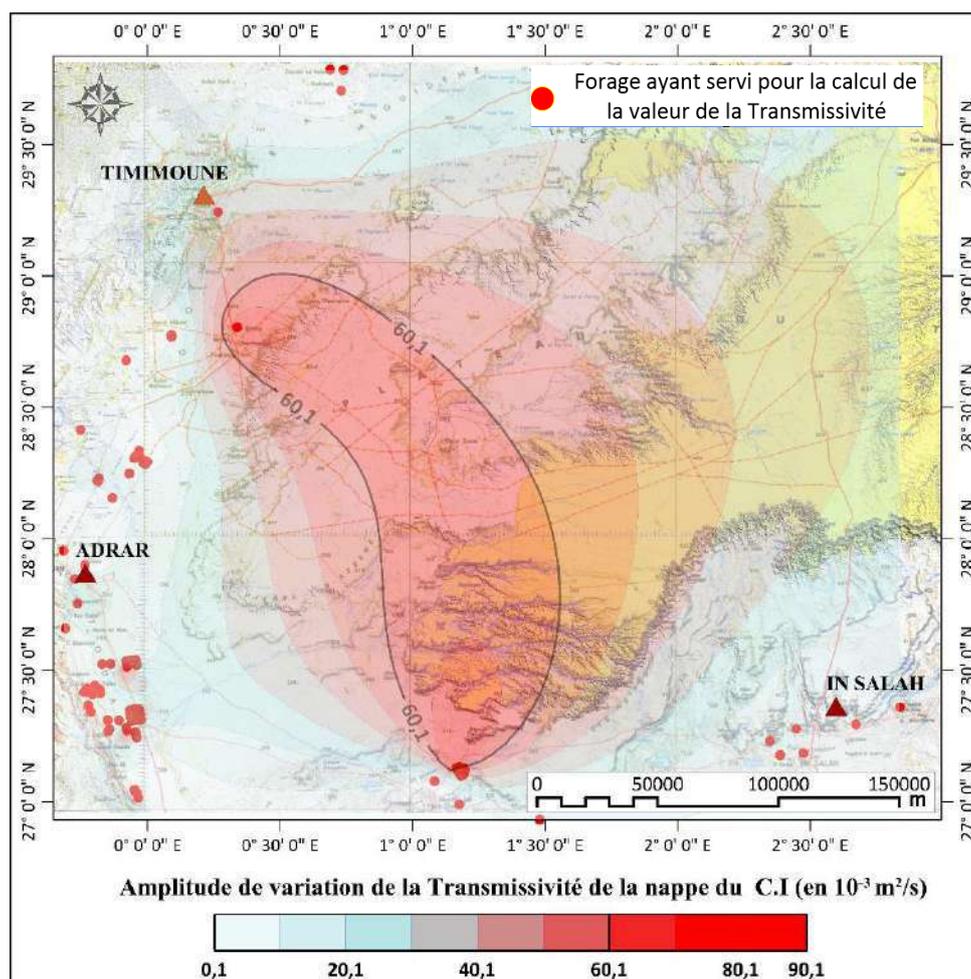


Fig. n° 32. Carte Iso-Transmissivité de la nappe du C.I (Touat – Gourara & Tidikelt).

IV.5. Alimentation, circulation et exutoire naturel des eaux du C.I.

Pour quantifier le volume total qui contribue à la recharge de la nappe albienne, plusieurs auteurs ont essayé de l'évaluer. CORNET (1961), qui est pour la première fois à tenter d'estimer l'alimentation de la nappe à 23 m³/s et ce par le biais des précipitations qui tombaient annuellement au niveau des affleurements du crétacé inférieur de l'atlas saharien.

La superficie de ces affleurements qui s'étendent des frontières algéro-marocaines au méridien de Biskra, est de 10000 Km² (M.O. BABASSY, Recharge et paléo-recharge du système aquifère du Sahara septentrional, 1985).

En 1963, l'étude du B.U.R.G.E.A.P sur la base d'informations complémentaires, rectifie les résultats annoncés par CORNET. D'après cette étude l'alimentation s'effectue à partir de 3 zones à la fois, par l'atlas saharien avec 4 m³/s, par la Hamada sud oranais et le grand erg occidental à raison de 8 m³/s, le Tademaït à raison de 0,5 m³/s (soit un total équivalent à 12,5 m³/s).

Tab. n° 06. Estimation de la recharge du C.I dans le Bassin occidental (O.S.S. 2005)

Années	Source de l'Etude	Estimation de la recharge (m ³ /s)		
1961	CORNET	23		
1963	BUR.G.E.A.P	L'Atlas Saharien	4	12,5
		La Hamada Sud et le Grand Erg Occidental	8	
		Le Tademaït	0,5	
1964	GEOPETROLE	L'Atlas Saharien	4,5	14
		La Hamada Sud et le Grand Erg Occidental	8,9	
		Le Tademaït	0,3	
1972	E.R.E.S.S	L'Atlas Saharien	2,03	5,58
		Le Grand Erg Occidental	3,55	
2003	O.S.S	7,54		

En suite l'étude de GEOPETROLE (1964), en utilisant un modèle analogique, revoit à la hausse le chiffre de BURGEAP. Au terme du calibrage du modèle, l'atlas saharien contribuerait à raison de 4,5 m³/s, la Hamada Sud oranais, le grand Erg occidental pour 8,9 m³/s et le Tademaït avec 0,3 m³/s. D'où, elle fixait un total de 14 m³/s.

Puis en 1972, l'étude E.R.E.S.S dans le but d'élaborer le premier modèle mathématique relatif à la gestion de la ressource en eau dans le bassin S.A.S.S, affecte aux zones d'alimentation comme étant des potentiels imposés pour le modèle. Où les débits d'entrée ont été calculés par le modèle, en s'assurant toutefois que la valeur trouvée par le calcul est compatible avec les observations recueillies du terrain E.R.E.S.S (rapports 2 et 5, 1972).

Après finalisation et calage du modèle en régime permanent, l'étude a retenu comme valeurs d'entrées de débits d'alimentation pour la nappe du C.I : 2,03 m³/s pour l'atlas saharien et 3,55 m³/s pour le grand Erg Occidental, soit un total de 5,58 m³/s.

Enfin, la dernière estimation de la recharge du C.I par sa limite Nord, qui intègre l'Atlas Saharien, la Hamada sud Oranaise et le Grand Erg Occidental, effectuée par calage du Modèle S.A.S.S (O.S.S., 2003), évaluée à 7,54 m³/s comme apport total par cette limite. Pour cela l'unique chiffre à retenir, qui est le plus récent est celui annoncé par l'O.S.S. (Système aquifère du Sahara septentrional, Modèle mathématique, volume IV, Juin 2003).

Quant à l'estimation de la recharge du Continental Intercalaire, cette dernière a fait l'objet de plusieurs études, les principales sont résumées dans le tableau suivant. Ces estimations sont sûres estimées dans les anciens travaux mais elles ont été corrigées par la suite dans les travaux les plus récentes notamment celles de l'O.S.S. (2003) qui sont les plus proches de la réalité.

CHAPITRE V.

V. RESSOURCE EN EAU ET HISTORIQUES DES PRELEVEMENTS.

L'exploitation des eaux de la nappe du C.I dans cette partie du S.A.S.S a probablement débuté, il y a plusieurs siècles, par un système de captage des eaux spécifique aux régions du Tidikelt et du Touat-Gourara : la Foggara. Et puis qu'il s'agit d'une nappe fossile, peu renouvelable, située dans une zone jouant un double hydrodynamique (recharge et exutoire), l'évaluation quantitative des eaux soutirées à partir de cette nappe constitue un élément important dans la gestion des ressources en eau souterraine puis qu'elle représente un paramètre indispensable au calage des modèles mathématiques des prévisions.

V.1. Présentation et interprétation des résultats d'inventaire.

Le dernier inventaire des points d'eau ayant touché la zone d'étude date de 2012, où le dépouillement et la synthèse des résultats nous ont permis d'une part, de quantifier le nombre actuel de points d'eau par communes, par usages et par état, et d'autre part d'établir une évaluation des volumes d'eau mobilisés. Et puisque notre zone d'étude chevauche entre 2 wilayas (Adrar et Tamanrasset), le recensement a enregistré à travers les 3 entités : Touat, Gourara et Tidikelt (figure n° 33) un total de 1082 points d'eau répartis entre puits, forages et piézomètres.

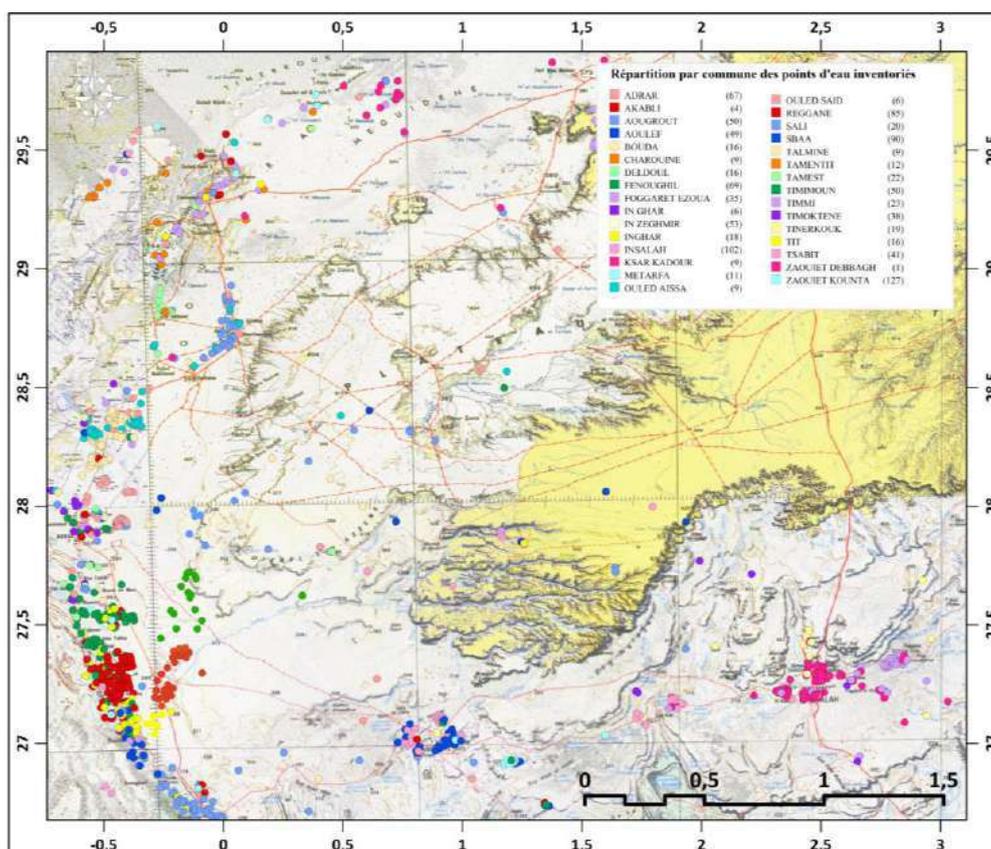


Fig. n° 33. Carte de situation par commune des points d'eau inventoriés en 2012.

D'après la carte de répartition par commune des différents points d'eau recensés sur toute l'étendue de la zone d'étude, il s'avère que les communes ayant enregistrées un nombre

important de forages sont : Zaouiet Kounta (127) forages, In Salah (102), Sbaa (90), Reggane (85), Aougrouit avec Timimoune comptent 100, Adrar également avec 67 points d'eau. Par contre celles ayant montrées un nombre très faible sont : Zaouiet Debagh (01), Talmine (09) et Akabli (04).

Quant à leur répartition par usages, comme le montre la carte suivante (figure n° 34) on enregistre que sur les 1082 puits d'eau on compte :

- 313 forages destinés pour l'alimentation en eau potable (soit 29% de la totalité).
- 684 forages mobilisés pour l'irrigation (soit 63% du nombre total).
- 45 forages ayant été réalisés pour des besoins d'explorations (soit 4% du total).
- 30 forages pour les besoins industriels et énergétiques (soit 3% de l'ensemble).
- 10 ouvrages correspondant à des points de contrôles piézométriques (avec 01%).

Il faut mentionner que sur les 1082 points d'eau inventoriés, on compte 503 forages en services dont 80% d'entre eux sont destinés pour les besoins agricoles et 350 non exploités pour des raisons de problèmes techniques. En plus des 1082 points d'eau, l'inventaire a ressortit plus de 680 puits ayant été servis pour alimenter les foggaras qui alimentent les oasis du Touat et Gourara.

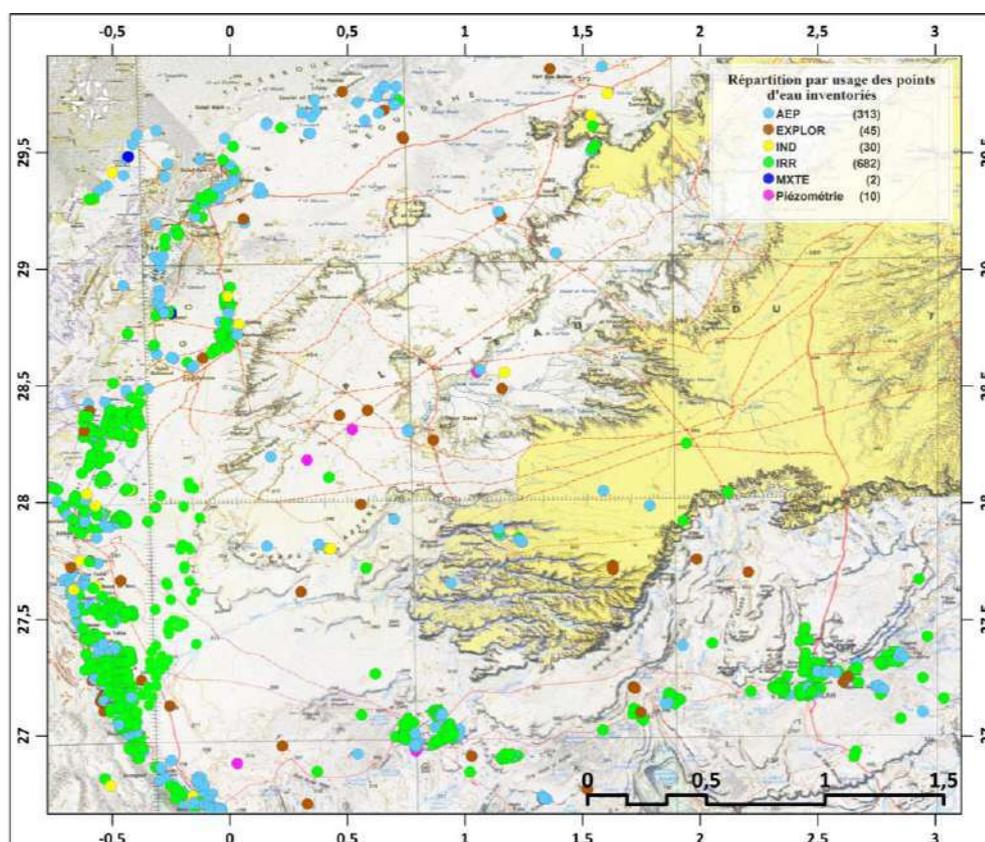


Fig. n° 34. Carte de situation par usages des points d'eau inventoriés en 2012.

Il est à signaler que durant les visites sur terrains, il a été enregistré dans certaines régions du Sud que l'artésianisme demeure toujours. D'où sur les 503 forages en services, 49 d'entre eux sont toujours artésiens, tous situés au Sud de la zone d'étude (au Tidikelt) sur l'axe Tit In Salah (07 à Tit, 05 à In Ghar et 36 à In Salah).

Quant à l'évaluation du volume d'eau soutiré de la nappe du C.I, mobilisé à travers l'ensemble des forages en services et ceux exploitables, a été calculé sur la base des données collectées dans le cadre de cet inventaire en tenant compte du débit de chaque point d'eau, et ce en fonction de sa fréquence de pompage journalière durant toute l'année.

Les volumes d'eau qui sont évalués annuellement à plus de 430 Hm³ ont été prélevés à partir de plus de 500 forages en services. Actuellement le nombre a augmenté et le volume aussi.

Tab. n° 07. Répartition par zone du volume d'eau soutiré de la nappe du C.I (Inventaire Année 2012).

Régions	Gourara	Touat	Tidikelt	TOTAL
Vol. soutirés (Hm ³ /an)	108,6	245,7	82,69	437

V.2. Evolution du nombre de forages et historique des débits.

La représentation graphique (figure n° 35) des données indiquées sur le tableau suivant (tableau n° 08), montre une croissance sans cesse du nombre de points d'eau réalisés depuis les années 60.

Tab. n° 08. Evolution annuelle du nombre de points d'eau réalisés de 1965 à 2012

Années	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	1998	2003	2008	2012
Nombre de forages par année	80	10	15	39	64	256	302	65	145	43	63
Nombre cumulé de forages	80	90	105	144	208	464	766	831	976	1019	1082

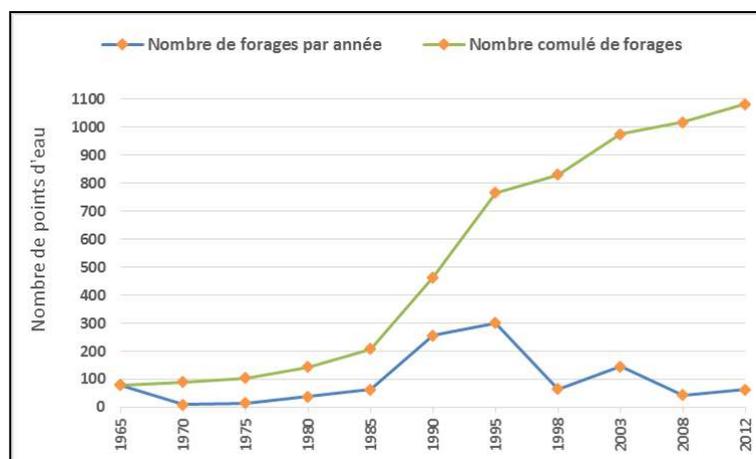


Fig. n° 35 Evolution par année du nombre de points d'eau réalisés (1982-2012).

Le même graphique indique que c'est durant l'année 1990 à 2003, où la région a connu le plus grand nombre de réalisation de forages, dont la majorité est à usage agricole. Cette période coïncide avec le lancement par l'état, des grands projets de développement de l'agriculture dans les régions sahariennes.

Quant à l'évolution dans le temps des volumes d'eau albiennes soutirés des forages réalisés dans la zone d'étude entre 1960 et jusqu'à 2012, on constate d'après le graphique (figure n° 36) des données reportées sur le tableau suivant (tableau n° 09), qu'il y a une nette augmentation du débit d'exploitation. On passe de 0,12 m³/an soit 120 l/s le débit enregistré jusqu'à 1960 à 13850 l/s en 2012.

Tab. n° 09. Historique des prélèvements soutirés de 1960 à 2012

Années	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	1998	2012
Volume soutiré (m³/s)	0,12	0,23	0,346	0,476	0,56	1,06	5,98	7,4	7,27	13,85

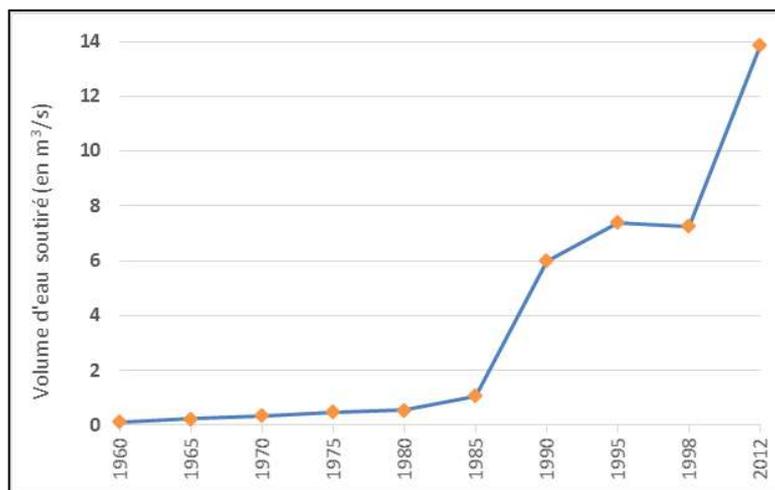


Fig. n° 36. Evolution par année du volume d'eau soutiré (1960 – 2012).

Il est à signaler également que des études menées par l'O.S.S., ont montrées que les régions du Touat-Gourara et du Tidikelt prélèvent actuellement 44% de l'exploitation totale du C.I à l'échelle du S.A.S.S sans compter les Foggaras.

L'accroissement considérable du nombre de forages qui s'est produit au cours de la période s'étalant entre 1980 et 2000, a engendré un effet négatif sur l'artésianisme de la nappe notamment au niveau du Tidikelt.

Conclusion de la Partie n° 01.

Située en plein cœur du Sahara algérien, la région d'étude est située au Sud-Ouest du pays à plus de 1200 km d'Alger. Elle correspond à l'extrémité occidentale du plateau de Tademaït, limitée au Nord-Ouest par la plaine de Gourara, au Sud par la plaine de Tidikelt et à l'Ouest par la dépression de Touat. Géographiquement, elle se situe entre les méridiens : 1° 22' W et 3° 14'E, et les parallèles : 26° 28' et 30° 19' Nord. Physiquement, elle se caractérise par la présence des buttes témoins appelées (Gour) qui s'étalent aux bordures de la falaise de Tademaït.

La synthèse hydroclimatologique sur une série d'observation allant de 2010 à 2014, révèle que la zone d'étude se caractérise par un climat saharien de type aride et sec. Le cumul des précipitations diminue au fur et à mesure en allant du Gourara qui est de 20 mm à 7 mm à Touat pour atteindre les 5 mm au Tidikelt. En général la moyenne annuelle des précipitations est très faible et ne dépasse guère les 20 mm, quant aux températures moyennes mensuelles qui sont de 25 °C, elles marquent des augmentations à partir du mois d'avril et jusqu'au mois de septembre conjuguée par des fortes évaporations et les rafales de vents. Ce qui explique l'étendue de la période de sécheresse qui affecte la région durant toute l'année. L'utilisation du diagramme d'Emberger nous a permis de classer les 3 régions dans l'étage bioclimatique saharien à climat doux à chaud. L'analyse et le traitement du MNT caractérisant la zone d'étude nous a permis de mettre en évidence d'une part, de ressortir les principaux oueds qui peuvent éventuellement drainer la nappe ainsi que d'identifier l'ensemble des sous bassins qui longent la partie occidentale du Sahara, avec leurs caractéristiques à savoir (périmètres, superficie, longueur...etc.). Il faut signaler que ces résultats représentent pour la première fois le complément des travaux élaborés par DUBIEF en 1952, où il n'a ressorti que 2 sous bassins au lieu de 5.

La description géologique de la région : (Gourara – Touat – Tidikelt) soumise à l'affleurement, a montré la présence de 3 formations du plus récent au plus ancien à savoir :

➤ Les terrains Quaternaires : constitués essentiellement par des alluvions argileuses sableuses, récents. Ces dépôts quaternaires correspondent aux couches de sables (dunes) dont l'épaisseur varie entre 0 à 20 m en moyenne.

➤ Les formations sédimentaires d'âge secondaire et tertiaire, couvrant toute l'étendue de l'aire de l'étude. Les terrains Secondaires, eux correspondants à la formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur, reposant, en discordance sur une série détritique allant du Cambro-ordovicien au Carbonifère comprenant essentiellement des grès (conglomératiques à la base du Cambrien) avec intercalation de marnes et d'argiles et quelques bancs calcaires. Les terrains Tertiaires : constitués principalement de formations sédimentaires (continentaux et marins), sont de faciès très hétérogènes, grès-argileux à la base puis grès-calcaire au milieu et se terminent par la dalle calcaire.

➤ Ces terrains Primaires très fossilifères, sont constitués principalement de terrains sédimentaires d'une part et de terrains cristallins d'autre part. Le Cambrien est gréseux, le Gothlandien est schisteux à intercalations calcaires, le Dévonien est calcaire au sommet, schisteux-argileux à la base.

Du point de vue hydrogéologie, le système aquifère qui caractérise la zone d'étude est représenté par une seule nappe le Continental Intercalaire C.I. Cette dernière contenue dans les formations d'âge crétacé inférieur est composée principalement de sables, de grès verts parfois argileux et de graviers, la profondeur des forages qui captent cette nappe oscille entre 100 et 200m en moyenne, le niveau statique de cette nappe varie du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest, il varie par rapport au niveau du sol entre 0,8m et plus de 50m, avec des débits d'exploitation de 5 à 50 l/s.

Les paramètres hydrodynamiques qui caractérisent cet aquifère dans cette partie occidentale du SASS, pour les Transmissivité, elles varient entre 0,01 et $1,21 \times 10^{-2}$ m²/s, alors que la perméabilité s'échelonne entre 0,8 et $0,12 \times 10^{-4}$ m/s. Le débit soutiré à travers les 1082 points d'eau recensés est évalué à 437 Hm³/an.

La synthèse entre les deux cartes piézométriques élaborées respectivement en 2012 avec celle de 1971, montre que sur une période de 40 ans d'observations, on enregistre un abaissement important du niveau piézométrique de la nappe du C.I, et ce suite à l'exploitation intensive à cause de la prolifération sans cesse des forages qu'a connue la zone depuis les années 2000 (période de lancement des différents programmes de développement agricoles des régions sahariennes initiés par le ministère de l'agriculture). Quant à l'estimation de la recharge du Continental Intercalaire, les études ont démontrées que les anciens travaux l'ont surestimé et que les plus récentes notamment ceux de l'O.S.S (2003) sont les plus proches de la réalité.

En matière de ressources hydriques, le dernier inventaire qui date de 2012 (données ayant servis à cette étude) a ressorti à travers les 3 zones plus de 1000 points d'eau sans compter les puits de foggaras. Ce nombre qui était de 80 forages durant les années 60 ne cesse de s'accroître pour atteindre les 1100 en 2016 dont 503 d'entre eux sont en services. On compte 29% de la totalité destinés pour l'AEP et 63% pour l'IRR, le reste est destiné pour des divers usages (explorations, piézométrie et autre). Le volume annuel mobilisé pour l'ensemble des forages est évalué à 430 Hm³. Où la région de Touat enregistre annuellement 245,7 Hm³, ce qui explique que le plus grand nombre de points d'eau se localise dans cette partie de la zone d'étude.

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a document. The image is partially visible on the right side of the page, overlapping the text box.

Deuxième partie

Matériels et méthodes

Introduction de la Partie n° 02.

L'élaboration du présent travail a nécessité un ensemble de matériels tant sur le terrain qu'au laboratoire. Aussi des programmes et logiciels ayant servis comme outils dans la réalisation de diagrammes et l'élaboration de cartes.

Dans les paragraphes qui suivent, nous donnons une description de la méthodologie d'échantillonnage d'eau pour analyses physicochimiques et aussi l'appareillage utilisé au cours de cette étude.

La base de données avec laquelle a été élaboré le présent travail est répartie en 2 groupes, des données qui datent de 2012 ayant été récupérées de la Direction Régionale d'Adrar de l'ANRH, le second groupe c'est nous-mêmes que nous l'avons récolté lors de notre dernière mission sur terrain effectuée en 2019.

Les éléments chimiques ayant fait l'objet de cette étude sont répartis en 2 groupes, et se résument comme suit : Paramètres physiques tels que la Conductivité électrique, le pH, le Eh et la Température tous effectués sur terrain. Et paramètres chimiques élaborés au laboratoire des eaux et de sol de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de la Direction Régionale Sud-Ouest à Adrar, à savoir les anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et SiO_4^{2-}), les cations : (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ et Mg^{2+}) ainsi que le Résidu sec, la dureté et l'Alcalinité.

Il est à noter également que des mesures de paramètres de pollutions ont été effectués à savoir : (les Nitrates NO_3^- , les Ortho-phosphates PO_4^{2-} et les Fluors F^-).

Mais avant de communiquer les résultats obtenus, il est nécessaire d'exposer dans la présente partie, les conditions de travail, le mode avec lequel nous avons effectué notre échantillonnage d'eau ainsi que les techniques de mesures sur terrain et au laboratoire et surtout les différents programmes et logiciels qui nous ont servis pour le traitement et la synthèse de ces résultats. Tout d'abord nous traiterons les résultats hydrochimiques puis ensuite les données piézométriques.

CHAPITRE VI.

VI. MATERIELS ET METHODES DE TRAVAIL.

VI.1. Description des données utilisées.

Les données climatiques traitées sont établies à partir des observations des 05 dernières années (allant de 2010 à 2014), issues des trois (03) stations : Timimoune pour le Gourara, Adrar pour le Touat, et In Salah pour le Tidikelt).

L'inventaire des points d'eau (1082 points) a été effectué par les techniciens de l'ANRH d'Adrar entre 2011 et 2012, dont 470 points d'eau ayant ont fait d'analyses physicochimiques au niveau du laboratoire de l'ANRH d'Adrar (en 2012), données, lesquelles nous ont servis dans l'analyse statistique et la caractérisation hydrochimique des eaux de la nappe étudiée.

Une campagne d'échantillonnage sur soixante (60) forages nous l'avons effectuée pour des mesures in-situ et d'analyses physicochimiques et isotopiques (O^{18} et H^2) ; respectivement au laboratoire de l'ANRH d'Adrar et au laboratoire du Centre Nucléaire des Recherches Atomiques Algérien (ex. COMENA).

- 71 points ayant fait l'objet de mesures piézométriques (40 pour l'année 2012 et 31 pour 1971).
- 120 Coupes de sondages (logs et master logs) ont été saisies pour l'établissement de coupes lithologiques et stratigraphiques (modèles en 3D).
- 94 coupes de forages ayant été analysées pour élaboration de cartes d'égalité d'épaisseurs (Isopaches) et celle d'égalité de profondeurs (Isobathes) de la nappe du C.I.
- 113 forages ayant fait l'objet d'essais de pompages, pour l'établissement de la carte d'Isotransmissivité.
- 86 échantillons des 470, nous en servis dans la thermodynamique géochimique pour le calcul des Indices de Saturations.
- 54 logs de sondages ont été analysés pour le calcul et cartographie de la fraction utile de la nappe du C.I.
- 16 échantillons d'eau ayant servis pour tester par région l'évolution spatiale des ions majeurs en fonction du sens d'écoulement des eaux de la nappe.
- 16 échantillons d'eau utilisés pour distinguer l'évolution spatiale des faciès chimiques suivant le sens d'écoulement et en tenant compte de la lithologie de la nappe.
- 435 échantillons d'eau ayant servis pour le traitement et la cartographie de l'Indice de Qualité des Eaux souterraines de la zone d'étude (GWQI).
- De nombreuses cartes géologiques et topographiques à différentes échelles ont été utilisées dans le présent travail.

VI.2. Localisation et mode de choix des points de mesures.

La carte ci-après (figure n° 37) illustre la répartition spatiale des points d'eau ayant fait l'objet de mesures d'échantillonnage d'eau pour analyses physicochimiques et ce pour les 2 périodes de notre travail.

On compte pour l'année 2012, 470 échantillons d'eau répartis à travers les 3 entités constituant la zone d'étude soit 91 points de mesures pour le Gourara, 287 au Touat et 92 au Tidikelt et en vue d'étudier l'évolution du chimisme de l'eau albienne une dernière campagne a été effectuée en 2019 n'ayant touché que 59 points d'eau dont 25 au Gourara, 21 au Touat et 13 au Tidikelt, ces points correspondent aux mêmes points de mesures de l'année 2012.

La première campagne a débuté fin Décembre 2011 et achevée mois d'Octobre 2012. Les 470 points d'eau choisis pour échantillonnage (tous des forages) ont été sélectionnés selon les critères suivants : la profondeur du forage (qui varie d'une zone à l'autre entre 60 et 500 m), l'année de mise en service du forage et son usage d'exploitation. On compte pour cela : 147 forages pour l'AEP (soit 31% du total), 298 pour l'IRR (soit 63%) et 25 forages entre DOM, IND et MXT avec (6% de la totalité). Par contre pour la dernière campagne qui a duré 15 jours (fin Décembre 2018 jusqu'à la mi-Janvier 2019), sur les 59 forages visités 80% d'entre eux sont destinés pour l'AEP où le choix n'était pas arbitraire puisque ces ouvrages le plus souvent sont en services.

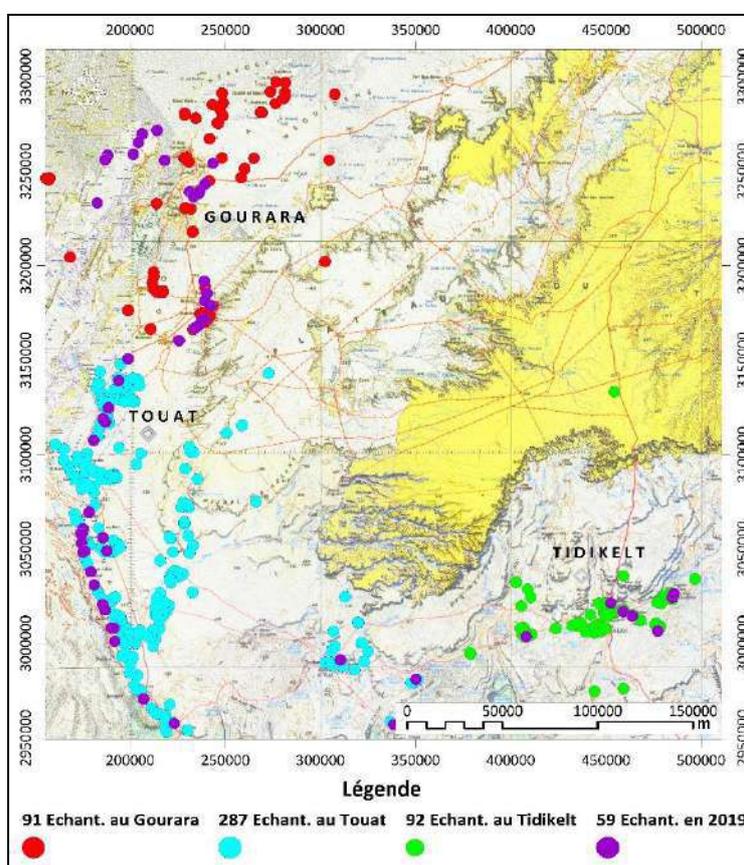


Fig. n° 37. : Situation des points d'eau sélectionnés pour échantillonnage.

VI.3. Mode d'échantillonnage et conditions de mesures.

Les échantillons d'eau prélevés dans des flacons en polyéthylène de 75 ml sont ensuite transférés chaque fin de mission au laboratoire des eaux de l'Agence pour être conservés au réfrigérateur à +4°C. Il est signalé qu'il n'y a pas eu de mesures in Situ lors de la campagne effectuée en 2012.

Cependant durant la dernière campagne, une filtration des échantillons d'eau prélevés a été effectuée sur terrain à l'aide d'une membrane filtrante de 0,45 µm de diamètre, et ce pour éviter la précipitation de certains composés et d'empêcher toute modification ultérieure de la composition chimique de l'eau prélevée due aux particules en suspensions et/ou à toute activité biologique. En plus 4 paramètres physiques ont fait l'objet de mesures sur terrain des 59 échantillons prélevés à savoir le pH, la Température (T°C), la Conductivité électrique (E.C) exprimée en µS/cm et le Potentiel d'oxydoréduction (Eh).

VI.4. Méthodes d'analyses physicochimiques et données de laboratoire.

Pour les analyses chimiques, les techniques analytiques des échantillons d'eau prélevées utilisées sont celles standard employés selon (Rodier, Edition 2009). Les paramètres physiques mesurés sur terrain sont le pH, T°, E.C et Eh, ceux mesurés au laboratoire : E.C et pH. Alors que les paramètres chimiques mesurés au laboratoire sont : Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁻, SiO₂⁻, PO₄⁻, F⁻, l'alcalinité, la turbidité et le résidu sec.

VI.4.1. Paramètres physiques mesurés sur terrain.

Les 4 paramètres à savoir : pH, Eh, E.C et T° : ont été mesurés à l'aide d'un multi-paramètre de terrain de marque HACH (réf : HQ.40d Field Case 58258-00). Affichage simultané du pH, de la température, de la conductivité en µS/cm et du Eh.

VI.4.2. Paramètres physiques mesurés au laboratoire.

a) Résidu Sec :

La détermination des résidus permet d'estimer la teneur en matières dissoutes et en suspension d'une eau. Si l'eau est filtrée préalablement à la mesure, le résidu correspond alors aux matières dissoutes. Une certaine quantité d'eau est évaporée dans une capsule tarée. Le résidu desséché est ensuite pesé. Comme matériel de mesures, on utilise : une capsule en porcelaine, une balance analytique et une étuve réglable.

- Le mode opératoire :

- Prélever 100 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée et déverser la dans la capsule.
- Porter cette dernière à l'étuve à 105° C pendant 24 heures.
- Laisser refroidir pendant ¼ d'heure au dessiccateur.
- Peser immédiatement et rapidement.

b) Conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes de platine de 1 cm² de surface, séparés par une distance de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité électrique d'une eau s'exprime généralement en (µS/cm).

- Le mode opératoire :

- Rincer plusieurs fois la cellule à conductivité, avec de l'eau distillée ;
- Plonger l'électrode complètement dans un récipient contenant l'eau à analyser ;
- Agiter afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide, elle permet d'éliminer les bulles, puis noter la valeur finale.

VI.4.3. Paramètres physicochimiques mesurés au laboratoire.

VI.4.3.1. Méthode potentiométrique :

Cette méthode est utilisée pour le dosage des carbonates (CO_3), bicarbonates (HCO_3 et les OH^- (mesure du pH), offre de nombreux avantages. Elle évite toute erreur d'estimation particulière par rapport aux méthodes utilisant les indicateurs colorés. En outre elle est particulièrement intéressante dans le cas des eaux troubles.

Le principe consiste à ce que les carbonates ne peuvent exister qu'à $\text{pH} > 8,3$ alors que les bicarbonates que si le pH est compris entre 4,4 et 8,3. Au cours d'un dosage acimétrique doublé d'une mesure de pH, on doit définir à quel moment ces ions sont encore présents ou non dans l'échantillon testé. Les réactifs employés sont : (Solution tampon pH/10 et pH/4) et (Solution H_2SO_4 à 0,01 N).

- Le mode opératoire :

Il se base sur la mesure du pH, on prend un bécher après rinçage on le remplit par de l'eau à analyser.

- On allume le pH-mètre (bouton On/Off)
- On rince l'électrode par de l'eau distillée
- On ajoute à la burette (elle doit être rincée par de l'eau distillée) H_2SO_4 à 0,01N
- On émerge l'électrode dans le bécher contenant de l'eau à analyser puis on enregistre la valeur de pH mentionnée.

- Le mode de Calculs :

▪ Premier cas si $\text{pH} > 8,3$:

Deux cas peuvent se présenter :

1) Si $V_2 > 2V_1$: il y a des bicarbonates dans l'échantillon ce qui implique une teneur négligeable en OH^- .

$\text{OH}^- = 0$:

$$\text{CO}_3^{-2} (\text{még/L}) = (2V_1 \times 0,01 \times 1000) / \text{PE ml}$$

$$\text{Conversion: } \text{CO}_3^{-2} (\text{mg/L}) = \text{CO}_3^{-2} (\text{még/L}) \times 30$$

$$\text{HCO}_3^- (\text{még/L}) = [(V_2 - 2V_1) \times 0,01 \times 1000] / \text{PE ml}$$

$$\text{Conversion (mg/L en még/L)} : \text{HCO}_3^- (\text{mg/L}) = \text{HCO}_3^- (\text{még/L}) \times 61.$$

2) Si $V_2 < 2V_1$: présence de OH^- dans l'échantillon, donc une teneur en bicarbonates négligeable.

$\text{HCO}_3^- = 0$:

$$\text{OH}^- (\text{még/L}) = [(2V_1 - V_2) \text{ ml} \times 0,01 \times 1000] / \text{PE ml}$$

$$\text{Conversion: } \text{OH}^- (\text{mg/L}) = \text{OH}^- (\text{még/L}) \times 17$$

$$\text{CO}_3^{-2} (\text{még/L}) = [2(V_2 - V_1) \text{ ml} \times 0,01 \times 1000] / \text{PE ml}$$

$$\text{Conversion: } \text{CO}_3^{-2} (\text{mg/L}) = \text{CO}_3^{-2} (\text{még/L}) \times 30$$

▪ Deuxième cas si pH est compris entre 4,4 et 8,3 $\text{pH} > 8,3$:

Dans ce cas il n'y a ni carbonates ni OH^- dans l'échantillon.

$$\text{HCO}_3^- (\text{még/L}) = V_2 \text{ ml} \times 0,01 \times 1000$$

$$\text{Conversion : } \text{HCO}_3^- (\text{mg/L}) = \text{HCO}_3^- (\text{még/L}) \times 61$$

VI.4.3.2. Méthode complexométrique pour dosage du (Ca et Mg).

Cette méthode souvent utilisée pour le dosage du calcium et du magnésium. Elle est basée essentiellement sur l'utilisation du sel disodique de l'acide d'Éthylène Diamino Tétra Acétique qui se cristallise avec l'H₂O, le résultat appelé des complexos forme avec un nombre de cation des complexes dont la stabilité dépend essentiellement du pH.

Pour cela 2 réactifs sont utilisés, une solution EDTA (Éthylène diamine tétra acétique) et un autre tampon à pH = 10.

- **Solution I (E.D.T.A d'Éthylène diamine tétra acétique) composée de :**

40g d'E.D.T.A, 5g de Soude caustique (Na OH) et 1g de chlorure de magnésium (Mg Cl₂ 6H₂O).

- **Solution II constituée essentiellement :** de mélanges de 2 solutions A et B à volumes égaux (A : Chlorure d'ammonium – B : Tartrate double de sodium et de potassium).

- **Le mode opératoire pour dosage du (Ca). :**

- Le dosage de l'E.D.T.A s'impose à chaque fois que le remplissage du flacon doseur est fait. On prépare une solution de CaCO₃ à 1g/L (attaque de 1g de CaCO₃ par HCl dilué puis ajuster à 1 litre avec de l'eau distillée. Le CaCO₃ doit avoir été séché à l'étuve puis refroidi au dessiccateur. On prélève 10 ml, qui seront par la suite dosés en même temps que les échantillons. Cette solution contient 20 méq/L de Ca⁺⁺.
- Les PE ayant été placés dans des béchers de 50 ml on y ajoute systématiquement 2ml de Tampon (Ca/Mg) et 2 ml de NaOH (Ca) et une pincée d'indicateur, la solution pour cela prend une teinte rose pour le (Ca/Mg) et rouge pour le (Ca).
- La solution étalon de Ca⁺⁺ et les échantillons ainsi préparés sont alors traités de manière identique. L'E.D.T.A étant placé dans la burette, on verse jusqu'au virage du rose au bleu en maintenant une agitation dans le bécher.

On notera soigneusement le volume V₁ de l'E.D.T.A nécessaire pour faire virer la solution étalon de Ca⁺⁺ et les volumes V₂ de l'E.D.T.A nécessaire pour faire virer les échantillons.

- **Calcul de la normalité de l'E.D.T.A de 10ml à 20méq/L de Calcium dosé par V1 de l'E.D.T.A :**

$$N_{E.D.T.A} \text{ (méq/L)} = (20 \times 10) / V_1 = 200 / 10.$$

- **Teneur en Calcium et Magnésium des échantillons :**

$$X \text{ (méq/L)}_{Ca/Mg} = (N_{E.D.T.A} \times V_2) / PE.$$

- **Teneur en Calcium des échantillons :**

$$X \text{ (méq/L)}_{Ca} = (N_{E.D.T.A} \times V_2) / PE.$$

- **Teneur en Magnésium des échantillons :**

$$\text{(méq/L) de Mg} = \text{(méq/L) de Ca/Mg} - \text{(méq/L) de Ca}$$

VI.4.3.3. Méthode photométrique a flamme pour dosage du (Na et K).

Pour doser ces 2 éléments, on utilise comme appareils, le Photomètre a flamme accompagnée d'un enregistreur. Le principe de cette méthode consiste à ce que les ions en solution sont portés au moyen d'une flamme de température convenable à un niveau énergétique supérieur à la normal (on dit que les atomes sont excités par la flamme). Une fois libérés de la flamme, ils restituent l'énergie acquise en émettant une radiation caractéristique de l'élément. On pulvérise donc au moyen d'un gicleur la solution à doser dans une flamme de température déterminée par l'élément que l'on recherche. On sélectionne la radiation attendue au moyen d'un filtre, puis on établit une gamme étalon pour chaque élément dosé et l'on s'y réfère pour déterminer une concentration inconnue.

Pour les réactifs, 2 solutions doivent être employées, une solution mère de Na et du K et une solution étalons de Na⁺ et du K⁺ dont le principe est comme suit:

Mettre successivement dans des fioles jaugées à 100 ml : 5,4, 3,1, 0,5 et 0,2 ml de la solution mère en Na⁺ compléter à 100 ml par de l'eau distillée. D'où Pour le K⁺ en prend : 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,6 – 1 puis compléter à 100 ml avec de l'eau distillée.

On obtient des solutions étalons contenant respectivement :
500, 400, 300, 100, 50 et 20 mg/L de Na⁺ Et 100, 60, 40, 30, 20 et 10 mg/L de K⁺.

VI.4.3.4. Méthode pour dosage des Chlorures (Cl⁻).

Les chlorures en présence du Thio-cyanate mercurique et de l'alun-ferrique donnent en milieu nitrique acide un complexe coloré orange susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 470 nm. Pour les réactifs, on doit employer les solutions suivantes :

- Solution saturée de Thio-cyanate mercurique.
- Solutions d'Alun-ferrique.
- Solution mère de Chlorure à 10 g/L.
- Solutions Etalons.

- Le mode opératoire pour dosage du (Cl) :

On place les PE (5 ml) dans des Erlen de 50 ml. Les PE des solutions étalons, le témoin (H₂O) et les échantillons sont alors traités de manière identique, on ajoute en suite dans l'ordre 15 ml de la solution de Thio-cyanate mercurique préalablement diluée au 1/3 puis 15 ml de la solution nitrique d'alun ferrique également diluée au 1/6.

Ensuite on agite vigoureusement les Erlen pour uniformiser la coloration qui apparaît et on laisse au repos pendant ½ heure. Puis en fin on effectue les lectures au colorimètre à la longueur d'onde de 470 nm en réglant le zéro avec le témoin.

En fin les résultats seront exprimés selon la courbe (figure n° 38) d'étalonnage suivante qui donne directement la teneur en Chlorure exprimée en mg/L.

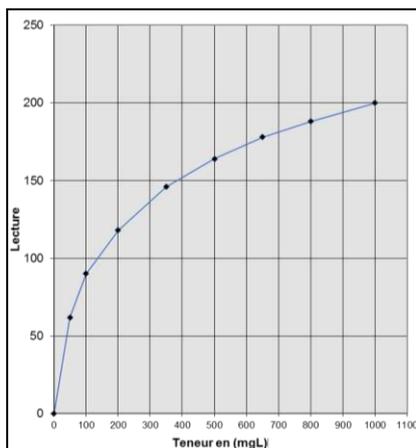


Fig. n° 38. Courbe d'étalonnage des Chlorures (en mg/L)

VI.4.3.5. Méthode pour dosage des Sulfates (SO_4^{2-}).

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum. Le précipité ainsi obtenu. On effectue une mesure turbidimétrique à la longueur d'onde de 495 nm. Pour les réactifs, on doit employer les solutions suivantes.

- Solution de Chlorure de Baryum et de gélatine.
- Solutions d'Alun-ferrique.
- Solution mère de Sulfate à 10 g/L.
- Solutions Etalons.

- Le mode opératoire pour dosage du (SO_4). :

On place les PE (5 ml) dans des Erlen de 50 ml. Les PE des solutions étalons, le témoin (H_2O) et les échantillons sont alors traités de manière identique tout d'abord on ajoute à chaque PE, 20 ml de la solution de BaSO_4 et de gélatine préalablement diluée au 1/6 puis on agite pour uniformiser le trouble et on laisse au repos pendant 20 mn jusqu'à la mesure. Ensuite on effectue les lectures au colorimètre à la longueur d'onde de 495 nm en réglant le zéro avec le témoin. Les résultats seront lus selon la courbe d'étalonnage suivante en mg/L (figure n° 39).

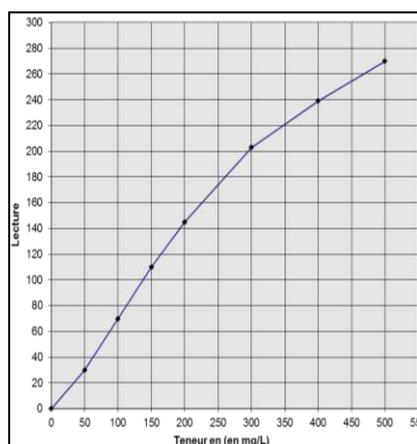


Fig. n° 39. Courbe d'étalonnage des Sulfates (en mg/L)

VI.4.3.6. Méthode pour dosage de la Silice (SiO₂).

Le principe se base sur la colorimétrie. Elle peut se faire sur le complexe jaune mais il faut alors de grandes quantités de silice et cette méthode est peu sensible. Les phosphates donnent des réactions analogues ; leur teneur dans les eaux étant généralement faible, on se contente de diminuer leur interférence possible par addition d'acide tartrique. On peut aussi éliminer les phosphates par précipitation en milieu ammoniacal $\text{CaCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{OH}$.

Cette méthode ne permet de doser que la silice ionique à l'exception de la silice colloïdale. Pour doser la silice totale, il est nécessaire de solubiliser la silice colloïdale par fusion alcaline après évaporation à sec de l'eau. On obtient ensuite la silice colloïdale par différence. Quant aux réactifs, tous doivent être conservés dans des flacons en polyéthylène.

- Solution de Chlorure de Baryum et de gélatine :
- Solution sulfurique de molybdate d'ammonium à base de :
- Solution d'acide tartrique :
- Solution Amino₁ naphthol₂ sulfonique₄ 4d'acide tartrique, constituée d'un mélange de 2 solutions (A : Chlorure d'ammonium et B : Bisulfite de sulfite de sodium.)
- Solution étalon de silice à 1 g/L.

- Le mode opératoire pour dosage du (SiO₂) :

On place les PE (5 ml) dans des Erlen de 50 ml. Tout d'abord on ajoute à chaque PE, 20 ml de la solution. Dans des fioles jaugées de 50 ml, lavées 24 heures avec de l'HCl N/5 mettre 4, 10, 15, 20, 30, 40 ml de SiO₂ à 10 mg/L. Ceci correspond respectivement à 2, 5, 10, 15, 20 mg/L de SiO₂ dans de l'eau à analyser pour une prise d'essai de 10 ml.

Compléter à environ 30ml avec de l'eau distillée exempte de silice puis ajouter 1ml de la solution molybdique. Laisser agir 15 mn, ensuite ajouter 2 ml d'acide tartrique puis ajouter 1ml de réactif d'Amino₁ naphthol₂ sulfonique₄ puis compléter à 50 ml et laisser développer la coloration 20 m Effectuer une mesure de l'absorption à 750 nm. On procède de la même manière avec une prise d'essai de 10 ml, pour une teneur en silice allant de 1 à 40 mg/l.

VI.4.3.7. Méthode pour dosage des Phosphates (PO₄).

Le principe de base c'est qu'en milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium $\text{Mo}_7(\text{NH}_4)_4\text{H}_2\text{O}$, les ortho-phosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui réduit par l'acide ascorbique, développent une coloration bleue pouvant être dosée d'une manière colorimétrique à une longueur d'onde de 710 nm. Pour les réactifs, on doit employer les solutions suivantes :

- Solution d'acide ascorbique à 10 g/L.
- Solutions de molybdate d'ammonium. :
- Solution mère de phosphate (PO₄) à 1g/L.
- Solutions de molybdate d'ammonium.
- Solution de PO₄⁻³ à 10 mg/L.
- Solutions étalons.

VI.4.3.8. Méthode pour dosage des Nitrates (NO₃).

La réduction des nitrates en nitrites par le biais d'une solution d'hydrazine en milieu alcalin et en présence de sulfate de cuivre comme catalyseur.

Les nitrites obtenus sont alors dosés par colorimétrie : diazotation avec l'acide sulfanilique et capulation avec l' α Naphtylamine. On mesure la densité du colorant ainsi formé à 520 nm.

Pour les réactifs, on doit employer les solutions suivantes :

- Solution de sulfate de cuivre (CuSO₄ 5H₂O).
- Solution d'hydrazine (NH₂-NH₂ H₂SO₄) à 0,1 N.
- Solution de Soude (NaOH) à 0,05 N.
- Solution d'acide sulfanilique (H₂NSO₃).
- Solution (α -Naphtylamine).
- Solution d'E.D.T.A.
- Solution d'acétate de sodium (NaCOO-CH₃, 3H₂O).
- Solution mère de nitrate à 1000 mg/L.
- Solutions étalons.

- Le mode opératoire pour dosage du (NO₃). :

Le dosage doit être effectué dans des flacons bruns, de préférence. Puis réaliser le mélange suivant en introduisant dans le flacon le préparatif suivant :

- 1 ml prise d'essai ;
- 5 ml de solution de soude à 0.05 M ;
- Agiter ;
- 5 ml de mélange réducteur ;
- Agiter ;
- Après une heure, ajouter 40 ml du mélange colorant ;
- Mettre à l'obscurité le mélange préparé pendant ¼ heure ;
- Mesurer la densité à 520 nm.

Laisser la coloration se développer dans l'obscurité pendant ¼ heure. Puis mesurer sa densité à 520 nm. Le passage à la colorimétrie ne doit intervenir que juste avant la mesure optique afin que la solution soit exposée un minimum de temps à la lumière à laquelle est très sensible. La réduction des nitrates est partielle et varie avec le temps et la température. Il importe donc que la mesure des échantillons soit toujours accompagnée d'une mesure des solutions étalons, traitées dans les mêmes conditions.

VI.4.3.9. Méthode pour dosage du Fluor (F).

La méthode colorimétrique automatisée à l'alizarine, est celle avec laquelle ont été dosés les fluorures de nos échantillons. La plage d'étalonnage de cette méthode se situe entre 0,04 et 2 mg/L de F. Le principe se base sur la séparation des fluorures dissouts dans l'échantillon d'eau des autres constituants non volatils par distillation en milieu acide. L'appareillage est composé d'un Colorimètre de marque Technicon (modèle II) muni des pièces suivantes : de filtres de longueur d'onde de 619 nm et d'une cellule de 50 mm de longueur, d'un échantillonneur, d'une pompe péristaltique, d'un système pour la réaction.

Aussi d'un bain d'huile chauffant à distillation en verre, d'une colonne de distillation et d'un enregistreur de marque Technicon.

- Solution tampon.
- Solution colorante d'alizarine.
- Solution de nitrate de lanthane.
- Réactif colorimétrique.
- Réactif de distillation.
- Solution étalon mère de fluorures de 100 mg/L de F.
- Solution étalon intermédiaire de fluorures de 5 mg/L de F.
- Solutions étalons de travail de fluorures.
- Calcul et expression des résultats :

Les résultats sont exprimés en mg/L de fluorures d'après l'équation suivante :

$$(C = A \times D) \quad \begin{array}{l} \text{Où } C : \text{Concentration des fluorures dans l'échantillon (en mg/L).} \\ A : \text{Concentration des F dans la solution dosée (en mg/L).} \\ D : \text{Facteur de dilution, si nécessaire.} \end{array}$$

La lecture des résultats s'effectue directement à partir du graphique obtenu de l'enregistreur. Si nécessaire multiplier le résultat par le facteur de dilution.

VI.5. Les Outils informatiques utilisés.

VI.5.1. Rockworks v17 (RockWare 1983).

RockWorks17 est la dernière version du progiciel intégré de RockWare pour la gestion, l'analyse et la visualisation des données géologiques. Nous nous sommes servis de ce logiciel afin d'établir les coupes de corrélations lithostratigraphique, la géométrie de la nappe dans cette partie du S.A.S.S, le mode de superposition entre les différents étages stratigraphiques mais surtout les blocks diagrammes lithologique et stratigraphique en 3D.

Ce programme nous a permis également de localiser les anomalies stratigraphiques ayant été enregistrées entre les formations gréseuses du secondaire et les argiles schisteuses de primaire.

VI.5.2. Xlstat v16 (Addinsoft distributeurs de XLSTAT).

Ce programme est un outil conçu pour l'analyse des données et de statistique à la fois. Ce dernier nous a servi pour la déterminer des paramètres statistiques de notre base de données physicochimiques, notamment le coefficient de corrélation, les valeurs max, min, ainsi que l'écart type de chaque élément chimique. Une méthode de classification ascendante principale (ACP) a été réalisée à l'aide de ce programme, et ce dans le but d'effectuer une comparaison entre elles. Cette méthode nous a permis de déterminer le nombre de groupes d'observations caractérisant notre base de données.

Ce logiciel a été utilisé également pour l'établissement des diagrammes de Gibbs (GIBBS, 1970) et ce pour la caractérisation des processus géochimiques à la base de la minéralisation d'une eau souterraine. De nombreux diagrammes surtout ceux binaires ont été élaborés par le biais de cet outil qui travaille sous Excel de Microsoft.

VI.5.3. Statistica.v10 (StatSoft, Inc 2011).

Ce logiciel a été utilisé principalement dans l'établissement des diagrammes de concentrations et la variation des indices de saturations des minéraux par rapport à certains paramètres chimiques. Aussi pour l'élaboration des diagrammes d'équilibres. Ce programme nous a énormément servis dans l'approche thermodynamique chimique en vue de vérifier certains paramètres liés à l'eau échantillonnée tels que l'origine relative de cette eau et le temps de séjour.

VI.5.4. Aq-QA (RockWare Application, 2015).

Il s'agit d'un tableur qui sait comment convertir les unités, vérifier la cohérence interne des analyses et surtout représenter ces données sous forme de graphique. Ce tableur qui s'appelle Aq-QA a été écrit par des chimistes de l'eau, pour des chimistes de l'eau. Mieux encore, il est non seulement puissant mais aussi facile à apprendre, de sorte qu'on peut commencer à l'utiliser en quelques minutes. Il suffit de copier les données et les faire coller dans Aq-QA. Ce dernier nous a servis pour la vérification et la fiabilité de la balance ionique entre anions et cations.

VI.5.5. Diagramme v6.59 (Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon).

Ce logiciel gratuit a été utilisé dans le but d'élaborer : les différents diagrammes. C'est avec ce programme qu'on a pu ressortir les différents faciès chimiques qui caractérisent l'eau de notre zone d'étude et surtout l'établissement des diagrammes de Stabler et Piper. Ce programme a été utilisé également pour l'établissement du diagramme de Korjinsky (KORJINSKY, 1937) appelé diagramme de stabilité ou d'équilibre, il permet de situer la composition de l'eau en fonction des teneurs en cations (Ca, Mg, K et Na), en pH et surtout en silice, où l'emploi de ce diagramme donne une représentation graphique des aluminosilicates

VI.5.6. PhreeqC v3.4.0 (PARKHURST and APPELO, 1999).

C'est un logiciel de thermodynamique chimique conçu spécialement pour l'étude géochimique des eaux basé sur des méthodes de simulations thermodynamiques dans des conditions naturelles (Température ambiante de l'échantillon), et ce par le biais de modèles préalablement intégrés. Il nous a été utile dans le calcul des différents indices de saturations conformément à l'équation ($IS = \log(Q)/\log(Kps)$) des minéraux dissous dans l'eau qui a été mené en utilisant la loi de Debye-Hückel, en considérant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de -0,5 à +0,5.

V.5.7. Logiciels de cartographie.

La synthèse et l'élaboration de l'ensemble des cartes (piézométriques et hydrochimiques et autres), a été effectuée par l'utilisation de 4 logiciels à savoir : Surfer V15, MapInfo V8.5, Global Mapper V18, ArcGis V10.4. Quant aux images satellitaires c'est Universal Maps Downloader V9.22 qui nous a servis pour leur téléchargement. Egalement des programmes conçus pour le traitement d'images ont été utilisés tels que Iphoto Plus et Photo Filtre.

Conclusion de la Partie n° 02

Cette partie représente le squelette de la thèse, elle englobe à la fois la base de données, la méthodologie et l'ensemble des programmes avec lesquels on a pu élaborer tout ce travail. Pour cela, 3 outils ont été pris en considération pour concrétiser la présente étude qui sont : l'outil bibliographique, le choix des données conjugué par les travaux de terrain et enfin les laboratoires qui nous ont servis pour l'élaboration des différentes synthèses des résultats d'analyses effectuées sans négliger les nombreux programmes et logiciels spécifiques pour chaque domaine qui nous ont servis et permis de mieux simplifier et conceptualiser ces résultats.

Parmi les supports qui nous ont servis dans cette partie bibliographique les documents suivants : la carte géologique du bassin mésozoïque du Sahara Algéro-tunisien et de ses bordures (BUSSON, 1967) modifiée par nos soins, les cartes géologiques de Timimoune, d'Adrar et d'In Salah (cartes 1/5000.00, dressées par le CNRS - Paris, 1967) aussi la carte géologique d'Algérie élaborée par l'AIEA (2015, sous SIG). Egalement de nombreuses cartes hydrogéologiques notamment la carte des grandes unités Hydrogéologiques (CORNET, 1967), topographiques et satellitaires. En matière d'ouvrages de référence, nous avons utilisé tous les travaux disponibles à l'ANRH tels que ceux de : LEFRANC, 1991 - FABRE, 1976, 1983 et 2005 - CONRAD, 1969, ERESS 1972, O.S.S., 2003, 2005 et 2012. Aussi de nombreuses coupes et logs de forages ont été consultés et qui nous ont servis pour la description lithostratigraphique des différents étages caractérisant le sous-sol de la zone d'étude.

Le travail de terrain réparti en 2 phases, l'une en 2012 durant laquelle les techniciens de l'ANRH d'Adrar ont effectué l'inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits suivi d'une campagne d'échantillonnage d'eau pour analyses physico-chimiques, l'autre phase effectuée en 2019 ayant touchée 64 échantillons d'eau qui nous ont servis pour les analyses isotopiques. On doit signaler que pendant la dernière campagne, des mesures in-situ ont été effectuées à l'aide d'un multi-paramètre de terrain. Quant au tri des données surtout celles se rapportant à l'approche géologique (modèle 3D) et hydrogéochimique, a été basé sur la mesure du possible qu'elle soit significative et que le maximum de données des forages d'eau doit avoir une bonne répartition expressive.

Le travail au laboratoire consiste à faire des mesures d'analyses portées sur un certain nombre de paramètres physicochimiques. Les mesures d'analyses effectuées au laboratoire d'Adrar associées à celles exécutées sur terrains nous ont largement servis de situer les propriétés physicochimiques des eaux de la nappe dans la partie occidentale du bassin S.A.S.S. Egalement d'autres échantillons ont été prélevés dans le but d'élaborer une analyse des isotopes stables tels que l'oxygène 18 et le deutérium. Egalement que de nombreux programmes, logiciels et outils informatiques ont été utilisés dans le but de mieux synthétiser et interpréter ces paramètres, surtout dans la partie cartographie et hydrochimie.

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a document. The image is partially obscured by the text box.

Troisième partie

Résultats et Discussions

Introduction de la Partie n° III.

Cette troisième partie de notre thèse constitue le cœur de notre travail, puis qu'elle réunit d'une part l'ensemble des données et informations ayant servis à cette étude, et d'autre part les différentes approches ayant été entreprises pour aboutir aux résultats en introduisant des interprétations et des explications aux phénomènes rencontrés, et ce par l'utilisation de nombreux outils et méthodes souvent employées dans ces types d'études.

Cette importante partie nous l'avons scindée en 4 grandes sections chacune d'elles traite une approche, où chaque approche subdivisée en chapitre, traite une thématique bien distincte.

La 1^{ère} approche qui qui correspond au Chapitre VII, résumera les spécificités ayant trait avec la géologie et l'hydrogéologie de la zone d'étude. Dans le but de ressortir l'influence ainsi que la contribution de ces 2 thématiques sur le sujet en question.

La seconde qui se résume dans le Chapitre VIII, sera axée sur l'étude hydrochimique détaillée accompagnée d'un essai de la méthode d'indice de qualité des eaux souterraine. C'est une méthode souvent utilisée pour les eaux de surface. Dans cette approche nous allons introduits de nombreux concepts et méthodes hydrochimiques dans le but d'appréhender le comportement physicochimique de l'eau de la nappe avec son encaissant.

La troisième approche qui rassemble IV sera consacrée à l'étude statistique et méthodes descriptives des données utilisées dans notre étude. Généralement ce type d'approches servira comme outils d'approbation ou de confirmation de certains phénomènes rencontrés.

La dernière approche qui est la plus importante et la plus intéressante dans cette étude, qui se résume dans le Chapitre X, évoquera 2 volets : l'étude géochimique et l'analyse isotopique. Dans cette parte, plusieurs concepts géochimiques et représentations graphiques seront élaborées, et ce sur la base de la thermodynamique chimique et modélisation géochimique des éléments. Cette dernière nous permettra de trouver quelques explications sur certains phénomènes géochimiques qui régissent par l'effet des conditions climatiques et surtout la définition de la signature géochimique de cette eau partiellement rechargeable sous l'effet de son contact avec la roche encaissante et avec le milieu extérieur le pourtour.

CHAPITRE VII.

VII. APPROCHE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.

VII.1. APPROCHE GEOLOGIQUE.

Dans le but de déterminer l'évolution du chimisme des eaux dans la nappe du CI, il est nécessaire d'étudier la nature lithologique de ses formations géologiques, afin de mettre en évidence l'origine naturelle et/ou anthropique de la minéralisation des eaux de la nappe étudiée. A l'aide du programme informatique RockWorks, nous avons réussi d'établir une modélisation géologique par la création d'une base de données de forage comprenant les caractéristiques lithologiques, stratigraphiques, et les propriétés physiques et chimiques en fonction de la profondeur de chaque puits.

VII.1.1. Objectif et résultats.

Notre base de données est composée de 120 coupes litho-stratigraphiques dispersée à travers les zones d'études, répartie entre logs de forages hydrauliques et master-logs. Après traitement et saisi ordonnée des différentes caractéristiques lithologiques et stratigraphiques des 120 logs de forages sélectionnés, nous avons procédé avec l'utilisation du logiciel à l'application de la corrélation entre ces logs. La représentation suivante (figure n° 40) illustre le positionnement des 120 logs de forages avec la description stratigraphique des différentes formations de chacun puits accompagnés de la superposition des étages.

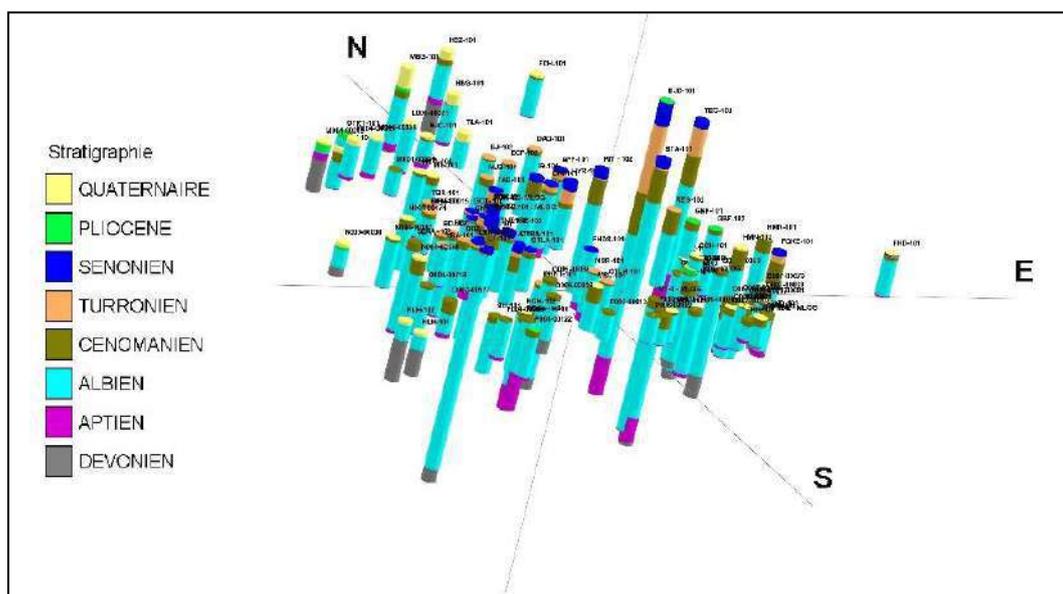


Fig. n° 40. Localisation des 120 logs de forages sélectionnés.
(Représentation de la stratigraphie en 3D)

Comme l'illustre graphiquement la représentation en 3D du modèle lithologique (voir figure n° 41) après extrapolation des données. Ce qui est remarquable dans le modèle lithologique, la présence des formations primaires (argiles schisteuses en couleur noire) qui dominent la partie Ouest du bloc diagramme et même le Sud. Egalement on constate le contact entre les différents grès de l'Albien avec les formations marneuses du Cénomaniens.

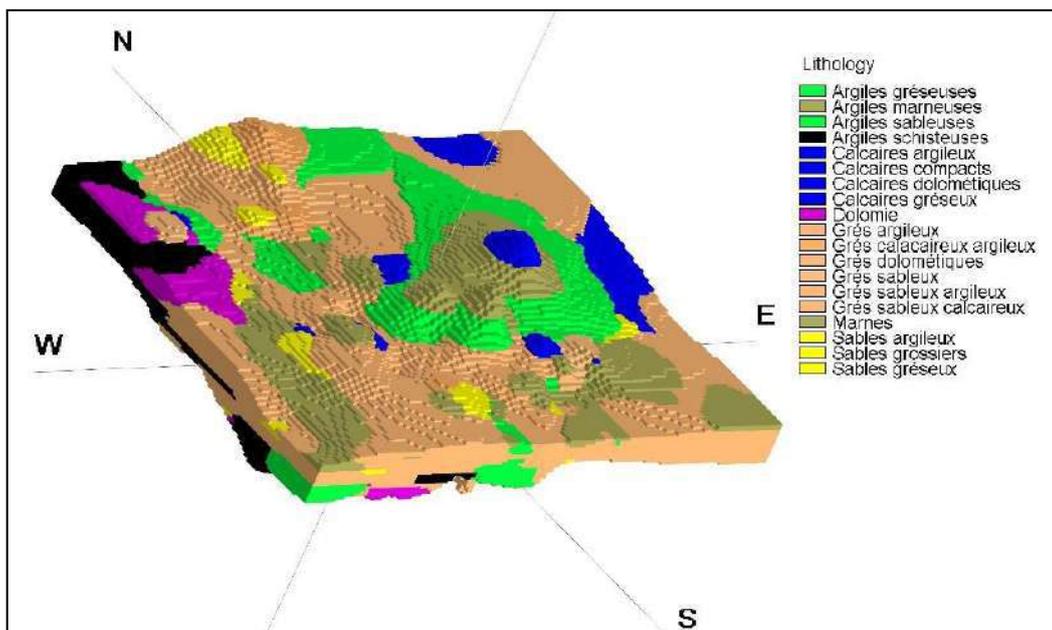


Fig. n°41. Bloc diagramme en 3D du modèle lithologique.
(Données des 120 logs de forages)

Le modèle stratigraphique en 3D représenté dans (la figure n° 42) illustre le changement spatial des épaisseurs des différents étages notamment celle du crétacé inférieur. D'après le bloc diagramme on remarque que la disposition de cet étage n'est uniforme et que sa profondeur change d'un endroit à l'autre. En plus l'épaisseur de cette formation est plus consistante par rapport aux autres.

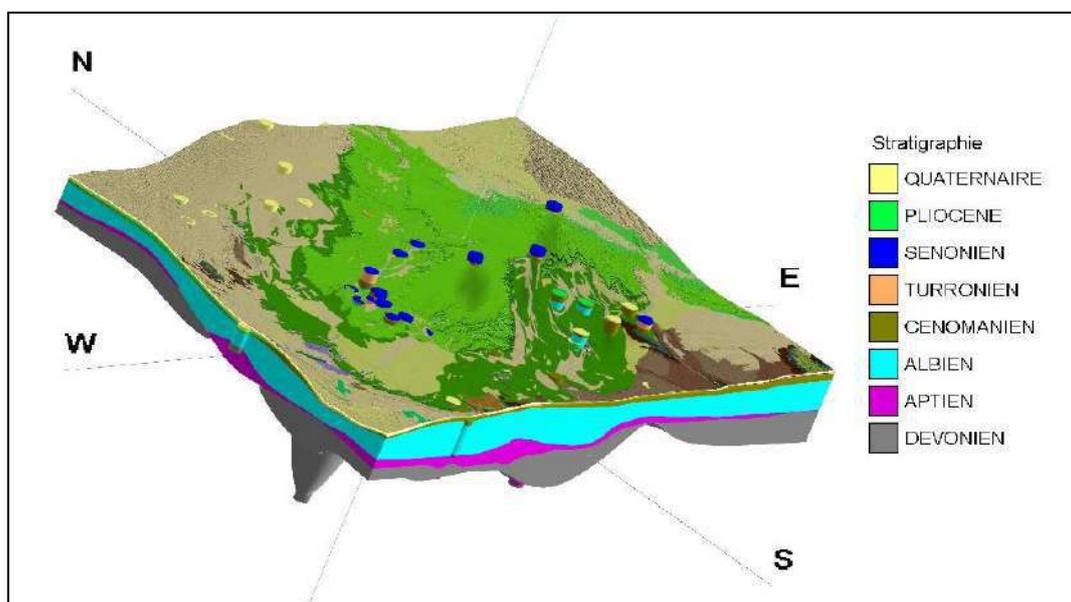


Fig. n° 42. Bloc diagramme en 3D du modèle Stratigraphique.
(Données des 120 logs drapés avec la carte géologique)

En vue de mettre en évidence le contact entre le crétacé inférieur qui correspond l'albien et les autres formations sous-jacentes notamment l'Aptien et les formations primaires. Il a été décidé de disséquer chaque couche à part.

Il a été enregistré l'existence d'un contact direct entre les formations albiennes du mésozoïque avec celles Dévoniennes du paléozoïque, sous l'effet d'une discordance entre ces 2 étages vue l'absence de la barre aptienne dans certains endroits du bassin occidental. Ces endroits comme l'indique la (figure n° 43) se localisent particulièrement au Nord, à l'Ouest et même au Sud de la zone d'étude (des tâches noires).

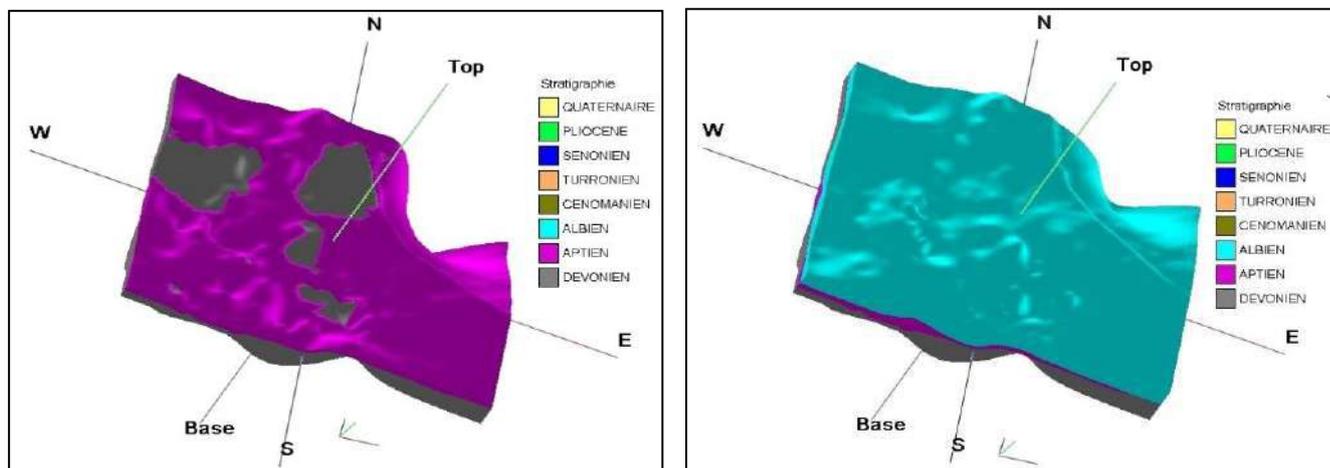


Fig. n° 43. Contact entre le Crétacé inférieur et les formations Sous-jacentes (Représentation en 3D).

VII.1.2. Interprétation des coupes établies.

Afin de mieux visualiser le changement transversal et longitudinal des différentes formations et étages, nous avons établi des coupes litho-stratigraphiques orientées selon la carte ci-dessous (figure n° 44).

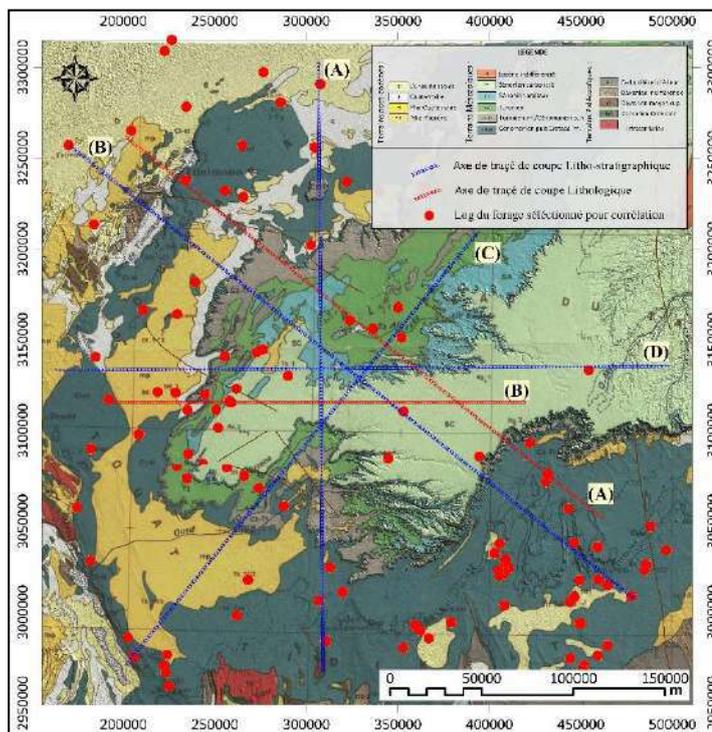


Fig. n° 44. Carte de localisation des logs avec orientation des coupes.

- Interprétation des coupes stratigraphiques :

Les coupes A et B orientées Nord-Sud et Ouest-Est, représentées par (la figure n° 44), montrent une succession stratigraphique relativement continue du Paléozoïque (Dévonien inférieur) jusqu'au Tertiaire (Pliocène du Continental terminal) pour finir au Quaternaire. Ce qui est remarquable dans les 2 coupes, c'est l'affleurement des formations Tertiaires tout au long du tracé. Le Sénonien calcaire couvre une bonne partie de l'Est du bassin (la coupe B) correspondant ainsi aux affleurements du plateau du Tademaït.

Les formations du Turonien et du Cénomaniens (imperméable) recoupées au piémont de l'Atlas saharien se biseautent progressivement pour disparaître au Sud-Ouest du bassin. La disparition du Cénomaniens met en contact direct les formations Quaternaires avec celles du Continental Intercalaires (la coupe A).

Les coupes A et B (figure n° 45) illustrent d'une part l'immersion de la nappe albienne du Nord vers le Sud (la coupe A), et d'autre part selon (la coupe B) qui traverse le bassin de l'Ouest à l'Est, confirme la disparition totale du Continental Intercalaire à l'Ouest.

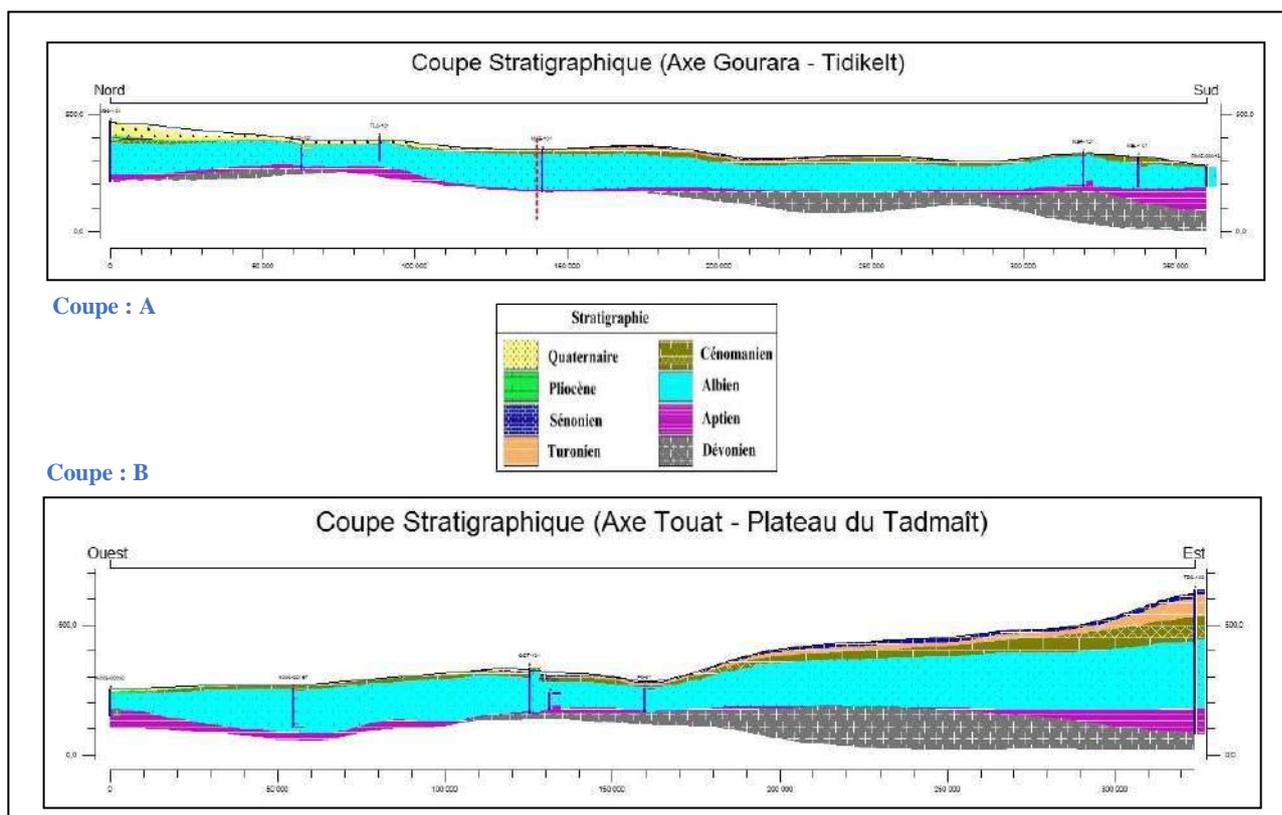


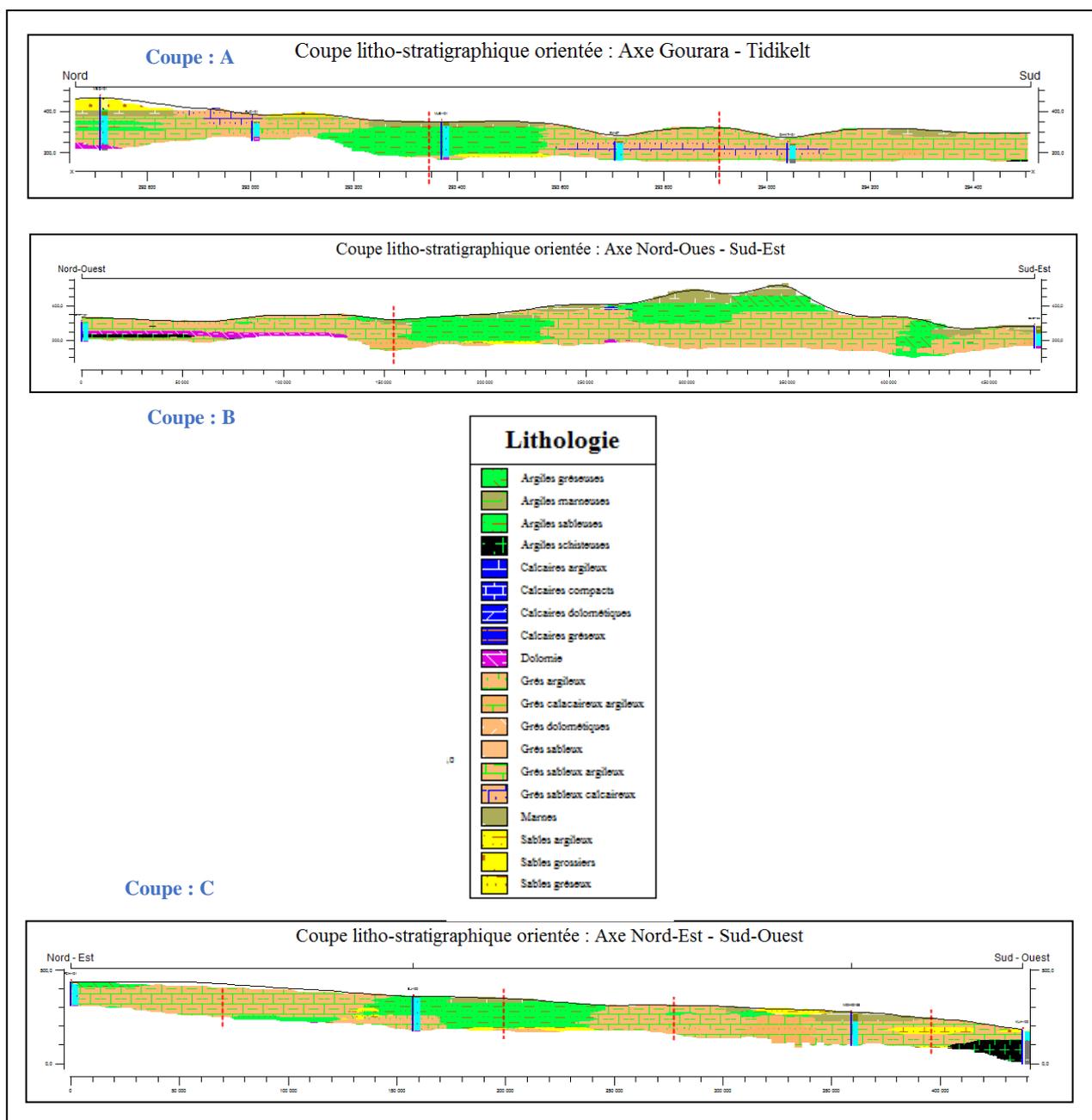
Fig. n° 45. Coupes litho-stratigraphiques dressées selon les axes d'orientations.

- Interprétation des coupes Litho-stratigraphiques :

L'analyse des différentes coupes élaborées (figure n° 46), indiquent une hétérogénéité de la composition lithologique de la matrice aquifère. Au niveau de la coupe A qui relie le Gourara au Tidikelt, on enregistre l'existence de lentilles argileuses au sein de la matrice aquifère.

Et sous l'effet de l'écoulement des eaux de la nappe qui s'effectue selon l'orientation de la coupe, les eaux au cours de le parcourt du Nord vers le Sud se chargent de plus en plus sous l'effet du temps de séjour et c'est pour cette raison que les eaux sont de plus chargées au Tidikelt qu'au Gourara.

Au niveau des coupes B et C, on remarque une hétérogénéité lithologique qui caractérise la matrice aquifère, parfois on rencontre des grès argileux, qui changent subitement en grès sableux puis en grès calcaireux pour devenir à nouveau des grès sableux et argileux mais nous n'avons jamais rencontré des grès francs. Ce qui caractérise ces 2 coupes l'existence de lentilles argileuses plus ou moins gypseuse ainsi qu'une lentille de sable argileux, mais surtout un contact enregistré dans la coupe C entre les grès albiens et les marnes du Cénomanién



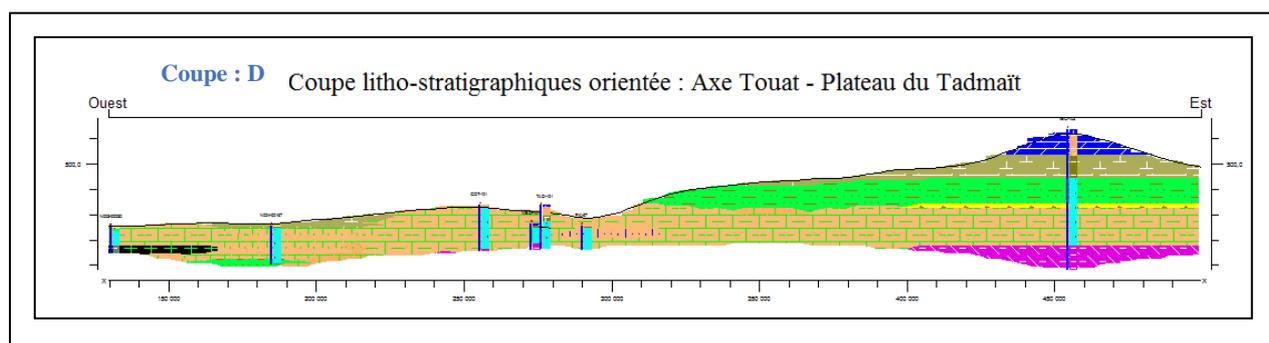


Fig. n° 46. Coupes litho-stratigraphiques dressées selon les axes d'orientations.

Il est à signaler également comme l'indiquent les 2 coupes, la présence de formations primaires (schistes du Dévonien Inférieur) en contact avec le Crétacé inférieur, enregistrées respectivement le long de la partie Ouest de la zone d'étude. Ce explique l'origine de SiO_2 dans l'eau échantillonnée dans cette partie du bassin occidental.

Pareillement pour la coupe D, où une vaste étendue de la nappe albiennaise à base de grès dolomitique et argileux est surmontée par une épaisse couche d'argiles enregistrée au pied mont du plateau du Tademaït qui elle-même est surmontée un banc de calcaire qui permet sous l'effet du contact avec les eaux de ruissellements d'établir un échange entre eux lors de leurs écoulements pour atteindre la nappe par infiltration ou par le biais des puits de foggaras.

Suite aux résultats obtenus par le biais de l'utilisation de ce programme, et en se basant sur les différentes coupes litho-stratigraphiques et modèles élaborés, on en déduit que la matrice aquifère qui caractérise la zone d'étude est très hétérogène, avec une dominance de grès et sables argileux.

VII.1.3. Validation des résultats avec calcul de la fraction Utile.

Afin de vérifier la certitude des résultats obtenus avec le programme RockWorks pour une éventuelle validation, nous avons décidé d'utiliser une approche basée sur le calcul du pourcentage de la fraction utile de la matrice aquifère.

A cet effet (M. BESBES, A. LARBES, M. BABSSY et B. MERZOUGUI, 2005), dans une étude intitulée « Modélisation du système aquifère du bassin occidental du SASS » élaborée en collaboration entre l'ANRH et l'OSS, ayant pour objectif l'établissement d'un modèle conceptuel pour la nappe du C.I, admettent une formule pour le calcul de cette fraction. Cette fraction est très utile après l'avoir cartographié. Puisqu'elle va nous permettre de localiser d'une part les formations perméables les plus dominantes et également celles affectées par une capacité hydrique importante.

La Base de données géologiques avec laquelle nous avons élaboré ce travail est composée de 54 logs tous ont recoupés le CI sur toute son épaisseur, et présentent également une description lithologique autorisant la détermination du pourcentage de la fraction utile. On a remarqué que la colonne lithologique des logs captant l'horizon aquifère n'est pas formée uniquement de sables et de grès, mais que l'on y trouve également des grès argileux, de l'argile gréseuse, ainsi que des argiles franches.

Cette divergence de faciès, pour une meilleure description des capacités du réservoir, nécessite de savoir calculer tout d'abord et en chaque forage l'épaisseur de chaque faciès qui rentre dans la constitution lithologique de la formation aquifère.

L'analyse des logs sélectionnés nous a indiqué que les sables grossiers et les grès occupent la place la plus importante, en suite viennent les sables et les grès argileux qui occupent une place moindre (en leur affectant un poids ou un coefficient de pondération de 0,75) et en fin les argiles sableuses et gréseuses qui doivent être comptabilisées mais avec un poids bien moindre (de l'ordre de 0,25).

En accord avec cette règle, la formule admise par (M. BESBES, A. LARBES, M. BABSSY et B. MERZOUGUI, 2005) pour le calcul de la fraction utile de la nappe du C.I dans un forage recoupant cette formation est exprimée en % comme suit :

$$F_U = [(E_p. Gr) + E_p. (Gr.Ar) \times 0.75 + E_p. (Ar.Gr) \times 0.25] / E_p. To \quad (3)$$

- Avec :**
- **F_U** : Fraction utile (en %).
 - **E_{p.} Gr** : Epaisseur des grès (en m).
 - **E_{p.} Gr.Ar** : Epaisseur des grès argileux (en m).
 - **E_{p.} Ar.Gr** : Epaisseur d'argile gréseuse (en m).
 - **E_{p.} To** : Epaisseur totale de la colonne du C.I (en m).

Dans le cas de notre étude, nous avons associé les grès et les sables dans la même unité puisqu'il s'agit de formations détritiques avec lequel on leur a affectées le même coefficient de perméabilité.

Le tableau ci-dessous illustre l'analyse des résultats obtenus après application de la formule sur les données de logs sélectionnés :

Tab. n° 10. Pourcentage des compositions lithologiques de la matrice aquifère.

	Pourcentage de la F.U	Nombre d'échantillons	Nbr. Ech. Par zones	% par rapport au Total
Grès franches	95 à 100 %	13 échantillons sur 54	- 03 au Gourara - 05 au Tademaït. - 03 au Touat. - 02 au Tidikelt	24 %
Grès argileux	50 à 75 %	30 échantillons su 54	- 03 au Gourara - 06 au Tademaït. - 12 au Touat. - 09 au Tidikelt.	55 %
Argiles gréseuses	25 à 30 %	08 échantillons sur 54	- 02 au Touat. - 06 au Tidikelt.	15 %
Argiles franches	10 %	03 échantillons sur 54	- 03 au Tidikelt.	06 %

Après avoir calculé les valeurs de fraction à partir de la formule, ensuite cartographiés, les résultats indiqués sur la carte (figure n° 47) nous informe que la répartition spatiale par zone peut être interpréter comme suit :

Pour la partie Nord de la zone d'étude (Le Gourara), où l'épaisseur efficace de la nappe qui varie entre 73 et 180 m, enregistre des valeurs de fraction utiles variant entre 60% et 100%, ce qui indique que la matrice aquifère est caractérisée par une dominance des grès avec peu d'argiles gréseuse.

Pour la partie centrale (Le Touat), qui enregistre des valeurs élevées de l'épaisseur efficace de la nappe (entre 50 et 300 m), se caractérise par valeurs de fraction qui oscillent entre 25% et 55%, ceci explique parfaitement la dominance des argiles gréseuses par rapport au grès franches.

Pareillement au plateau du Tademaït, les pourcentages de fractions sont similaires mais l'épaisseur utile est plus importante et peut même atteindre les 700 m.

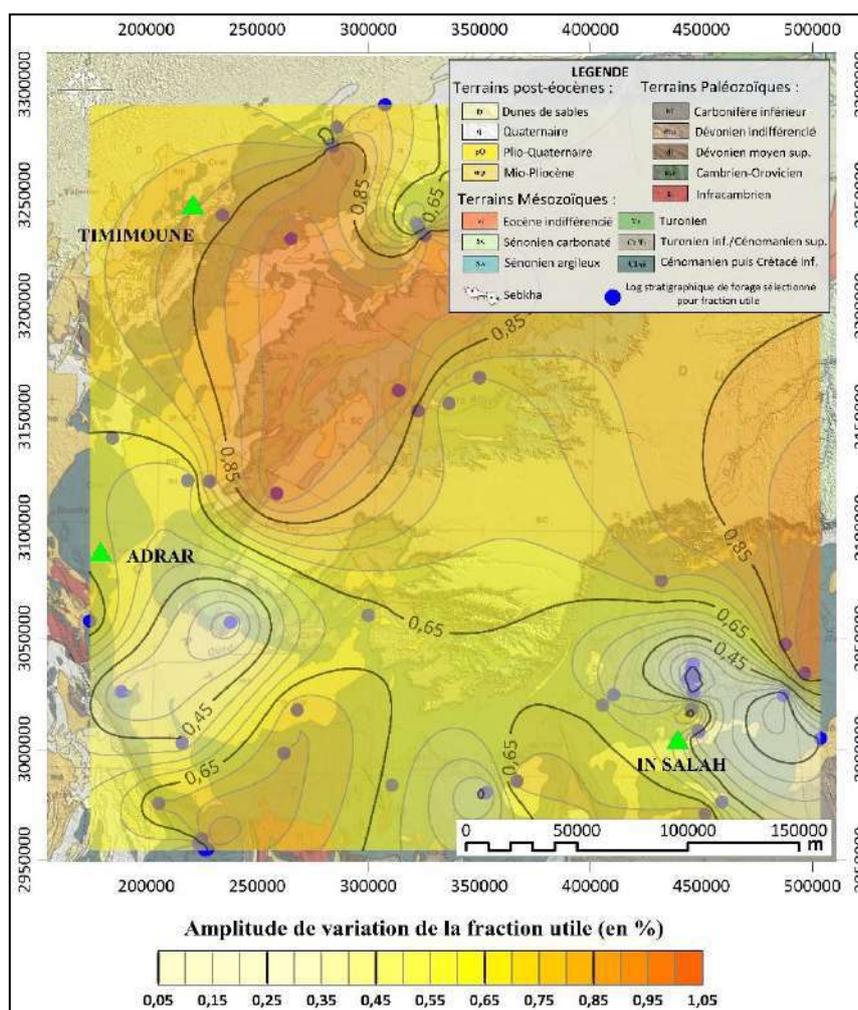


Fig. n° 47. Carte d'égal fraction utile de la formation aquifère du C.I.

Au Sud de la zone d'étude (Tidikelt), 2 intervalles de valeurs de fractions sont enregistrés, à l'Est les valeurs sont beaucoup plus importantes qu'au centre et à l'Ouest, Ceci indique que la partie orientale les grès est plus dominante qu'à l'Ouest.

Pour conclure, d'après l'évolution spatiale du pourcentage de fraction utile, il s'avère que les valeurs les plus élevées se localisent au Nord de la zone d'étude ainsi qu'à la périphérie Nord-Est du Plateau. Aussi au niveau de la partie orientale du Tidikelt au Sud.

La confrontation entre les résultats obtenus par extrapolation en utilisant le programme RockWorks avec ceux calculés en utilisant la formule mathématique, montrent une corrélation positive entre les 2 méthodes. Ce qui confirme que la matrice aquifère est très hétérogène. Comme l'indique (le tableau n° 10), on remarque que les grès argileux sont les plus dominants où ils occupent les 55% de la tranche sélectionnée des logs, les grès franches 24%, les argiles gréseuses 15% et en fin les argiles franches 6% de la matrice aquifère.

VII.2. APPROCHE HYDROGEOLOGIQUE.

La nappe albienne dans cette partie occidentale du bassin, est caractérisée par une particularité assez spéciale. Elle a un double rôle, elle correspond à la fois à la zone de recharge et à l'exutoire naturel. Pour cette raison toute exploitation excessive influera impérativement sur le comportement hydrodynamique de la nappe et par la suite sur les échanges physico-chimiques des eaux de la nappe. D'où la reconnaissance hydrogéologique de la nappe va se servir à identifier d'une manière globale l'évolution dans le temps et dans l'espace de la surface piézométrique en vue de localiser les endroits ayant subits de fortes exploitations. A cet effet il a été jugé utile d'étudier l'évolution de la piézométrie sur une période de 40 ans, et ce depuis 1971 jusqu'à l'an 2012. Pour cela des cartes piézométriques ont été élaborées dans ce sens.

VII.2.1. Variation spatio-temporelle de la piézométrie.

a. Etat de la Piézométrie en 2012.

Dans le but de définir le sens d'écoulement des eaux de la nappe du C.I le long de la zone d'étude, ainsi que son évolution dans le temps et dans l'espace, des mesures sur terrain ont été entreprises au cours de l'année 2012. Pour cela 108 points d'eau ayant fait l'objet de mesure du niveau hydrostatique. Le choix de ces points de contrôles n'était pas arbitraire, des facteurs ont été pris en considération pour la bonne fiabilité des résultats, à savoir :

- La bonne répartition spatiale des points.
- La précision de la valeur (Z : altitude des points) est nécessaire.
- La disponibilité d'un historique de mesures de ces points.
- L'éloignement des forages sélectionnés des champs de captages.
- Tous les forages choisis étaient à l'arrêt.

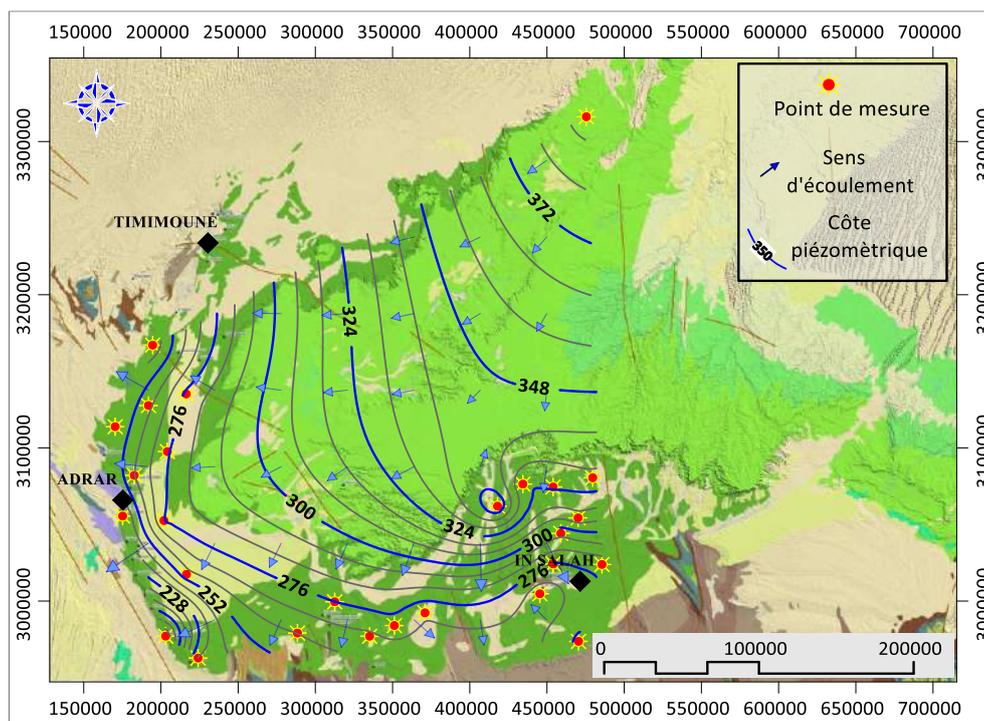


Fig. n° 48. Carte Piézométrique de la nappe du C.I (données année 2012)

Les mesures du niveau hydrostatique effectuées en 2012 à travers les forages à l'arrêt, ont montrés que le niveau d'eau de la nappe varie selon 2 axes distincts, l'un orienté Nord-Sud variant entre 9 m à Gourara pour atteindre 20 m à Touat puis à plus de 50 m plus au Sud, l'autre suivant l'axe Sud-Ouest Sud-Est c'est-à-dire du Touat vers le Tidikelt où le niveau varie entre jaillissement et 0,8 m et 05 m en moyenne. La carte piézométrique obtenue (figure n° 48), nous indique que le sens d'écoulement des eaux de cette nappe se fait du Nord (zone de recharge) vers le Sud (zone d'exutoire).

Les valeurs de charges piézométriques les plus importantes se situent au Nord de la région du Gourara tandis que les plus faibles au Sud de Touat. On remarque également que le gradient hydraulique au niveau de la région du Touat est très faible ceci peut être expliqué par la forte concentration des forages en exploitation dans cette zone (très connue par sa vocation agricole).

b. Etat de la Piézométrie en 1971.

Et afin de suivre l'évolution dans le temps la piézométrie de cette nappe fortement sollicitée dans la région, nous avons jugé utile de reconstituer la carte piézométrique dressée par l'E.R.E.S.S en 1971, et la faire comparer avec celle la plus récente élaborée en 2012.

La première constatation que nous l'avons tiré selon la carte suivante (figure n° 49), et que l'écoulement souterrain demeure toujours suivant un axe de direction Nord-Est Sud-Ouest, en plus les courbes isopièze qui étaient espacés en 71 se sont resserrées dans la partie Nord, Sud-Est et Sud-Ouest de la zone d'étude.

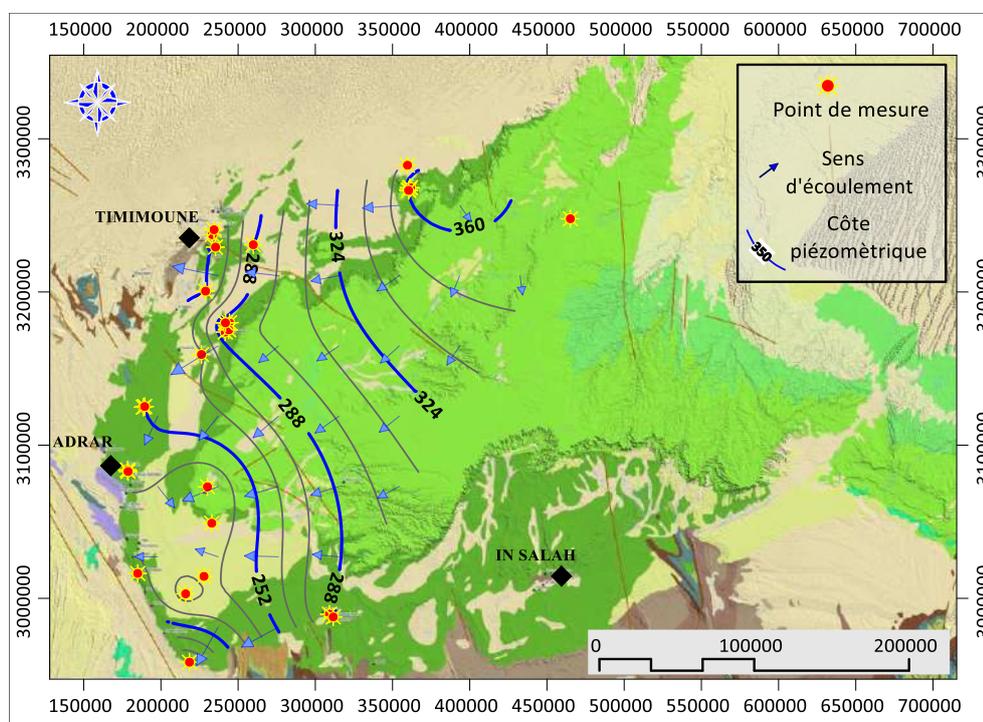


Fig. n° 49. Carte Piézométrique de la nappe du C.I (données ERESS 1971).

Egalement un abaissement du gradient hydrauliques a été enregistré en 2012, et ce suite à l'exploitation excessive de la nappe du C.I (prolifération croissante du nombre de forages réalisés surtout après l'année 2000), cette dernière a entraîné une chute considérable du niveau hydrostatique dans certain forages (entre 0,2 à 0,5 m) aux alentours du champ captant de la ville d'Adrar, accompagné d'un rabattement important de plus de 3 mètres à Tasfaout au Nord (mesure effectuée dans le piézomètre Pz 06).

Il est à signaler au cours des dernières années qu'au niveau de la zone du Tidikelt, nous avons enregistré la disparition de l'artésianisme du CI dans certaines localités (auparavant la quasi-totalité des forages étaient jaillissants) d'où la surexploitation de cette nappe dans les autres zones (Touat et Gourara) a engendré des effets négatifs sur le reste des autres zones.

CHAPITRE VIII.

VIII. APPROCHE HYDROCHIMIQUE ET ETUDE DE L'I.Q.E.S.

VIII.1. APPROCHE HYDROCHIMIQUE.

L'étude de la chimie des eaux qui est une méthode de prospection hydrogéologique essentielle pour la caractérisation des aquifères, permettra d'une part de définir la classification des eaux en faciès hydro chimiques ainsi que la détermination des origines de la minéralisation de cette eau. En effet la composition chimique des eaux dépend particulièrement de la composition lithologique des milieux traversés par ces mais surtout du temps de séjour qu'effectue l'eau en contact avec la formation encaissante. (DAKOURE, 2003), a confirmé que le chimisme des eaux souterraines dépend en grande partie de 4 paramètres : (la composition de la roche encaissante, de l'évolution hydrodynamique des écoulements, de la profondeur de ces écoulements autrement dit de la température et enfin du milieu climatique (aride, semi-aride ou autre). De même (GLYNN & PLUMMER, 2005), ont montrés que les changements géochimiques des eaux au sein des aquifères peuvent avoir une relation avec les proportions des minéraux constituant la roche encaissante. Plusieurs auteurs notamment (BANWART et al. 1999 ; LENCZEWSKI et al, 2003 ; GLYNN & PLUMMER, 2005 ; SPENCE et al, 2005 ; VAN DER HOVEN et al, 2005), se sont intéressés à l'étude couplée entre l'hydrochimie et l'hydrogéologie dans le but de déterminer l'origine du chimisme des eaux souterraines.

Pour l'élaboration de la présente étude, deux campagnes ont été effectuées la première en 2012 et qui a touché 470 échantillons répartis à travers l'aire de l'étude tandis que la dernière effectuée en 2019 n'a affectée que 64 prélèvements. Quant aux éléments chimiques ayant fait l'objet de cette étude se répartissent en 2 groupes et se résument comme suit : Paramètres physiques tels que le Conductivité électrique, le pH, le Eh et la Température tous effectués sur terrain. Et Paramètres chimiques élaborés au laboratoire des eaux et de sol de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de la Direction Régionale Sud-Ouest à Adrar, à savoir les anions : (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et SiO_2^-), les cations : (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ et Mg^{2+}) ainsi que le Résidu sec, la dureté et l'Alcalinité. Il est à noter également que des mesures de paramètres de pollutions ont été effectués à savoir : (les Nitrates NO_3^- , les Nitrites NO_2^- , les Ortho-phosphates PO_4^{2-} et les Fluores F^-).

VIII.1.1. Caractérisation des éléments mesurés in-situ.

- La Température (T °C).

Cet élément qui joue un rôle important dans la mobilité des sels dissouts et des gaz, influe pertinemment sur la conductivité électrique de l'eau. Ce paramètre est proportionnel à la conductivité mais inversement proportionnel à la viscosité.

La température qui est en relation directe avec la profondeur, augmente de 1°C dans le sous-sol par rapport à la température de l'air chaque 35m. Les températures de l'eau mesurées sur terrain pendant le mois de décembre enregistrent le long des 3 zones distinctes une moyenne de l'ordre de 25°C, restent assez loin de la température de l'air (zone hyperaride). Les valeurs de températures des échantillons d'eau mesurées sur terrain oscillent entre (18,3 au nord et 32,4 au sud) °C.

- Le Potentiel Hydrogène (pH).

L'eau comme les sels minéraux, s'ionise partiellement suivant la réaction réversible :



Cet équilibre est une fonction de la température à 25°C $K_H = 10^{-14}$ à 0°C, $K_H = 0,1139 \cdot 10^{-14}$ et les concentrations de H^+ et OH^- dépendent des sels dissouts. Le pH est une représentation de l'activité protonique en solution (FRITZ, 1981 et STUMM & MORGAN, 1996):

$$\text{pH} = -\text{Log} (\text{H}^+) = -\text{Log} [\gamma\text{H}^+] = -\text{Log} \gamma - \text{Log} [\text{H}^+] \quad (4)$$

Avec H^+ : activité du proton en solution.

$[\text{H}^+]$: molarité du proton en solution (mol/l d'eau).

(γH^+) : coefficient d'activité du proton en solution.

Si $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$ on parle de solution neutre ($\text{pH} = 7$), si $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$ (solution acide) ($\text{pH} = 1$ à 7), si $[\text{H}^+] < [\text{OH}^-]$ on parle de solution alcalin (pH de 7 à 12).

Les valeurs de pH mesurées sur terrain indiquent que les eaux caractérisant la zone d'étude, sont dans les normes et varient en majorité entre 5,6 et 9,2. Néanmoins 85% des échantillons prélevés enregistrent des valeurs ayant une tendance vers la basicité ce qui explique l'absence des ions carbonates (CO_3^{2-}), ce qui indique que les eaux la zone d'étude sont à réaction faiblement alcalines.

- La Conductivité électrique (Ec).

Ce paramètre mesuré avec le même appareil utilisé pour les mesures du pH et de Température, sa variation est liée à la nature des sels dissouts et surtout à leur concentration.

D'après (BOGOMOLOV, 1982 et CASTANY, 1968) cet élément augmente en fonction de la teneur en ions dissouts ainsi que de la nature de ces sels dissouts. Comme l'indique la carte ci-après (figure n° 70), l'analyse des résultats obtenus montre que les eaux issues des forages enregistrent des conductivités plus ou moins élevées comparées aux normes de potabilité.

D'après les résultats obtenus, 3 classes de conductivités peuvent être distingués : L'une au Nord (de Gourara jusqu'au Nord de Touat) avec des valeurs tolérables soient de 700 à 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une autre zone située au centre de la zone d'étude où les valeurs de conductivité sont nettement élevées par rapport à celles enregistrées au Nord (entre 2700 et 3800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Et une dernière localisée au Tidikelt où les valeurs de conductivité sont énormément élevées (entre 4900 et 5800 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

- Le Potentiel Redox (Eh).

G. MICHARD (1967), définit le potentiel d'oxydo-réduction Eh (mesurée en mV) d'une solution comme grandeur intensive liée aux phénomènes d'oxydo-réductions de cette solution, et qu'il doit être observé comme la conséquence des teneurs de la solution en substances oxydo-réductrices.

Walter Nernst, a établi une équation qui permet de calculer le potentiel d'un couple d'oxydo-réduction et ce dans des conditions normale (à 25°C), et qui peut s'exprimée comme suit :

$$Eh = E_0 + \frac{0,06}{n} \log \frac{(C)^y (D)^z}{(A)^x (B)^s} \quad (5)$$

Le potentiel normal du couple $H_2O/1/2O_2$ E_0 équivaut à 1,23v, si pO_2 correspond à la pression partielle de l'oxygène (exprimée en atmosphères), on devrait donc mesurer un potentiel de :

$$Eh = 1,23 + 0,06/4 \log (pO_2 \times [H^+]^4)$$

$$D'où, Eh = 1,23 + 0,06/4 \log (pO_2 \times [H^+]^4)$$

$$Eh = 1,23 + 0,015 \log pO_2 - 0,06 \text{ pH avec } pO_2 = 0,2 \text{ atm.}$$

Soit : $Eh = 1,22 - 0,06 \text{ pH}$ (6)

Par définition, une mesure de potentiel redox positive pour une solution quelconque indique que cette dernière est influencée par un agent oxydant, alors que toute eau alcaline ionisée est un agent antioxydant, car elle a une valeur de potentiel redox négative (c'est le cas des eaux albiennes qui caractérisent notre zone d'étude).

Il est à signaler que seulement 63 échantillons ont fait l'objet de mesure du Eh, tous présentent des valeurs négatives. Elles varient entre (-5 et -95,9) mV soit entre -0,008 et -0,096.

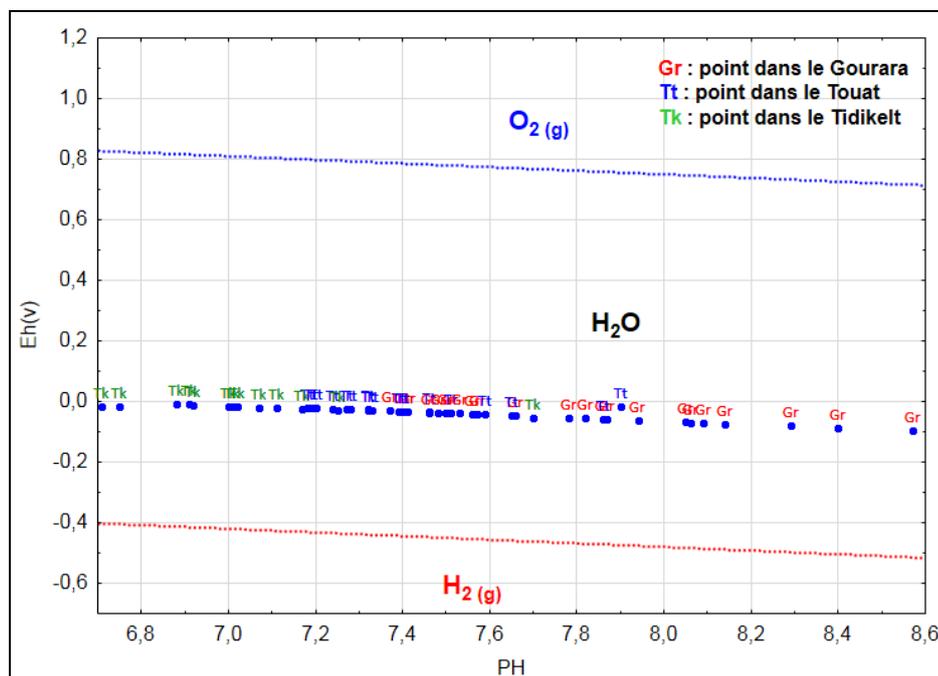


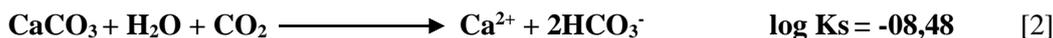
Fig. n° 50. Diagramme de POURBAIX (pH = f(Eh)) d'équilibre de l'Eau du C.I

Comme le montre le diagramme de POURBAIX (figure n° 50), tous les points montrent une tendance vers le milieu réducteur. Ce qui indique que les eaux albiennes dans cette partie du SASS, se situent dans le milieu de stabilité caractérisé par l'existence de conditions anaérobiques d'où milieu confiné.

VIII.1.2. Caractérisation des éléments chimiques mesurés au Labo.

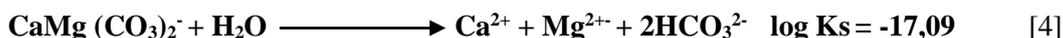
- Le Calcium (Ca²⁺).

Cet élément qui constitue un des éléments chimiques qui contrôle la dureté totale, sa dissolution résulte principalement soit de l'infiltration des eaux dans les formations carbonatées tel que la Calcite [2] [CaCO₃], soit dans les formations gypseuses [3] (CaSO₄). Cette dissolution est due principalement à la présence de gaz carbonique qui provient de l'activité bactérienne qu'il génère, et il se forme selon les équations chimiques suivantes :



- Le Magnésium (Mg²⁺).

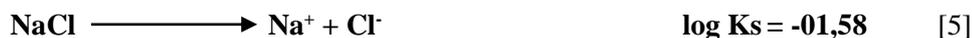
Les ions de ce paramètre proviennent généralement de la dissolution des roches magnésiennes du gypse ainsi que des minéraux ferromagnésiens. La mise en solution des formations dolomitiques notamment les calcaires dolomitiques est responsable de l'origine de cet élément chimique [4] [CaMg(CO₃)₂].



- Le Sodium (Na⁺).

Le sodium qui est un élément toujours présent dans les eaux naturelles avec des proportions variables, provient principalement du lessivage des formations géologiques riches en NaCl.

Dans la plupart des eaux souterraines, les plagioclases représentent la principale source du Sodium tandis que dans les zones de dépôts évaporitiques, l'halite y est la source de l'ion Na⁺ [5]. Les sels de sodium sont très solubles et ne se précipitent pas assez rapidement.



- Le Potassium (K⁺).

Comme le Sodium, le Potassium est très soluble et il n'est pas facilement éliminé de l'eau, sauf par échange d'ions. Les sources courantes du Potassium (DERRON, 1989) sont les feldspaths et les formations silicatées (roches métamorphiques et magmatiques). En général l'ion K⁺ provient du sel de Sylvite (KCl) [6] et ce, suite à l'altération des argiles riches en minéraux de Potasse comme la Solvate.

Bien que l'abondance du Potassium dans la croûte terrestre soit semblable à celui du sodium, sa concentration dans l'eau souterraine est souvent moins importante que celle du Sodium.

Dans la plupart des eaux naturelles, le Potassium est généralement un élément mineur. Il ne dépasse guère les 3% des cations, lorsqu'il enregistre des valeurs élevées ceci revient à leur origine anthropique (Hem, 1989).



- Les Chlorures (Cl⁻).

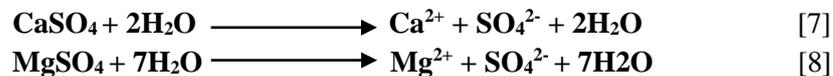
D'après (EMANUEL MAZOR, 2004), le chlore peut être apporté sous l'effet de la dissolution de l'Halite présente dans les roches aquifères sous forme de sel gemme ou de filon traversant d'autres roches.

Dans les études géochimiques, le chlorure est généralement considéré comme un produit conservateur, peut jouer le rôle d'un traceur hydrochimique. Sa présence dans les eaux naturelles en proportions très variables, résulte soit par la dissolution des sels naturels sous l'effet du lessivage des terrains gypseux, marneux ou argileux, soit suite à l'évapotranspiration intense dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol, le cas des zones aride et hyperarides.

- Les Sulfates (SO₄²⁻).

D'après (COOK, ANDREW L., et HERCZEG, 2000) et (Hendry et al, 1989), dans les régions semi-arides les dépôts atmosphériques avaient été déterminés comme une source d'émissions de Sulfates dans les eaux souterraines. Lorsque la concentration des Sulfates dissouts dans les eaux souterraines dépasse les 100 mg/l, on peut simuler la lithologie comme source de Sulfates telles que les minéraux sulfatés évaporitiques aussi l'oxydation de pyrite ou de matière organique peuvent en être également. Par conséquent, une baisse de concentration en Sulfate est fréquemment associée à une augmentation des ions Bicarbonatés (FRED G. BELL, 1998).

En général, les Sulfates qui sont toujours présents dans l'eau naturelle, leur présence dans l'eau provient soit des formations gypseuses, soit de la solubilité de CaCO₄ (voir équations [3] – [7] et [8]) avec des passées gypseuses.



La concentration de Sulfates dissouts dans l'eau souterraine est généralement inférieure à 100 mg/l cependant des valeurs plus élevées en ions SO₄²⁻ pourrait provoquer un effet néfaste sur l'environnement qui peuvent causées des problèmes respiratoires sur l'être humain (MAITI, 1982 ; SUBHA RAO, 1993 et N. SUBHA Rao et al. 2002).

- Les Bicarbonates (HCO₃⁻).

(RITCHER B. CHRISITAN ET CHARLES W., KREITLER, 1993), cet élément chimique résulte de l'effet de la dissolution des roches carbonatées et ce en fonction de l'existence de certains paramètres notamment la tension en CO₂, la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversées. En général, l'alcalinité est exprimée en Bicarbonates (HCO₃) ou Carbonate de Calcium (CaCO₃), (RITCHER B. CHRISITAN ET CHARLES W., KREITLER, 1993). L'alcalinité totale est une mesure de la capacité de l'eau à neutraliser les acides forts. Il s'agit d'une mesure déterminée par la quantité d'acide fort qui abaissera le pH d'un échantillon d'eau à une valeur de niveau spécifique. Dans la plupart des eaux alcalines naturelles plus les concentrations en Bicarbonates augmentent plus les mesures du pH diminuent [1].

- La Silice (Si).

La Silice est un composé abondant qui se trouve dans la plupart des roches, qu'elles soient magmatiques ou sédimentaires. Elle est soit sous forme très peu soluble comme le Quartz soit plus soluble comme le feldspath ou plagioclase. Dans une eau a pH inférieur à 9 (comme le cas présent), la Silice se présente sous plusieurs formes H_4SiO_4 , $SiO_2.H_2O$, mais le plus souvent elle est reportée sous son état simple en SiO_2 ou tout simplement en Si (DREVER, 1989).

- Le Fluor (F).

La Fluorure (F^-) est un ion inorganique que l'on retrouve dans tous les types de l'eau de faibles à fortes concentrations et elle se trouve dans les roches, le sol, l'air, l'eau, les plantes et les animaux ainsi que dans l'environnement.

L'eau souterraine, dont la plus grande partie se charge des précipitations ou des masses d'eau de surface, gagne des minéraux au cours de son cycle de vie, et son transport et sa période de résidence dans la matrice rocheuse (RAJU, 2012 ; VAROL et al, 2013 ; RAJU et al, 2014 ; SINGH et al, 2015 ; XIAO et al, 2015. 2015 ; Patel et al. 2016). Le Fluor, sa présence dans l'eau souterraine avec des concentrations faibles ou élevées est liée principalement à la nature de la roche mais surtout à la présence de minéraux fluorés.

Les concentrations de Fluors dans l'eau sont limitées par la solubilité du fluorure (Ca F), de sorte qu'en présence de 40 mg/l de calcium, elle est limitée à 3,2 mg/l (HEM, 1989). D'où c'est l'absence de calcium en solution qui permet des concentrations plus élevées à stables en Fluor (EDMUNDS et SMEDLEY, 1996).

Le taux de Fluor élevé dans les eaux souterraines provient d'aquifères pauvres en calcium et caractérise les régions où les minéraux fluorés sont courants. Les minéraux en solution responsables d'une forte concentration de fluorure sont la fluorite et la fluoropatite (THANGARAJAN, 2007).

D'après (EDMUNDS et SMEDLEY, 1996), les concentrations de fluorure peuvent également augmenter dans les eaux souterraines sous l'effet d'échange cationique du sodium contre le calcium de la solution. Le fluor dans l'eau provient principalement de la dissolution des minéraux naturels présents dans les roches et les sols avec lesquels l'eau réagit.

La Fluorine (CaF_2)_[9], la Cryolithe (Na), le Fluo-apatite $CaF(PO_4)$ _[10] et les micas sont les principaux minéraux qui le contiennent.



Du point de vu qualité, l'OMS en 2006 indique que la valeur limite pour le fluor est de 1,5 mg/l cette valeur qui demeure indicative peut être changée en fonction des conditions climatiques, comme la température, l'humidité, la fréquence d'exploitation et volume d'eau soutiré (VISWANATHAM, 2008).

- Les Ortho phosphates (PO_4^-).

Les Ortho phosphates constituent la forme prédominante du phosphore disponible dans le sol ou dans l'eau. En combinaison avec l'azote, le phosphore est utilisé dans les engrais humiques et naturels pour enrichir les sols agricoles qui participent avec d'autres nitrifiants à sa fertilisation. Où au cours de ces dernières années et pour mieux contrôler la fertilisation agricole des sols, une attention particulière a été apportée dans ce sens (POLAN et MONIQUE, 1990). En général la source des Phosphates et Ortho-phosphates dans les eaux de nappes souterraines peut être attribuées à l'altération minérale des argiles en particulier l'Apatite (qui contient plus de 41 % d'oxyde de phosphore (P_2O_5), ce qui en fait la source la plus importante des phosphates. Elle est aussi l'un des trois composants primaires des engrais minéraux utilisés comme fertilisants pour les sols agricoles).

Il faut signaler que dans notre zone d'étude où la nappe albienne qui est soumise à un contact direct avec les argiles et marnes Cénomaniennes, sous l'effet de l'altération de ses argiles agissent en permanence sur le chimisme des eaux de cette nappe. D'où la source de cet élément dans l'eau, peut être soit d'origine géologique soit anthropique qui pourrait provenir des eaux usées domestiques.

- Les Nitrates (NO_3^-).

L'ion nitrate est la forme oxydée de l'azote, les sources naturelles du nitrate sont principalement les eaux de pluies au cours de leur transfert de la surface du sol vers la nappe (sous-sol) ainsi que les interactions avec le sol et la végétation (JACQUES. B, 2008).

Le nitrate n'est pas un composant des minéraux rocheux ou des particules de sol ; c'est un produit de la rotation de l'azote dans le sol. La pollution des eaux souterraines par les nitrates ne peut avoir qu'une seule et unique source (anthropique). L'Azote de l'une ou l'autre source naturelle (précipitations, gisement géologique, forêt, fourrage, pâturage, etc.) ou la source anthropique (engrais, eau, etc.) peuvent subir les processus de contaminations (KOMOR et ANDERSON, 1993).

L'abondance des nitrates avec des concentrations qui dépassent les normes admises par l'OMS (45 à 50 mg/l), ne peut être que le résultat de l'utilisation intensive d'engrais d'origines chimiques et animales dans les cultures maraîchères fortement pratiquée dans cette zone. Le rejet des eaux usées domestiques dans des fosses septiques mal imperméabilisées contribue aussi à la contamination des eaux par cet élément.

VIII.1.3. Etude de fiabilité des données hydrochimiques.

Généralement dès que les résultats d'analyses sont prêts à être traités pour par la suite être interprétés, il est indispensable d'étudier tout d'abord la fiabilité de ces résultats.

En hydrochimie plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour vérifier cette fiabilité, à savoir la méthode d'équilibre de la balance ionique entre les anions et les cations qui est la plus utilisée dans le domaine d'hydrochimie, aussi il existe une deuxième celle basée sur la comparaison entre la conductivité électrique mesurée in situ à celle enregistrée au laboratoire.

Dans la présente étude, nous avons optés pour la première méthode. Le calcul de la balance ionique (B.I) permet généralement de vérifier la fiabilité des résultats des analyses chimiques. Cependant, les incertitudes sur les résultats, selon les techniques d'analyse, peuvent expliquer les erreurs parfois élevées sur les balances ioniques, et ce à cause de la présence d'éventuelles anions organiques non pris en compte dans les calculs. D'une manière générale et selon (RODIER), les analyses chimiques sont considérées :

- Excellentes lorsque le B.I < 5 % ;
- Acceptable lorsque si, 5 % < B.I < 6 % ;
- Douteuse lorsque BI > 6 % ;

En réalité, une égalité entre la somme des anions et celle des cations est rarement obtenue, cependant d'une manière générale, la différence est attribuée à certains paramètres notamment aux incertitudes suite à la présence de certains ions non dosés ou à d'éventuelles erreurs d'analyses effectuées le plus souvent par l'opérateur. Cette balance ionique (B.I) est exprimée sous forme d'un écart relatif exprimée selon la formule suivante (4):

$$B.I = \frac{\sum(\text{Cations}) - \sum(\text{Anions})}{\sum(\text{Cations}) + \sum(\text{Anions})} \times 100 \quad (7)$$

Le cas de notre étude, nous avons optés pour la première méthode, les résultats obtenus sont résumés dans (la figure n° 51) et qui montre que sur les 478 points analysés, seulement 470 échantillons ont été retenus, les 8 autres (qui correspondent aux échantillons prélevés dans la zone du Gourara « au nord ») ont été systématiquement éliminés vue que la différence entre la somme des anions et les cations dépasse les 6%.

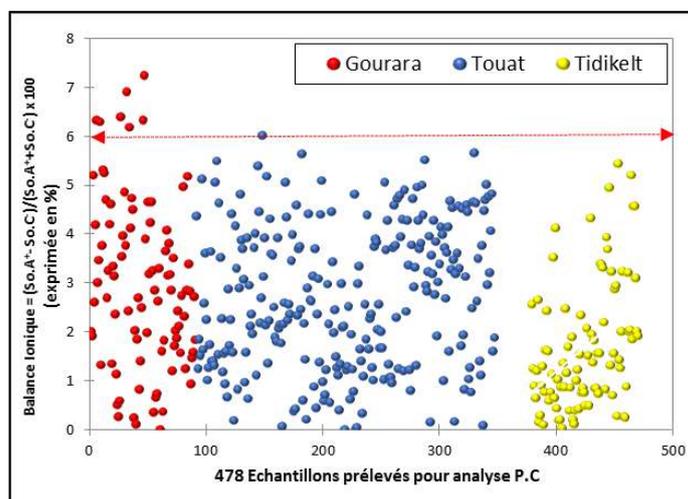


Figure n° 51 : Balance ionique enter Σ des anions et Σ de cations des 478 échantillons

VIII.1.4. Traitement et interprétation des données Physicochimiques.

VIII.1.4.1. Comparaison des résultats avec les normes Algériennes.

Dans le but d'évaluer l'aptitude de l'eau albiennne fortement sollicitée à la potabilité, il a été jugé utile de comparer les résultats des concentrations chimiques de différentes espèces des échantillons prélevés par rapport aux normes algériennes.

- Les Cations : (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+).

Afin d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'approvisionnement en eau potable, le 23 Mars 2011, et selon le journal officiel du gouvernement algérien paru dans son n°18 annonçant un décret exécutif n°11-25 du 17 Rabie E'Thani 1432 correspondant au 22 Mars 2011 relatif aux normes nationales de la qualité de l'eau de consommation.

Pour cela la concentration chimique des espèces tels que (Ca, Mg, Na, HCO_3 , SO_4 , Cl, etc...) dans les échantillons d'eaux prélevés pourrait être comparée aux normes de qualité initiées par le Ministère des Ressources en Eau. En ce qui concerne le Ca^{2+} , la limite prescrite est de 200 mg/L, environs 40 échantillons d'eau de la totalité dépassent la limite de sécurité, soit 9% et sont localisés principalement au nord de la zone de Touat et aussi au Tidikelt (figure n° 52).

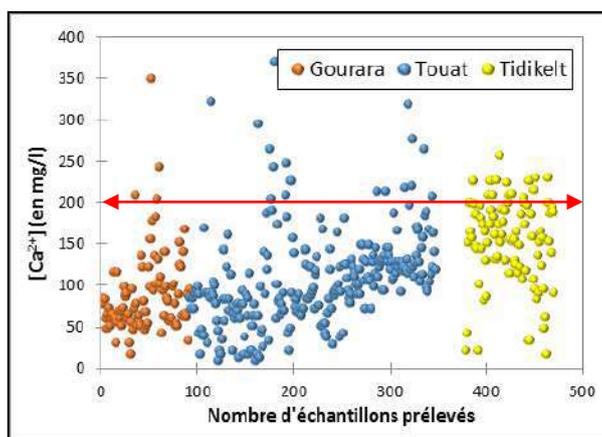


Fig. n° 52 : Comparaison des teneurs en Ca^{2+} par rapport aux normes.

Le Mg^{2+} qui varie entre (5 à 255 mg/L), seulement 18 échantillons sur les 470 enregistrent des valeurs supérieures à la limite permise de 150 mg/L, soit environ 4% de la totalité des échantillons ce qui a rendu l'eau de la zone d'étude adéquate à la consommation (figure n° 53).

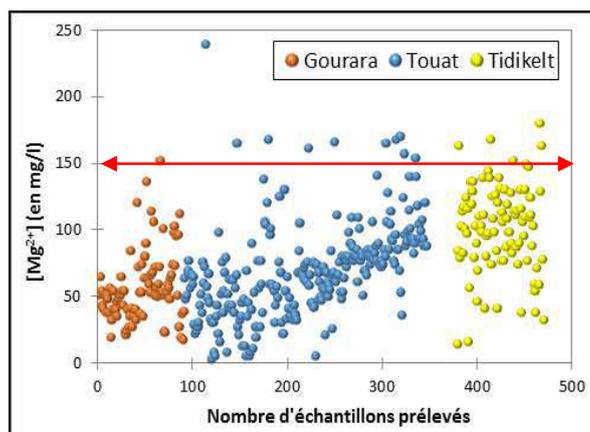


Fig. n° 53 : Comparaison des teneurs en Mg^{2+} par rapport aux normes.

Le plus souvent le Potassium (K^+) qui est essentiel au maintien de l'équilibre de l'organisme on l'associe avec le Sodium (Na^+). Dans le cas de notre étude, la concentration de ces 2 éléments dépasse largement les normes admises.

Par exemple pour le Na⁺, où 65% de la totalité des échantillons présentent des teneurs supérieures à 200 mg/L (figure n° 54), Ceci explique l'excès de Sodium qui caractérise les eaux dans cette partie du bassin. De même pour le K⁺ où 271 des 470 dépassent les normes soit 60% de la totalité (figure n° 55).

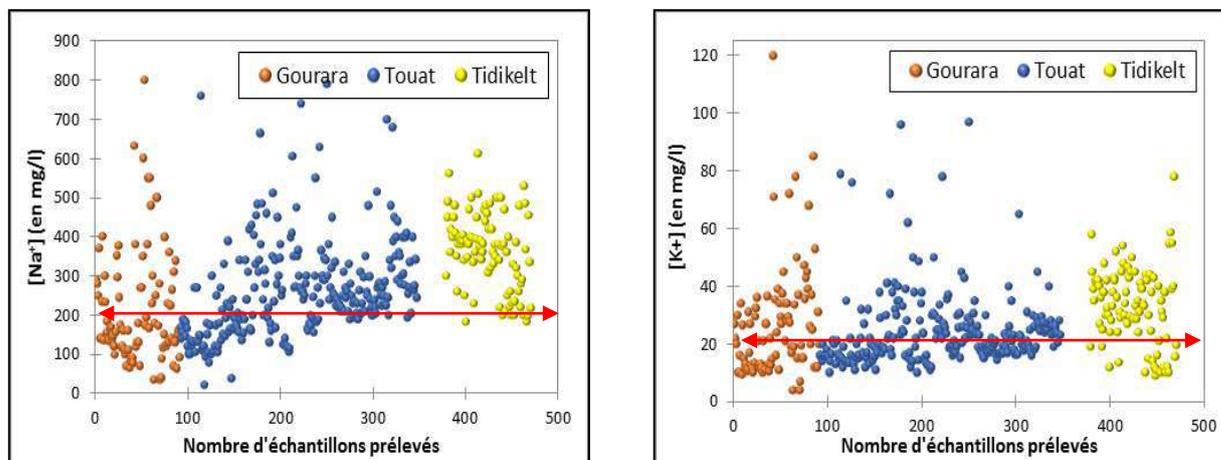


Fig. n° 54 – 55 : Comparaison des teneurs en Na⁺ et K⁺ par rapport aux normes.

- Les Anions : (HCO₃⁻, Cl⁻ et SO₄²⁻).

Concernant les anions, les données hydrochimiques de la zone d'étude montrent que les valeurs de concentrations du HCO₃⁻ oscillent entre (3 et 280 mg/L) toutes sont en deçà de la limite souhaitable qui est de 300 mg/L (figure n° 56).

Quant à la limite permise du Cl⁻ pour l'eau potable qui est de 500 mg/L, il s'avère que les échantillons d'eau souterraine observés dans la zone d'étude montrent que seulement 30% de la totalité admettent des teneurs en Chlorures supérieurs à la limite de sécurité (figure n° 57), soit 141 points répartis entre le centre (Touat) et le sud au (Tidikelt).

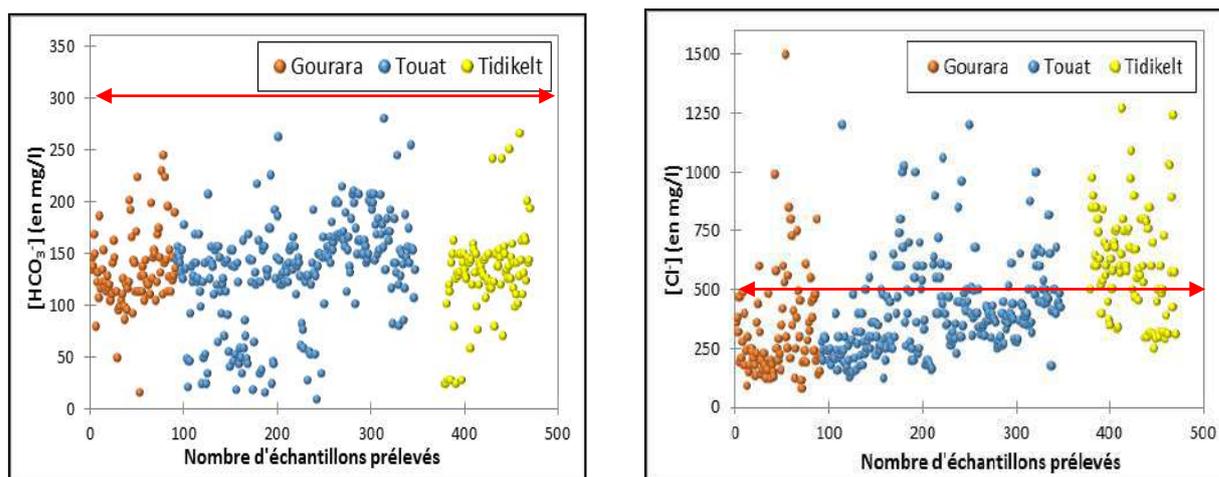


Fig. n° 56 – 57 : Comparaison des teneurs en HCO₃⁻ et Cl⁻ par rapport aux normes.

Pour les concentrations des Sulfates (SO₄²⁻) des 470 échantillons, qui varient entre (40 et 2100 mg/L), 51% de la totalité montrent des teneurs supérieures à la limite recommandée soit 239 points d'eau du total (figure n° 58).

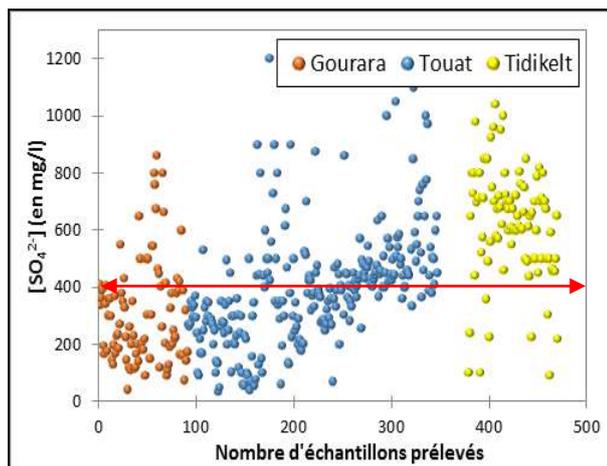


Fig. n° 58 : Comparaison des teneurs en SO_4^{2-} par rapport aux normes.

- Paramètres de pollutions : (NO_3^- et F^-).

Les données montrent que plus de 34% de l'ensemble des échantillons ont une concentration plus élevée que la limite souhaitable (50 mg/L), ce qui signifie que la présence de Nitrates (NO_3^-) dans les eaux de la d'étude est alarmante (4 fois plus des normes) et qui peut constituer un danger pour la santé des agglomérations (figure n° 59).

Quant à la limite sécuritaire du la Fluorure (F^-) qui se situe entre (0,6 et 1,5) mg/L, car au-delà de 1,5 entraîne la fluorose (la croissance anormale des os) alors qu'en deçà de 0,6 peut causer des caries dentaires.

Dans la présente étude seulement 11% de la totalité des échantillons enregistrent des valeurs qui dépassent les normes prescrites (figure n° 60).

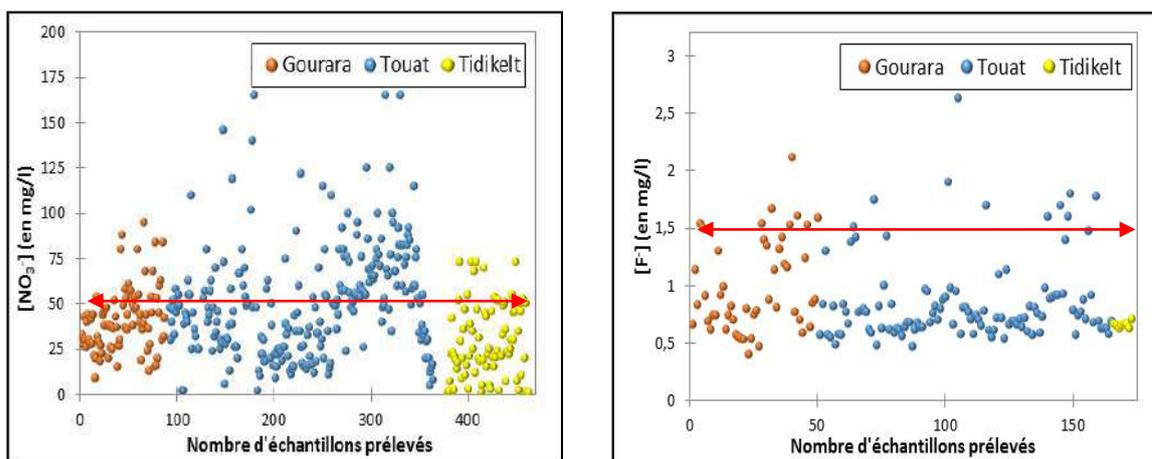


Fig. n° 59 – 60 : Comparaison des teneurs en NO_3^- et F^- par rapport aux normes.

- Paramètres physiques : (Conductivité et pH).

Les normes admises montrent que le seuil limite de pH d'une eau potable se situe entre 6,5 et 8,5 (figure n° 61). D'après (RAO et al. 2012), lorsque le pH d'une eau dépasse les 8,5, cette dernière peut affectée la membrane ou muqueuse.

Les mesures enregistrées montrent que la majorité des échantillons d'eau prélevés marquent des valeurs de pH qui ne dépassent pas la limite recommandée.

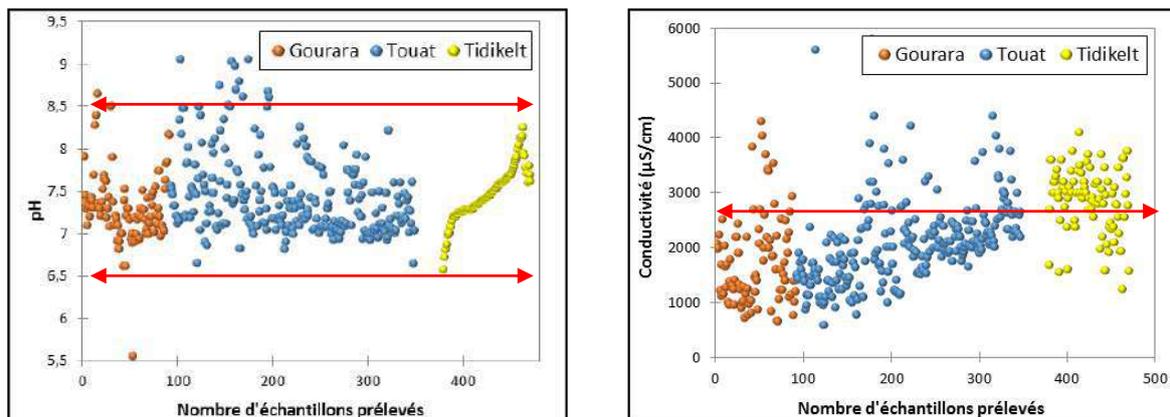


Fig. n° 61 – 62 : Comparaison des teneurs du pH et Ec par rapport aux normes.

Quant à la conductivité électrique, on remarque que leur variation s'échelonne entre (640 et 2400) $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il est à signaler que sur la totalité des échantillons, 20% présentent des valeurs supérieures aux normes (figure n° 62) par rapport aux normes admises dont 85% de ce nombre sont situés au sud de la zone d'étude (Tidikelt). Cela explique que les valeurs élevées de conductivités se situent au sud de la zone d'étude.

VIII.1.4.2. Cartographie hydrochimique des différents éléments.

En vue de mettre en évidence l'évolution significative des éléments chimiques à travers l'aire de l'étude, il a été nécessaire d'étudier la distribution spatiale de ces éléments à savoir les anions, les cations ainsi que les paramètres physiques qui rentrent dans la composition physico-chimique de l'eau de la zone d'étude (la nappe albienne), une cartographie hydrochimique est nécessaire à établir. Cette cartographie est importante surtout lorsqu'elle est confrontée avec la géologie du terrain, puisque l'eau au cours de son transfert se charge avec les minéraux et composants géochimiques qui constituent la matrice de cet aquifère et par la suite prendra la signature géochimique de la roche.

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la distribution des concentrations de ces éléments tels que la composition litho-stratigraphique de la matrice aquifère, la transmissivité de cet aquifère, la profondeur de la surface piézométrique par rapport à la surface du sol, la vitesse d'écoulement, le type d'aquifère...etc.

Toutefois il ne faut pas négliger les conditions climatiques qui jouent un rôle primordial dans cette répartition surtout que climat qui caractérise la région d'étude est hyperaride où les températures sont élevées entraînant de fortes évaporations conjuguées par de faibles précipitations qui peuvent provoquées lorsqu'elles sont exceptionnelles le lessivage et la dissolution des formations en surface.

La méthode d'interpolation avec laquelle ont été élaborées les différentes cartes c'est celle du Krigeage avec comme outil (le logiciel Surfer v16 - 2019).

Dans cette partie nous n'allons exposer que les cartes des éléments chimiques ayant présentés des valeurs de concentrations assez élevées et qui peuvent influencer sur le chimisme et la qualité de l'eau à savoir le Ca^{2+} , le Mg^{2+} , le Na^+ , le K^+ , le Cl^- et le SO_4^{2-} .

D'autres cartes ont été élaborées notamment celle de la conductivité électrique, du pH ainsi que des cartes de pollutions (nitrates NO_3^- et Fluorure F^-).

- Carte de Calcium (Ca^{2+}).

En général la présence d'ion Ca^{++} dans l'eau montre, qu'il s'agit d'une dissolution d'origine carbonatée tel que la Calcite (CaCO_3) ou la Dolomie [$(\text{CaMg})\text{CO}_3$], soit d'origine évaporitiques tel que le Gypse [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$] ou l'Anhydrite (CaSO_4).

L'analyse descriptive des 470 échantillons analysés, a donné pour l'élément Ca^{2+} les résultats suivants :

Tab. n° 11. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Ca^{2+}

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
Ca^{2+} (mg/L)	470	9,00	536	114,22	3867,45	62,19

Comme l'indique la carte illustrant la répartition spatiale des concentrations en Ca^{2+} (figure n° 63), les endroits marqués par de fortes teneurs en calcium (entre 289 et plus de 500) mg/L se situent dans des localités bien cernées et se localisent surtout au sud de Timimoune (Gourara), au nord d'Adrar (Touat), aussi au sud de Reggane, à Aoulef également et sur une bonne partie du nord de In Salah (Tidikelt). Cependant le reste de l'aire de l'étude, qui correspond à plus de 90%, le taux des concentrations en [Ca^{2+}] est dans les normes.

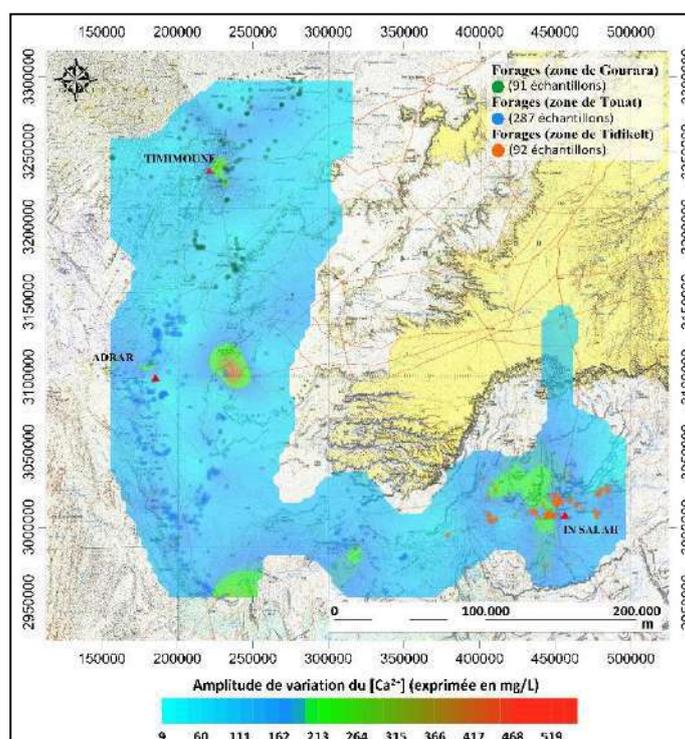


Fig. n° 63 : Répartition spatiale des teneurs en [Ca^{2+}] (exprimées en mg/L).

- Carte de Magnésium (Mg^{2+}).

C'est un élément chimique très abandon tout comme le calcium, souvent il est rencontré dans les formations évaporitiques (sel de magnésium) ainsi qu'au niveau des formations dolomitiques ($CaMgCO_3$).

L'analyse descriptive des 470 échantillons analysés, a donnée pour l'élément Mg^{2+} les résultats suivants :

Tab. n° 12. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Mg^{2+}

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
Mg^{2+} (mg/L)	470	3,00	255	74,33	1472,93	38,38

Les endroits où on enregistre des valeurs élevées de Mg^{2+} (plus de 150) mg/L se coïncident à peu près avec les mêmes localités où il a été enregistré pour le Ca^{2+} (figure n° 64).

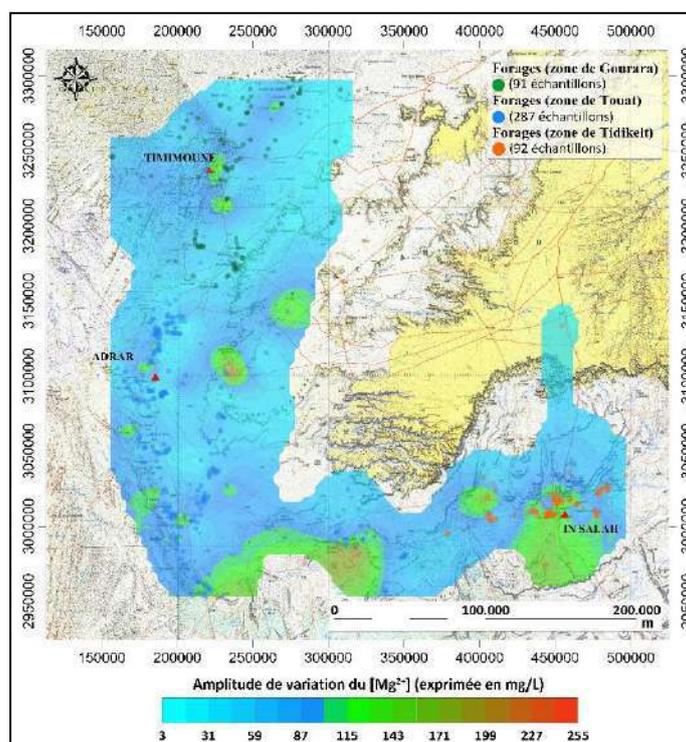


Fig. n° 64 : Répartition spatiale des teneurs en [Mg^{2+}] (exprimées en mg/L).

- Carte de Sodiments (Na^+).

En général, l'origine des fortes concentrations en Sodium peut être due à la dissolution des formations salifères très solubles telle que l'Halite ($NaCl$). Ce Na^+ proviendrait probablement de l'altération des minéraux échangés avec les argiles.

D'après la carte ci-contre (figure n° 65), l'ion Na^+ qui correspond au cation dominant dans 95% des points d'eau, lui rend l'un des ions les plus importants dans l'acquisition de la minéralisation de ces eaux. 65% des points d'eau échantillonnés présentent des teneurs en Na^+ supérieures aux normes nationales (150 mg/L).

Le traitement statistique des 470 échantillons analysés, a donné pour l'élément Na^+ les résultats suivants :

Tab. n° 13. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Na^+

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
Na^+ (mg/L)	470	22,00	860	275,69	18295,71	135,26

La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage O005-00077 (Tt270) avec (860 mg/L) et la plus faible valeur avec (22 mg/L) enregistrée au niveau du forage N004-00211 (Tt27) situé au nord de la zone du Touat.

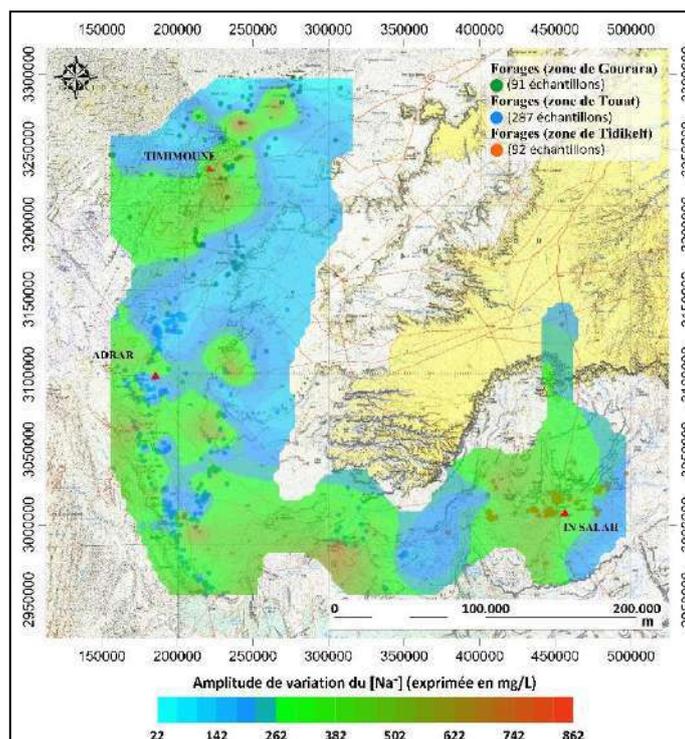


Fig. n° 65 : Répartition spatiale des teneurs en $[\text{Na}^+]$ (exprimées en mg/L).

- Carte du Potassium (K^+).

Le potassium qui est un ion qui résiste généralement à l'attaque de l'eau (HEM, 1992), et l'un des paramètres chimiques qui caractérisent les eaux Albiennes que ce soit dans la partie orientale ou occidentale du bassin SASS.

Les résultats d'analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément K^+ se résument comme suit :

Tab. n° 14. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément K^+

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
K^+ (mg/L)	470	4,00	160	27,47	279,79	17,11

D'après la carte de répartition spatiale des ions K^+ (figure n°66), il s'avère que 55% de l'aire de l'étude est affectée par une prédominance de cet élément de l'amont jusqu'à l'aval (figure n° 64) où les concentrations oscillent entre (4 et 160) mg/L.

Des valeurs relativement faibles qui dominent la partie centrale de la zone d'étude ainsi que la partie ouest de la région du Tidikelt avec des valeurs qui varient entre (4 et 20) mg/L. On enregistre d'après la carte que les fortes concentrations en Potassium coïncident de la même manière avec celles marquées par le Sodium.

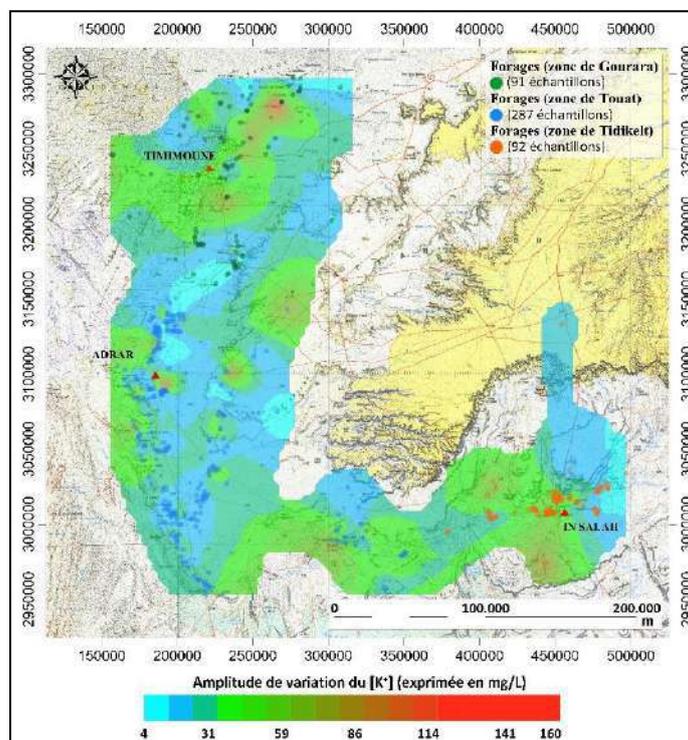


Fig. n° 66 : Répartition spatiale des teneurs en $[K^+]$ (exprimées en mg/L).

- Carte des Chlorures (Cl^-).

L'analyse descriptive de cet élément sur les 470 échantillons traités a donné les résultats suivants :

Tab. n° 15. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Cl^-

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
Cl^- (mg/L)	470	80,00	1500	433,48	51848,69	227,70

Selon la carte de variation des teneurs en ion Cl^- (figure n° 67), on remarque que cet élément chimique enregistre des valeurs élevées au nord et au centre de l'aire de l'étude.

Cependant il marque surtout son importance au sud notamment sur l'axe Reggane – Aoulef et sur toute l'étendue du Tidikelt. On peut conclure que son évolution se fait suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe (NE-SW), mais en général il s'effectue de l'amont vers l'aval. Les valeurs de concentrations les plus faibles (entre 80 et 150) mg/L sont enregistrées au niveau de la zone du Gourara (au nord), quant aux plus élevées qui s'échelonnent (entre 1000 et 1500) mg/L, on les rencontre au sud (Tidikelt).

La corrélation entre les cartes de répartition des teneurs en Sodiums (Na^+) et celle en Chlorures (Cl^-), montre l'existence d'une coïncidence entre elles. Pour cette raison on

remarque que les valeurs de Cl^- les plus élevées sont enregistrées pour les mêmes échantillons dans les mêmes endroits que ceux décrites pour le Na^+ .

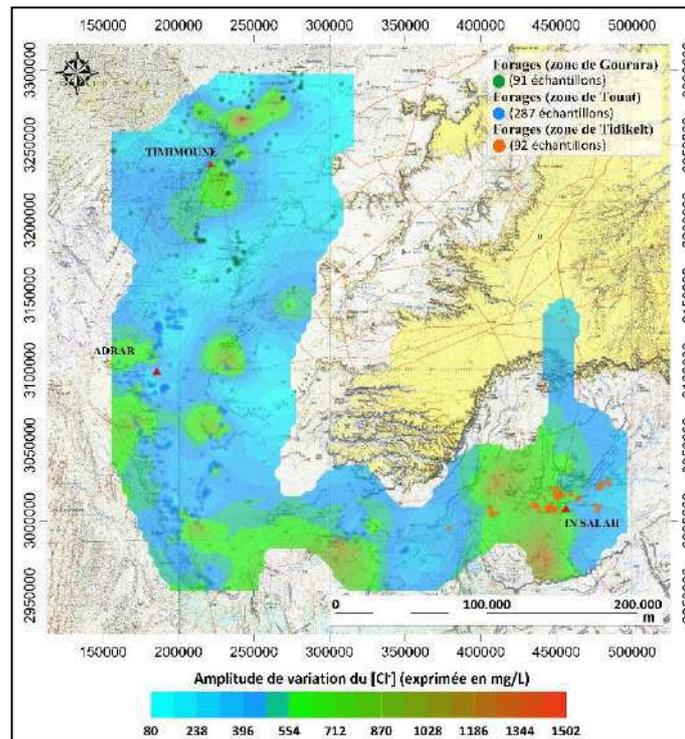


Fig. n° 67 : Répartition spatiale des teneurs en $[\text{Cl}^-]$ (exprimées en mg/L).

- Carte des Sulfates (SO_4^{2-}).

Les résultats d'analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément SO_4^{2-} se résument comme suit :

Tab. n° 16. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément SO_4^{2-}

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
SO_4^{2-} (mg/L)	470	35,00	2100	446,28	66276,78	257,44

La carte d'Iso-Sulfates (figure n° 68) montre que les concentrations de cet élément varient entre (35 et 2100) mg/L.

Les fortes concentrations enregistrées avec des valeurs qui dépassent les 400 mg/L se localisent dans les mêmes endroits enregistrés par l'ion Sodium, cela implique la coïncidence évolutive entre ces 2 éléments chimiques (le SO_4^{2-} et le Na^+).

En général les fortes concentrations qui caractérisent n'importe quelle nappe aquifère, sont soumises à deux facteurs, dus soit au lessivage des formations gypsifères et évaporitiques provenant soit de la forte évaporation, du moment que la zone d'étude se caractérise par un climat hyperaride et que la surface piézométrique est très proche de la surface du sol (où le niveau statique des eaux de la nappe varie entre 1,5 et 35m).

Par contre les plus faibles valeurs de concentrations en Sulfates sont observées le long des bordures Est de la zone d'étude.

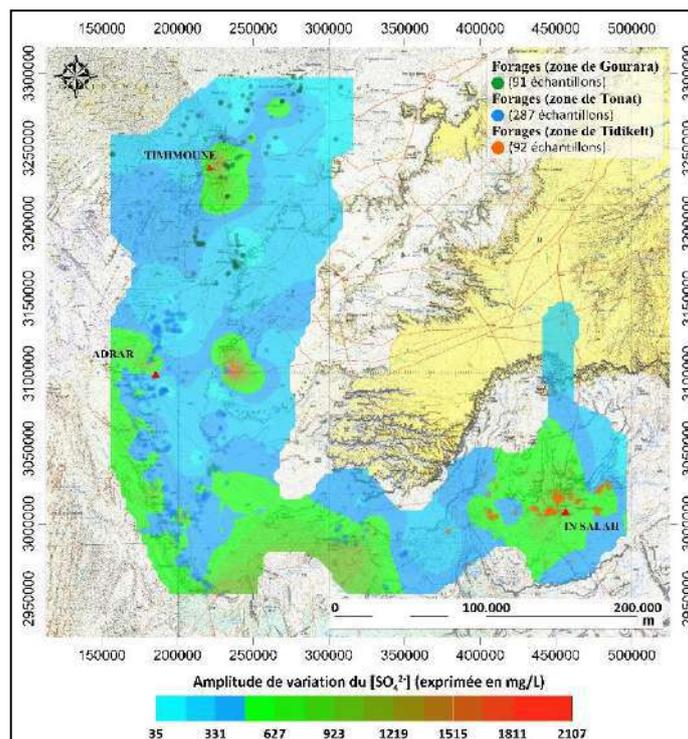


Fig. n° 68 : Répartition spatiale des teneurs en $[\text{SO}_4^{2-}]$ (exprimées en mg/L).

- **Carte d'égaux teneurs en Bicarbonates (HCO_3^-).**

L'analyse descriptive de l'élément (HCO_3^-) après traitement des 470 échantillons se résume comme suit :

Tab. n° 17. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément HCO_3^-

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
HCO_3^- (mg/L)	470	03	280	132,08	2034,25	45,10

En général les Bicarbonates résultent de la dissolution des roches carbonatées est ce en fonction de 4 paramètres : la tension en CO_2 , la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversées.

Dans le cas de notre étude où la matrice aquifère est constituée principalement par des grès et des grès argileux, l'enregistrement de concentrations en HCO_3^- avec des valeurs faibles qui varient entre (3 et 280) mg/L, indique que la participation des bicarbonates sur le chimisme de l'eau par rapport aux autres éléments chimiques est minime.

D'après la carte (figure n° 69), ces valeurs sont importantes au nord-ouest de Timimoune, par contre sur le reste de l'aire de l'étude les valeurs demeurent faibles en général et ne dépassent guère les 200 mg/L.

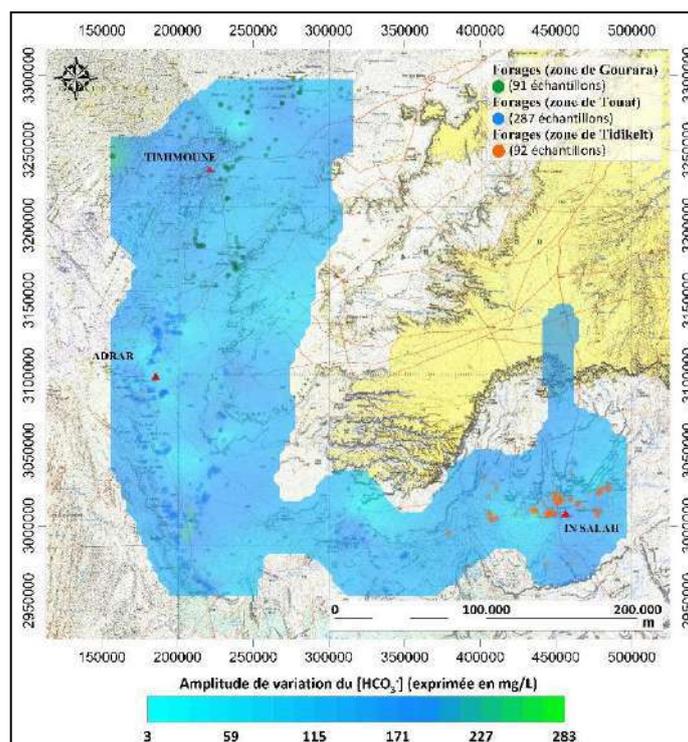


Fig. n° 69 : Répartition spatiale des teneurs en $[\text{HCO}_3^-]$ (exprimées en mg/L).

- Carte d'égaux teneurs en Silicium (SiO_2).

Pour le Silicium, l'analyse descriptive de ce dernier à partir des 470 échantillons traités se résume ci-après :

Tab. n° 18. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément SiO_2

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
SiO_2 (mg/L)	232	01,10	68	17,80	109,08	10,48

L'analyse des cuttings prélevés à partir de certains forages réalisés dans la zone d'étude, montre que litho-logiquement les grès albiens se présentent comme un grès formé de grains de quartz (Silice SiO) agglomérés parfois par un ciment calcaireux. Peut-être c'est la raison pour laquelle on enregistre des valeurs élevées en cet élément.

Le Silicium (SiO_2) qui est un métal dissout dans l'eau et qui caractérise les eaux albiennes de la zone d'étude, l'OMS admet pour ce paramètre une norme qui varie entre (3 et 7) mg/L pour les eaux de consommations.

La carte de répartition spatiale de ce paramètre (figure n° 70) montre que les valeurs élevées se localisent principalement au nord de Timimoune (Gourara) ainsi qu'au niveau de la région du Tidikelt au sud. Ces 2 régions se caractérisent par la présence de formations primaires en contact direct avec les formations gréseuses du Crétacé inférieur (Continental Intercalaire). Dans le reste de l'aire de l'étude les valeurs de SiO_2 se caractérisent sont dans les normes

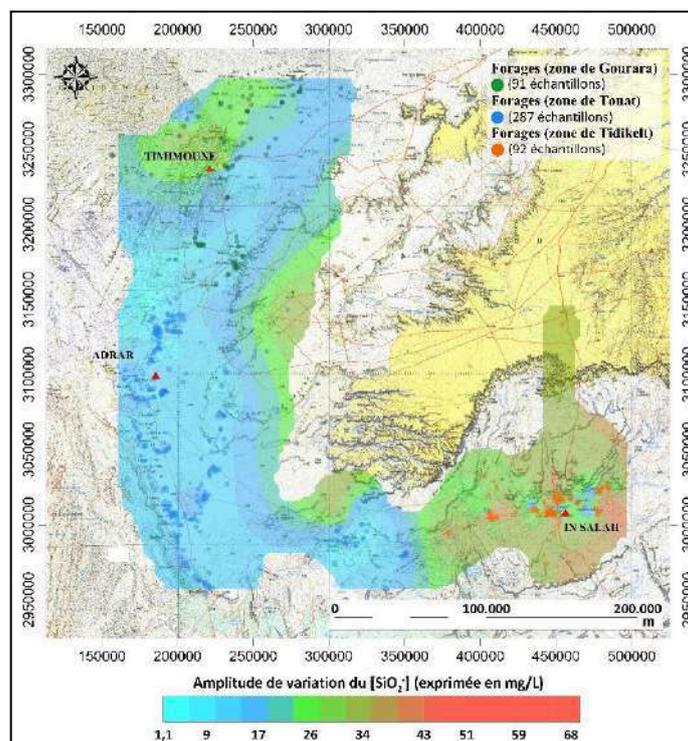


Fig. n° 70 : Répartition spatiale des teneurs en $[\text{SiO}_2^-]$ (exprimées en mg/L).

- Carte d'égaies Conductivités électriques (Ec).

Dans l'ensemble, elles sont fortement minéralisées, sauf les eaux échantillonnées au nord-ouest du Gourara où les conductivités sont respectivement inférieures à $700 \mu\text{S}/\text{Cm}$, de même au niveau la partie orientale de l'aire de l'étude (figure n° 71).

La conductivité électrique varie selon l'analyse descriptive de ce paramètre physique, pour une moyenne de plus de $2200 \mu\text{S}/\text{Cm}$:

Tab. n° 19 Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément Ec.

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
Ce ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	470	585,00	5800	2202,34	707381,31	841,06

D'après les amplitudes de variations de ce paramètre qu'illustre la carte (figure n° 71), trois zones peuvent être distinguées : la 1^{ère} située au Nord de la zone et qui s'étend de la région du Gourara jusqu'au Nord de Touat, et ce avec des valeurs tolérables (de 700 à $2600 \mu\text{S}/\text{Cm}$), une 2^{ème}, située au centre et qui s'étale d'Adrar jusqu'à l'ouest et au Sud-Ouest d'Aoulef avec des valeurs qui oscillent entre (2900 et $4200 \mu\text{S}/\text{Cm}$).

En fin une dernière située au Tidikelt où les valeurs de conductivité sont énormément élevées (plus de $5500 \mu\text{S}/\text{Cm}$).

La confrontation entre les cartes d'iso-teneurs en (Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- et Conductivité), montre une nette coïncidence entre elles. Ce qui explique la relation hydrochimique entre les 3 premiers éléments d'une part et avec la conductivité électrique d'autre part.

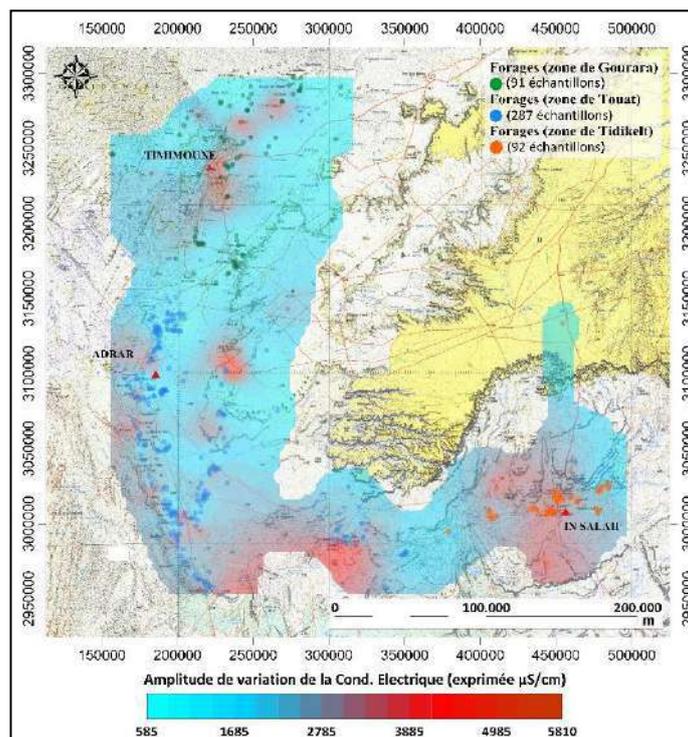


Fig. n° 71 : Répartition spatiale de la conductivité électrique [Ec].

- Carte des Nitrates (NO_3^-).

L'analyse statistique de ce paramètre sur les 470 échantillons observés, a donné les résultats suivants :

Tab. n° 20. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément NO_3^-

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
NO_3^- (mg/L)	436	1,00	214	45,42	940,94	30,67

La valeur élevée (214 mg/L) a été enregistrée au niveau du forage n° Tt170 situé à Taberkane (Touat) alors que la plus faible de (1) mg/L respectivement au niveau des forages Tk n°1 et Tk n°84 à Foggaret E'Zoua au (Gourara).

Vu que la zone d'étude est reconnue par ses vocations agricoles, la présence de taux de Nitrates avec des valeurs relativement supérieures aux normes admises (45 à 50) mg/L, n'est pas étrange. Cependant lorsque ces valeurs passent au double ou au triple, la situation devient inquiétante et même alarmante (figure n° 72). Les valeurs élevées en Nitrates (entre 90 et 190) mg/L enregistrées à l'ouest de Timimoune (Gourara) et au sud d'Adrar (Touat) peuvent être dues non seulement aux activités agricoles (sous l'effet des engrais) mais également aux rejets des eaux domestiques et usées suite à l'absence de réseau d'assainissement dans certaines localités de la région.

Toutefois sur le reste de l'aire de l'étude et en dehors des zones agricoles, on constate que les concentrations en Nitrates restent dans les normes entre (1 et 50) mg/L.

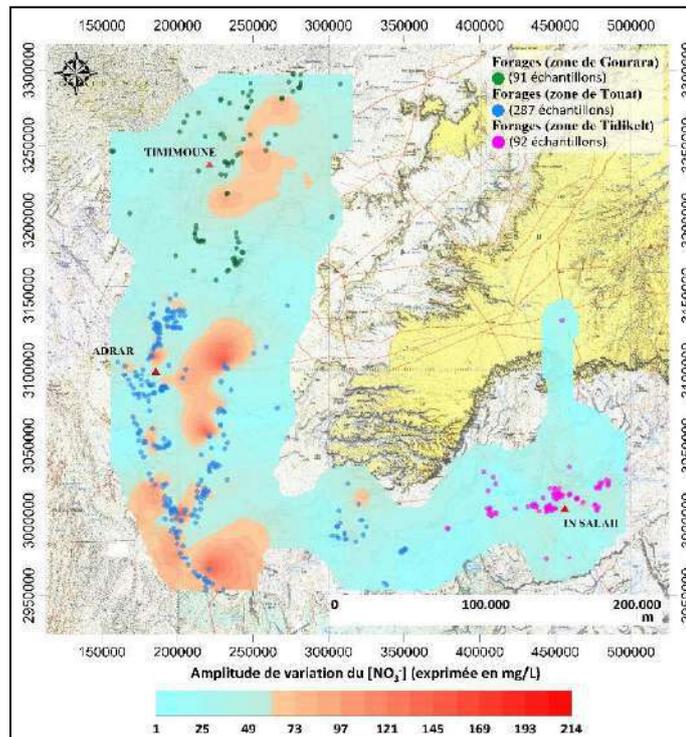


Fig. n° 72 : Répartition spatiale des teneurs en $[NO_3^-]$ (exprimées en mg/L).

- Carte des Fluors (F^-).

Comme l'indique les valeurs présentées ci-après, la valeur maximale est de (2,63) mg/L enregistrée à Fenoughil (Touat) alors que la minimale de (0,40) mg/L à Oudghagh.

Tab. n° 21. Analyse descriptive des 470 échantillons pour l'élément F^-

Elmt. Chmq.	Nb. Echant.	Min.	Max.	Moy.	Variance	Ecart-type
F^- (mg/L)	179	0,40	2,63	0,89	0,14	0,38

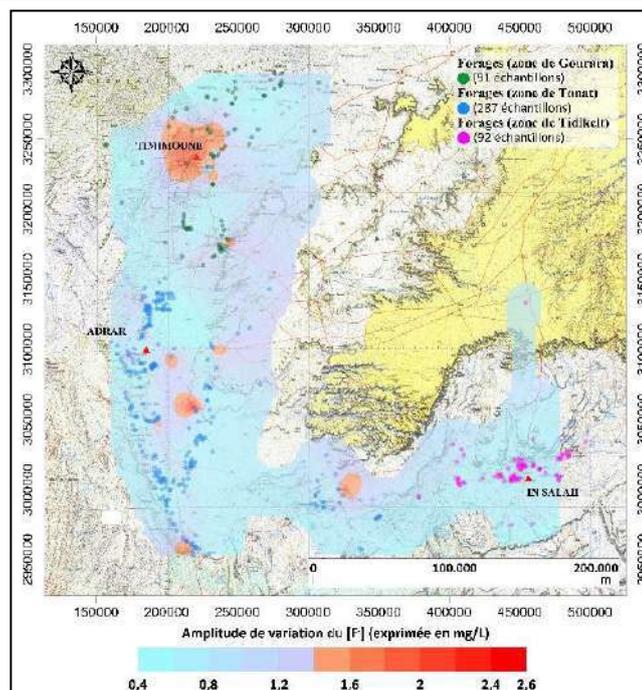


Fig. n° 73 : Répartition spatiale des teneurs en en $[F^-]$ (exprimées en mg/L).

D'après la carte ci-après (figure n° 73), on constate que les fortes teneurs en cet élément se situent au niveau des zones urbaines de Timimoune et Adrar, sauf qu'à Timimoune le périmètre de pollution est plus important. Ceci peut être affecté à la nature de la formation encaissante de la nappe aquifère, vu que généralement l'origine de cet élément est géologique.

VIII.1.5. Identification des différents faciès chimiques.

La figure ci-après illustre le pourcentage des différents paramètres qui rentrent dans la composition physico-chimique de l'eau albiennaise de la zone d'étude.

Sur les 11 paramètres chimiques testés, seuls les Sulfates, les Chlorures et les Sodiums représentent un pourcentage élevé par rapport aux autres (figure n° 74).

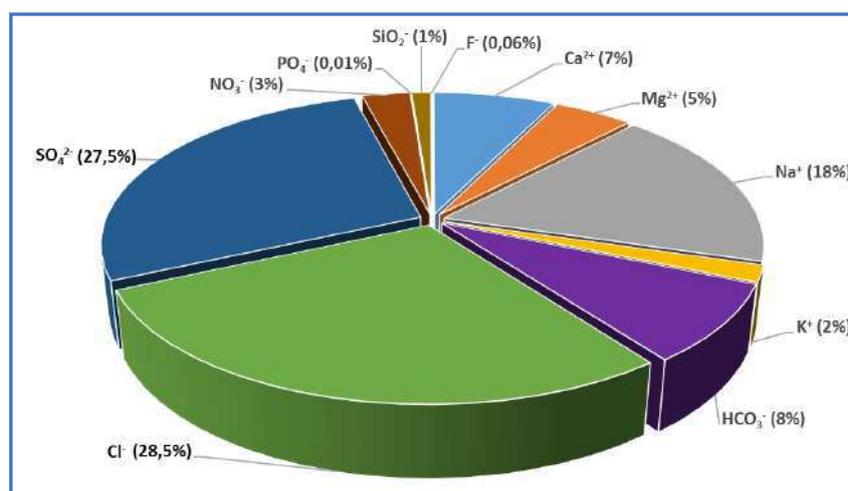


Fig. n° 74 : Pourcentage des concentrations moyennes des différents éléments constituant la composition chimique de l'eau de la zone d'étude.

a) Faciès hydrochimiques.

Dans le but d'établir une classification hydrochimique bien appropriée, on doit suivre le principe suivant :

- Tout d'abord considérer les concentrations relatives des ions majeurs en % (exprimé en méq/L), à condition de prendre en considérations dans la classification que les ions et cations supérieurs à 10% (en méq/L).
- Les anions sont écrits en premier par ordre décroissant, suivis des cations.
- Les teneurs supérieures à 50% sont soulignées et celles comprises entre 10% et 20% (en méq/L) sont mises entre parenthèses.

En employant la formule caractéristique de STABLER, et le diagramme de PIPER, pour identifier le faciès chimique de chaque échantillon.

Et pour déterminer les différents faciès hydrochimiques de l'eau qui caractérise la zone d'étude, il a été jugé utile de convertir les résultats de variations des concentrations absolues des ions majeurs (cations et anions exprimées en méq/L), et les visualisés en format graphique.

Et pour aboutir au but il a été jugé utile d'utiliser 2 représentations graphiques, la 1^{ère} de Stabler pour ressortir la formule caractéristique, la 2^{ème} celle de Piper (ou Diagramme de PIPER), pour identifier le faciès chimique de chaque échantillon.

Pour cela nous avons utilisé comme outil le logiciel Diagramme V6.59, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2018), qui est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau.

Le diagramme de STABLER, permet d'établir une classification exprimée par une formule caractéristique (formule ionique), elle consiste à calculer les quantités en réaction en pourcent par rapport à la concentration totale des éléments (5) soit (50% pour les anions et 50% pour les cations).

$$r\% = \frac{r \times 100}{c} \quad (8)$$

Avec :

- r % :** quantité en réaction en pourcent de l'élément.
- r :** quantité en réaction de l'élément chimique (mg/l).
- c :** concentration de l'élément chimique dans l'eau.

Ensuite on classe de gauche à droite par ordre décroissant, les quantités en réaction en pourcentage pour les anions et les cations, pour obtenir en fin des formules caractéristiques. Cette dernière permet d'une part de définir la relation entre le chimisme des eaux et la lithologie de l'aquifère et d'autre part de regrouper les eaux de même origine. Les résultats obtenus se résument sur (le tableau n° 22).

La représentation des résultats d'analyses chimiques selon la représentation de STABLER, 6 classes de faciès chimiques différents ont été identifiés à savoir :

- Un faciès Chloruré Sodique, le plus dominant et qui représente les 71% de la totalité des échantillons.
- Un autre Sulfaté Sodique, avec 22%.
- Chloruré Magnésien, avec 03%.
- Un Chloruré Calcique, avec 02%.
- Un Sulfaté Calcique, avec 01%
- Un dernier Sulfaté Magnésien, avec 01%.

Quant à la représentation de Piper (Piper 1944) dont le principe permet de représenter le faciès chimique d'un groupe ou de l'ensemble d'échantillons d'eau, selon (PIPER, 1944 ; HEIM, 1970), elle permet d'étudier l'évolution spatio-temporelle du chimisme d'une eau ou d'un aquifère. C'est une représentation très fréquemment utilisée dans ce type d'approches puisqu'elle donne de très bons résultats (YERMANI et al, 2003 ; ALLASSANE, 2004 ; TABOUCHE et ACHOUR, 2004 ; GOUIDIA, 2008 ; OGA et al, 2009 ; KOUASSI et al, 2010 ; YAO et al, 2010 ; AHOUSI et al. 2011 ; KOUASSI et al, 2012).

Le diagramme de PIPER qui est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global.

Selon ce diagramme et comme l'indique la (figure n° 75), on remarque une nette dominance de 2 principales familles d'eau, la famille des eaux Chlorurées Sodiques qui domine et qui représente 71% de la totalité des échantillons et celle des eaux Sulfatées Sodiques qui occupe les 22%. Le reste des autres faciès ne représente que 7% de l'ensemble des 470 échantillons analysés.

Tab. n° 22. Classification des eaux de la nappe Albienne selon STABLER

Faciès chimique	Représentation de Stabler	Formule caractéristique	(%) Par rapport à la totalité	Id. des 470 Echantillons
Chloruré-Sodique		$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$ $r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+} > rCa^{2+}$	71,28%	335 Ech. soit : - 66 Ech. À Gourara - 209 Ech. À Touat - 60 Ech. À Tidikelt
Sulfaté-Sodique		$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$ $r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+} > rCa^{2+}$	22,13%	104 Ech. soit : - 12 Ech. À Gourara - 66 Ech. À Touat - 26 Ech. À Tidikelt
Chloruré-Magnésien		$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$ $rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+}$	03%	14 Ech. soit : - 05 Ech. À Gourara - 06 Ech. À Touat - 03 Ech. À Tidikelt
Chloruré-Calcique		$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$ $rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$	01,70%	08 Ech. soit : - 05 Ech. À Gourara - 03 Ech. À Touat - 00 Ech. À Tidikelt
Sulfaté-Calcique		$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$ $r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+} > rMg^{2+}$	01,06%	05 Ech. soit : - 03 Ech. À Gourara - 01 Ech. À Touat - 01 Ech. À Tidikelt
Sulfaté-Magnésien		$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$ $rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+}$	00,85%	04 Ech. soit : - 00 Ech. À Gourara - 02 Ech. À Touat - 02 Ech. À Tidikelt

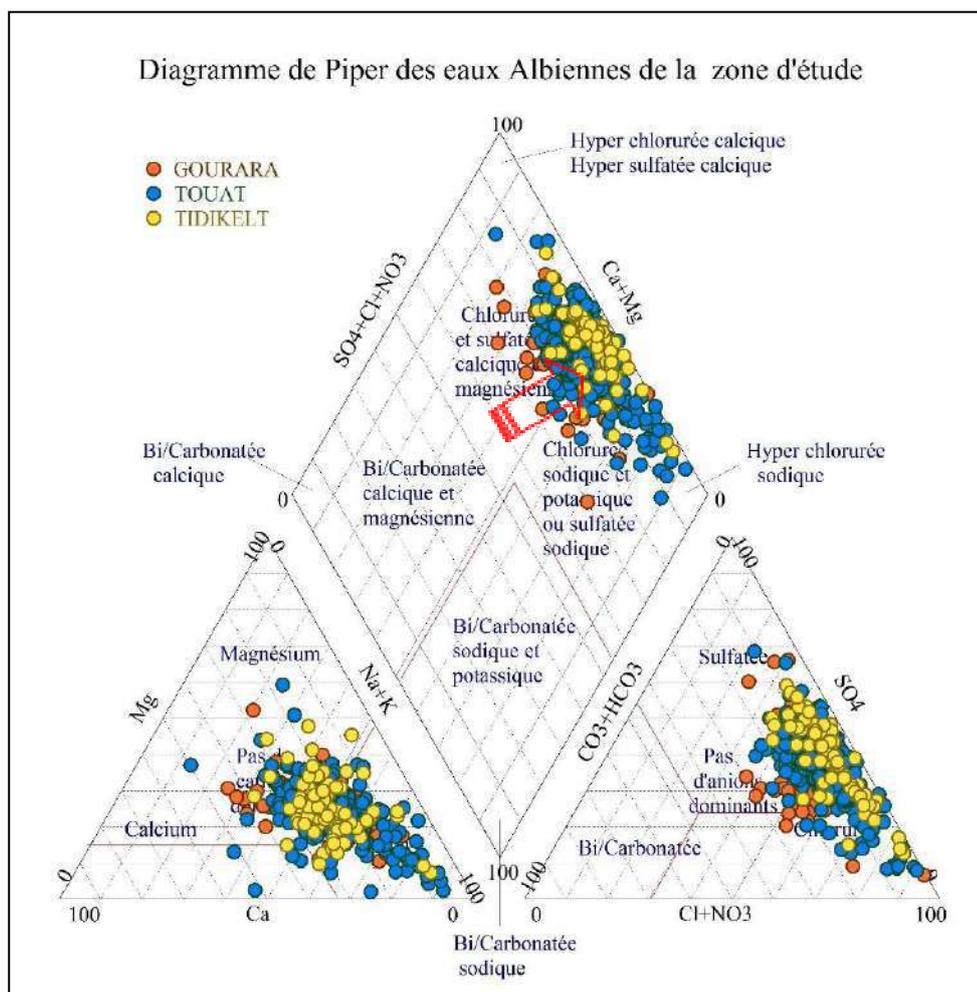


Fig. n° 75 : Répartition des faciès chimiques selon la représentation de PIPER

D'une manière générale et comme l'illustre ce diagramme (figure n° 75) on constate que la majorité des échantillons est regroupée au niveau de deux pôles avec la présence d'une zone de transition pour constituer un troisième.

L'évolution s'effectue selon l'orientation de la flèche rouge du pôle bicarbonaté aux pôles chloruré - sulfaté - sodique. Cette évolution explique l'apport joué d'une part par les Sulfates et les Chlorures pour les anions, et les Sodiums et Potassiums pour les cations d'autre part. Dans le diagramme des cations, une bonne partie des échantillons se situent dans la zone centrale avec une tendance remarquable vers le pôle Na-K, ils se répartissent entre la zone neutre (pas de cations dominants) et la zone dominée par le Sodium et Potassium. D'autres échantillons minoritaires se distribuent entre le Magnésium pour Tt27, Tt57 à Touat et Gr63 au Gourara et le Calcium pour les points Tt36, Tt140.

Pour les pourcentages des cations des 470 points, le diagramme montre qu'ils varient comme suit : $7,39\% < \text{Na}^+ < 86,79\%$ - $2,09\% < \text{Mg}^{2+} < 59,16\%$ - $2,76\% < \text{Ca}^{2+} < 51,6\%$ - $0,90\% < \text{K}^+ < 19,93\%$. Donc de ce diagramme, on déduit la classification dans l'ordre décroissant suivant : $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, Mg^{2+} , Ca^{2+} .

Pour les anions, il montre qu'il n'y a pas d'anions dominants et que l'ensemble des points sont alignés sur la bordure Cl-SO₄, loin du pôle des Sulfates mais très proches de celui des Chlorures avec la présence d'une zone de mélange.

Les pourcentages des anions de tous les points échantillonnés varient dans les intervalles suivants : 17,55% < Cl⁻ < 92,63% - 06,84% < SO₄²⁻ < 71,62% - 0,24% < HCO₃⁻ < 30,54%. De cela on déduit la classification pour les anions selon l'ordre décroissant suivant : Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻.

D'où la formule ionique se présente comme suit :

$$(rCl > rSO_4 > rHCO_3 \text{ et } r(Na + K) > rMg > rCa)$$

La combinaison entre les cations et les anions de l'ensemble des 470 points échantillonnés, a ressortie 2 principaux types des faciès dominants à savoir : les eaux Chlorurées Sodiques et celles Sulfatées Sodiques. Ces deux types de faciès qui caractérisent les eaux albiennes sont en général rencontrées dans la partie orientale du bassin du SASS.

Comparés aux précédents d'autres faciès ayant été enregistrés dans la zone d'étude mais avec un pourcentage très faible à savoir : le faciès Chloruré Magnésien, Chloruré Calcique, Sulfaté Magnésien et Sulfaté Calcique. (EDMUNDS et al, 2003) a déduit que le faciès chimique des eaux du Continental Intercalaire "Nappe albiennne" dans la partie Algéro-Tunisienne du Sahara Septentrional est du type Sulfaté Chloruré Sodique. De même (BOUCHAHM et al, 2008) a mentionné qu'au niveau des régions de Ouargla et Touggourt (partie orientale du SASS) le faciès est Chloruré, Sulfaté, Calcique, et Magnésien : (rCl > rSO₄ > rHCO₃ et rCa > rMg > rNa) alors que à El Oued, les eaux profondes sont Sulfatées Chlorurées Calciques et Magnésiennes : (rSO₄ > rCl > rHCO₃ et rCa > rMg > rNa). Plus au nord du bassin, à Biskra (Bouziane et al, 2009), a montré que les eaux albiennes ont un faciès Sulfaté Sodique et Calcique : (rSO₄ > rCl > rHCO₃ et rNa > rCa > rMg - rSO₄ > rCl > rHCO₃ et rCa > rNa > rMg).

b) Evolution hydrochimique spatiale des faciès des eaux.

Les analyses chimiques réalisées sur les 470 points d'eau, montrent que les eaux Chlorurées Magnésiennes, Chlorurées Calciques, Sulfatées Magnésiennes et Sulfatées Calciques représentent les 7 % des observations et correspondent aux eaux les moins minéralisées. Par contre les eaux Chlorurées Sodiques et Sulfatées Sodiques représentent les 93% des observations, elles sont peut-être responsables des plus fortes concentrations. Comme l'indique la carte (figure n° 76), les eaux Chlorurées Sodiques s'observent en plus grand nombre 72% et dominent toute l'aire de la zone d'étude. La répartition spatiale de ces types d'eau s'observe surtout en bordure de la zone d'exutoire.

Quant aux eaux de type Sulfatées Sodiques et représentent les 22% des observations, sont observées presque dans le sud de la zone d'étude mais surtout dans les endroits où la nappe albiennne est surmenée par les formations argilo-marneuses du Cénomanienn. Ce faciès a été enregistré également au niveau de la bordure sud du Plateau de la Tademaït.

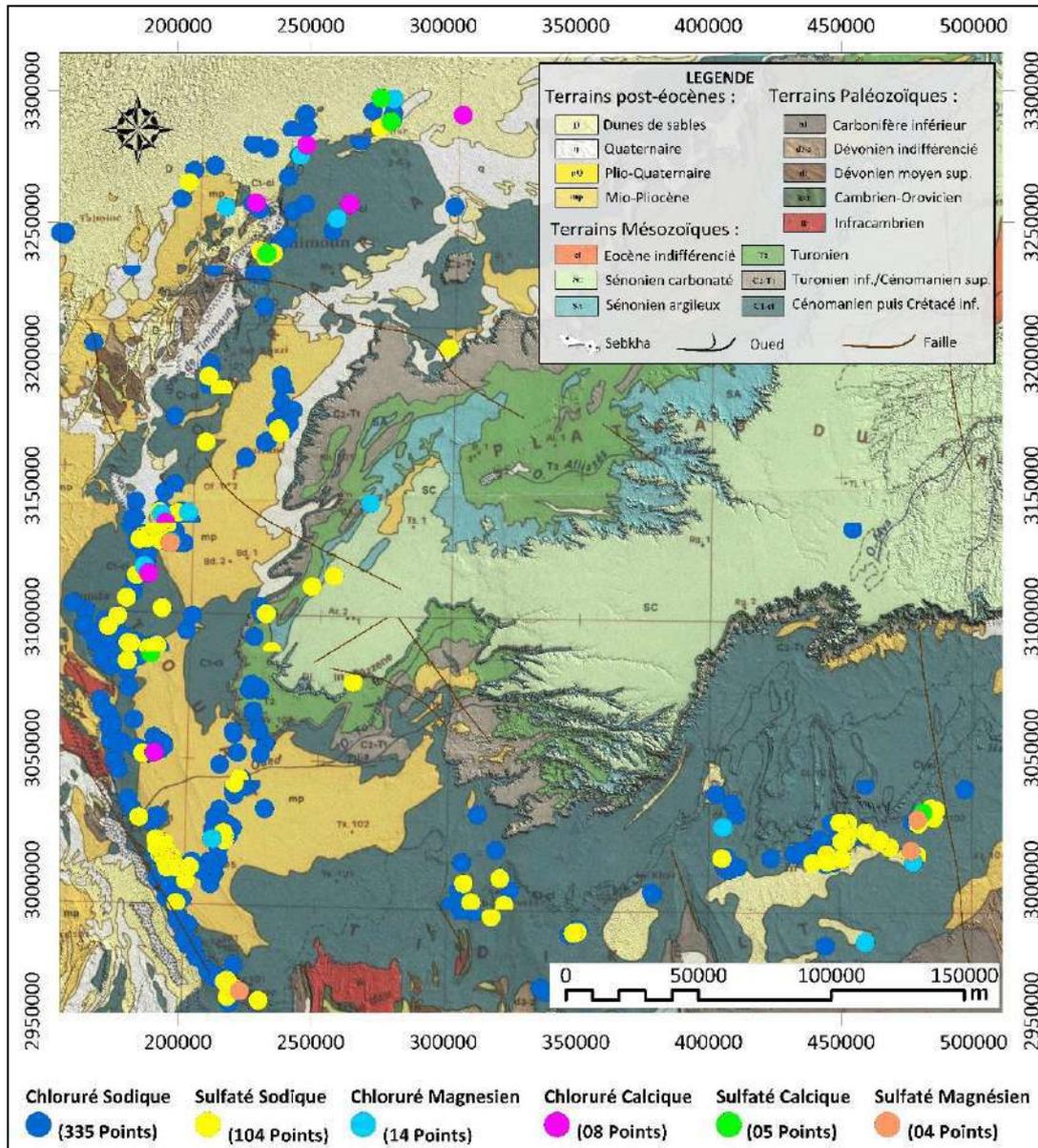


Fig. n° 76 : Carte des faciès hydrochimiques caractérisant l'eau de la zone d'étude.

VIII.1.6. Evolution hydrogéochimique spatiale des ions majeurs.

Dans la présente approche on étudiera d'une manière bien détaillée l'évolution du chimisme selon les axes suivants :

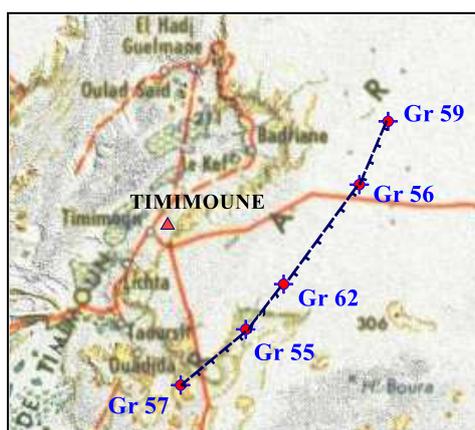
- L'évolution chimique des ions majeurs dissouts dans l'eau en fonction de la distance entre les points de prélèvements et le sens d'écoulement des eaux de la nappe.
- L'évolution spatiale des faciès chimiques respectivement en fonction de la distance entre les points de prélèvements, la lithologie de l'aquifère et le sens d'écoulement des eaux.
- L'évolution spatiale du rapport entre les ions (SO_4^{2-} et le Cl^-), et ce en fonction de la distance entre les points de prélèvements, la lithologie et le sens d'écoulement des eaux de la nappe.

A cet effet, il a été jugé utile d'examiner par régions l'influence de concentrations des principaux indicateurs hydrochimiques à savoir : Conductivité électrique, Chlorures, Sodium,

Magnésium, Potassium, Sulfates, Calcium, et Bicarbonates en fonction de l'éloignement entre les points de prélèvements et le sens d'écoulement des eaux de la nappe, nous avons effectué une projection de certains points de prélèvements parallèlement à l'axe d'écoulement des eaux. Pour cela 3 profils ont été élaborés (le 1^{er} qui s'étend sur une distance de 19,5 km longe la région du Gourara rattachant le point Gr57 au Gr59, le 2^{ème} axe passant par la région du Touat joignant le Tt117 et Tt231 sur une distance de 23,2 km, et le 3^{ème} de 13,5 km de long situé dans la région du Tidikelt s'étend du point Tk66 au point Tk34). Ceci va nous permettre à l'aide des graphiques de mettre en évidence la variabilité spatiale de ces indicateurs hydrochimiques parallèlement au sens d'écoulement des eaux de la nappe.

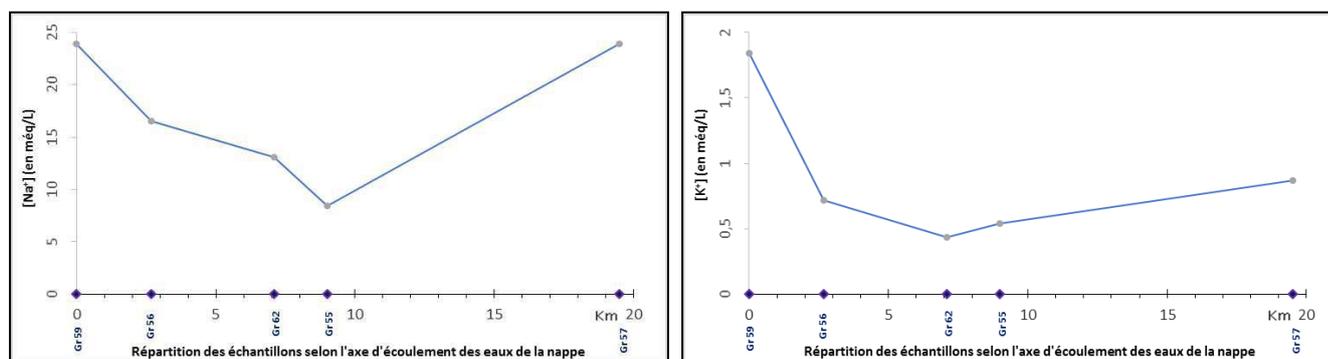
- Profil hydrochimique n° 1 (Région du Gourara) :

D'après les graphiques (figure n° 77), on remarque une coïncidence entre l'évolution de la conductivité électrique avec celle des autres paramètres, ceci explique que la concentration de ces éléments chimiques est contrôlée par la conductivité. On remarque également une correspondance entre les profils du Na^+ , Cl^- d'une part et le Mg^{2+} et SO_4^{2-} d'autre part, qui évoluent avec la même cadence, où les concentrations de ces paramètres débutent avec des valeurs importantes pour devenir faibles au point Gr55 puis pour augmenter de nouveau au Gr57 (dernier point).



Orientation du profil n° 1 traversant la région du Gourara).

Une simultanée est enregistrée entre les profils du Ca^{2+} , et le HCO_3^- ce qui explique une relation entre le Calcium et les Bicarbonates.



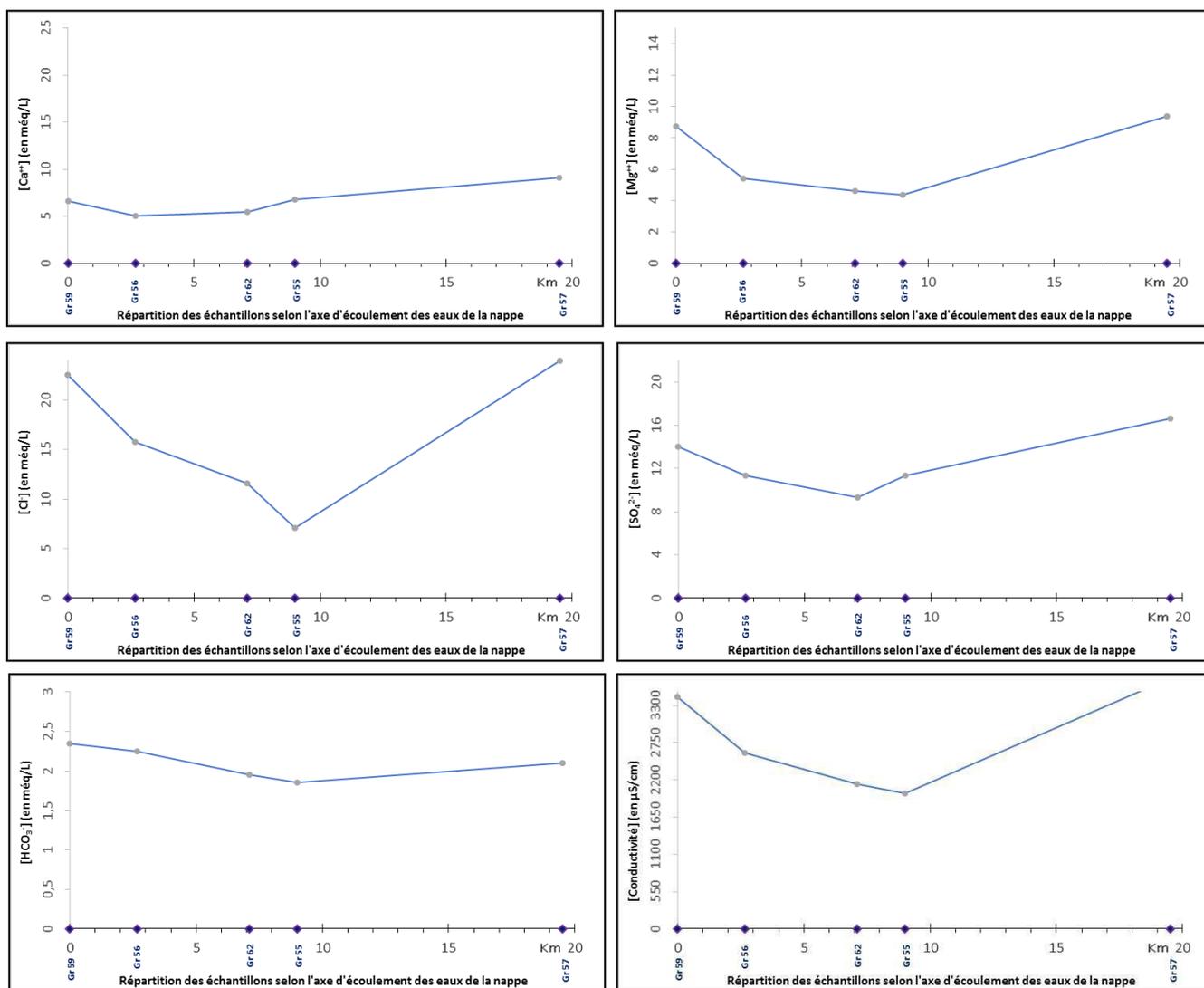
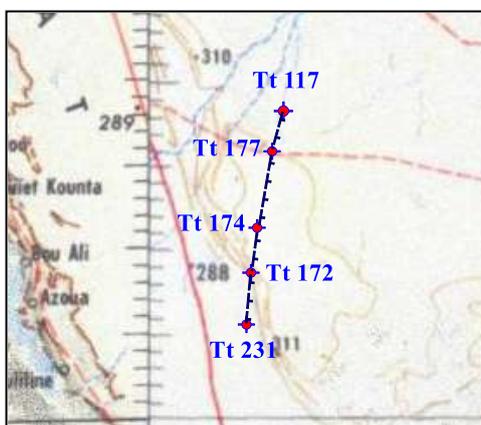


Fig. n° 77 : Evolution spatiale des ions majeurs suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe du C.I (Région du Gourara).

- Profil hydrochimique n° 2 (Région du Touat) :



Orientation du profil n° 02 traversant la région du Touat.

Les graphiques (figure n° 78), illustrent qu'hormis le Mg^{2+} qui illustre une allure différente des autres courbes, l'évolution de l'ensemble des éléments dans cette région est similaire à celle évoquée dans le Gourara.

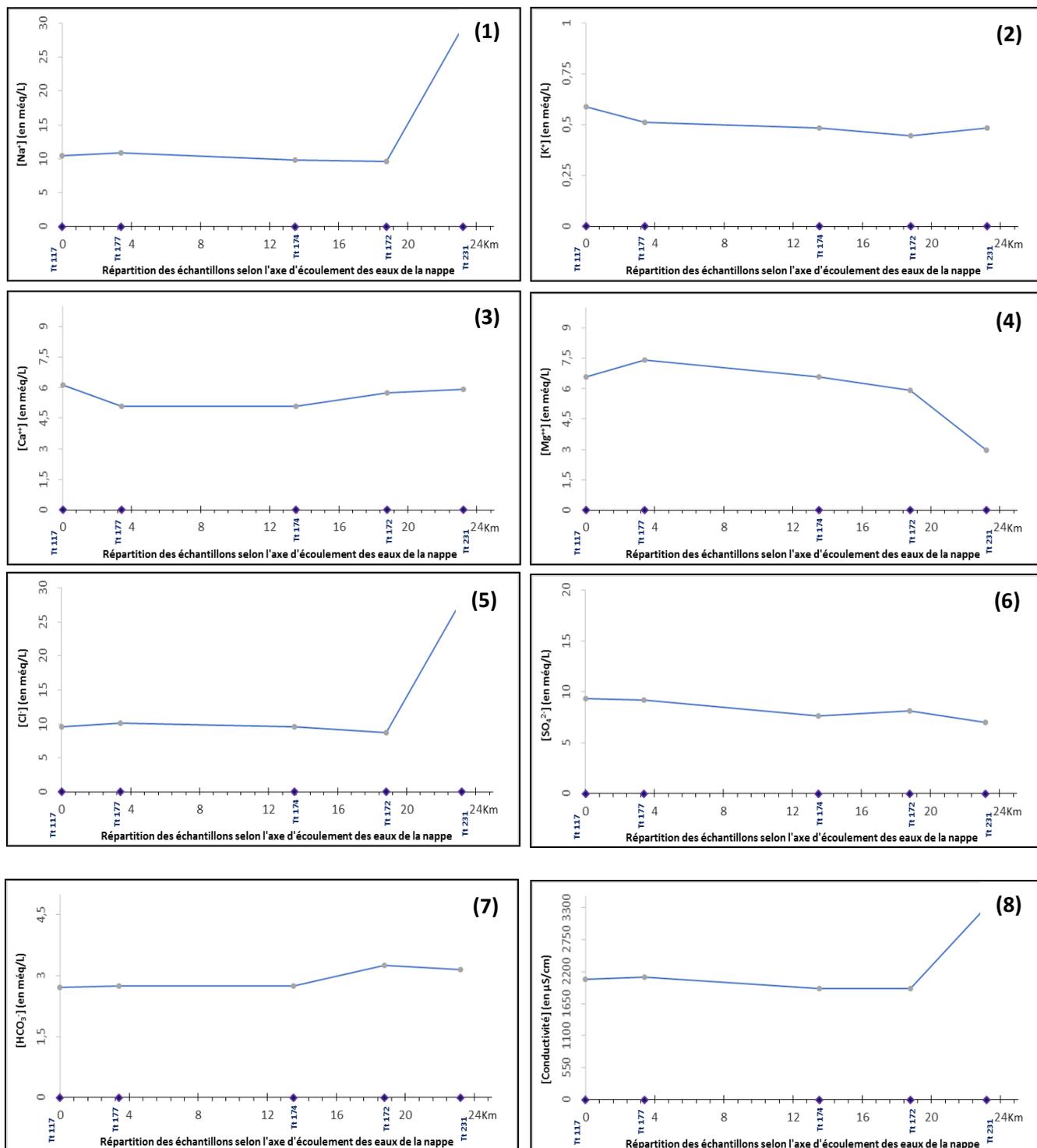
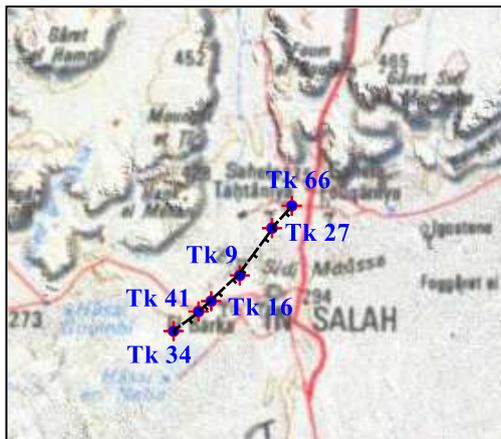


Fig. n° 78 : Evolution spatiale des ions majeurs suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe du C.I (Région du Touat).

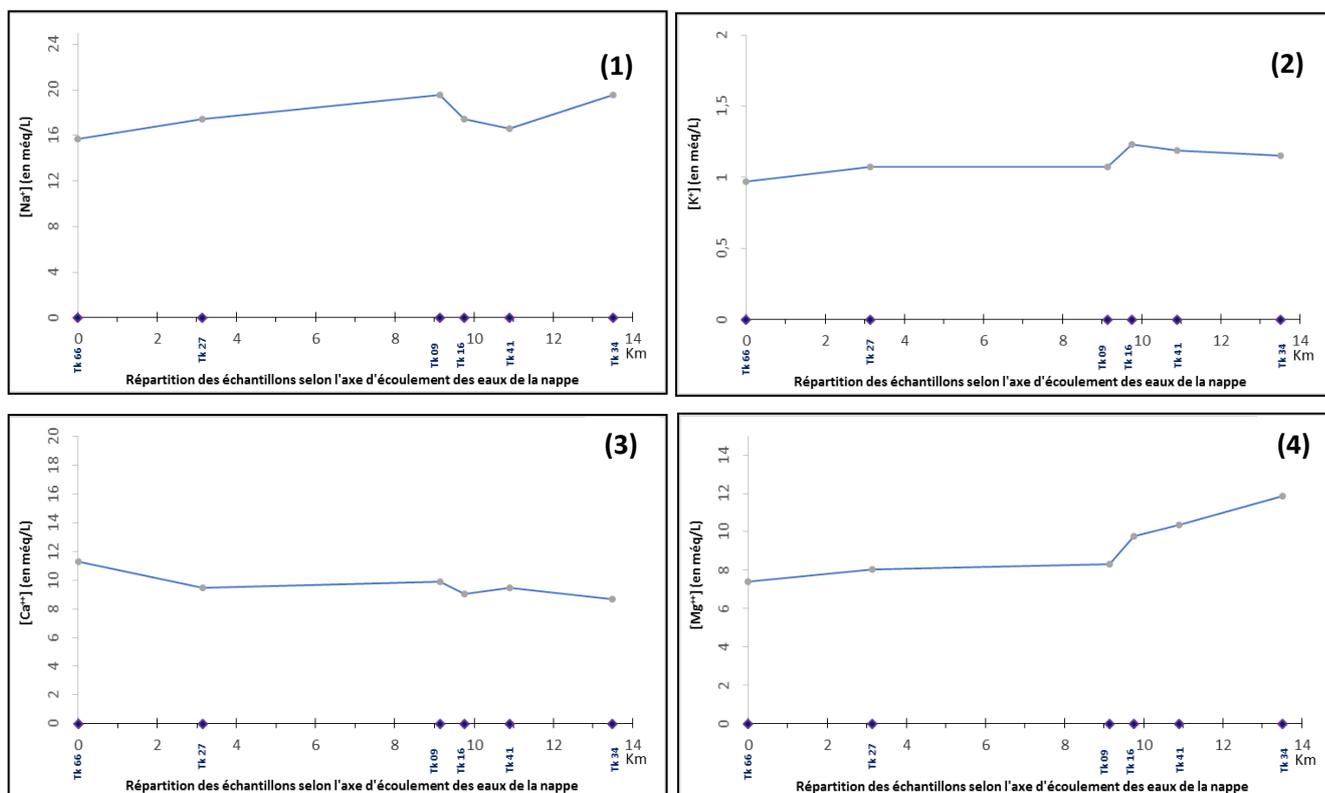
- Profil hydrochimique n° 3 (Région du Tidikelt) :

Graphiques (figure n° 79). Dans cette zone qui correspond à l'extrême sud de la zone d'étude, les profils élaborés illustrent une spécificité au niveau des points Tk09, Tk16 et Tk41 où l'allure du graphique change au niveau de ses 3 points (la distance entre Tk09 et Tk41 est de 1,75 km).

Ceci indique que sur une distance très réduite le chimisme de l'eau ne se comporte pas de la même manière qu'entre deux points éloignés.



Orientation du profil n° 03 traversant la région du Tidikelt.



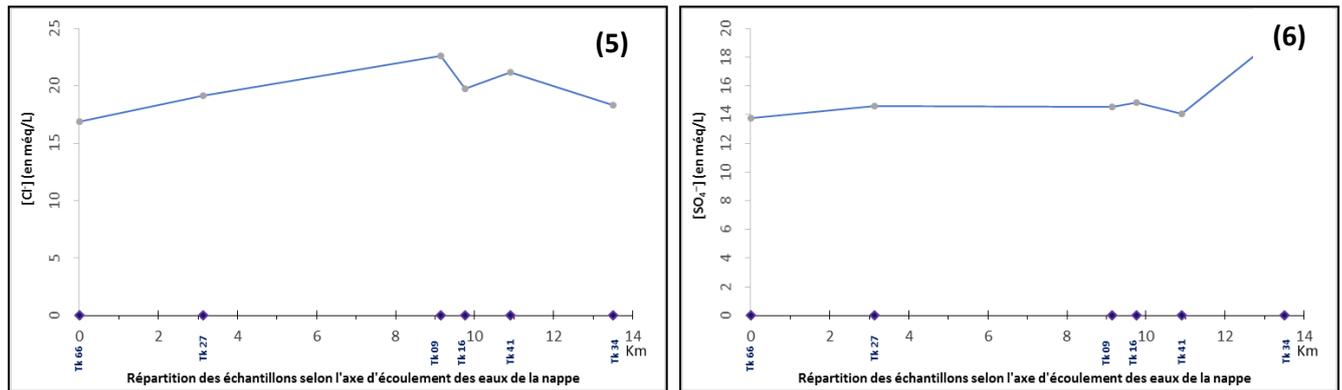


Fig. n° 79 : Evolution spatiale des ions majeurs suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe du C.I (Région du Tidikelt).

VIII.1.7. Evolution hydrogéochimique spatiale des faciès.

La combinaison entre la cartographie des différents éléments chimiques et les diagrammes de PIPER et de STABLER, nous ont permis de déduire la présence de 3 principaux faciès chimiques qui sont par ordre de dominance : Chloruré-Sodique, Sulfaté-Sodique et Chloruré-Magnésien. Et pour schématiser le mode d'acquisition du chimisme de cette eau ainsi que les facteurs qui interviennent dans le changement spatial des faciès, il a été jugé utile d'établir un modèle qui prendra en considération la combinaison entre 3 paramètres principaux :

- La répartition spatiale des ions majeurs (anions et cations) qui rentre dans la constitution chimique de cette eau.
- Le sens d'écoulement des eaux de cette nappe.
- Et la lithologie de la matrice aquifère.

La variation des paramètres physico-chimiques et leur influence sur la prédominance et le changement de faciès d'un point à l'autre, nécessitent une étude qui prend en considération la relation entre 3 éléments (la lithologie, la nature chimique de l'eau prélevé, et le sens d'écoulement des eaux de la nappe. Généralement les faciès hydrochimiques d'un lieu particulier sont influencés par 2 paramètres, la géologie de la région et l'état de l'eau. Et vue la particularité de l'hétérogénéité de la lithologie de la zone d'étude a reflétée sur la diversité des faciès (en tout 6 faciès caractérisent l'eau albienne de la zone).

En vue de mettre en évidence cette évolution, nous présenterons sous forme de profil hydrochimique une combinaison entre le changement latéral de la lithologie de la matrice aquifère et le faciès chimique des points de prélèvements appartenant, et ce suivant l'axe d'écoulement des eaux de cette nappe.

Les différentes cartes piézométriques élaborées, ont montrées que le sens d'écoulement est orienté selon 2 axes principaux, l'un du NW au SE (pour Gourara et Touat) l'autre du sud vers le nord pour le Tidikelt. En tout 09 coupes litho-stratigraphiques accompagnées de faciès hydrochimiques ont été élaborées réparties comme suit :

2 ayant traversées la zone de Gourara, 2 pour Touat, 2 autres dont l'une située entre Touat - Gourara et l'autre entre Touat – Tidikelt, en fin 3 autres profils dont 2 pour le Tidikelt et un dernier qui rattache le sud de Reggane (Touat) au nord d'In Salah (Tidikelt). D'autre part 12 profils hydrogéochimiques dont 4 pour chaque région ont été dressés dont le but de suivre l'évolution latérale du rapport entre SO_4^{2-} et Cl^- et ce, en tenant compte de 2 paramètres le sens d'écoulement des eaux de la nappe et la variation lithologique de la matrice aquifère (voir carte d'orientation des profils ci-après – figure n° 80).

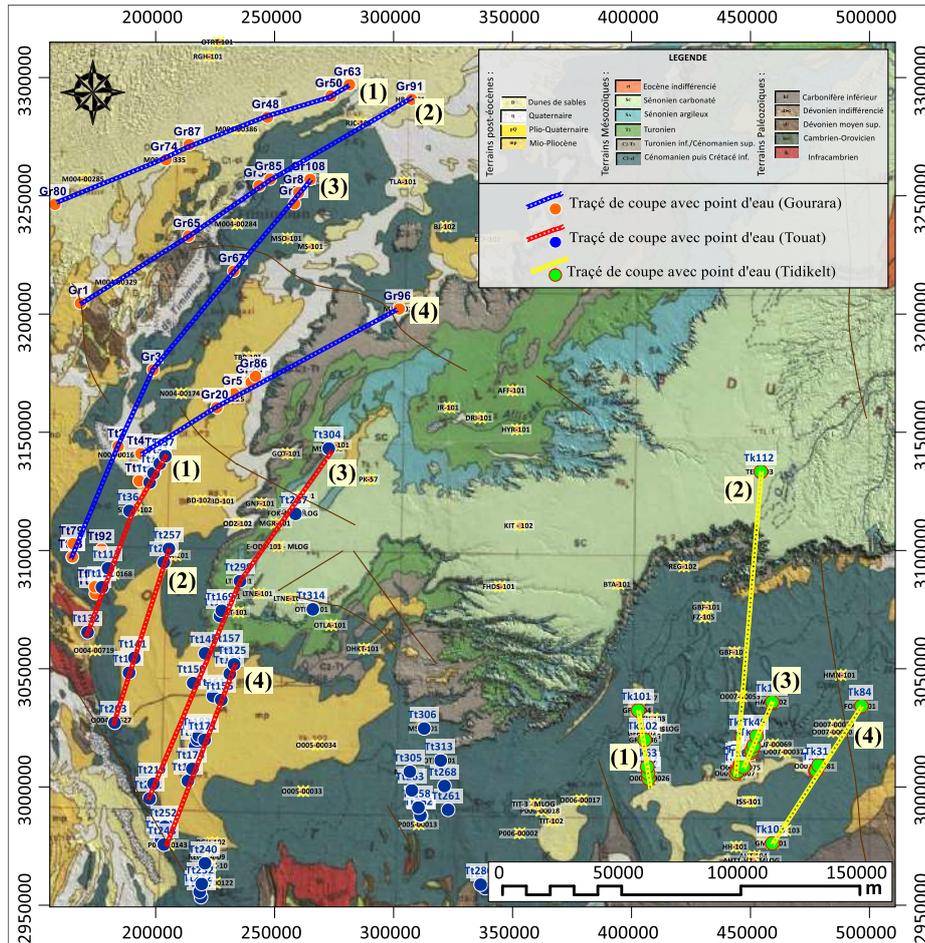


Fig. n° 80 : Carte d'orientation des profils hydrogéochimiques élaborés.

- Coupes n° 1-2-3 (Région du Gourara) :

La corrélation entre les points caractérisant la région du Gourara révèle une hétérogénéité de la lithologie de la matrice aquifère. Plus à l'Est de la région l'aquifère est à base de grès argileux et de l'argile sableuse relativement gypseux, ceci peut être l'origine du faciès sulfaté sodique.

Au fur et à mesure vers l'ouest en suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe le faciès change et devient chloruré calcique (remarque observée pour la coupe 2).

Ce changement brusque de faciès, peut être expliqué par l'effet de la piézométrie c'est elle qui favorise la naissance de ces faciès car les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction Est-Ouest et vu que la vitesse d'écoulement est lente (temps de résidence lent), ces eaux se chargent progressivement au fur et à mesure qu'on se déplace vers l'ouest pour constituer une zone d'accumulation. Ceci explique les fortes concentrations observées dans ce secteur affecté par la prédominance des faciès chlorurés sodique.

Comme l'indique les différentes coupes lithologiques, la présence des argiles dans plusieurs forages avec des intercalations argileuses et grés-argileuses dans la matrice aquifère favorise les échanges de base des ions, ce qui explique la présence de sodium ou du calcium ce qui engendre l'apparition de faciès sodiques et calciques.

Nous avons remarqué dans certaines coupes de forages situés en amont (Hassi E'Rtem), que la matrice aquifère est constituée par des grès sablo-calcareux. Alors que dans la partie ouest de la région (exutoire), la présence de nombreux flocons de gypses en surface, ce qui explique l'existence de faciès sulfaté dans cet axe (sebkhet El Malah).

- Coupes n° 1-2-3 (Région du Touat) :

La corrélation entre les différentes coupes qui longent cette région et la carte de répartition spatiale du rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$), montre une simultanéité entre elles. Ceci peut être expliqué par le fait de la dominance de grès sablo-argileux qui caractérisent la matrice aquifère le long de cette région, avec la présence de formations marneuses qui couvrent le toit de l'aquifère. C'est pour cela que le faciès chloruré sodique est le plus dominant.

La présence de faciès sulfaté ne peut être expliquée que suite aux échanges d'ions dus à la dominance d'intercalations argileuses au sein de la matrice aquifère.

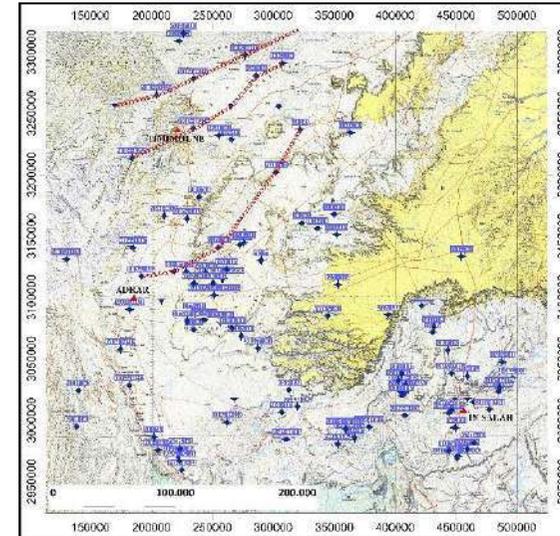
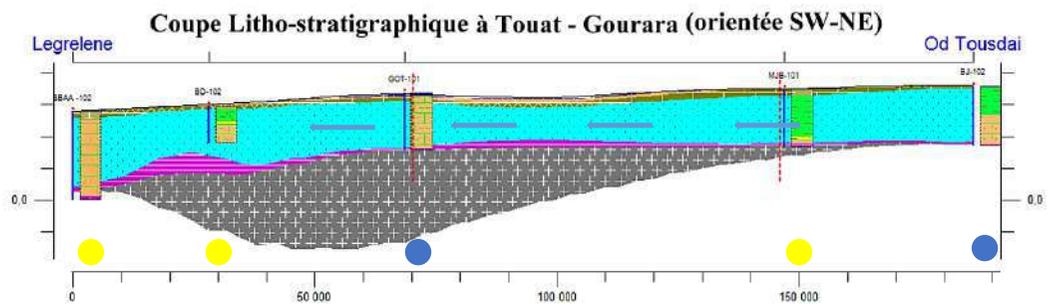
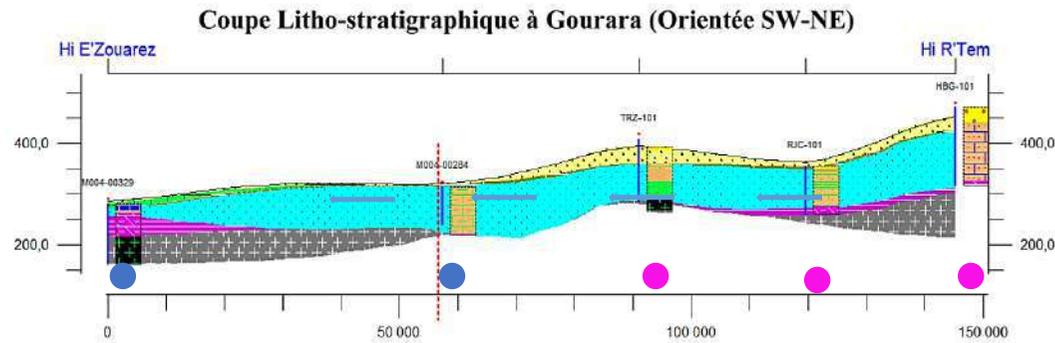
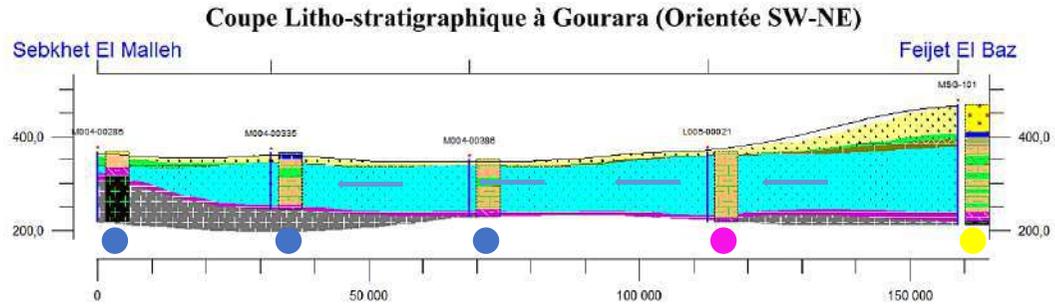
On remarque également d'après ces coupes, la présence de 3 faciès avec la dominance des chlorurés sodiques en amont et les sulfatés sodiques en aval.

- Coupes n° 1-2-3 (Région du Tidikelt) :

Plus au sud de la zone d'étude (au Tidikelt), les coupes illustrent en direction du sens d'écoulement des eaux de la nappe qui se fait selon la carte piézométrique du Nord-Est au Sud-Ouest, et suivant 2 axes différents la dominance de 2 faciès, chlorurés sodiques et sulfaté sodique.

Le 1^{er} axe correspond aux coupes 1 et 2, et qui débute avec un faciès chloruré sodique au nord pour devenir sulfaté sodique à l'aval au sud de la région. Alors que le 2^{ème} axe qui est le contraire de l'axe 1, convient avec la coupe 3 où le faciès commence à l'aval avec un type sulfaté sodique à l'Est pour devenir chloruré au Sud (exutoire).

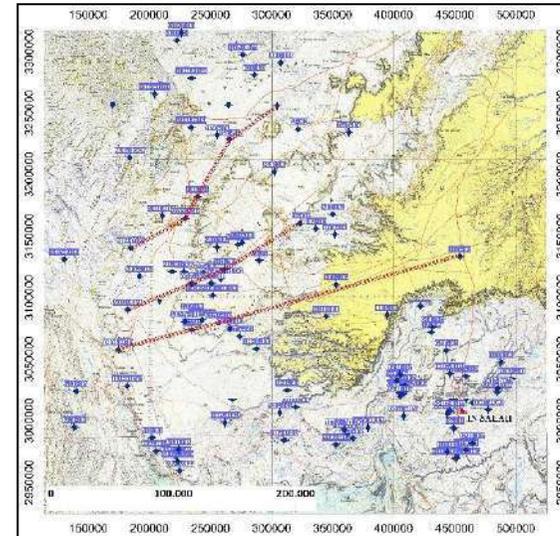
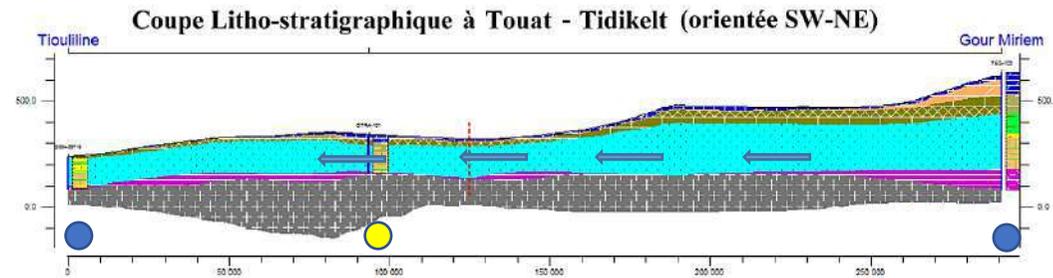
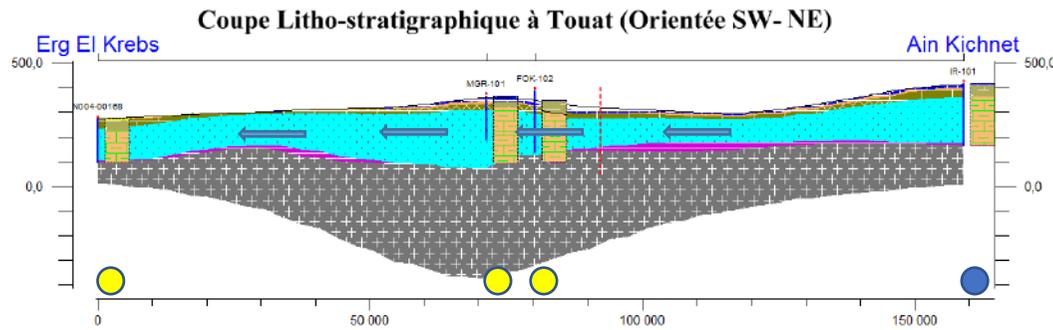
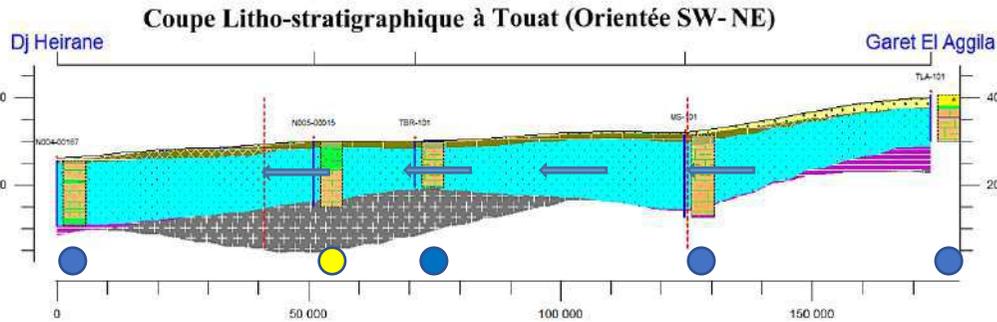
Coupes n° 1-2-3 (Région du Gourara)



Lithologie et description lithologique	Stratigraphie
Sable gréseux	Quaternaire
Sable grossier	Pli-Quaternaire
Sable argileux	Sénonien
Calcaire argileux	Sénonien
Calcaire compact	Turronien
Calcaire dolomitique	Albien (C.I.)
Calcaire gréseux	Aptien
Marnes	Dévonien
Argile marneuse	
Argile sableuse	
Argile gréseuse	
Grès argileux	
Grès calcineux argileux	
Grès dolomitique	
Grès sableux	
Grès sablo-argileux	
Grès sablo-calcaireux	
Dolomie	
Argile schisteuse	

- Faciès Chloruré sodique.
- Faciès Sulfaté sodique.
- Faciès Chloruré magnésien
- Faciès Chloruré calcique.

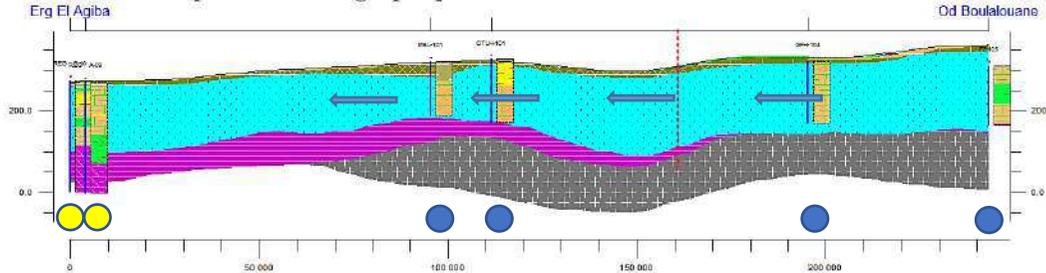
Coupes n° 1-2-3 (Région du Touat)



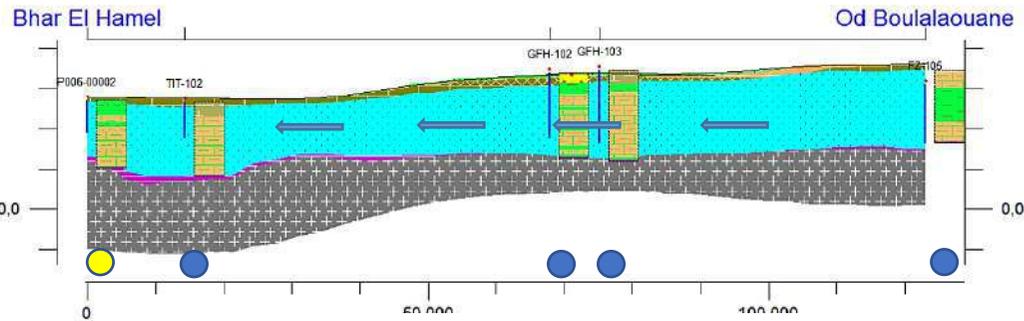
Lithologie et description lithologique	Stratigraphie
Sable gréseux	Quaternaire
Sable grossier	Plio-Quaternaire
Sable argileux	Sénonien
Calcaire argileux	Sénonien
Calcaire compact	Turronien
Calcaire dolomitique	Albien (C.I)
Calcaire gréseux	Aptien
Marnes	Dévonien
Argile marneuse	
Argile sableuse	
Argile gréseuse	
Grès argileux	Faciès Chloruré sodique.
Grès calcineux argileux	Faciès Sulfaté sodique.
Grès dolomitique	Faciès Chloruré magnésien.
Grès sableux	Faciès Chloruré calcique.
Grès sablo-argileux	
Grès sablo-calcaireux	
Dolomie	
Argile schisteuse	

Coupes n° 1-2-3 (Région du Tidikelt)

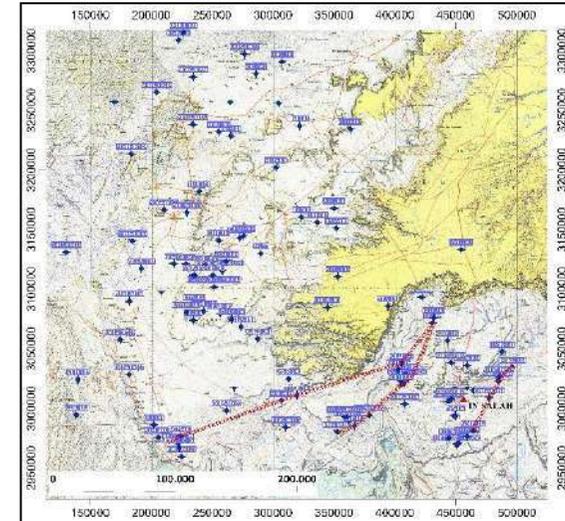
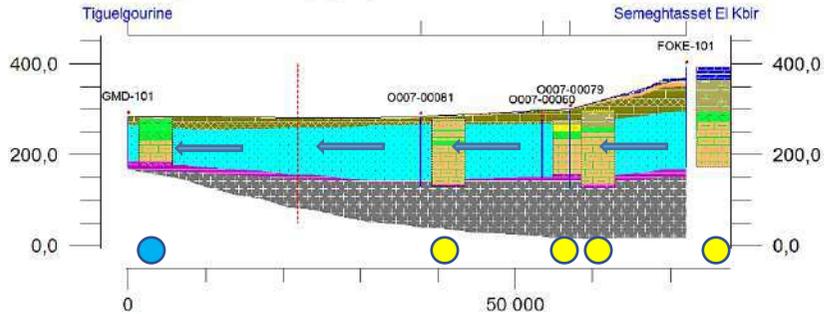
Coupe Litho-stratigraphique du Sud d'Aoulef au Nord de In Salah



Coupe Litho-stratigraphique du Sud au Nord de In Salah

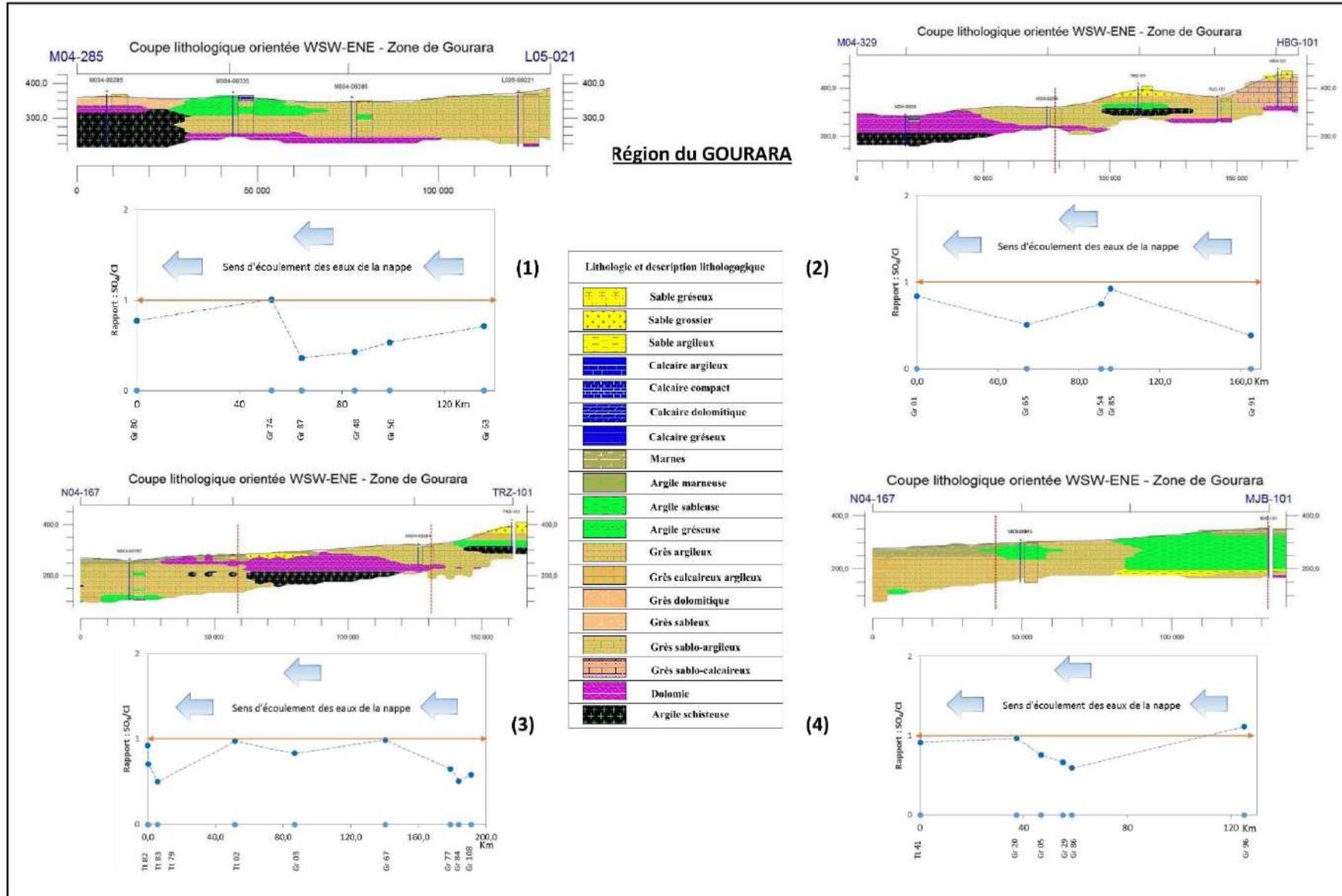


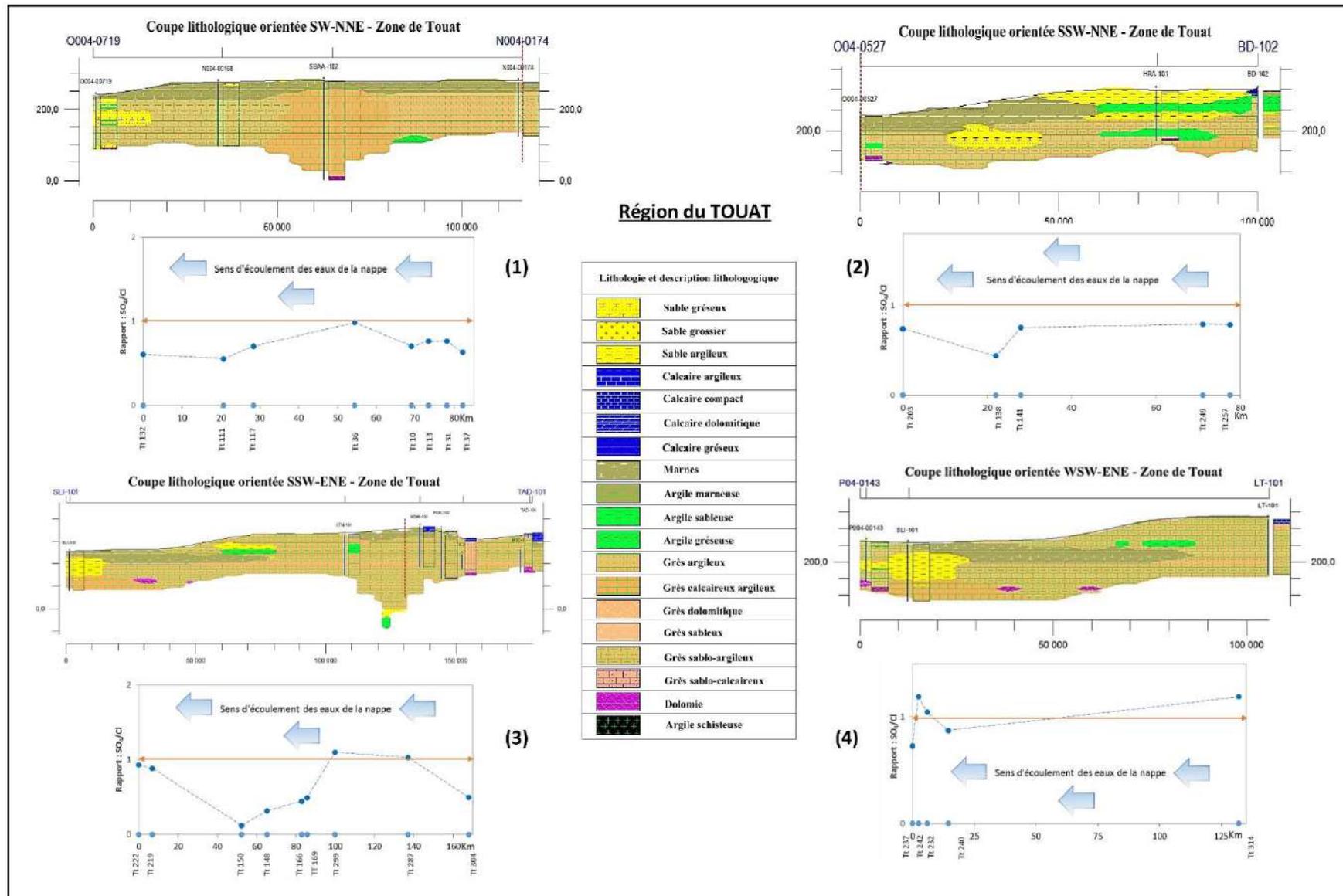
Coupe Litho-stratigraphique du S-W au N-W de In Salah

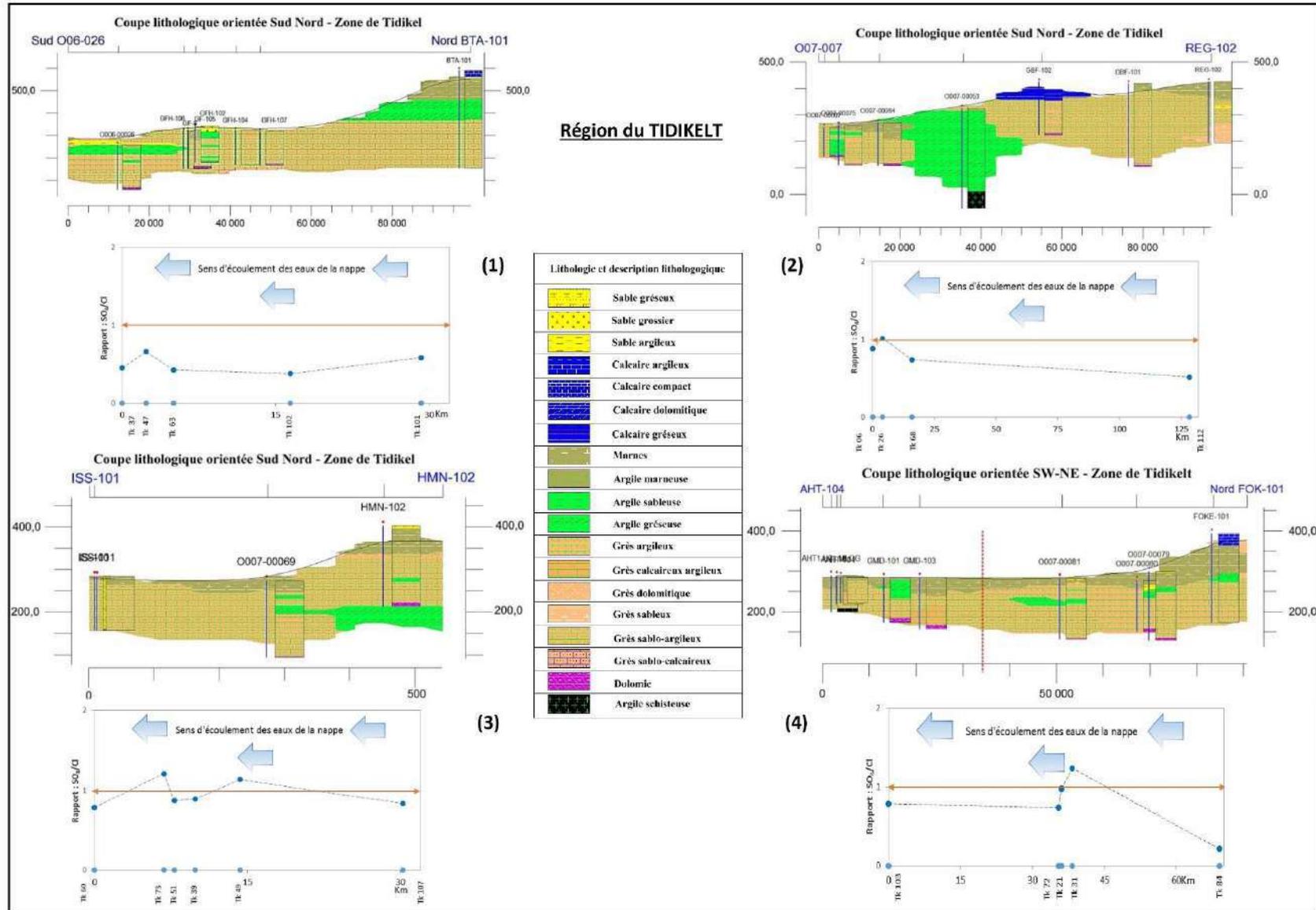


Lithologie et description lithologique		Stratigraphie	
	Sable gréseux		Quaternaire
	Sable grossier		Plio-Quaternaire
	Sable argileux		Sénonien
	Calcaire argileux		Sénonien
	Calcaire compact		Turonien
	Calcaire dolomitique		Albien (C.I)
	Calcaire gréseux		Aptien
	Marnes		Dévonien
	Argile marneuse		
	Argile sableuse		
	Argile gréseuse		
	Grès argileux		
	Grès calcineux argileux		
	Grès dolomitique		
	Grès sableux		
	Grès sablo-argileux		
	Grès sablo-calcaireux		
	Dolomie		
	Argile schisteuse		

- Faciès Chloruré sodique.
- Faciès Sulfaté sodique.
- Faciès Chloruré magnésien
- Faciès Chloruré calcique.







VIII.1.8. Origine de la minéralisation des eaux.

D'après l'étude géologique, les principales formations qui caractérisent la nappe aquifère de la zone d'étude sont représentées par des roches sédimentaires d'âge Albien composés de grès argileux parfois calcareux et sableux surmontées sur toute l'étendue de l'aire de l'étude par les formations marneuses du Cénomanién. D'après la carte géologique de BUSSON 1967, une indifférenciation entre l'albien et le Cénomanién a été enregistrée au niveau de la partie occidentale du bassin. Ce qui caractérisent également ces formations perméables, leurs richesses en eau souterraine. Par conséquent, le chimisme de ces eaux qui circulent dans ce système aquifère est dépendant de la composition minéralogique des formations encaissantes où leurs minéraux contribuent à la minéralisation de l'eau.

Pour cela et afin de mieux comprendre les processus de minéralisation des eaux dans la zone d'étude, nous avons établi des corrélations entre les éléments chimiques par le biais de diagrammes binaires.

VIII.1.8.1. Diagrammes binaires.

L'établissement des diagrammes binaires consiste à représenter sur un graphique 2D l'évolution d'un élément ou d'un rapport ionique en fonction d'un autre élément souvent supposé conservatif. Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher également l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélations déterminés par des calculs statistiques (souvent effectués par le logicielle). La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Pour cela et pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté quelques éléments majeurs en fonction des chlorures (d'autant plus que cet élément chimique conservatif joue le rôle d'un traceur naturel). Des graphiques ont été également établies entre les éléments majeurs pris deux à deux.

1. Origine de la salinité en fonction de certains paramètres.

a) Diagramme Conductivité, Cl⁻, HCO₃⁻ et SO₄²⁻.

Afin de discriminer, parmi les éléments chimiques contribuant à la minéralisation des eaux (en l'occurrence les sulfates et les chlorures qui représentent les ions dominants dans cette étude), à savoir lequel de ces ions est responsable principalement de l'augmentation de la salinité des eaux, on a établi la représentation graphique de la conductivité électrique avec le SO₄²⁻ et le Cl⁻. L'examen du graphique de la (figure n° 81) montre que les chlorures et les sulfates des 470 échantillons d'eaux prélevées augmentent simultanément avec la conductivité électrique. Ce qui explique que ces deux éléments (sulfates et chlorures) participent à la minéralisation des eaux dans la zone d'étude. Cependant pour les bicarbonates, on constate qu'il n'y a pas d'évolution de la conductivité électrique avec ce paramètre.

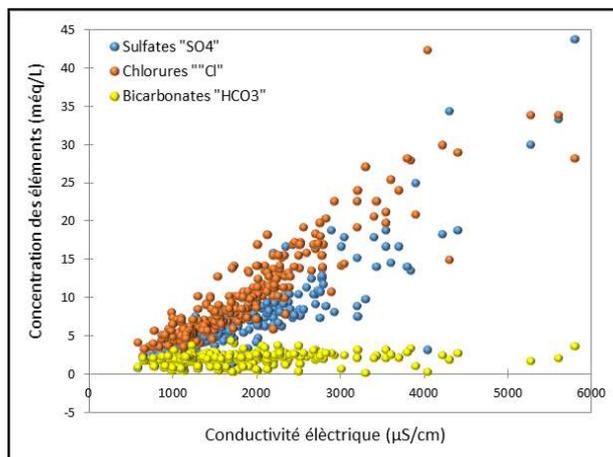


Fig. n° 81 : Evolution des anions (en méq/L) en fonction de la conductivité électrique

Et en vue de discriminer lequel de ces éléments chimiques qui contribue de plus à la minéralisation des eaux (en l'occurrence les sulfates et les chlorures). Il a été jugé utile d'établir la représentation des rapports SO_4/HCO_3 et Cl/HCO_3 en fonction de la conductivité électrique voir (figure n° 82), et ce dans le but de déterminer lequel de ces ions est responsable principalement de l'augmentation de la salinité des eaux qui caractérisent la zone d'étude.

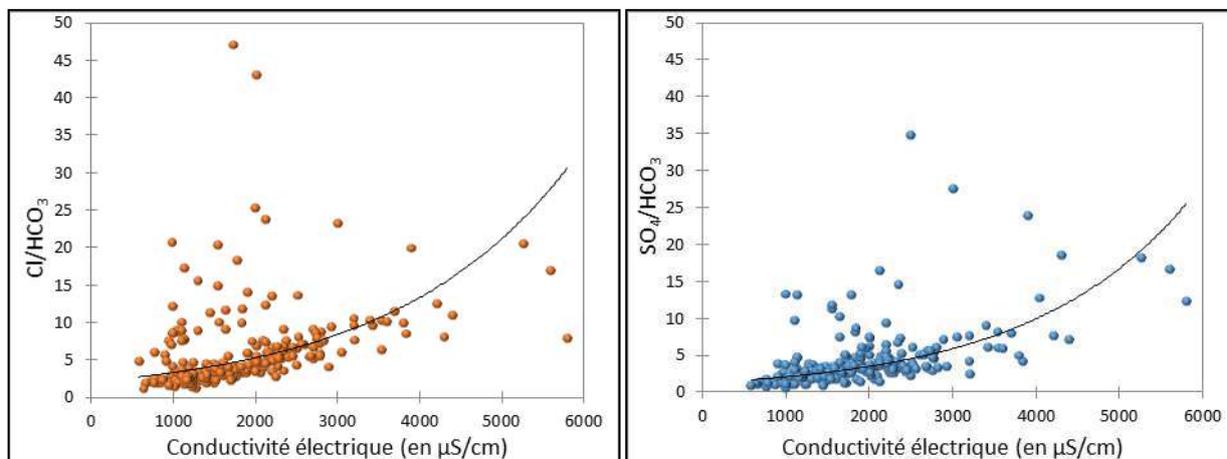


Fig. n° 82 : Variation des rapports Cl/HCO_3^- et SO_4^{2-}/HCO_3^- en fonction de la C. Electrique.

L'examen des 2 graphiques montre que la conductivité électrique des 470 échantillons prélevés à partir de la zone d'étude évolue avec la même cadence pour les 2 paramètres mais avec une tendance plus accrue avec les chlorures ce qui explique qu'elle est beaucoup plus due aux chlorures qu'aux sulfates.

b) Diagramme Conductivité, rapport Cl^- et SO_4^{2-} .

Après avoir défini l'origine de la minéralisation qui caractérise les eaux albiennes de la zone d'étude, il est impératif de déterminer l'origine de ces 2 éléments chimiques. Généralement ces deux ions sont issus de deux formations sédimentaires évaporitiques

différentes, le SO_4^{2-} est d'origine gypsifère (du gypse) alors que le Cl^- provient de la dissolution de l'halite et probablement d'une pollution anthropique (qui reste à confirmer).

On a associé l'évolution de ces ions à la conductivité électrique pour mettre en évidence la manière avec laquelle ils évoluent et confirmer de nouveau lequel d'entre eux est à l'origine de la salinité des eaux de cette acquière.

L'interprétation du graphique (figure n° 83) a révélé que la majorité des points d'eau présente un rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl^- par rapport à SO_4^{2-} , ce qui confirme la dominance du faciès chloruré sodique, magnésien et calcique. Toutefois 112 sur les 470 points d'eau présentent des valeurs de ce même rapport mais inférieures à 1 indiquant ainsi qu'ils ont une origine gypsifère. Une bonne partie de ces points se situent principalement au niveau du Touat (au centre de la zone d'étude). D'où la dominance d'ions chlorurés (plus de 70% des points analysés) par rapport aux ions gypseux (10% de la totalité).

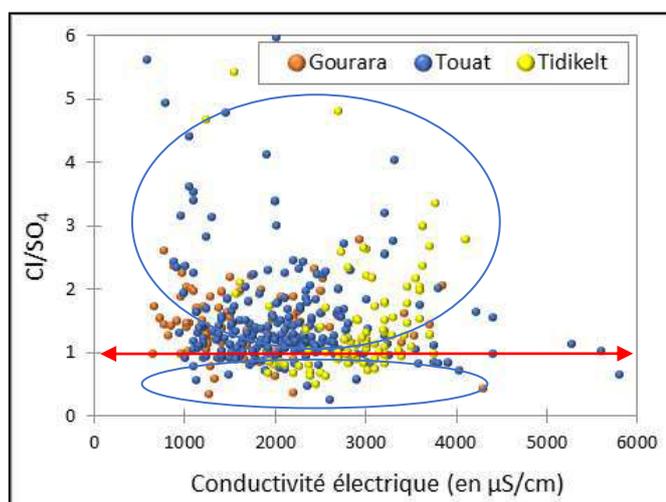


Fig. n° 83 : Rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ en fonction de la C. Electrique.

c) Diagramme Conductivité, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-) / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$.

D'après le graphique (figure n° 84), le rapport $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-)$ et celui $(\text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ en fonction de la Conductivité électrique, on peut ressortir que les évaporites jouent suite à leur dominance dans la matrice aquifère un rôle important dans l'origine de la minéralisation des eaux albiennes dans cette partie du bassin. Ce qui explique que la salinité des eaux de la région d'étude est en liaison directe avec l'effet des évaporites pour la plupart des échantillons prélevés.

On enregistre également que les faibles salinités qui caractérisent l'eau de la zone d'étude se situent principalement dans la zone du Gourara (au nord) ainsi que sur l'axe qui rattache le Gourara au nord du Touat. Néanmoins les fortes salinités se positionnent au niveau du Tidikelt et sur l'axe Touat – Tidikelt.

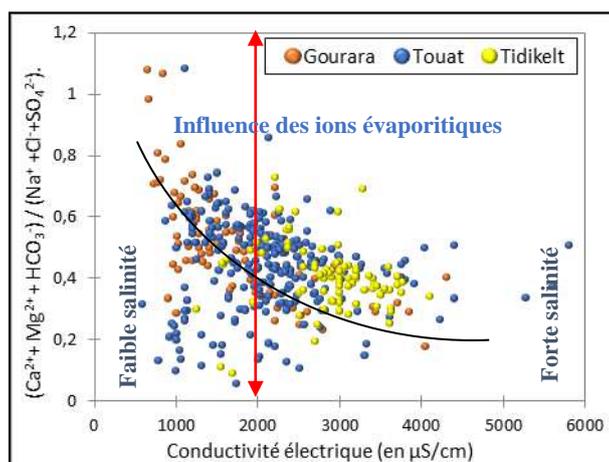


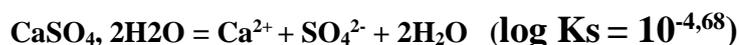
Fig. n° 84 : Rapport $(Ca^{2+} + Mg^{2+} + HCO_3^-)/(Na^+ + Cl^- + SO_4^{2-})$ en fonction de la C. Electrique.

Pour résumer, on déduit d'après la (figure n° 84) que les points d'eau montrent une fonction exponentielle, et que le rapport entre le $(Ca^{2+} + Mg^{2+} + HCO_3^-)$ et le $(Na^+ + Cl^- + SO_4^{2-})$ est inversement proportionnelle à la conductivité électrique et ce, suite à la dissolution des formations salifères qui commence à apparaître à partir de 2000 $\mu S/cm$.

L'analyse du graphique confirme donc que la conductivité électrique est conditionnée beaucoup plus par les chlorures avec une légère dominance des sulfates.

d) Diagramme Conductivité, (Ca^{2+}/Mg^{2+}) .

Vue l'abondance de formations marneuses du Cénomaniens qui se sont en contact direct et régulier avec les formations gréseuses de l'Albien sur toute l'étendue de l'aire de l'étude, et vue que l'ions Ca^{2+} dérive généralement sous l'effet soit de la dissolution des bicarbonates soit des formations gypseuses (contenus dans les marnes), et ce selon l'équation d'équilibre suivante :



Et pour vérifier l'influence de ces 2 cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) sur la conductivité électrique, il a été décidé d'établir le couple (Ca^{2+}/Mg^{2+}) en fonction de la C.E.

Le graphique (voir figure n° 85) montre que 60 % des points analysés présentent un rapport inférieur à 1, indiquant une dominance des ions du magnésium contre 40% de la totalité des points par rapport aux ions calcium. Ce qui explique que la conductivité est influencée beaucoup plus avec le magnésium qu'avec le calcium.

Il est à noter que le graphique montre que les points d'eau suivent une fonction exponentielle où le rapport entre les 2 éléments diminue au fur et à mesure que la conductivité augmente.

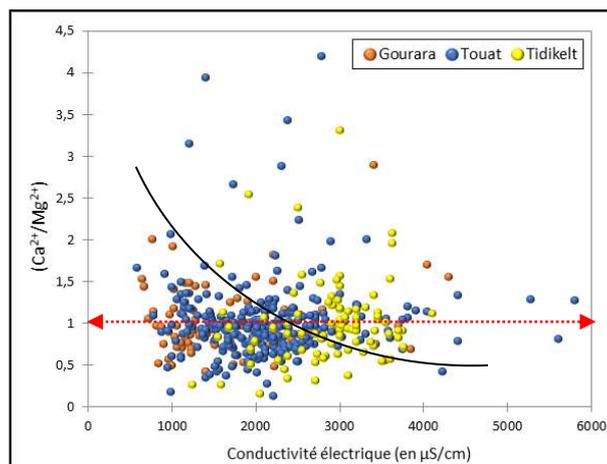


Fig. n° 85 : Rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) en fonction de la C. Electrique.

2. Origine des paramètres à partir des rapports caractéristiques.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la répartition spatiale des 6 faciès a révélé que le SO_4^{2-} et Cl^- représentent les anions dominants, alors que pour les cations c'est le Na^+ et Mg^{2+} .

a) Rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ des 470 échantillons.

L'interprétation du graphe suivant, a révélé que la majorité des points d'eau (plus de 90%) présente un rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl^- par rapport à SO_4^{2-} , ce qui confirme la dominance du faciès chloruré, en contrepartie certains points d'eau présentent des valeurs inférieures à 1 indiquant ainsi un faciès moins important qui est sulfaté.

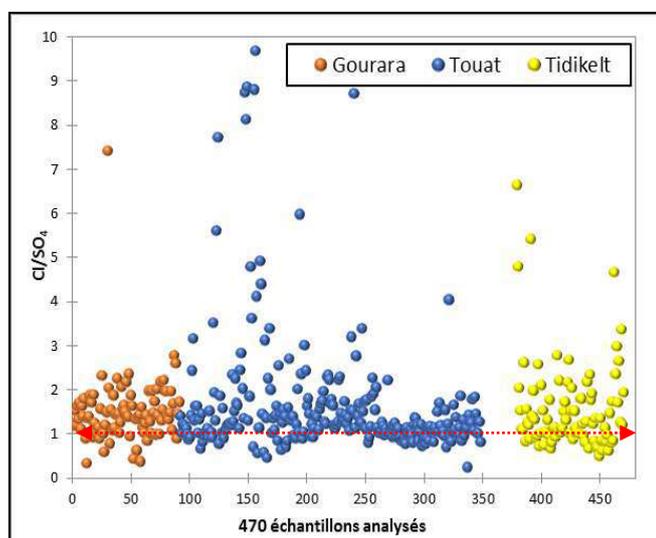


Fig. n° 86 : Rapport entre Chlorures et Sulfates des 470 échantillons.

En général ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le Cl^- provient de la dissolution de l'halite alors que le SO_4^{2-} a une origine gypsifère. Et pour mettre en évidence la répartition spatiale de ce rapport le long de l'aire de l'étude, une carte a été élaborée (figure n° 86).

D'après la carte, on constate une dominance des amplitudes de variations du rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) correspondent ainsi à des valeurs supérieures à 1 d'où une nette dominance d'ions Cl^- par rapport aux ions SO_4^{2-} . Ce qui explique que le faciès chloruré comparé à celui sulfaté occupe une grande partie de l'aire de l'étude.

Des valeurs remarquables ont été enregistrées (plus de 13) au Nord de Timimoune, au Sud d'Adrar et à l'extrême Ouest d'In Salah. Quant au faciès sulfaté dont les valeurs oscillent entre (0,25 et 1), se localise à l'Est de la zone du Touat, au Sud de Reggane et d'Aoulef ainsi qu'au Sud-Ouest d'In Salah.

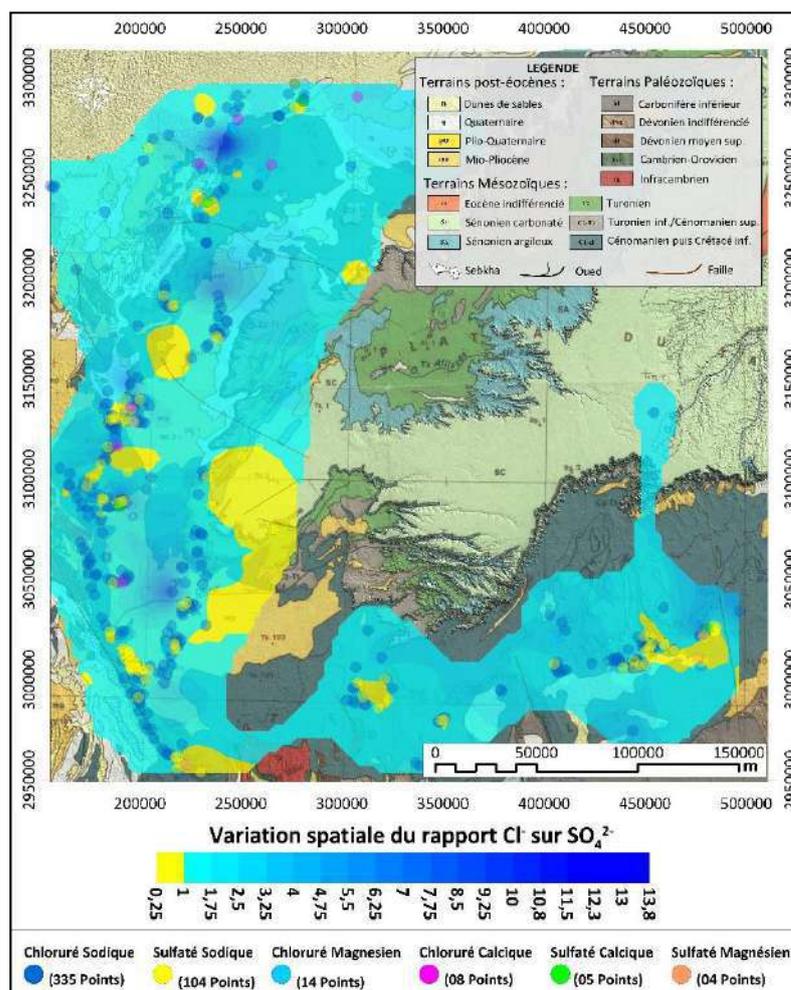


Fig. n° 87 : Répartition spatiale du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ des 470 échantillons.

b) Rapport $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$.

Pour les cations, ce sont le Na^+ et le Mg^{2+} qui présentent une dominance assez nette par rapport au Ca^{2+} . Le graphique (figure n° 88) indique que la majorité des points d'eau présente un rapport ($\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$) supérieur à 1 (plus de 95% des échantillons), ceci indique une dominance des ions Na^+ par rapport à Mg^{2+} , ce qui confirme la dominance du faciès sodique. Pour les points d'eau qui présentent des valeurs inférieures à 1, indique la présence du faciès magnésien mais qui reste insignifiant.

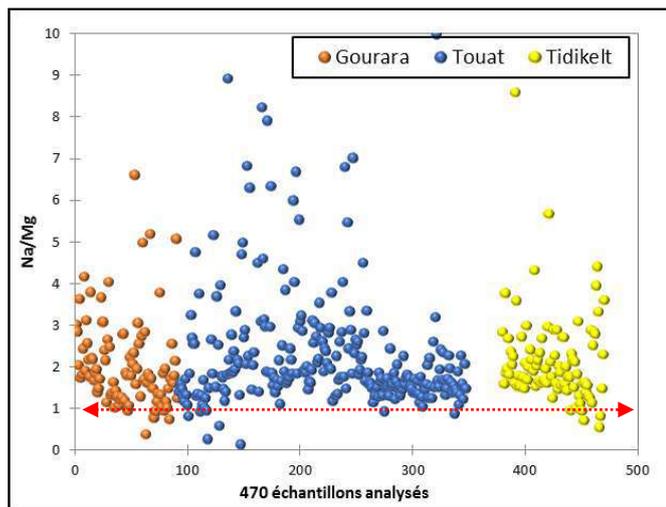


Fig. n° 88 : Rapport entre Sodium et Magnésium des 470 échantillons.

La répartition spatiale du rapport ($\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$) illustrée sur la carte (figure n° 89) montre une dominance des amplitudes de variations de ce rapport pour des valeurs supérieures à 1 d'où la prédominance d'ions Na^+ par rapport aux ions Mg^{2+} . Ce qui explique que le faciès sodique occupe une grande partie par rapport à celui magnésien.

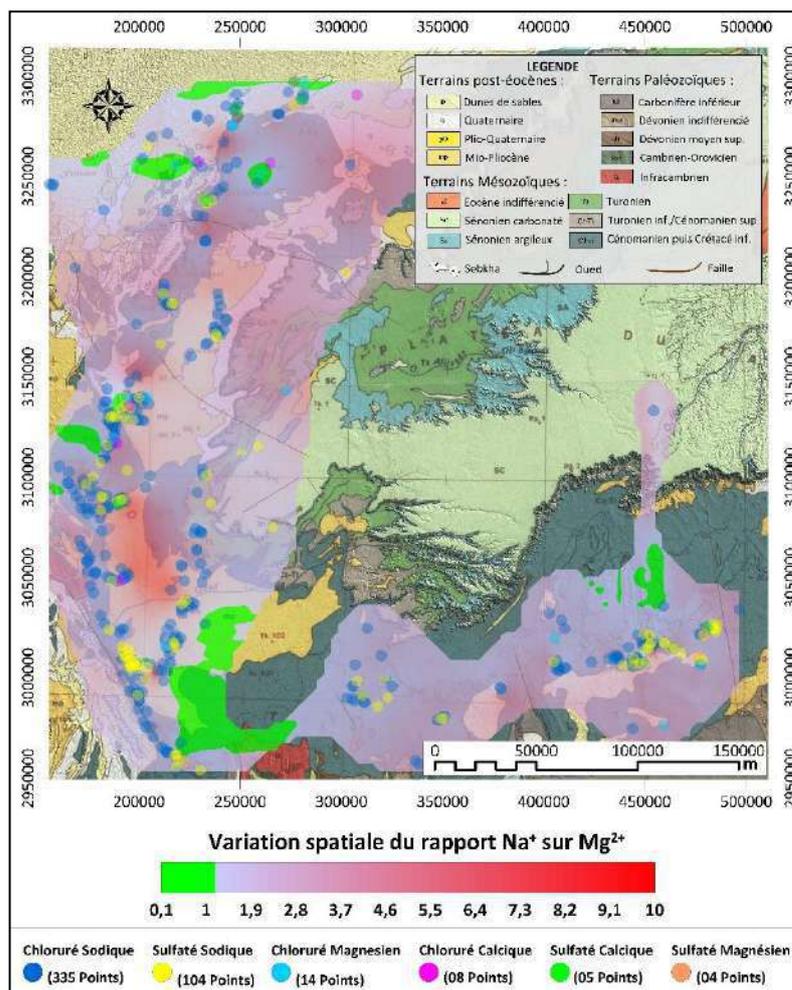


Fig. n° 89 : Répartition spatiale du rapport $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ des 470 échantillons.

c) Diagramme Mg^{2+} versus SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

D'après le graphique (figure n° 90) qui met en évidence la relation entre le sulfate et le magnésium des 470 échantillons traités, montre une évolution proportionnelle de ces 2 paramètres. Cette relation qui confirme l'existence du faciès sulfaté magnésien caractérisant les eaux du CI (enregistré au nord d'Adrar à Touat et à In Salah au Tidikelt), traduit la dissolution d'un sulfate de magnésium d'origine salifère. Ceci confirme également que l'origine de ces sulfates ne peut provenir que de la dissolution du gypse.

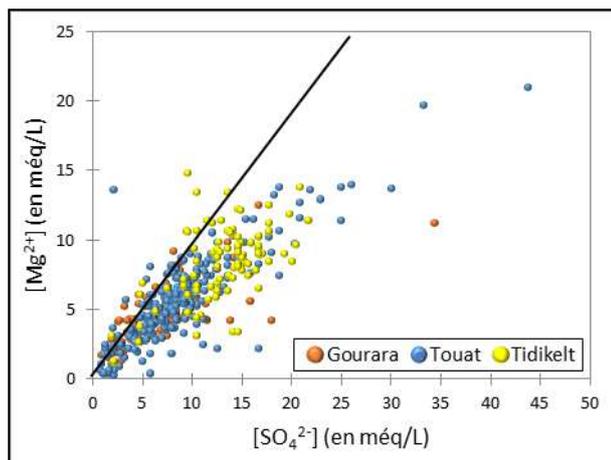


Fig. n° 90 : Diagramme mettant en relation le Mg^{2+} et le SO_4^{2-} .

Au faite, le positionnement de tous les points analytiques au-dessous de la droite de mise en solution du sulfate de magnésium ($MgSO_4$) ne peut-être expliqué que par « un déficit » en Mg^{2+} », qui est due soit à une précipitation secondaire de la calcite, soit à une précipitation de la dolomite soit à un échange de base entre (Ca^{2+}/Na^+) contre (Mg^{2+}/Na^+) sur les minéraux argileux.

Le graphique de la (figure n° 91) montrent une prédominance du Mg^{2+} par rapport au Ca^{2+} qui est dû probablement à la l'altération des minéraux argileux du toit de la nappe du Cénomaniens, indique que les argiles qui caractérisent la formation aquifère sont riches en magnésium.

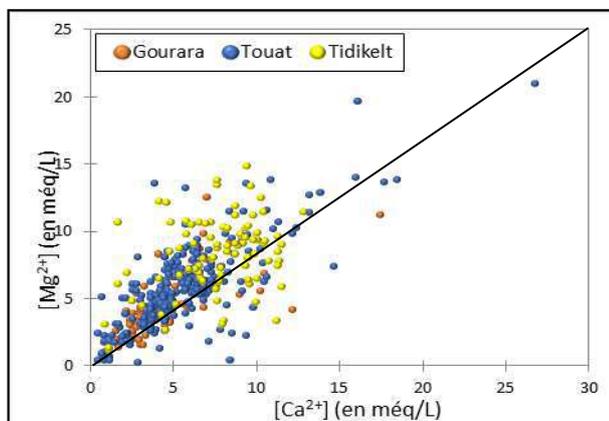


Fig. n° 91 : Diagramme mettant en relation le Mg^{2+} et le Ca^{2+} .

Les valeurs du rapport (Mg^{2+}/Ca^{2+}) reportés sur la carte ci-dessous (figure n° 92) montrent que les fortes teneurs du rapport coïncident avec les endroits où l'écoulement des eaux de la nappe est rapide cependant le contraire pour les faibles valeurs de ce rapport.

Ce qui explique que la répartition spatiale de ce rapport qui dépend du phénomène d'interaction eau – roche, a une relation avec le temps de séjour qu'effectue l'eau au cours de son parcours.

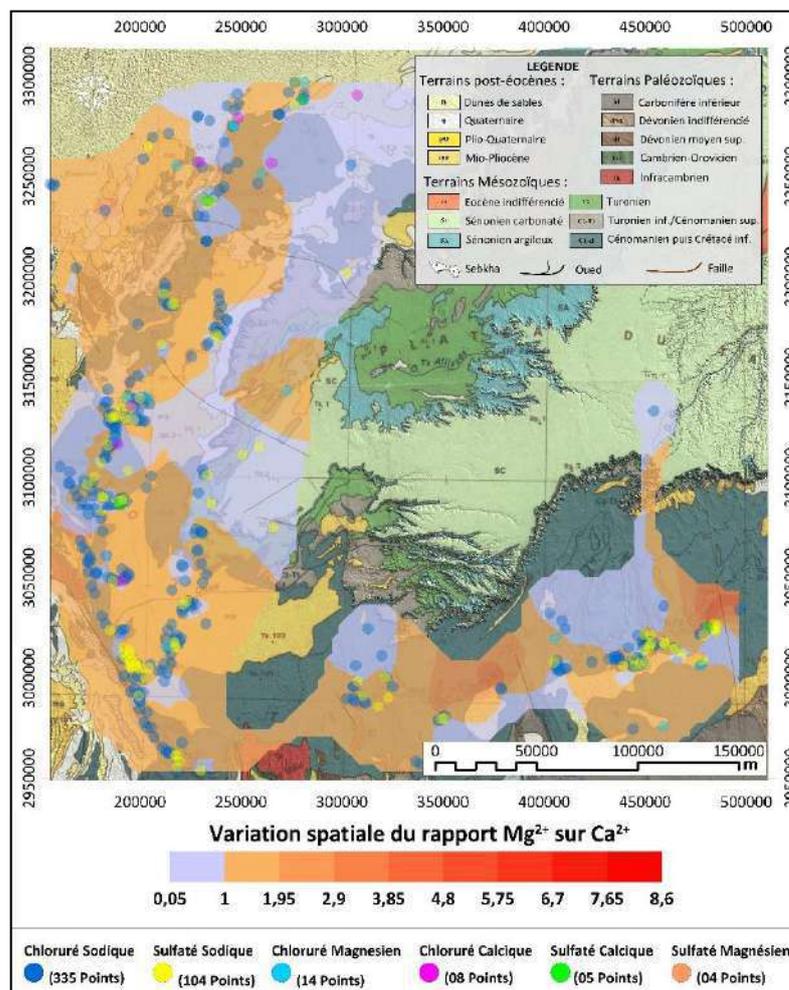


Fig. n° 92 : Répartition spatiale du rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} des 470 échantillons.

d) Diagramme Ca^{2+} versus SO_4^{2-} .

Généralement l'existence d'ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans les eaux souterraines résulte principalement de la dissolution du gypse.

Avec un bon coefficient de corrélation de l'ordre de ($r = 0,7161$), la représentation graphique entre ces 2 paramètres (figure n° 93), montre que l'ensemble des 470 points échantillonnés sont proches de la ligne 1 :1, indiquant ainsi que le Ca^{2+} est d'origine beaucoup plus évaporitique (gypseuse) et ce, suite à la dissolution des gypses présente dans la matrice aquifère.

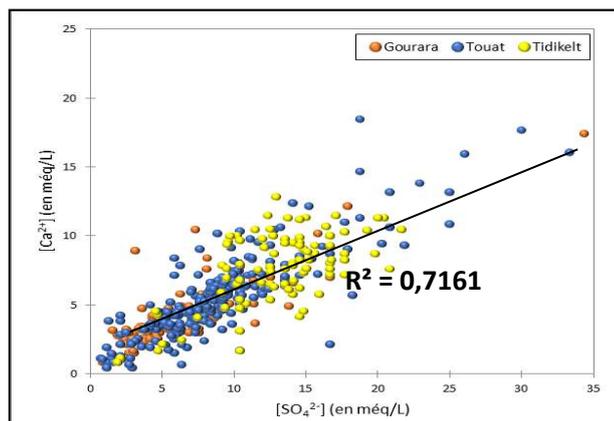


Fig. n° 93 : Diagramme mettant en relation le Ca^{2+} et le SO_4^{2-}

Il faut mentionner également que dans les eaux souterraines, la dissolution de l'anorthite peut également contribuer aux ions Ca^{2+} où la dissolution de l'anorthite produit de la kaolinite plus Ca^{2+} (Herczeg 2001) :

e) Diagramme Ca^{2+} versus HCO_3^- .

Le graphique (figure n° 94) du couple $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ montre qu'il n'y a pas de relation entre ces 2 paramètres, d'après la droite de tendance montre que le coefficient de corrélation qui est de ($r = 0,1491$) n'est pas significatif. Cela confirme que la source de Ca^{2+} ne peut être la calcite.

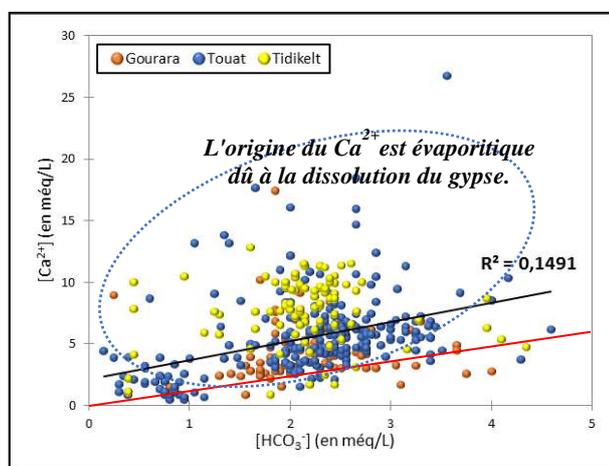


Fig. n° 94 : Diagramme mettant en relation le Ca^{2+} et le HCO_3^-

En général le Ca^{2+} provient de 2 origines soit carbonaté (calcite, dolomite ou aragonite), soit évaporitique (halite, gypse ou anhydritique).

Du même graphique il s'avère que tous les points se positionnent au-dessus de la droite de pente 1, ce qui explique que l'origine du Ca^{2+} est évaporitique et non pas carbonaté dû sûrement à la dissolution du gypse et précipitation de la calcite suite à l'adsorption du Ca^{2+} par les argiles.

f) Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ des 470 échantillons.

En général ce rapport nous informe sur le phénomène de dolomitisation, pour des valeurs du rapport supérieur à 1, le phénomène d'interaction eau-formation est favorisé par l'effet de dolomitisation comme le cas de notre étude, par contre si ce rapport est inférieur à 1 on parle d'un domaine calcique. Comme le montre le graphique (figure n° 95), où des valeurs élevées du rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) ont été enregistrées, ceci ne peut être dû que suite à un excès de Ca^{2+} sous l'effet de la dissolution du gypse selon l'équation suivante :

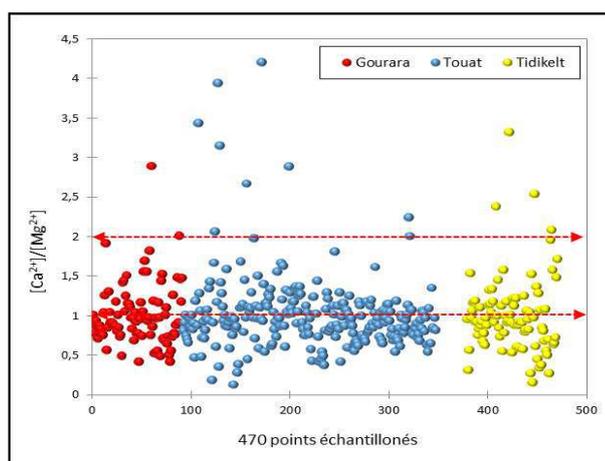


Fig. n° 95 : Diagramme du rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$).

Ce graphique qui explicite le phénomène de dissolution de la calcite et de la dolomite, indique que pour les échantillons présentant des valeurs du rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) inférieures à 1 il s'agit d'une dissolution de la dolomite, tandis que pour des valeurs comprises entre 1 et 2 on parle de dissolution de la calcite.

Finalement lorsque les valeurs de ce rapport sont supérieures à 2, il s'agit d'une dissolution des minéraux silicatés. On a déduit des résultats obtenus du rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) des 470 échantillons prélevés :

- 276 valeurs comprises entre 0 et 1 (soit 59% de la totalité).
- 177 valeurs entre 1 et 2 (soit 37%).
- 17 valeurs supérieures à 2 (avec 04%).

D'après ces résultats, on constate une prédominance du domaine de dissolution de la dolomite. Mais ce qui est important dans ce graphique c'est le domaine de dissolution des minéraux silicatés qui marque sa présence et leurs participations dans le chimisme des eaux de la zone d'étude.

Ces résultats reportés sur carte (figure n° 96) nous montrent la localisation des endroits dominés par le phénomène de dissolution des dolomites. Où il couvre une grande partie de l'aire de l'étude.

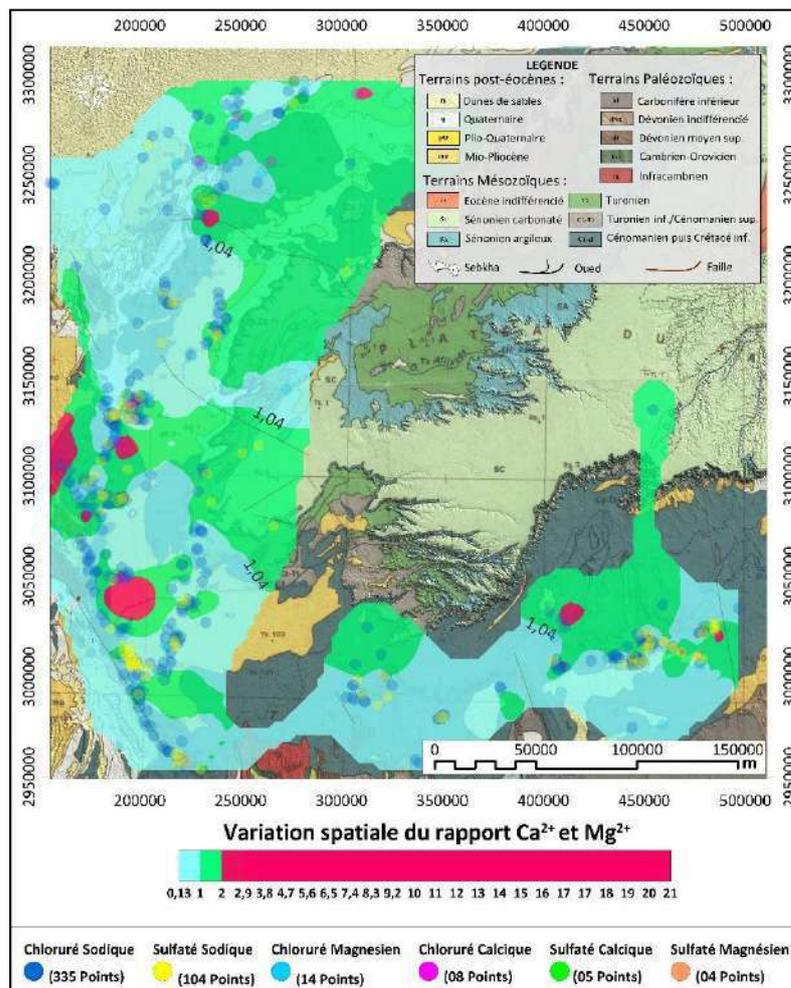


Fig. n° 96 : Répartition spatiale du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ des 470 échantillons.

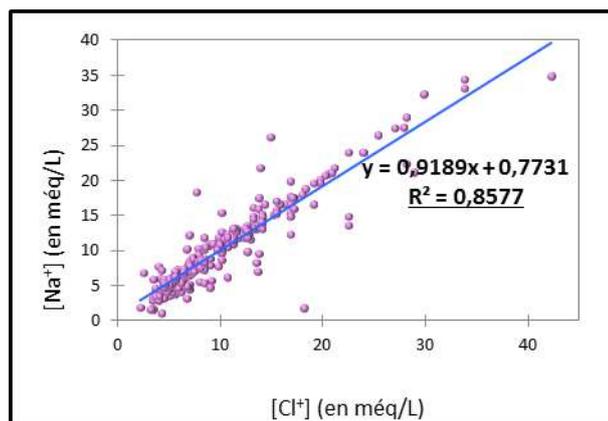
g) Diagrammes Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} .

Les chlorures comme le sodium, sont 2 éléments qui caractérisent les eaux naturelles, leur origine peut être naturelle (géologique) ou anthropique. Généralement leur présence dans l'eau résulte du phénomène de dissolution de l'halite caractéristique des dépôts des formations du secondaire (grès, calcaires et marnes).

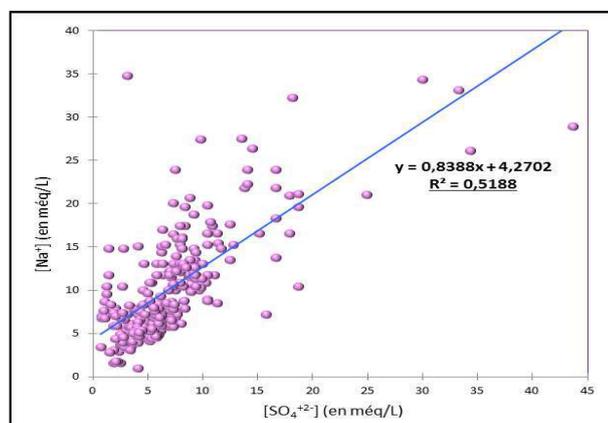
Et pour mieux cerner leur origine, un graphique a été établi mettant en évidence le Na^+ en fonction du Cl^- .

Avec un bon coefficient de corrélation de ($r = 0,8577$), le graphique (figure n° 97) indique l'existence d'une relation entre le Na^+ et le Cl^- .

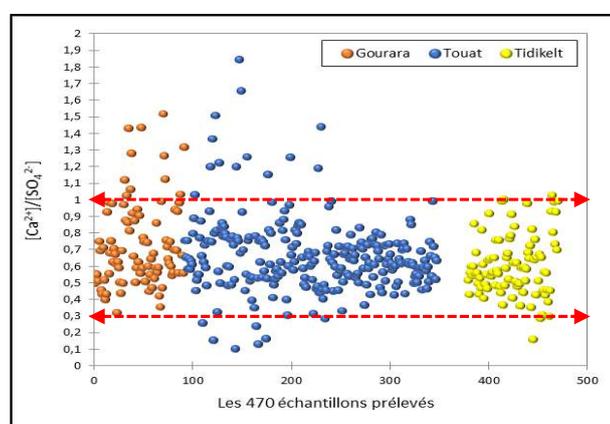
Du même graphique, on constate que les fortes teneurs en Na^+ qui ont accompagné celles élevées du Cl^- peuvent être attribuées à la dissolution de l'halite contenue dans les marnes et les évaporites qui caractérisent la matrice aquifère, on constate également que certaines données analytiques s'éloignent de la droite de pente 1, ce qui indique qu'une partie du Na^+ dérive sa source à partir d'autres processus.

Fig. n° 97 : Diagramme du couple Na^+ et Cl^-

Le graphique suivant (figure n° 98), montre une corrélation positive de ($r = 0,5188$) entre le Na^+ et le SO_4^{2-} ce qui indique que l'excès de sodium dans ces échantillons provient probablement de la dissolution des sulfates de sodium ainsi qu'à l'effet des échanges de bases.

Fig. n° 98 : Diagramme du couple Na^+ et SO_4^{2-}

Il ne faut pas négliger que la dissolution des silicates (présence d'ion SiO_2) avec des valeurs considérables peut être une source probable de Na^+ dans les eaux souterraines de la zone étudiée. Le graphique de (la figure n° 99) qui met en évidence le lessivage des sulfates, illustre le mode de dissolution du gypse. Il ressort 3 groupes distincts.

Fig. n° 99 : Diagramme du rapport $\text{Ca}^+/\text{SO}_4^{2-}$

- 1^{er} groupe : qui correspond aux échantillons dont les valeurs du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ sont inférieures à 0,3 (ceux ayant des concentrations en calcium et sulfates les plus faibles).
- 2^{ème} groupe : dont les valeurs du rapport sont comprises entre 0,3 et 1 correspondaient aux échantillons ayant des concentrations élevées en sulfates et en magnésium. Il s'agissait des eaux issues de la dissolution du gypse mélangée à des eaux faiblement minéralisées.
- 3^{ème} groupe : avec des valeurs du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ supérieur à 1, indiquant que l'origine des sulfates est différente de la dissolution du gypse.

h) Diagramme Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} avec Na^+ , K^+ , Cl^- .

Pour tester la possibilité que l'échange de cations qui affecte la composition chimique des eaux souterraines soit significatif, il a été procédé à tracer un diagramme mettant en évidence la fonction entre 2 processus distincts :

- 1^{er} processus associant les paramètres suivants : $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ qui représente la quantité de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ gagnée ou perdue par rapport à celle fournie par la dissolution du gypse, calcite et dolomite.
- 2^{èm} processus rassemblant le $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ \text{ et } \text{Cl}^-)$ et qui correspond à la quantité de $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ gagnée ou perdue par rapport à celui fourni par la dissolution de l'halite. (MACLEAN et al. 2000), pour que le processus de contrôle soit significatif, il faut que toutes les données devraient être tracées près de l'origine et que la relation entre eux doit être linéaire avec une pente de -1.

La (figure n° 100) indique une augmentation du $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ liée à une diminution de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ou à une augmentation du $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$. Comme prévu tous les points sont près d'une ligne droite ($r = 1$) avec une pente de -1, indique clairement l'existence d'un échange de cations qui est également responsable de l'échange d'ions ayant entraîné l'augmentation d'ions Na^+ . En plus, l'enrichissement des eaux souterraines en Ca^{2+} au détriment du Na^+ dans les eaux sous l'effet des phénomènes d'échanges de bases peut créer des conditions favorables pour les précipitations de la calcite.

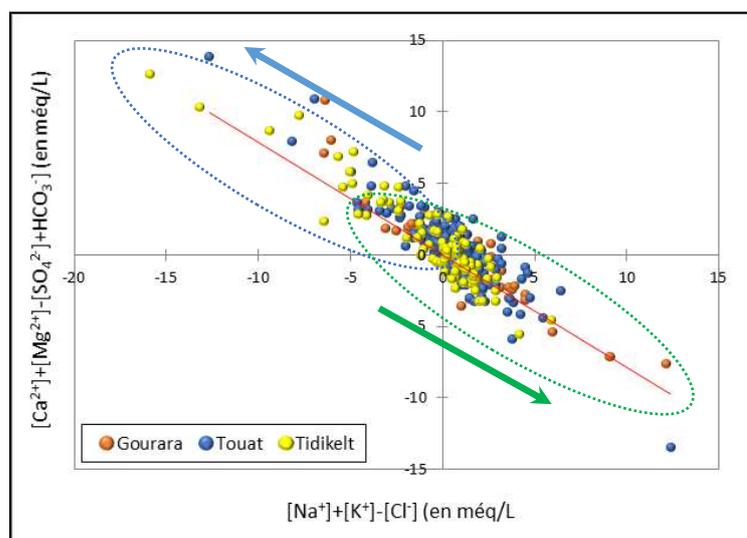


Fig. n° 100: Diagramme $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ avec $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$.

i) Phénomène d'échange de base entre ions⁻.

En général dans les eaux naturelles les teneurs en chlorures présentent des valeurs importantes comparativement à celle du sodium et ce, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique, il ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile. Dans le cas des eaux Albiennes les valeurs des concentrations en Na^+ et Cl^- sont élevées et ce à cause des forts apports salifères influencées par les formations argileuses et marneuses. Il est à noter qu'au cours de leurs trajets souterrains, les eaux Albiennes entrent en contact avec les différentes formations géologiques qui caractérisent la zone d'étude et qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les eaux.

Comme l'indique les diagrammes ci-après (figure n° 101), on constate un excès en Na^+ qui s'accompagne par un déficit en Ca^{2+} et Mg^{2+} ce qui témoigne la responsabilité de l'échange de base au cours de l'augmentation des teneurs en Na^+ .

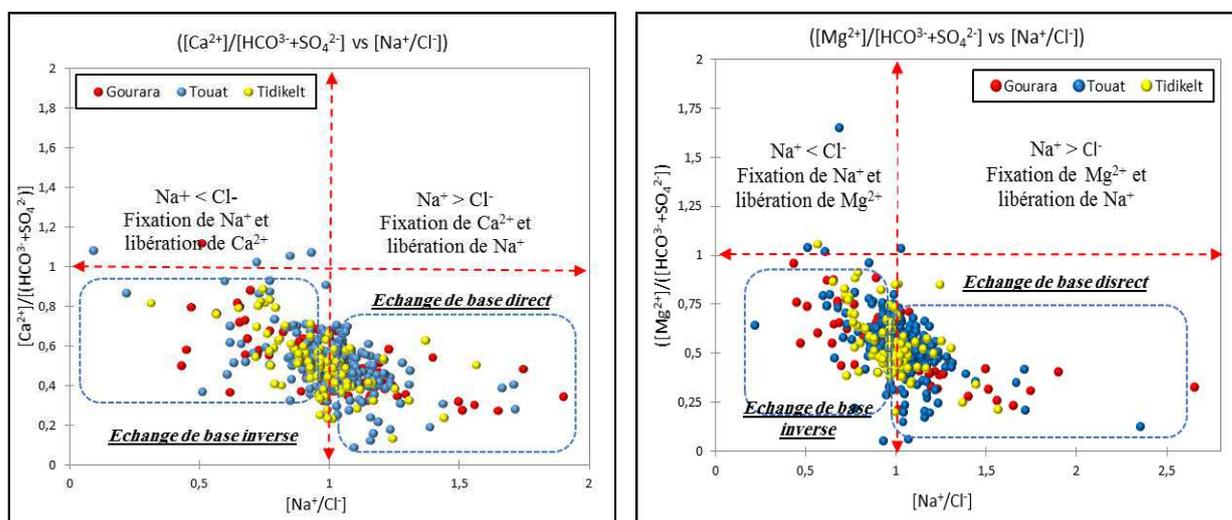


Fig. n° 101 : Diagramme mettant en évidence le phénomène d'échange de base.

Plus un enrichissement en (Na + K) (Alcalin) est accompagné d'un appauvrissement en alcalino-terreux (Ca + Mg). Ce qui révèle un échange ionique entre les argiles de la formation encaissante et l'eau de la nappe.

VIII.1.8.2. L'Indice d'échange de Base (I.E.B).

L'indice d'échange de base (I.E.B.) communément appelé Indice Chloro-Alcalin (C.A.I) défini par H. SCHOELLER en 1962, est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Il est formé par l'expression suivante (12):

$$\text{I.E.B.} = r \frac{\text{Cl} - (\text{Na} + \text{K})}{\text{Cl}} \quad (12)$$

Il permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre (ou de déséquilibre) vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés de la roche-réservoir (MALIKI, 1993). Cet indice définit le sens d'échange ioniques entre l'eau et les terrains encaissants. Toute fois D'après Schoeler, 1934 :

- L'I.E.B. = 0 \longrightarrow Pas d'échange entre ions (ou équilibre).
- L'I.E.B. > 0 \longrightarrow Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés par Na^+ et K^+ de la roche.
- L'I.E.B. < 0 \longrightarrow Na^+ et K^+ de la roche sont échangés par Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau.

Comme l'indique la carte d'Iso-IEB (figure n° 102), les valeurs d'I.E.B. calculés ensuite reportés sur carte sont pour la plupart inférieures à 0. Sur les 470 échantillons analysés, 329 présentent un IEP négatif variant entre (-0,02 et -1,77) soit 70% de la totalité, ceci traduit des échanges ioniques entre le sodium et le potassium de l'eau avec le calcium et le magnésium des formations encaissantes. Egalement 109 points admettent un I.E.B. supérieur à 0 qui correspondent à 23% de l'ensemble des points avec des valeurs qui varient entre (0,02 et 0,7), indiquent que les eaux souterraines de la nappe étudiée échangent les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} contre les ions Na^+ et K^+ de la formation encaissante, justifie le fait que les alcalins de l'eau sont échangés par substitution par les alcalino-terreux des terrains traversés.

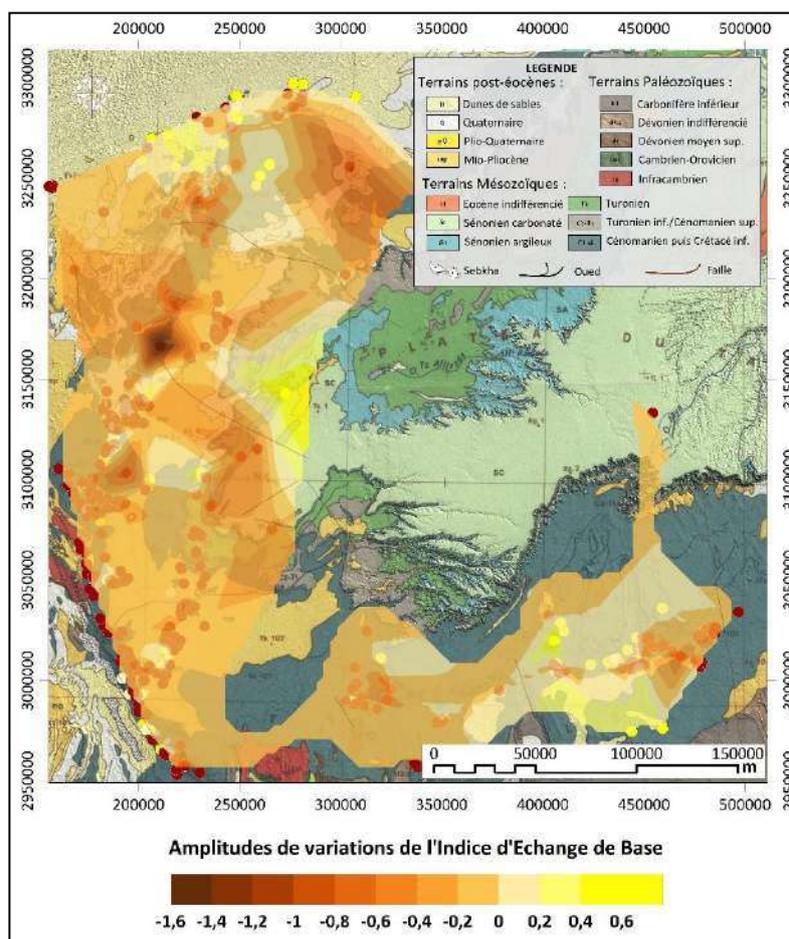


Fig. n° 102 : Carte d'I.E.B. des 470 échantillonnées eaux prélevés.

Pour les points dont l'IEB est nul (pas d'échange ionique), on compte 32 échantillons soit 7% de la totalité et se situent au niveau du Tidikelt et au nord de la zone de Touat (au Sud de Timimoune). Ces échantillons expliquent le processus d'interaction eau – roche.

VIII.1.8.3. Processus d'acquisitions du chimisme.

Et en vue de mieux caractériser le processus géochimie de l'eau échantillonnée, il a été décidé de combiner entre certains diagrammes souvent utilisés dans ce type de projet de recherche, à savoir celui de GIBBS (1970) et de KORJINSKY (1937).

a) Diagramme d'équilibre des eaux vis-à-vis des aluminosilicates.

Afin de représenter l'état d'équilibre des eaux vis-à-vis des aluminosilicates notamment de l'Albite – Kaolinite – Gibbsite, ...etc., il a été décidé d'utiliser le diagramme de KORJINSKI, ce dernier nous a permis de situer les eaux de la zone d'étude en fonction de leurs teneurs en SiO_2 , Na, Mg, Ca, K et pH. La silice dans la nature se trouve sous forme SiO_2 , d'origine essentiellement naturelle, liée aux formations silicatées (sables et grès qui représentent 27 % de l'écorce terrestre) ainsi que les silicates en provenance de roches métamorphiques et magmatiques. Elle se dissout dans l'eau sous forme de $\text{Si}(\text{OH})_4$ ou acide ortho-silicique H_4SiO_4 qui s'ionise en deux phases : H_3SiO_4^- et $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, la limite de solubilité de l'acide silicique (acide faible) formé est de 0,140 g/L et que cette solubilité augmente très fortement avec la température et la pression.

La prédominance de la fraction argileuse et sableuse dans les formations de l'aquifère étudiée ainsi que l'aridité du climat de la région d'étude favorisant la dissolution de la silice dans l'eau.

$\log(\text{Na}) + 2 \text{pH}$ Vs $\log(\text{H}_4\text{SiO}_4)$

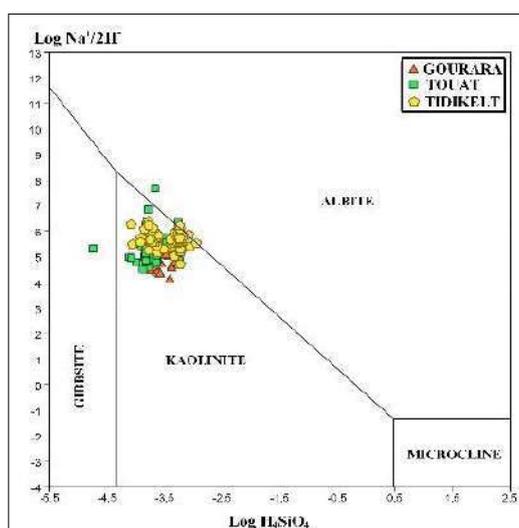


Fig. n°103 : Diagramme vis à vis des minéraux silicatés sodiques.

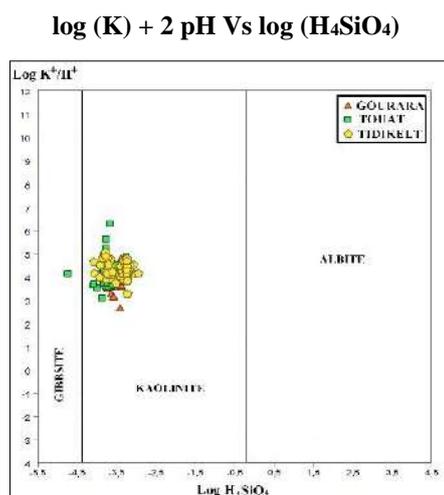


Fig. n°104 : Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés.

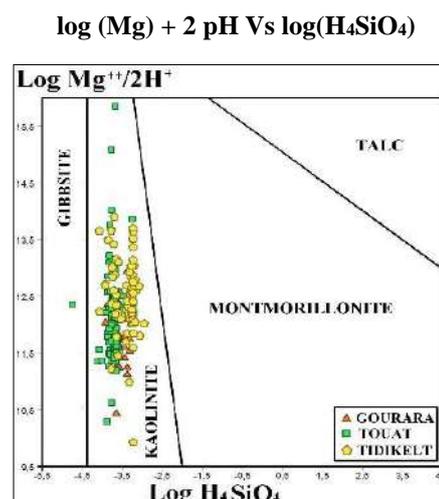


Fig. n°105 : Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés magnésiens.

C'est avec le diagramme de KORJINSKY (1937) que nous avons testé la stabilité pour être ensuite reproduits sur les (figures n° 103, 1045 et 105).

Les diagrammes d'équilibres obtenus expliquent que le phénomène d'hydrolyse des minéraux enrichirait les solutions en silice dissoute en rapprochant les solutions d'équilibre avec ces minéraux tout en restant dans le domaine de stabilité de la kaolinite. Cependant pour les eaux bicarbonatées, 13 échantillons : (L004-00001, X001-7, M004-00293, M004-00292, L005-00023, M004-00286, M004-00380, N004-00517, X001-44, P006-00014, X001-45, X001-49 et X001-64) sont dans le domaine de la stabilité de la kaolinite.

b) Diagramme de GIBBS.

En général, pour déterminer la composition chimique des eaux souterraines, plusieurs mécanismes peuvent être utilisés. D'après (PACHECO 1996), 2 critères rentrent dans le contrôle chimique partielle de l'eau souterraine, et sont la composition minéralogique de la roche encaissante et les conditions météorologiques. D'autres facteurs, notamment le temps de séjour, les interactions entre l'eau et les roches, l'évaporation et les précipitations, peuvent également jouer un rôle important dans le changement de la qualité de l'eau (XING et al, 2013). Pour cette raison, il a été jugé utile d'utiliser un diagramme qui tient compte de tous ces critères, c'est celui de Gibbs (GIBBS 1970). Il montre trois champs distincts : la dominance des précipitations, la dominance de la roche et celle de l'évaporation (LIU et al. 2015).

Le diagramme de Gibbs a longtemps été utilisé, pour caractériser les processus géochimiques à la base de la minéralisation d'une eau souterraine (NASEEM et al, 2010 ; RAVIKUMAR & SOMASHEKAR, 2011, MARGHADE et al. 2012 ; MERLIN et al. 2017, XING et al. 2013 ; AKOACHERE et al. 2018). L'application de ce diagramme, initialement était conçue pour les eaux de surfaces, car il présente d'une manière plus ou moins complète les processus géochimiques contrôlant la minéralisation des eaux souterraines.

La région d'étude reconnue par son climat hyper aride et un pouvoir évaporant assez important et d'une nappe dont son niveau hydrostatique est assez proche de la surface du sol

aussi caractérisée par un temps de séjour plus long des eaux souterraines, toutes ces conditions peuvent également contribuer à influencer sur les processus chimiques de l'eau. GIBBS (1970) trace des diagrammes indiquant l'interaction eau-rocher comme principal processus de régulation de l'interaction entre l'eau et la roche.

Il propose pour cela 2 diagrammes mettant le résidu sec (TDS en mg/L) en fonction du rapport pondéral de $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ pour les cations et $(Cl^-) / (Cl^- + HCO_3^-)$ pour les anions. Ces diagrammes pourraient fournir des informations sur l'activité des principaux mécanismes naturels ainsi que le contrôle du chimisme de l'eau souterraine, et mettre en évidence les échanges de bases et l'évaporation des eaux de la nappe jadis jaillissantes

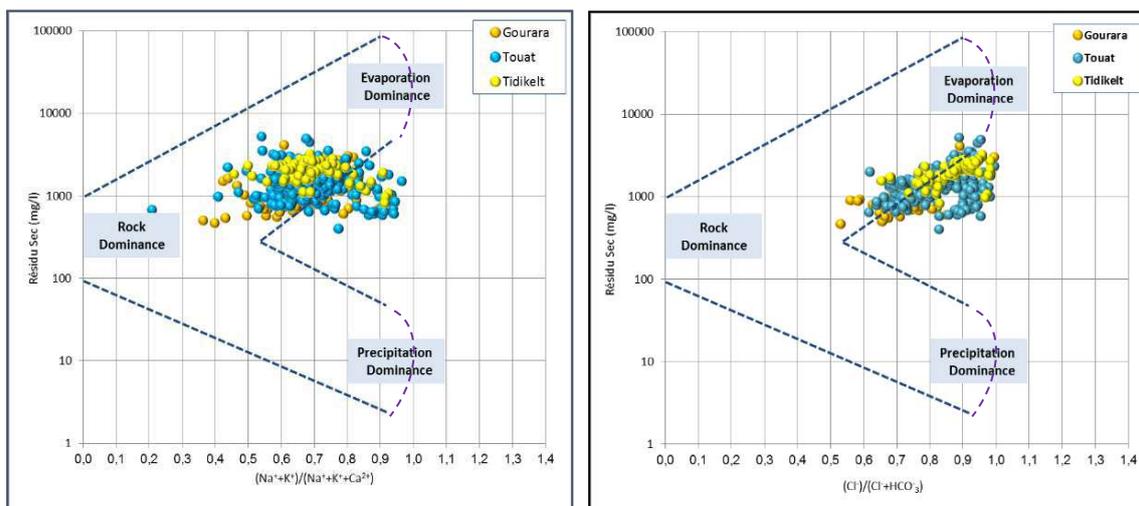


Fig. n° 106 : Diagramme de Gibbs indiquant le mécanisme qui intervient le plus dans le contrôle chimique de l'eau souterraine.

Sur le diagramme de Gibbs (figure n° 106), nous constatons l'influence de la lithologie sur la concentration des anions et cations par dissolution et évaporation eaux souterraines de la zone d'étude. En effet, la majorité des échantillons des 3 localités sont localisées dans le domaine d'altération de la roche réservoir avec une influence majeure des chlorures, et par conséquent l'influence de la matrice évaporitique (NaCl) qui confère à l'eau le faciès chloruré sodique (dominant). Toutefois, l'abondance des alcalins (Na et K) dans les eaux générées par les argiles (échanges de bases) du toit (Cénomaniens) au dépend des carbonates, met en évidence l'influence de la matrice silicatée, présente également par les schistes du mur des terrains primaires (Dévonien) où le rapport Cl vs $(Cl + HCO_3)$ commence à augmenter à partir de la valeur 0,5 et devient plus prononcé au-delà de cette valeur tout en dépassant 0,9 ce qui montre que les bicarbonates continuent à diminuer pour participer à la précipitation des carbonates, et par conséquent les activités des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} vont diminuer automatiquement car ils vont subir un contrôle sévère non seulement par les carbonates mais aussi par les sulfates (gypse). Il faut noter également que le déficit de ces 2 cations est attribué aux échanges de bases, d'où l'influence de la matrice silicatée sur la minéralisation des eaux de la nappe.

VIII.2. ETUDE DE L'INDICE DE QUALITE DES EAUX (I.Q.E.S.).

VIII.2.1. Définition et principe de l'I.Q.E.S.

L'I.Q.E.S. (ou G.W.Q.I) abréviation du mot indice de qualité des eaux souterraines, est un outil pratique qui permet de faire la synthèse de données complexes sur la qualité de l'eau. L'I.Q.E.S. est le résultat d'une équation mathématique utilisée pour transformer un grand nombre de données sur la qualité de l'eau en un numéro unique (STAMBUK et GILJANOVIC, 1999) Son principe consiste à transformer les données complexes sur la qualité de l'eau en informations cartographiques facilement compréhensibles et utilisables.

Tout a d'abord, on doit exposer les paramètres physicochimiques qui caractérisent notre eau ainsi que les normes de potabilités admises par le ministère de la santé pour la spécification de l'eau à la potabilité. En suite un paramètre doit être sélectionné en fonction de son impact sur la qualité globale des effets de l'eau et de la santé, pour le cas de notre étude nous avons choisis l'élément Nitrate (NO₃), puisque sa concentration dans l'eau de la zone d'étude enregistre des valeurs très importantes et qui dépassent énormément les normes admises de potabilité. Et Pour le calcul de l'I.Q.E.S., il faut suivre par ordre les trois étapes suivantes :

- Première étape : affecté un poids (wi) aux paramètres chimiques de l'eau choisis tels que pH, résidu sec, conductivité, cations et anions et ce en fonction de leur importance relative dans la qualité globale de l'eau à évaluer, ce poids varie entre 1 et 5. Un poids maximum de 5 a été attribué au paramètre nitrate en raison de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau puisque c'est un paramètre de pollution en plus il présente des valeurs excessives par rapport aux normes de potabilités.

- Deuxième étape, calcul d'un poids relatif (Wi) du paramètre chimique à l'aide de l'équation suivante :

$$Wi = wi / \sum_{i=1}^n wi \quad (10)$$

Avec Wi est le poids relatif, (wi) est le poids de chaque paramètre et « n » le nombre de paramètres.

- Troisième étape, attribuer une échelle d'évaluation de la qualité (qi) à chaque paramètre, selon la formule suivante :

$$qi = (Ci / Si) \times 100 \quad (11)$$

Où qi est l'indice de qualité, Ci est la concentration de chaque paramètre chimique de chaque échantillon d'eau exprimée (en mg/L), et Si la valeur de référence c'est-à-dire la limite souhaitable indiquée dans les normes algériennes de potabilités (voir journal officiel n° 28 – 2011). Et où le résultat sera multiplié par 100.

Pour le calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau Souterraine (I.Q.E.S), il faut tout d'abord déterminer le S*i* qui est le sous-indice de chaque paramètre chimique, et ce selon la formule suivante :

$$Sli = Wi \times qi \quad (12)$$

- Où
- **Sli** : Le sous-indice du paramètre i.
 - **Wi** : Le poids relatif du paramètre i
 - **qi** : La valeur basée sur la concentration du nième paramètre.
 - **n** : Le nombre de paramètres.

$$WQI = \sum_{i=1}^n Sli \quad (13)$$

Où W.Q.I qui est la somme des valeurs du Sli, correspond à l'indice de qualité de l'eau pour chaque échantillon. Ensuite pour chaque échantillon d'eau on lui affect son Indice de Qualité. Puis sur la base de l'I.Q.E.S. calculé on regroupe les valeurs en cinq types de classes selon les fourchettes suivantes :

(Tab. n° 23) : Poids relatifs des paramètres physiques et physicochimiques.

Paramètres (mg/L)	Normes Algériennes	Poids du paramètre (wi)	Poids relatif (Wi)
Ca	200	2	0,0571
Mg	150	1	0,0286
Na	200	2	0,0571
K	20	2	0,0571
Cl	500	3	0,0857
SO ₄	400	4	0,1143
HCO ₃	300	3	0,0857
NO ₃	50	5	0,1429
Résidu sec	1500	5	0,1429
Conductivité	2800	4	0,1143
pH	8,5	4	0,1143
		$\sum (wi) = 35$	

(Tab. n° 24) : Classification qualitative des types d'eau selon l'I.Q.E.S.

Gammes I.Q.E.S	Type d'eau	Affectation de couleurs
< 50	Eau de qualité excellente	
50 – 100	Eau de bonne qualité	
100 – 200	Eau médiocre	
200 – 300	Eau mauvaise	
> 300	Eau impropre à la consommation	

VIII.2.2. Application de la méthode sur les eaux de la zone d'étude.

La base de données avec laquelle nous avons calculé l'I.Q.E.S. pour les eaux albiennes qui caractérisent la zone d'étude, est constituée de 435 échantillons soit (87 au Gourara, 267 au Touat et 82 au Tidikelt) avec 11 paramètres ayant fait l'objet de calculs des poids relatifs. Les résultats obtenus de l'I.Q.E.S. de chaque échantillon (voir annexe) ont été reportés sur SIG en vue de les cartographier et localiser ensuite par région les différentes classes de qualité de cette eau.

La carte de répartition spatiale de l'I.Q.E.S. (figure n° 107) a montré que la partie nord de la région d'étude (amont) où les valeurs de l'I.Q.E.S. sont inférieures à 50, est affectée par une eau de très bonne qualité (excellente), elle représente 5% de la surface totale de l'aire de l'étude (c'est dans cette zone où on exploite les eaux minérales de TAZLIZA). Les eaux dont la qualité est bonne avec un I.Q.E.S. qui varie entre 50 et 100, représentent 60% de la zone d'étude. Pour les eaux de qualité médiocre avec un I.Q.E.S. situé entre 100 et 200, correspondent à 34% du total. Elles se situent principalement au niveau des zones urbaines et les parties aval affectées par une surexploitation de la nappe. Quant aux eaux classées mauvaises et dont l'indice de qualité est supérieur à 200, leur répartition spatiale ne dépasse pas les 1%.

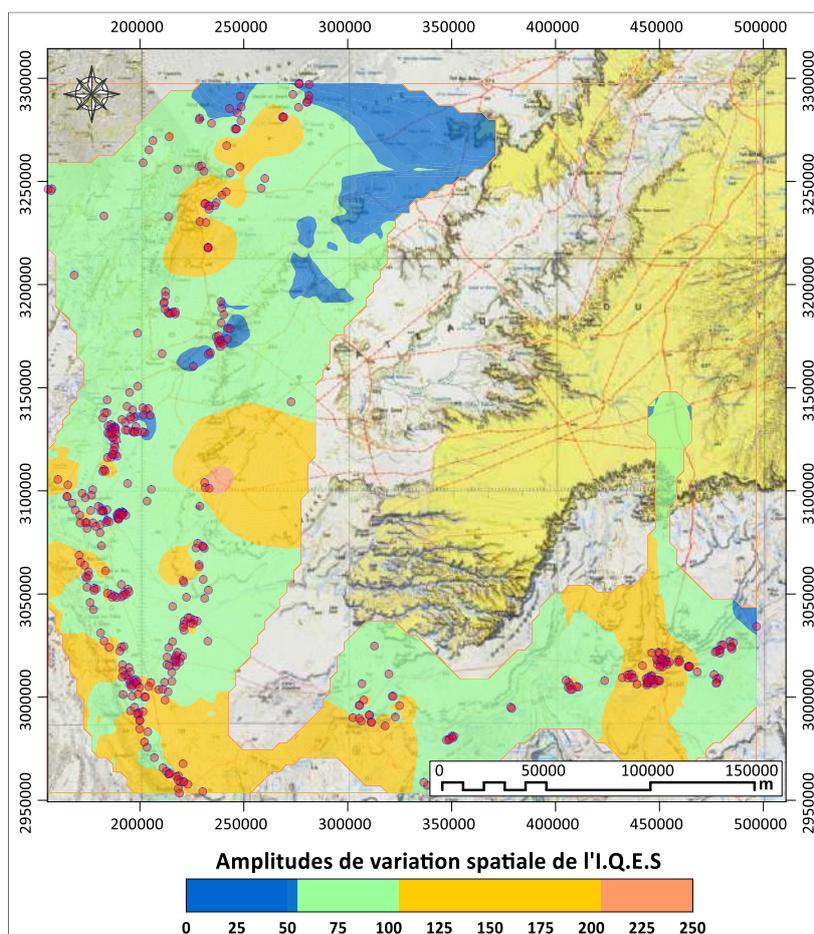


Fig. n° 107 : Répartition spatiale des I.Q. des eaux albiennes de la région.

CHAPITRE IX.

IX. APPROCHE STATISTIQUE.

Parmi les approches qui étudient et identifient les phénomènes responsables de l'origine de la minéralisation des eaux souterraines, on trouve la méthode statistique, où le traitement et l'interprétation des données sont effectués de manière simplifiée et dans un espace très restreint (LAGARDE, 1995 - AHOUSI et al, 2010).

La méthodologie optée pour la présente étude, est basée sur l'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode, permet donc de réunir puis de classer un nombre important de données pour en déduire les principaux facteurs qui sont à l'origine de cette évolution et définir en suite les relations qui les réunissent.

Dans le cas présent, l'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse multi-variée permettant l'étude simultanée d'un grand nombre de variables dont l'information totale ne peut pas être visualisée à cause d'un espace à plus de trois dimensions. Cette méthode permettrait de préciser les relations entre les variables et les phénomènes à l'origine de ces relations. L'objectif est d'avoir une information concentrée sur un minimum d'axe.

IX.1. Définitions.

Le but d'analyse en composantes principales (ACP) est de faire ressortir les différents points d'eau qui possèdent des mêmes caractéristiques et de voir l'évolution des concentrations en éléments chimiques par rapport à l'ensemble des points d'observations, et de déterminer les différentes liaisons entre plusieurs variables et de mettre en évidence les associations qu'y sont possibles, sous forme graphique et tableau, contenant le maximum d'informations.

Ce tableau pour notre cas est constitué, par des lignes correspondant aux « individus » sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » qui sont : (CE, pH, les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , et SO_4^{2-}) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières après l'élaboration de la matrice de corrélation, il s'ensuit une diagonalisation basée sur :

- Une matrice de « vecteurs propres » qui contient des combinaisons linéaires des (P = 09) variables initiales actives ;

- Une matrice de « valeurs propres », qui représente les variances des individus sur les axes principaux correspondants.

Pour un axe donné, les variables qui ont les plus forts coefficients (en valeurs absolues) sont celles qui contribuent le plus à la formation de cet axe. Une variable est d'autant mieux représentée sur le plan qu'elle est proche du cercle. Le choix du nombre de composantes est exprimé en fonction des « valeurs propres » ou « des pourcentages de variation expliqués par chaque composante principale ». Sur chaque plan factoriel retenu, on regarde :

- La structure des variables à partir de leurs corrélations avec les axes principaux, représentée par des « cercles de corrélation » en couleur bleu ».

- La répartition des individus, à partir de leurs coordonnées sur les axes principaux et d'indices.

IX.2. Méthodes de mesures.

Plusieurs logiciels sont conçus pour le traitement de ce type de données, dont l'objectif est de définir d'une part les mesures de ressemblances (similarités ou dissimilarités) et d'autre part déterminer les différentes méthodes pour le calcul des critères d'agrégations. Parmi eux citons XLSTAT 2016, logiciel avec lequel nous avons utilisé dans le cadre de cette étude.

IX.2.1. Application des statistiques descriptives.

Le tableau ci-après (Tableau n° 25) représente le calcul statistique descriptif des 470 échantillons (Répartis à travers les 3 régions constituant la zone d'étude « Gourara au Nord – Touat au centre – Tidikelt au Sud ») avec 9 variables représentés respectivement par le pH, la conductivité, les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-} (exprimées en g/L).

(Tab. n° 25) : Statistique descriptive des 470 échantillons caractérisant les paramètres Physico-chimiques des eaux albiennes.

Variables	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH
Minimum	9,00	3,00	22,00	4,00	3,00	35,00	80,00	585,00	5,56
Maximum	536,00	255,00	860,00	160,00	280,00	2100,00	1500,00	5800,00	9,22
Moyenne	114,21	74,33	275,67	27,49	132,03	446,38	433,34	2202,18	7,42
Ecart-type σ'	62,25	38,42	<u>135,41</u>	17,13	45,14	<u>257,71</u>	<u>227,93</u>	<u>841,95</u>	0,44
C.V (en %)	<u>54,51</u>	<u>51,69</u>	<u>49,12</u>	<u>62,30</u>	34,19	<u>57,73</u>	<u>52,60</u>	38,23	5,98

(C.V): Coefficient de variance

De la statistique descriptive, on peut en tirer 2 paramètres de dispersions (l'Ecart type et le Coefficient de variance). Ces 2 paramètres nous montrent la manière dont les observations fluctuent autour de la tendance centrale.

a) L'écart-type σ' : le plus utilisé des paramètres de dispersion, il est beaucoup plus représentatif dans ce type de cas. En effet elle ne prend en compte que les valeurs extrêmes.

b) Le coefficient de variation CV : qui correspond au rapport entre l'Ecart type et la moyenne, il représente une sorte d'écart-type relatif pour comparer les dispersions indépendamment des valeurs de la variable. Il s'exprime souvent en pourcentage.

Le coefficient de variation permet de comparer notamment la précision entre les différentes variables. Dans l'exemple suivant on admet comme variables (paramètres chimiques) que ceux présentant un C.V supérieur à 50%.

D'après le tableau N°01, on peut conclure que le Na⁺, le SO₄²⁻, le Cl⁻ et la conductivité électrique présentent les plus grandes valeurs relatives à l'écart type. Cependant ceux qui montrent de faibles dispersions sont le HCO₃⁻, le Ca²⁺ et le Mg²⁺. Concernant le Coefficient de variance, tous les paramètres peuvent être admis puisqu'ils présentent des valeurs supérieures à 50% mis à part le HCO₃⁻ où leur C.V = 34,19%.

IX.2.2. Calcul des coefficients de corrélations.

D'après (le Tableau n° 25), reliant le coefficient de corrélation des 9 variables avec le nombre d'échantillons, ce dernier est de l'ordre de 0,75 pour 470 échantillons. Le coefficient de corrélation met en évidence la liaison existante entre les 9 paramètres prises 2 à 2 sur la matrice de corrélation. L'examen de la matrice de corrélation des 470 échantillons traités (voir Tableau n° 26) montre que les coefficients de corrélations les plus significatifs sont ceux de la Conductivité électrique avec respectivement : les Chlorures (r = 0,90), les Sulfates (r = 0,87), le Sodium (r = 0,91), le Calcium (r = 0,83) et le Magnésium (r = 0,82).

Aussi une corrélation significative du Sodium avec les Chlorures (r = 0,91) ainsi que les Sulfates (r = 0,73), de même pour les Sulfates avec le Calcium et le Magnésium (soit r = 0,85 et 0,81) et le Sodium (r = 0,73). Par contre à un degré moindre pour les Bicarbonates avec l'ensemble des éléments (r < 0,30).

(Tab. n° 26) : Matrice de corrélation des variables de la zone d'étude (en rouge : les corrélations positives supérieurs à 0,75).

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	E.C	pH
Ca ²⁺	1,00								
Mg ²⁺	0,71	1,00							
Na ⁺	0,62	0,61	1,00						
K ⁺	0,39	0,49	0,55	1,00					
HCO ₃ ⁻	0,25	0,25	0,04	0,03	1,00				
SO ₄ ²⁻	0,85	0,81	0,73	0,42	0,18	1,00			
Cl ⁻	0,65	0,67	0,91	0,64	-0,01	0,61	1,00		
E.C	0,83	0,82	0,91	0,59	0,15	0,87	0,90	1,00	
pH	-0,32	-0,29	-0,12	-0,15	-0,29	-0,24	-0,15	-0,23	1,00

Il est à signaler également que le tableau ci-dessus illustre que les variables : Conductivité, Cl⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ et SO₄²⁻ sont fortement corrélés positivement. La variable chimique HCO₃²⁻, excepté sa corrélation liée aux équilibres calco-carbonique avec calcium, le pH, et le Mg, elle est loin d'être corrélée avec Cl, Na, K, SO₄, et CE.

IX.2.3. Analyse en Composante Principale (ACP).

En général pour élaborer une ACP, 3 étapes devront être évoquées : définir tout d'abord les valeurs propres des 9 variables dans le but de distinguer les facteurs principaux à maintenir.

En suite établir une corrélation entre les variables et les facteurs, et en fin mettre en évidence la contribution de chaque paramètre (exprimée en %).

Dans le cas présent, et dans but de définir les sources possibles de la variance des 470 données, (KAISSER, 1960) propose un critère sur lequel on détermine le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère seuls les facteurs ayant des valeurs propres supérieures ou égales à 1 seront retenus. Sur cette base 2 composantes (Facteurs) ont été maintenues où les résultats ont représenté une variance cumulée de l'ordre de 74,10% de la variance totale des 470 échantillons traités.

(Tab. n° 27) : Valeurs propres et variabilité des axes factoriels retenus pour l'ACP.

Facteurs	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valeur propre	5,331	1,34	0,75	0,67	0,43	0,28	0,18	0,01	0,01
Variabilité (%)	59,23	14,87	8,34	7,43	4,77	3,07	2,04	0,15	0,11
% Cumulé	59,23	74,10	82,44	89,87	94,64	97,71	99,75	99,89	100

Du (Tableau n° 27) on peut lire que la variance expliquée est de l'ordre de 74% pour les 2 axes retenus (F1 & F2) avec une variabilité de plus 55% pour l'axe F1.

Le (Tableau n° 28), mis en évidence la corrélation entre les variables et les axes factoriels, montre que le facteur F1 est déterminé positivement pour la conductivité électrique avec les paramètres suivants : (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} et Cl^-), mais avec des valeurs moindres pour le (HCO_3^-). Ce facteur peut correspondre au contrôle chimique de la minéralisation sous l'influence de la conductivité électrique lors du contact entre la formation encaissante et l'eau.

Quant au facteur F2, il peut correspondre à l'influence des formations carbonatées sous l'effet des réactions ioniques entre la roche et l'eau de la nappe.

(Tab. n° 28) : Corrélation entre les 9 variables et les axes factoriels retenus.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	E.C	pH
F1	0,85	0,86	0,88	0,65	0,20	0,89	0,88	0,99	-0,31
F2	0,19	0,15	-0,27	-0,24	0,78	0,09	-0,30	-0,08	-0,66

Les résultats des Analyses en Composantes Principales représentés graphiquement sur (la Figure n° 108), montrent que la conductivité se situe dans le même champ que le Na^+ , Cl^- et K^+ d'une part et le Ca^{2+} , Mg^{2+} , et SO_4^{2-} d'autre part.

Cette conductivité forme une bonne corrélation avec ces paramètres, ceci explique que l'origine de la minéralisation qui caractérise les eaux albiennes dans cette partie occidentale du SASS est contrôlé par la conductivité et ce, suite à la forte évaporation qui caractérise la zone d'étude.

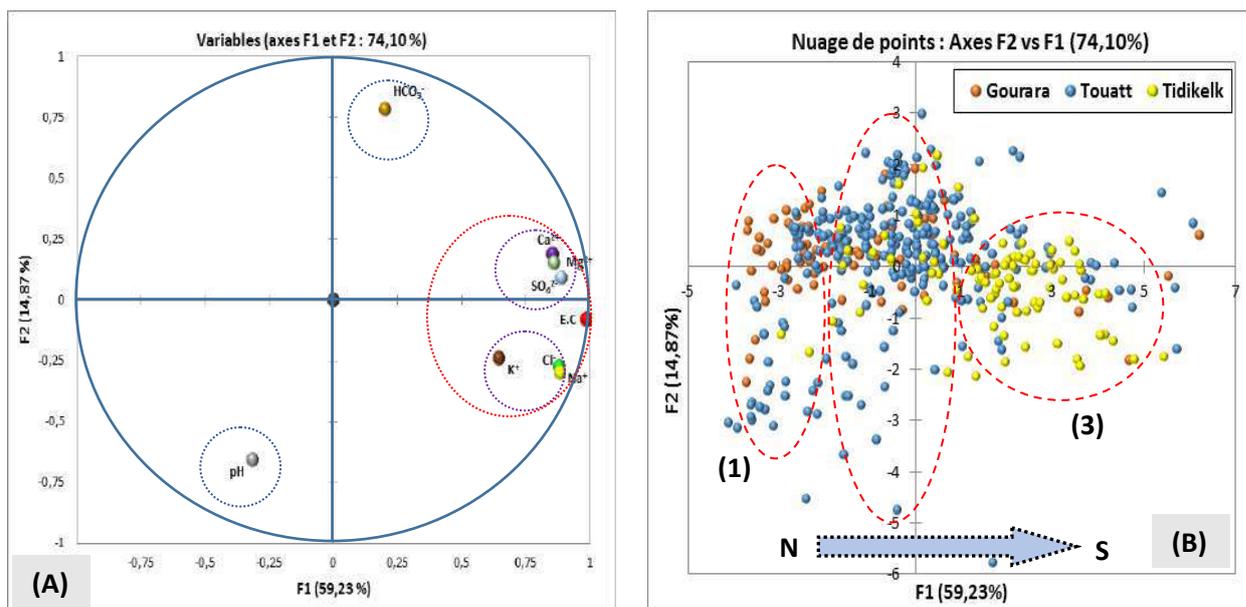


Fig. n° 108 : Représentation graphique de l'ACP – (A) pour les 9 variables et (B) pour les 470 individus « échantillons »

Quant au K^+ , il se comporte tout seul et se retrouve partiellement associé avec les autres paramètres et ce, suite à la contribution des silicates dans l'enrichissement du Potassium qui peut être due à l'altération des roches suite au phénomène d'hydrolyse. Alors que ce qui n'est pas le cas dans la partie orientale du bassin SASS, et ce d'après l'étude de (L. SAHRY, et al, 2017), où elle l'a confirmée.

L'emplacement du pH en opposition avec le HCO_3^- par rapport à l'axe horizontal indique une corrélation inverse liée aux équilibres Calco-carbonique faisant intervenir. La dissolution du CO_2 va se combiner avec H_2O pour donner H_2CO_3 au fur et à mesure il y a libération de H^+ dans la solution ; H^+ augmente d'où le pH diminue (acide) en favorisant la solubilité (concentration) des carbonates.

Il s'avère d'après l'ACP que l'ensemble des variables ne présentent aucun lien avec le pH et le HCO_3^- . Il est à signaler que pour l'ensemble des autres paramètres. La combinaison entre le graphique de l'ACP (figure n° 108) et (le Tableau n° 28), nous ont permis de ressortir 2 mécanismes (ou phénomènes) :

- Le 1^{er}, qui est contrôlé par l'ensemble des éléments proches de 1 notamment le (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- et la Conductivité) qui caractérisent souvent les eaux évaporitiques (soit 60 % expliqué par une Influence évaporitique).
- Le 2^{ème} phénomène qui correspond au facteur F_2 est contrôlé par le HCO_3^{2-} .

Nous constatons, que le groupement des sulfates calcium, et magnésium et d'après les corrélations enregistrées que le calcium est d'origine évaporitique (gypses) et non pas carbonaté et le magnésium également est issue beaucoup plus des sels sulfatés magnésiens, et non pas dolomitique et cette hypothèse a été confirmée par l'approche géochimique.

Par ailleurs la conductivité est au milieu des deux pôles évaporitiques :

- Pôle chloruré sodique et potassique (faciès dominant) : Cl, Na, et K.
- Pôle sulfaté calcique et magnésien : SO₄, Ca, et Mg.

En mettant, de ce fait, en évidence une minéralisation conduite autant par la matrice évaporitique que par les matrices carbonatées et siliceuses.

On peut en déduire de la représentation graphique d'après (la Figure n° 131-B), l'existence de 3 groupes de familles :

a) Groupe n°01 : qui renferme des points d'eau situés au Gourara (nord de la zone d'étude) et qui sont affectés par une conductivité plus ou moins faible.

b) Groupe n°02 : qui englobe un mélange de points d'eau des 3 régions distinctes et où la conductivité présente des valeurs plus ou moins élevées.

c) Groupe n°03 : qui correspond aux forages situés au Tidikelt (sud de la zone d'étude), où les valeurs de conductivité sont nettement élevées.

CHAPITRE X.

X. APPROCHE THERMODYNAMIQUE ET ISOTOPIQUE.

X.1. APPROCHE THERMODYNAMIQUE.

La dissolution d'un minéral dans l'eau peut être décrite par un état d'équilibre : quand l'eau est en contact avec un minéral, la concentration de la solution augmente pour atteindre un maximum pour des conditions physico-chimiques données. On dit alors que la solution est saturée en ce minéral.

La simulation, dans les conditions normales de pression et de température de l'échantillon d'eau, a été effectuée par le logiciel thermodynamique chimique, Phreeqi.v.3 (PARKHURST et APPELO, 1999), sur 86 échantillons portant sur 11 variables représentées par le pH, la conductivité, et les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , le F^- et le Si. Le calcul des indices de saturation par rapport aux minéraux susceptibles de constituer la matrice aquifère.

L'état de saturation est exprimé par la loi de DEBYE et HÜCKEL (1923) suivante exprimée par l'indice de saturation (CIDU et al, 2009) :

$$\boxed{I_s = \log(Q) - \log(K_{ps})} \quad (14)$$

Avec K la constante d'équilibre et K_{ps} le produit ionique en considérant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de -0,5 à +0,5, pour cela 3 cas sont possibles :

- $I_s < 0,5$ signifie une sous-saturation d'une solution par rapport à un minéral (l'eau est dite sous-saturée).
- $I_s = 0$ indique un état de saturation (l'eau est dite en équilibre avec un minéral).
- $I_s > 0,5$ démontre une sursaturation (l'eau est dite sursaturée).

1. Evolution géochimique des eaux de la nappe.

La nappe albienne dans cette partie du bassin, son alimentation est assurée par 2 facteurs, par les eaux météoriques qui tombent durant les périodes humides ainsi que par les oueds qui longent la zone d'étude où leurs alimentations s'effectuent au niveau des pieds monts de l'atlas saharien (M.O. BABASSY, et al, 2003). Ces eaux de pluies avant leur interception au sol, se chargent en faibles concentrations en éléments chimiques. Une fois elles sont en contact avec la surface du sol, une partie des précipitations se ruisselle à travers les oueds et l'autre partie s'infiltré dans le sous-sol pour atteindre la nappe. Ces eaux lors de leur passage vers la nappe vont subir 2 phénomènes successives :

- Une évaporation sous l'effet de la forte température qui caractérise la zone d'étude surtout pendant la période estivale.
- Une précipitation des éléments chimiques sous forme de minéraux qui vont influencer sur la signature géochimique des eaux de la nappe.

Pour cela et dans l'objectif de mieux expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation et le chimisme qui caractérise les eaux de la zone d'étude, il a été décidé de combiner entre les indices de saturations des minéraux carbonatés et ceux évaporitiques.

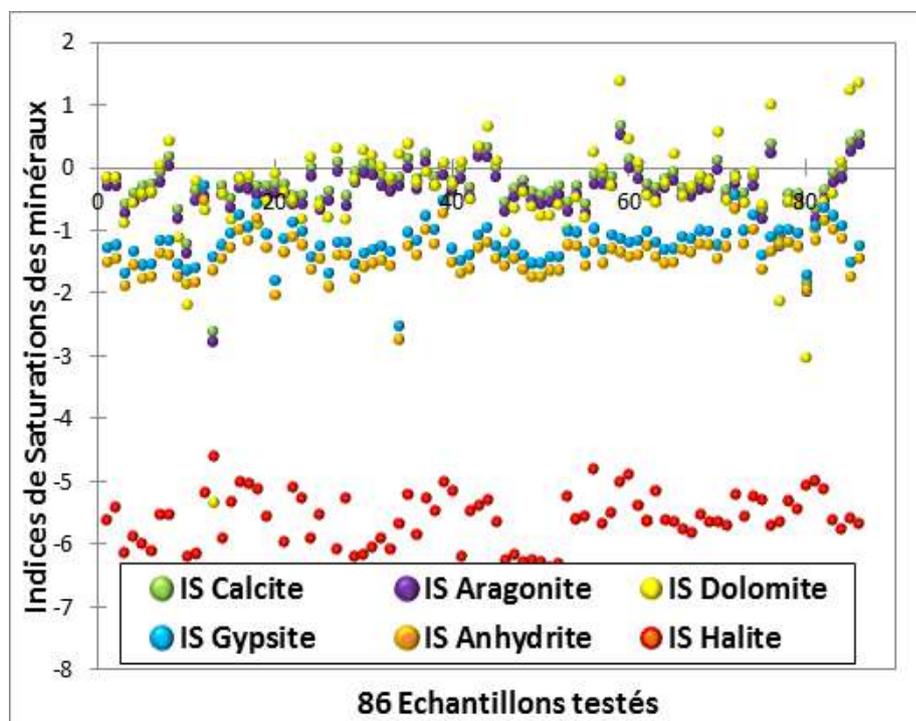


Fig. n° 109 : Variation des indices de saturations des minéraux pour les 86 échantillons.

Le graphique (figure n° 109) montre que les indices de saturations des minéraux que ce soit carbonatés ou évaporitiques, présentent des degrés très variables. A titre d'exemple pour les minéraux carbonatés, les I.S de la dolomite varient entre -5,34 et 1,37 alors que pour l'aragonite entre -2,77 et 0,52 et pour la calcite entre -2,62 et 0,66.

Pour les minéraux évaporitiques qui montrent des degrés de saturations assez faibles que ceux carbonatés, indiquent que l'I.S de l'anhydrite varie entre -2,74 et -0,51 et pour le gypsium entre -0,52 et -0,29 alors que pour l'halite il oscille entre -7 et -4,6. Ceci indique que les minéraux évaporitiques sont sous saturés par rapport aux minéraux carbonatés où plus de 80% des échantillons testés présentent des I.S de valeurs négatives.

La répartition spatiale des I.S (figure n° 110) à travers la zone d'étude montre que l'augmentation des concentrations de ces indices pour les minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) varie de la même manière pour les 3 minéraux.

2. Origine des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+).

Des corrélations significatives entre les sulfates et les ions majeurs (Mg^{2+} , Ca^{2+} et Na^+) ont été enregistrées (tableau n° 29), ce qui suggère que l'origine de ces cations est évaporitique et d'un degré moindre avec les chlorures, alors que les carbonates semblent sans influence marquée.

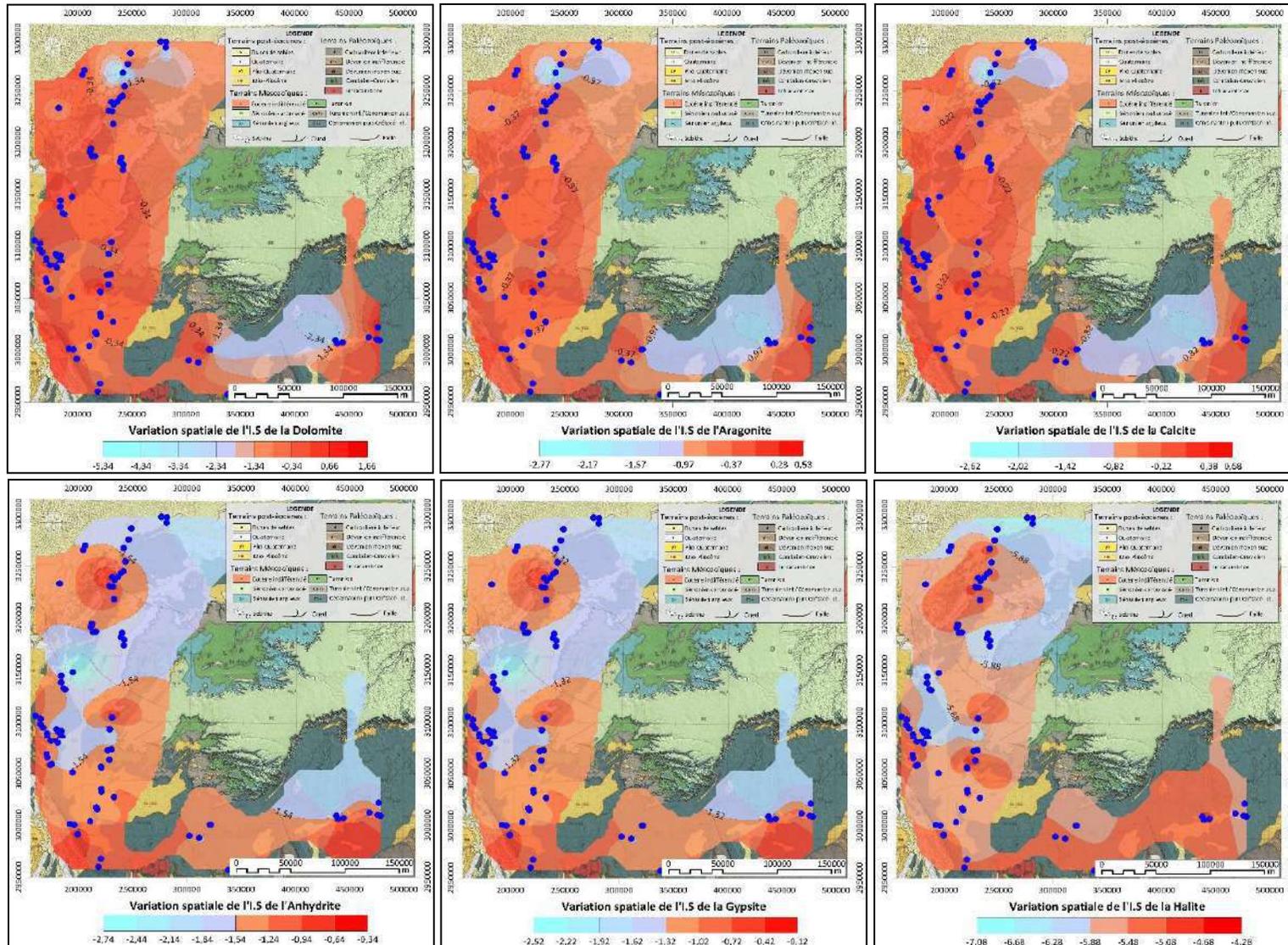


Fig. n° 110 : Variation spatiale des indices de saturations des minéraux carbonatés et évaporitiques des 86 échantillons testés.

(Tab. n° 29) : Matrice de corrélation entre les cations, les sulfates et les bicarbonates.

Variabiles	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Ca ²⁺	1,00					
Mg ²⁺	0,71	1,00				
Na ⁺	0,62	0,61	1,00			
HCO ₃ ⁻	0,25	0,25	0,04	1,00		
SO ₄ ²⁻	0,85	0,81	0,73	0,18	1,00	
Cl ⁻	0,65	0,67	0,91	-0,01	0,61	1,00

Et pour vérifier l'exactitude de ces résultats, il a été décidé d'utiliser d'autres approches telles que l'outil géochimique en s'appuyant sur l'activité ionique de ces éléments en fonction des indices de saturations des minéraux qui peuvent être source du chimisme.

a) Origine du Ca²⁺.

D'après le graphique I.S vs Log Ca (figure n° 111), on remarque que le calcium montre une bonne corrélation avec l'indice de saturation (IS) du Gypse (0,88), alors qu'avec les la calcite et la dolomite, ne montre aucune corrélation significative, ce qui suggère que son origine est évaporitique et non pas carbonatée. Toutefois, un contrôle chimique de l'activité du calcium par la fluorine est observé avec une corrélation significative de (0,47) mettant en évidence l'origine géologique du fluor.

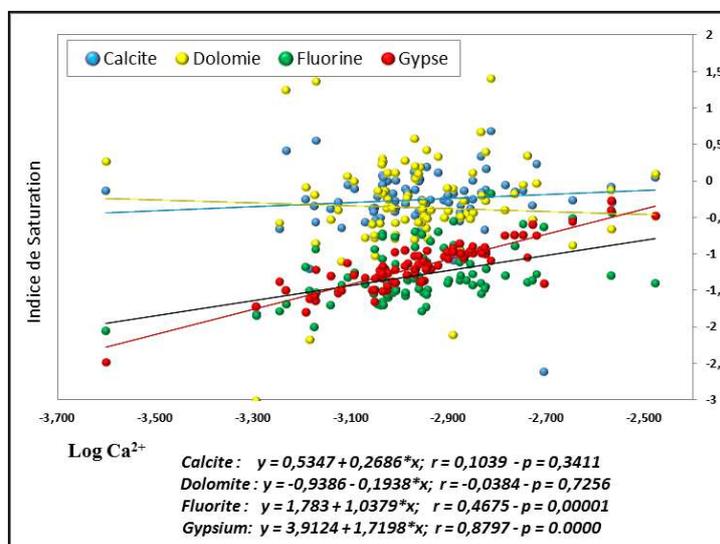


Fig. n° 111 : Test de l'origine du Ca²⁺ par rapport à l'I.S de certains minéraux

b) Origine du Mg²⁺.

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (surtout la dolomite). Cependant l'évolution de ses teneurs n'est pas identique à celle du calcium, car lorsque les concentrations en Mg²⁺ dépassent certaines limites, les apports en Mg²⁺ à partir des formations argileuses deviennent importantes.

D'après le graphique ci-dessous (figure n° 112), on remarque que le Magnésium est en bonne corrélation avec les 03 minéraux, sauf qu'elle est meilleur avec le Talc ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) et la Sépiolite ($Mg_2Si_3O_7 \cdot 5OH \cdot 3H_2O$) ce qui confirme l'hydrolyse des silicates par ce qu'il s'agit d'argiles irritées. Ce qui indique que son origine est plutôt argileuse que dolomitique ($CaMg(CO_3)_2$). Ceci peut être dû à l'existence des formations marneuses (marnes du Cénomaniens) qui dominent la région et qui sont en contact régulier avec les grès albiens (qui couvre une grande partie du bassin occidental). Ces résultats confirment ceux obtenus avec l'étude statistique et ce d'après la matrice de corrélation où le Mg^{2+} montre une bonne corrélation avec les sulfates SO_4^{2-} donc d'origine évaporitique $MgSO_4$.

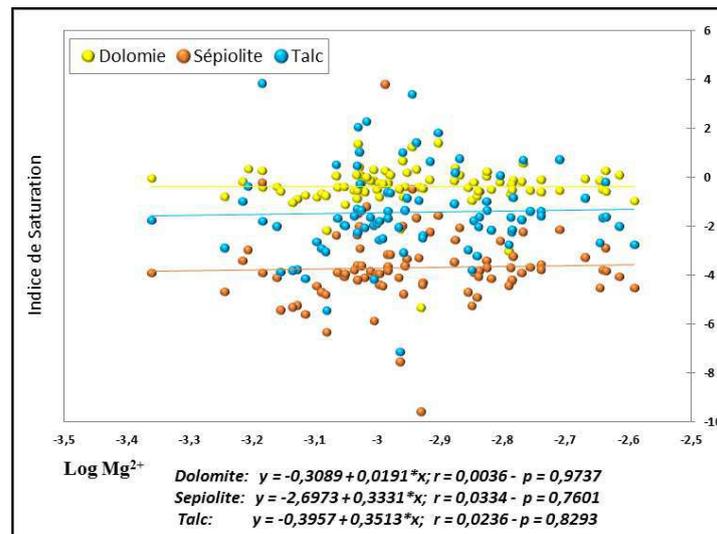


Fig. n° 112 : Test de l'origine du Mg^{2+} par rapport à l'I.S de certains minéraux.

c) Origine du Na^+ .

Comme l'indique le graphique ci-après (figure n° 113), le sodium montre une parfaite corrélation avec l'halite, ce qui explique que l'origine de cet élément est évaporitique.

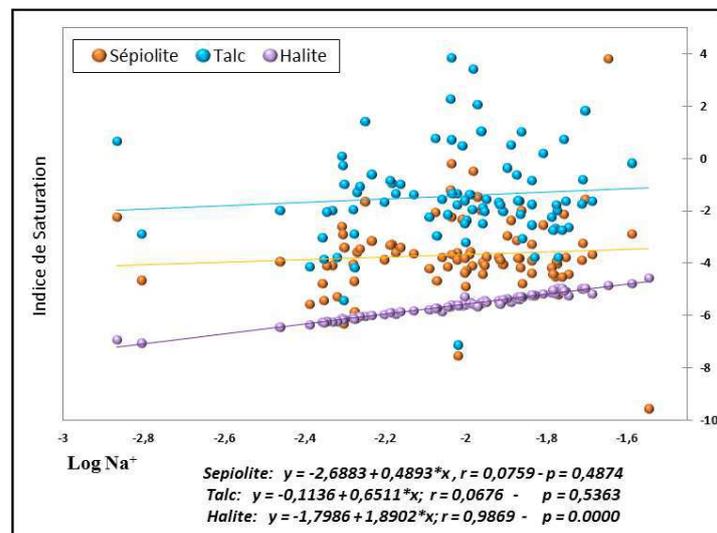


Fig. n° 113 : Test de l'origine du Na^+ par rapport à l'I.S de certains minéraux.

Il a été démontré précédemment que les ions Cl^- et Na^+ participent activement dans la minéralisation totale des eaux de la zone d'étude et ce, suite à une éventuelle dissolution de l'halite et/ou de l'anhydrite. Ceci est confirmé d'après la matrice par la corrélation positive entre les chlorures et le sodium, affichant un coefficient de détermination de l'ordre de 0,91. De même, la participation des ions Ca et SO_4 à la salinisation indiquant ainsi une éventuelle dissolution du gypse, ce qui est confirmé par l'étroite corrélation entre ces deux paramètres.

La dissolution de ces évaporites est d'ailleurs été confirmée par les indices de saturations, en effet, les indices de saturations de l'ensemble des eaux vis-à-vis de l'halite et du gypse montrent un état de sous-saturation pour l'ensemble des échantillons (Indice de Saturation moyen vis-à-vis de l'halite est de $-5,63$ (avec un coefficient $R^2 = 0,9197$) alors que celui vis-à-vis du gypse est de $-1,19$ (avec un coefficient $R^2 = 0,7368$).

Les fortes corrélations indiquées d'après la (figure n° 114), entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de l'halite et du gypse respectivement en fonction du $(\text{Na} + \text{Cl})$ et de $(\text{Ca} + \text{SO}_4)$ confirme l'hypothèse de la dissolution de ces évaporites.

Cependant l'absence d'une corrélation entre les indices de saturations de ces eaux vis-à-vis de la calcite en fonction de $(\text{Ca} + \text{HCO}_3)$ et de la dolomite en fonction de $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{HCO}_3)$ infirme la dissolution de ces minéraux carbonatés, ce qui explique que le Ca et le Mg peuvent avoir d'autres sources autre que les bicarbonates (HCO_3).

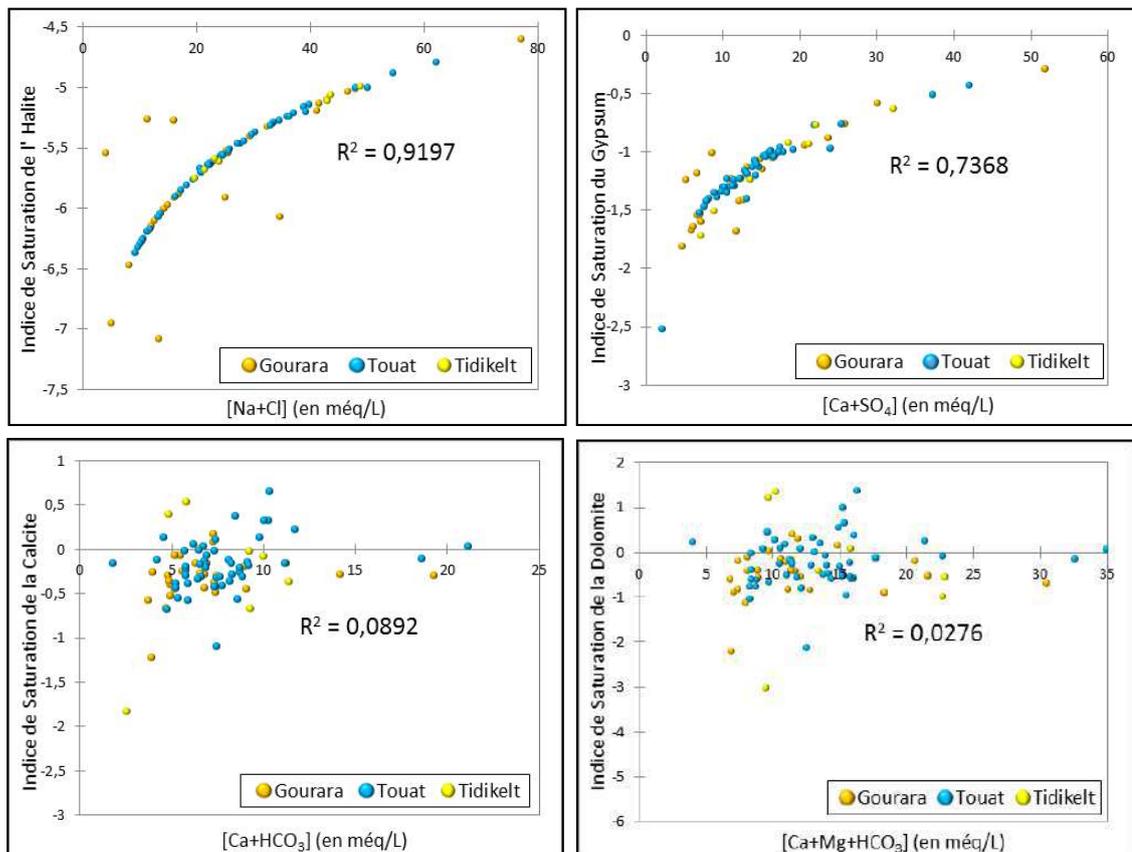


Fig. n° 114 : Corrélation des indices de saturations des eaux vis-à-vis de l'halite, du gypse, de la calcite et de la dolomite en fonction de $(\text{Na} + \text{Cl})$, $(\text{Ca} + \text{SO}_4)$, $(\text{Ca} + \text{HCO}_3)$ et $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{HCO}_3)$

3. Etude du mécanisme d'acquisition de la minéralisation.

3.1. Diagrammes de concentrations et molalité des ions.

En vue d'étudier l'évolution géochimique des eaux souterraines, de nombreux auteurs utilisent souvent le diagramme de concentration. Le principe consiste à utiliser l'ion chlorure qui est un élément stable et conservatif, très soluble et très abondant dans les eaux souterraines et de surface qu'on l'emploie comme un traceur de l'évolution hydrochimique de la minéralité des eaux.

Le facteur de concentration des eaux (F.C) peut être estimé grâce à la division les molalités en Cl⁻ sur la valeur de la molalité minimale de cet élément tout en introduisant la fonction logarithme décimale sur les valeurs du rapport pour obtenir la variable Log facteur de concentration. Par ailleurs, nous suivront l'évolution des molalités des autres éléments chimiques majeurs notamment (Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, SiO₂⁻ et F⁻) en fonction de ce facteur de concentration. Ceci nous permettra d'établir un classement relatif des échantillons et les faire comparés les uns par rapport aux autres (BARBIERO *et al.*, 1992).

À travers les 3 zones d'étude, nous pouvons visualiser le comportement géochimique des 9 paramètres selon le sens d'écoulement des eaux de la nappe (du sud vers le nord).

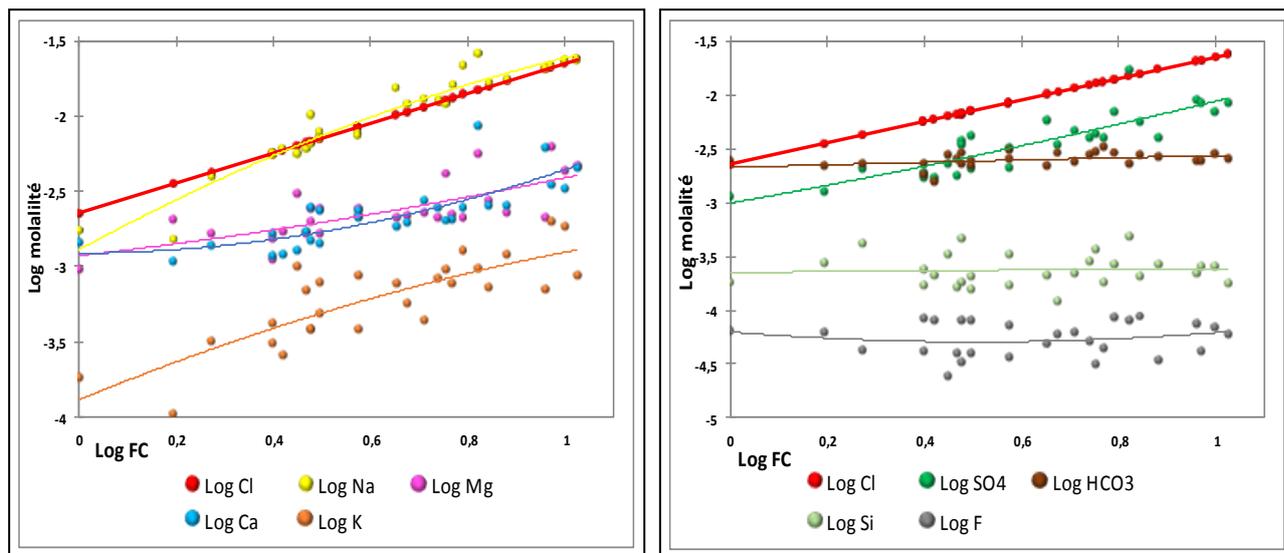
a) Zone Nord (Le Gourara) :

D'après les diagrammes de concentrations tracés pour les 3 zones, on constate une dispersion élargie des échantillons que ce soit pour les anions ou pour les cations, ceci explique que les solutions qui caractérisent les eaux de la nappe ne sont pas identiques et que les processus géochimiques qui régissent sont très variés.

Comme l'indique le diagramme des cations (figure n° 115), les variations des teneurs en sodium sont similaires à celles enregistrées par les chlorures pour l'ensemble des points, sauf que pour les Na⁺ elles débutent plus lentement (peut être due à un phénomène de dilution).

Ceci peut être expliqué par le phénomène de sorption due à une fixation du sodium par les formations argileuses suite au mécanisme d'un échange de base inverse. En plus cette zone qui correspond à l'amont de la zone d'étude se caractérise par des eaux peu chargées. L'ion potassium souvent rattaché à celui du sodium qui montre une stabilité, ses teneurs évoluent de la même manière que celles du Na⁺ et Cl⁻. Ce qui explique la dominance du faciès chloruré sodique.

La même chose est enregistrée pour les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ où les teneurs de ces 2 éléments évoluent simultanément mais avec un rythme inférieur que celui du facteur de concentration, ceci s'explique par l'adsorption du Ca²⁺ et Mg²⁺ par les formations argileuses surtout que nous avons constaté précédemment que près de 60% du rapport Ca/Mg présentent des valeurs proches de 1.

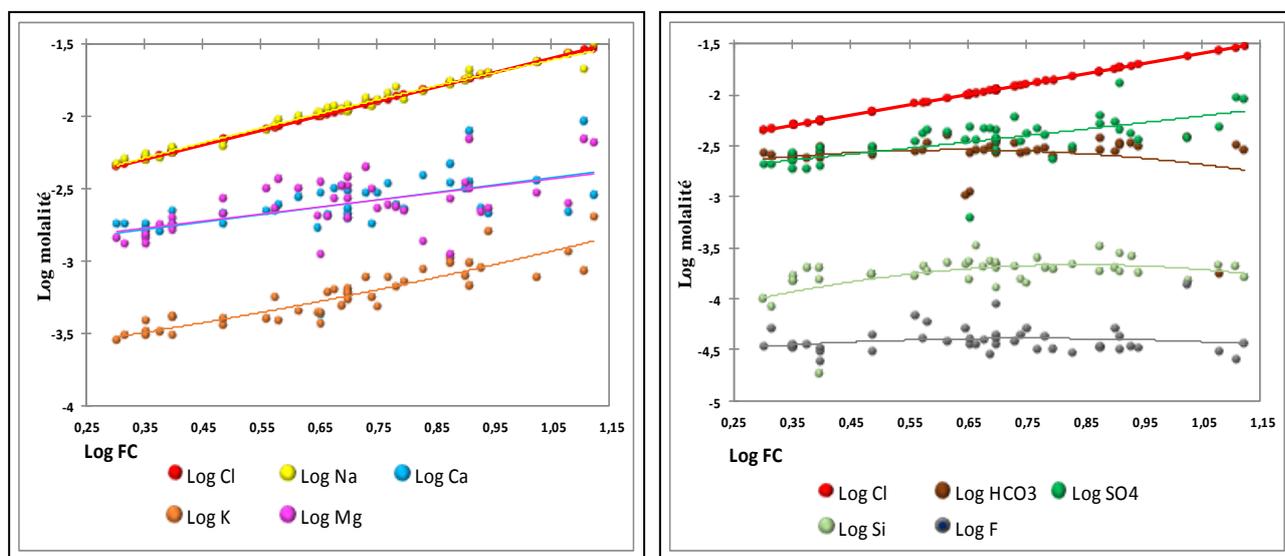


Figs. n° 115 : Diagrammes de concentrations pour les cations et les anions.

Pour les teneurs en sulfates, elles augmentent et évoluent simultanément avec l'évolution du traceur alors que pour l'ion HCO_3^- c'est le contraire, au moment que le SO_4^{2-} évolue le HCO_3^- démarre avec des concentrations plus élevées (molalité de -2,5) puis tend à s'incurver à partir d'une valeur faible du facteur de concentration ($\log \text{FC} = 0,46$).

b) Zone Centre (Le Touat) :

D'après les diagrammes ci-après (figure n° 116), la molalité du sodium augmente proportionnellement au facteur de concentration, ce qui explique l'influence la matrice halite qui confère à l'eau un faciès chloruré sodique. Quant aux concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} , leurs teneurs augmentent simultanément avec un rythme inférieur à celui du facteur de concentration et ce à partir du $\log \text{FC} = 0,65$ aussi bien que celui enregistré dans la zone de Gourara. Les nuages de points exprimant les concentrations des ions SO_4^{2-} et HCO_3^- demeurent élevées mais à partir du $\log \text{FC} = 0,60$ celles des bicarbonates HCO_3^- s'incurvent vers le bas, traduisant ainsi une tendance vers la précipitation.



Figs. n° 116 : Diagrammes de concentrations pour les cations et les anions.

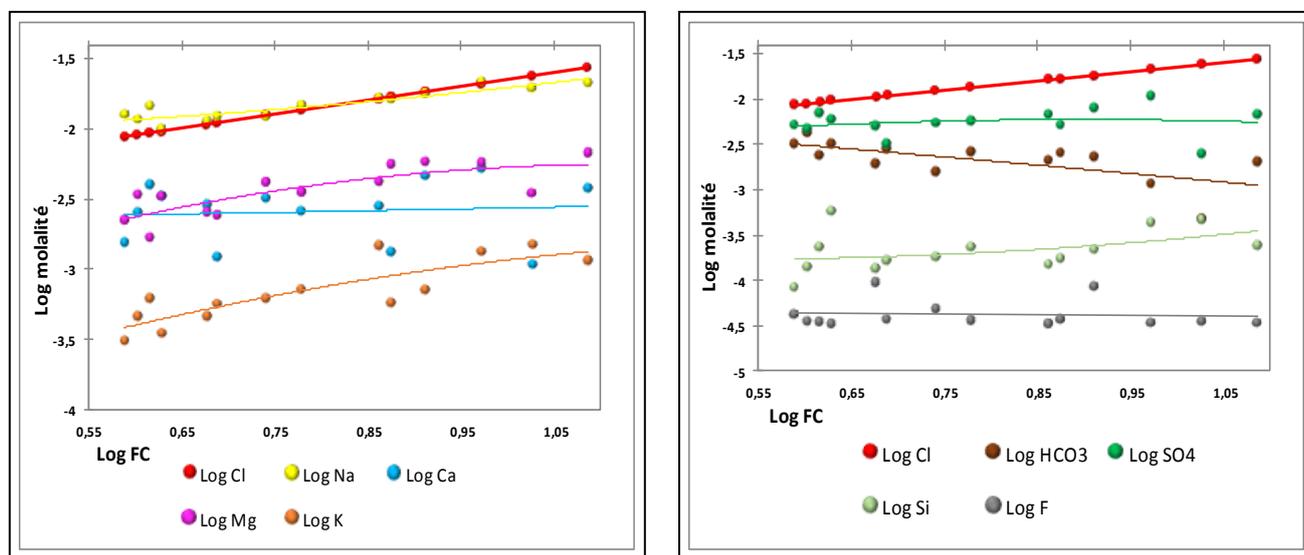
Cependant, les ions SO_4^{2-} continuent en évolution suivant l'alignement de l'ion Na^+ et Cl^- , ce qui explique la dominance du faciès sulfaté sodique.

c) Zone Sud (Le Tidikelt) :

Les diagrammes de concentrations élaborés dans cette région (figure n° 117) indiquent que l'évolution de molalités des éléments majeurs diffère des précédents, établis pour les autres régions. Ce qui explique que les mécanismes du chimisme qui affectent les eaux la nappe de la partie sud ne sont pas les mêmes que ceux qui caractérisent la partie centrale et septentrional de la zone d'étude. Puisque cette partie correspond à la fois à la zone de recharge et d'exutoire de la nappe albienne (bande occidentale du bassin SASS).

Dans la zone de Tidikelt (au sud) les molalités des éléments majeurs débutent avec des concentrations plus élevées par rapport au Gourara, où l'ion Cl^- débute avec une molalité de $-2,52 \text{ mol/kg}$ et au Touat avec $-2,48 \text{ mol/kg}$, alors qu'au Tidikelt avec $-2,0 \text{ mol/kg}$. On enregistre également que les teneurs en sodium commencent à augmenter plus vite que celles des chlorures, ce phénomène n'est observé que lorsque les solutions sont relativement concentrées en Na^+ .

Quant au potassium, les teneurs en cet élément sont très stables et suivent régulièrement l'évolution du facteur de concentration mais avec des concentrations très faibles. Généralement cet élément est contrôlé par les minéraux argileux qu'ils le fixent le plus souvent (Assa, 1976, Jardine et Sparks, 1984 ; Wang et al, 2004). De même on constate une stabilité de l'ion Ca^{2+} alors que les teneurs en Mg^{2+} tendent à augmentés au fur et à mesure suivant l'alignement du traceur Cl^- à partir de la valeur $\text{FC} = 0,65$.



Figs. n° 117 : Diagrammes de concentrations pour les cations et les anions.

3.2. Relation entre Indice de Saturation et facteur de concentration.

a) Zone nord (Le Gourara) :

D'après les diagrammes ci-après (figure n° 118), on remarque que tous les points sont sous saturés vis-à-vis des minéraux des minéraux sulfatés (gypse et anhydrite) ceci peut être

due à un phénomène d'enrichissement suite à un lessivage chimique suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe.

Pour les minéraux carbonatés, l'ensemble des points tendent vers un équilibre et tournent au tour de la normalisation, la même chose est constatée pour les minéraux silicatés et ce, suite au phénomène de dilution (eaux de bonne qualité chimique).

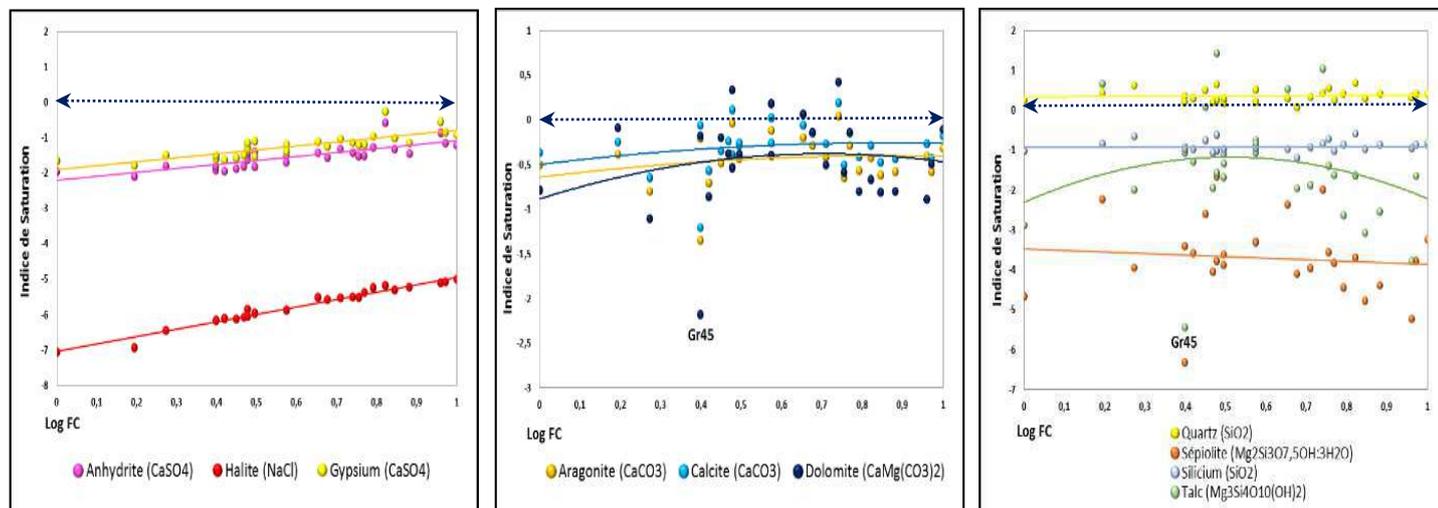


Fig. n° 118 : Diagrammes de concentrations vis à vis des minéraux :
(Évaporitiques - Carbonatés - Silicatés et le F.C)

Nous signalons que d'après les coupes litho-géochimiques élaborées traversant cette zone montrent que la nappe albienne à base de grès est en contact direct avec les argiles schisteuses du primaire, c'est pour cette raison que les eaux de cette zone montrent une saturation vis-à-vis du quartz. On enregistre également que tous les échantillons présentent une large sous-saturation vis-à-vis de l'halite.

b) Zone centrale (Le Touat) :

Comme l'indique les diagrammes suivants (figure n° 119), on remarque que pour les minéraux évaporitiques le même comportement signalé au Gourara se répète au Touat. Il est à signaler également que la majorité des échantillons d'eaux dans zone sont à l'équilibre ou saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés à savoir : la dolomite et d'un degré moindre pour la calcite.

Quant à l'aragonite, elle tend vers la précipitation et ce à partir du FC = 0,30. Cette sursaturation indique qu'une précipitation de ces minéraux et ce comme l'illustre les coupes litho géochimiques qui longent cette partie de la zone d'étude (figure n° 120) suite à la présence des formations marneuses du Cénomaniens qui couvre une grande partie de la nappe albienne.

Pour les minéraux silicatés, on constate que le quartz et le silicium gardent le même comportement enregistré au Gourara (sursaturés à stables), par contre la sépiolite et le talc se dressent vers la précipitation après saturation.

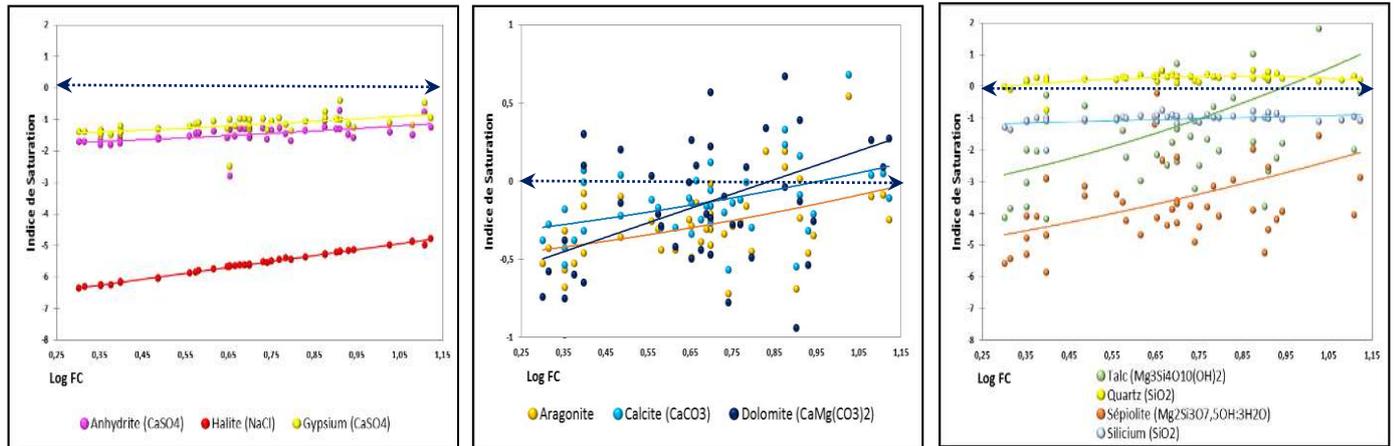


Fig. n° 119 : Diagrammes de concentrations vis à vis des minéraux :
(Évaporitiques - Carbonatés - Silicatés et le F.C)

c) Zone sud (Le Tidikelt) :

D'après le diagramme ci-dessous (figure n° 120), les indices de saturations des minéraux évaporitiques des échantillons d'eau caractérisant la partie sud de la zone d'étude ne montrent aucun changement (tous sous-saturés) par rapport aux régions précédentes. Cependant à partir du point FC = 0,6 les indices de saturation des minéraux carbonatés tendent vers la dissolution.

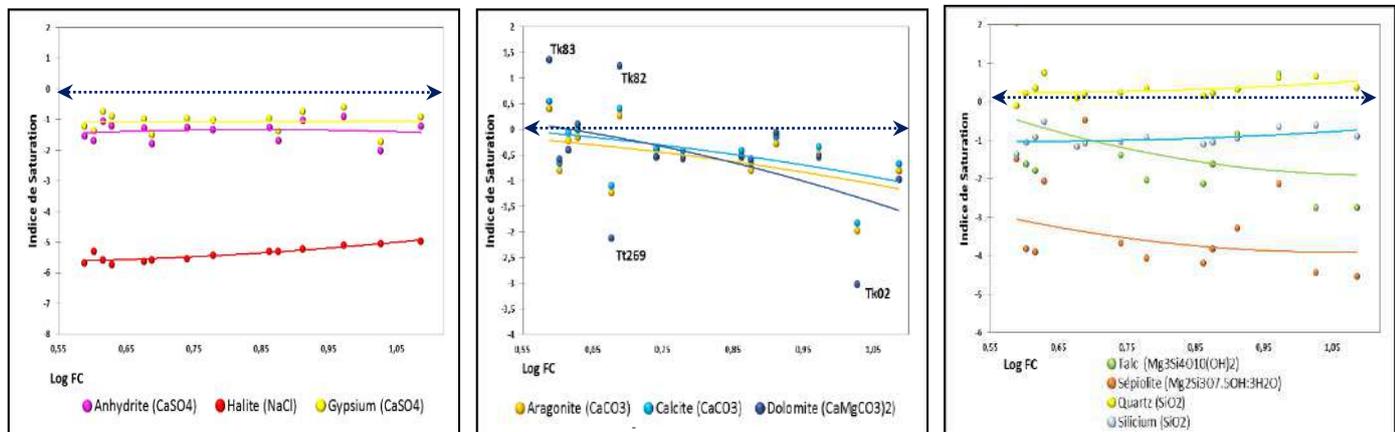


Fig. n° 120 : Diagrammes de concentrations vis à vis des minéraux :
(Évaporitiques - Carbonatés - Silicatés et le F.C)

Pour les minéraux silicatés, le quartz et le silicium se comportent de la même attitude rencontrée au nord néanmoins la sépiolite et le talc, se dévient à partir du point FC = 0,70 vers la dissolution pour se mettre en suite à la stabilité.

3.3. Relation entre I.S et pH des échantillons d'eau prélevés.

a) Zone Nord (Le Gourara) :

Les diagrammes ci-après (figure n° 121) illustrent une sous-saturation vis-à-vis des minéraux évaporitiques où leurs I.S. tendent à s'abaisser au fur et à mesure que l'alcalinité augmente, ce qui induit à une dissolution de ces minéraux.

Pour les minéraux carbonatés, on remarque que le nuage de points à une forte tendance à l'équilibre puis à la précipitation suite à la dissolution du gaz carbonique CO₂ et par conséquent l'alcalinité (pH) augmente.

Quant aux minéraux silicatés, l'augmentation de pH favorise la précipitation en aval des minéraux argileux ; en l'occurrence la sépiolite et le talc. Toutefois, la silice amorphe tend à se dissoudre pour des pH élevés, tandis que le quartz résiste à la dissolution et demeure sursaturé.

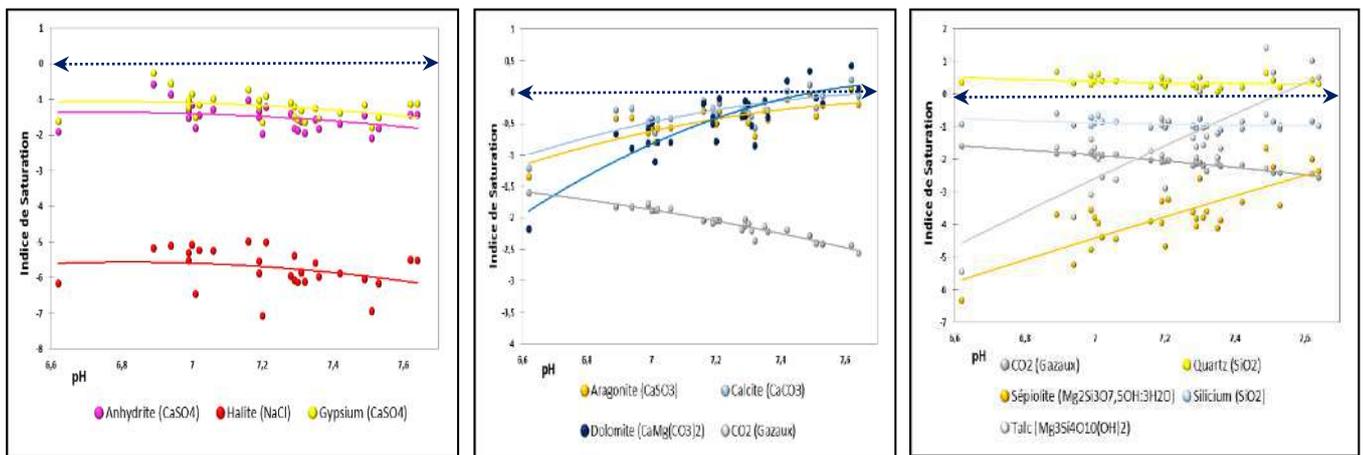


Fig. n° 121 : Relation pH/I.S. vis-à-vis des minéraux : Évaporitiques - Carbonatés – Silicatés.

b) Zone Centre (Le Touat) :

Dans cette zone, d'après les diagrammes tracés (figures n° 122), on constate que tous les points demeurent sous saturés vis-à-vis des minéraux sulfatés (gypse et anhydrite) et déploient vers la dissolution cependant pour l'halite l'IS de ce minéral a une tendance de se précipiter au fur et à mesure que l'alcalinité augmente.

Pour les points exprimant l'évolution des I.S. vis-à-vis des carbonates, ils montrent une tendance à l'équilibre au moment de la dissolution marquée par le gaz carbonique à l'égard de l'augmentation du pH.

Alors que pour les minéraux silicatés c'est le même phénomène enregistré au nord de la zone d'étude (Gourara). Silice amorphe.

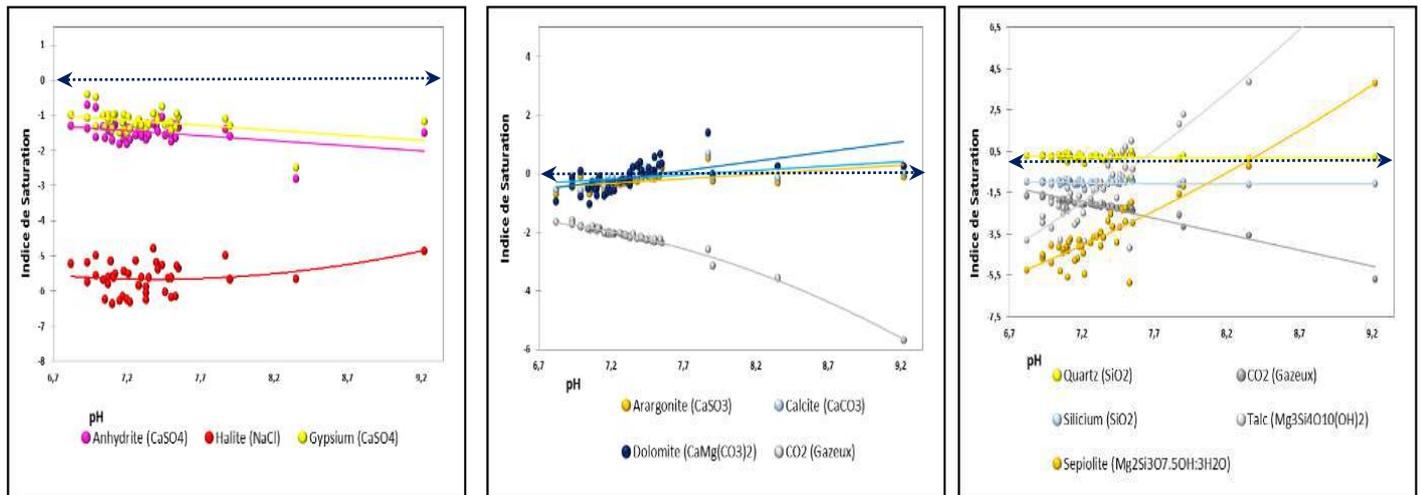


Fig. n° 122 : Relation pH/I.S. vis-à-vis des minéraux : Évaporitiques - Carbonatés – Silicatés.

c) Zone Sud (Le Tidikelt) :

Une comparaison entre les diagrammes élaborés dans la zone nord avec celle du sud (figures n° 123), on remarque une nette similarité du point de vue évolution des nuages de points des IS vis-à-vis des 3 groupes de minéraux en fonction de l'augmentation de l'alcalinité, ce qui explique que les 2 régions sont affectées par les mêmes mécanismes géochimiques.

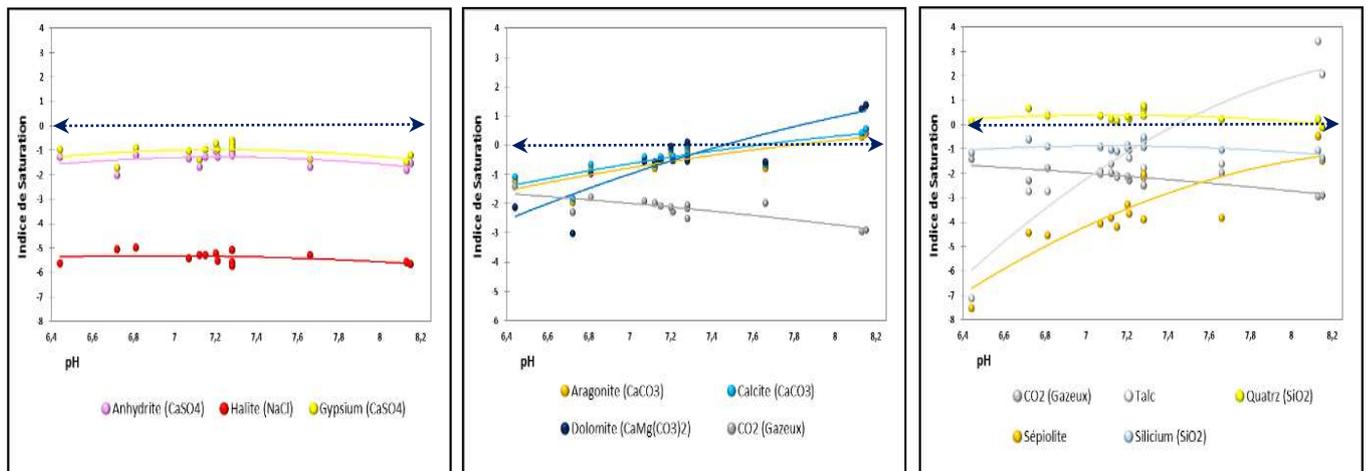


Fig. n° 123 : Relation pH/I.S. vis-à-vis des minéraux : Évaporitiques - Carbonatés – Silicatés.

Dans le but de mettre en évidence la relation entre Indices de saturations, la $p\text{CO}_2$ et le pH, d'après (RAYMAHASHAY, 1986), l'emploi de la pression partielle du ($p\text{CO}_2$) associée à la teneur en pH et à l'I.S. de la calcite et (ou) de l'I.S. de la dolomite, permettra d'apporter des informations sur le déroulement des processus hydrogéochimiques qui affecte les nappes aquifères en général.

Pour le cas de notre étude, on remarque que les indices de saturations des principaux minéraux carbonatés caractérisant les eaux de de la région, à savoir l'aragonite, la calcite et la dolomite comme l'indique le graphique ci-après (figure n° 124), montrent qu'ils tendent vers l'état d'équilibre (stabilité).

Ce qui indique que l'eau a subi des changements importants suite au dégazage du CO₂. D'après (DJIDI et al, 2008) ceci induit le plus souvent à la précipitation des minéraux carbonatés ou une partie de ces minéraux.

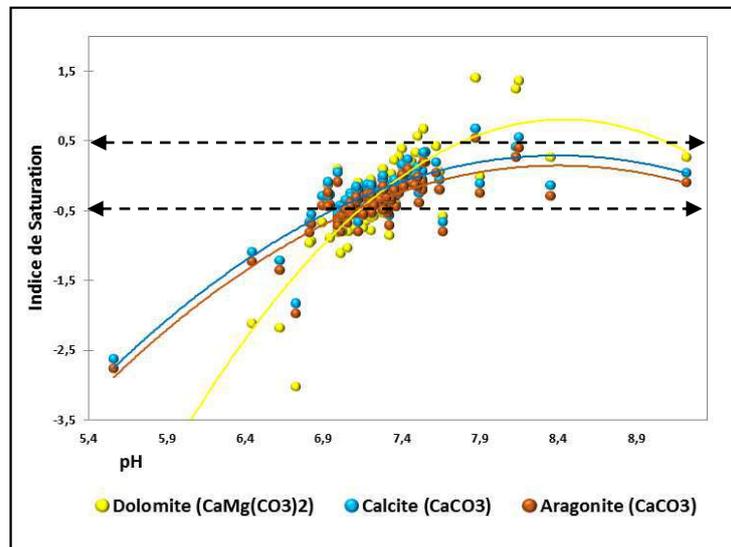


Fig. n° 124 : Variation des I.S des minéraux carbonatés selon le pH.

D'après ce même graphique, on remarque que les indices de saturation respectivement de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite sont proportionnels au pH, ils augmentent régulièrement avec l'augmentation de ce dernier, ce qui explique que l'alcalinité produite par la dissolution des minéraux carbonatés peut être la cause principale de l'augmentation du pH. Et en vue de mener plus de détail sur les processus hydrogéochimiques qui caractérisent les eaux albiennes de la région d'étude, il a été procédé d'utiliser un diagramme hydrochimique qui met en évidence le rapport de la pression partielle du gaz carbonique (p_{CO_2}) associé aux indices de saturation de la calcite et de la dolomite.

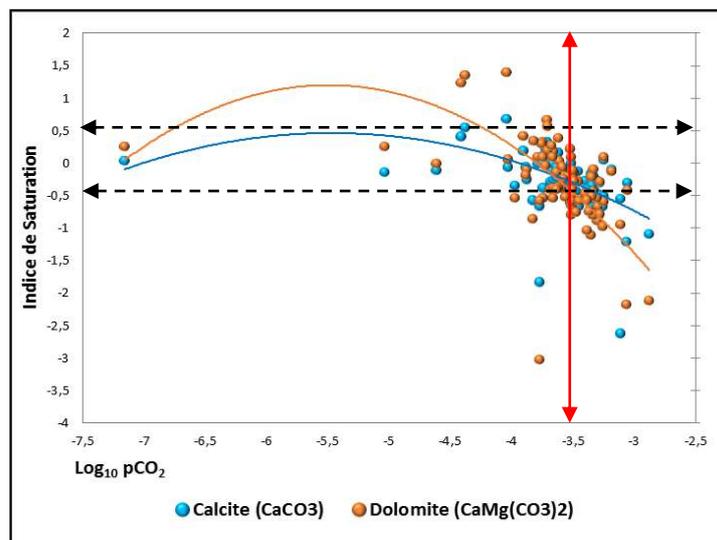


Fig. n° 125 : Relation du log (p_{CO_2}) avec l'I.S Calcite et l'I.S Dolomite

L'examen de ce graphique (figure n° 125), indique que la majorité des échantillons testés sont à l'équilibre et s'incurvent vers la dissolution.

Pour mettre en évidence la relation entre les 3 paramètres à savoir l'activité de l'ion Ca^{2+} , le pH et la pression partielle du CO_2 , il a été jugé utile d'étudier à l'aide d'un diagramme (diagramme d'équilibre) mettant le rapport du $\text{Log Ca} + 2\text{pH}$ en fonction du Log pCO_2 par zone, et ce selon le sens d'écoulement des eaux de la nappe (du Nord vers le Sud). Le principe du diagramme d'équilibre désigne l'équilibre entre un minéral dissout avec la solution (eau).

Lorsque les points se trouvent au-dessous de cette droite c'est que les eaux sont sous-saturées par rapport à ce minéral, ceci correspond généralement aux zones d'alimentation (les eaux jeunes). Plus on suit le sens d'écoulement et avec l'érosion chimique, les points subissent une migration pour se placer, tout d'abord sur la droite (état d'équilibre) puis au-dessus de la droite (état de sursaturation).

3.4. Equilibre Calco-carboniques, pCO_2 , pH, et I.S des carbonates.

a) Zone Nord (Le Gourara) :

D'après le diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (figure n° 126), construit d'après l'équation :

$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Log Ks} = -9.75$, on remarque une nette sous-saturation en calcite au fur et à mesure que la pCO_2 augmente.

Sur le diagramme, les 5 points d'eau qui synthétisent le groupe 1 à savoir (Gr23 – Gr24 – Gr86 – Gr 63 et Gr6), se caractérisent par les paramètres suivants :

- Une lithologie à base de grès fins à moyens et du gravier grossier.
- Altitude située entre 230 et 300 m.
- Profondeur entre 135 et 150 m.
- Epaisseur utile entre 59 et 72 m.
- pH varie entre 7,5 et 7,6.
- Niveau statique entre 5 et 9 m.

Hormis le Gr63 qui se situe à l'extrême nord de la zone du Gourara, le reste se localise au sud (voir figure n° 126). Ce groupe se trouve, non seulement sous saturé en calcite, témoignant ainsi d'une faible minéralisation des eaux, mais aussi à une faible profondeur traduisant également une faible pression régnant dans la nappe (inférieure à la pression atmosphérique -3,5).

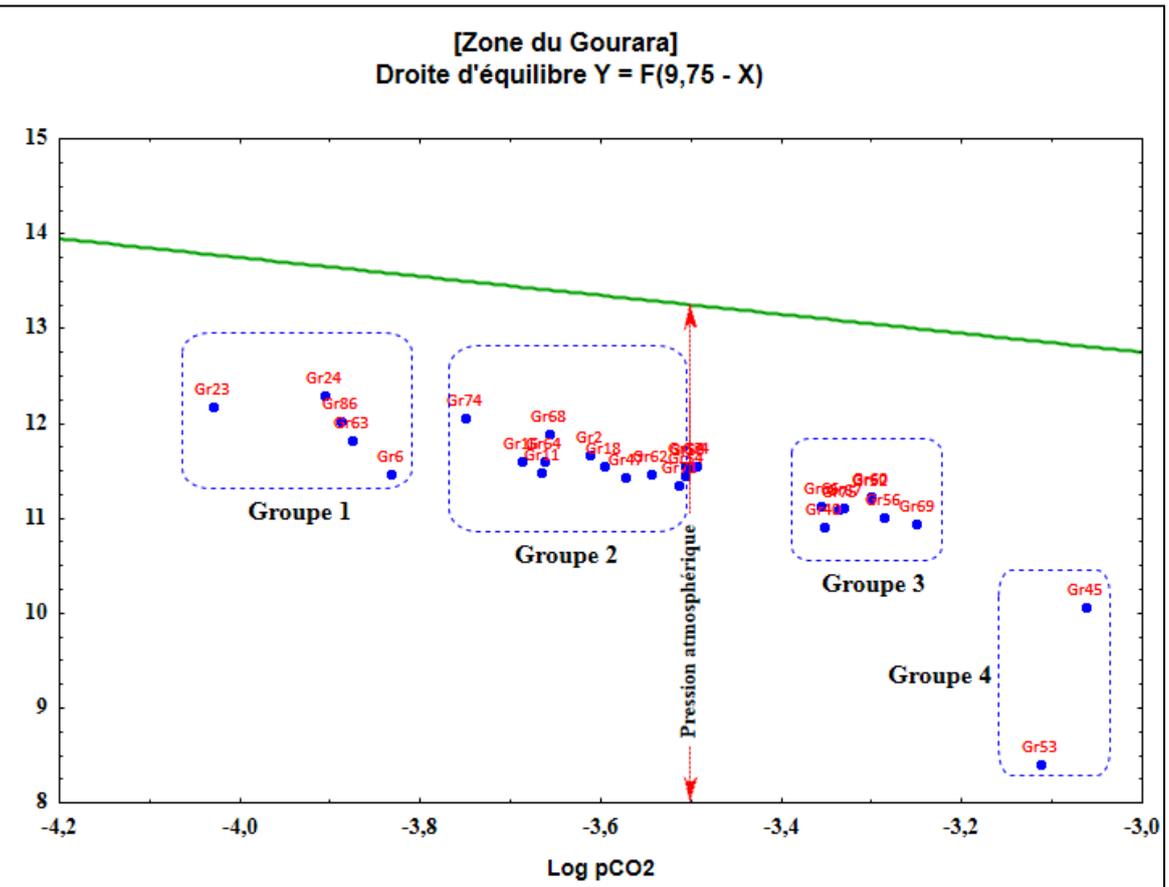


Fig. n° 126 : Diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (Zone du Gourara).

Le groupe 2 situé au nord et au sud Est de sebkhet de Timimoune, rassemble 14 points : (Gr2, Gr4, Gr11, Gr16, Gr18, Gr47, Gr 54, Gr47, Gr54, Gr57, Gr59, Gr62, Gr64, Gr68, Gr71 et Gr74), et se caractérisent par les éléments suivants :

- Une lithologie à base de grès sablo-argileux surmontés par des marnes.
- Altitude située entre 310 et 370 m.
- Profondeur entre 85 et 150 m.
- Epaisseur utile entre 35 et 125 m.
- pH varie entre 7,1 et 7,5.
- Niveau statique entre 9 et 36 m.

De même que le premier groupe, celui-ci représente des eaux sous saturées vis-à-vis de la calcite, et de faibles pressions ; toujours inférieures à la pression atmosphérique -3.5.

Le groupe 3 regroupe 8 points situés au nord et à l'ouest du sebkhet Timimoune : (Gr40, Gr52, Gr56, Gr60, Gr66, Gr67, Gr69 et Gr75) et se caractérisent par :

- Une lithologie composée par des grès tendres avec du sable argileux.
- Altitude située entre 280 et 300 m.
- Profondeur entre 120 et 135 m.

- Niveau statique entre 11 et 27 m.
- Epaisseur utile entre 80 et 95 m.
- pH de 7,0.

Le groupe 4 rassemble 2 points situés au nord de la zone, le Gr45 et Gr53 caractérisés par :

- Des grès tendres ferrugineux avec de l'argile rouge gréseuse.
- Altitude située entre 330 et 370 m.
- Profondeur de 150 m.
- Epaisseur utile entre 90 et 95 m.
- pH entre 5,5 et 6,5.
- Niveau statique entre 5 et 19 m.

Les deux derniers groupes (3 et 4) prêtent, également, des eaux sursaturées en calcite, d'une faible minéralité, mais d'une pression équilibrante supérieure à la pression atmosphérique.

b) Zone Centre (Le Touat) :

Le diagramme reproduit dans la partie centrale (le Touat) indique des points en dessous de la droite d'équilibre or sous-saturés par rapport à la calcite.

Ceci coïncide avec la variation du pH, on passe de 6,8 à 7,8 pour atteindre 9,22 (voir figure n° 127). De même que le précédent 4 groupes sont ressortis à savoir :

Le groupe 1 représenté par (Tt58) situé à l'extrême nord de la zone, se caractérise par :

- Une lithologie à base de sable argileux quartzeux avec des grès argileux
- Altitude de 270 m.
- Profondeur de 120 m.
- Epaisseur utile de 75 m.
- pH de 8,4.
- Niveau statique de 8 m.

Le groupe 2 rassemblant les points (Tt145 et Tt148) situés au centre de la zone entre le groupe 3 et 4, se caractérise par des propriétés similaires au groupe 1, sauf qu'ils diffèrent au niveau de l'altitude et de la profondeur hydrostatique.

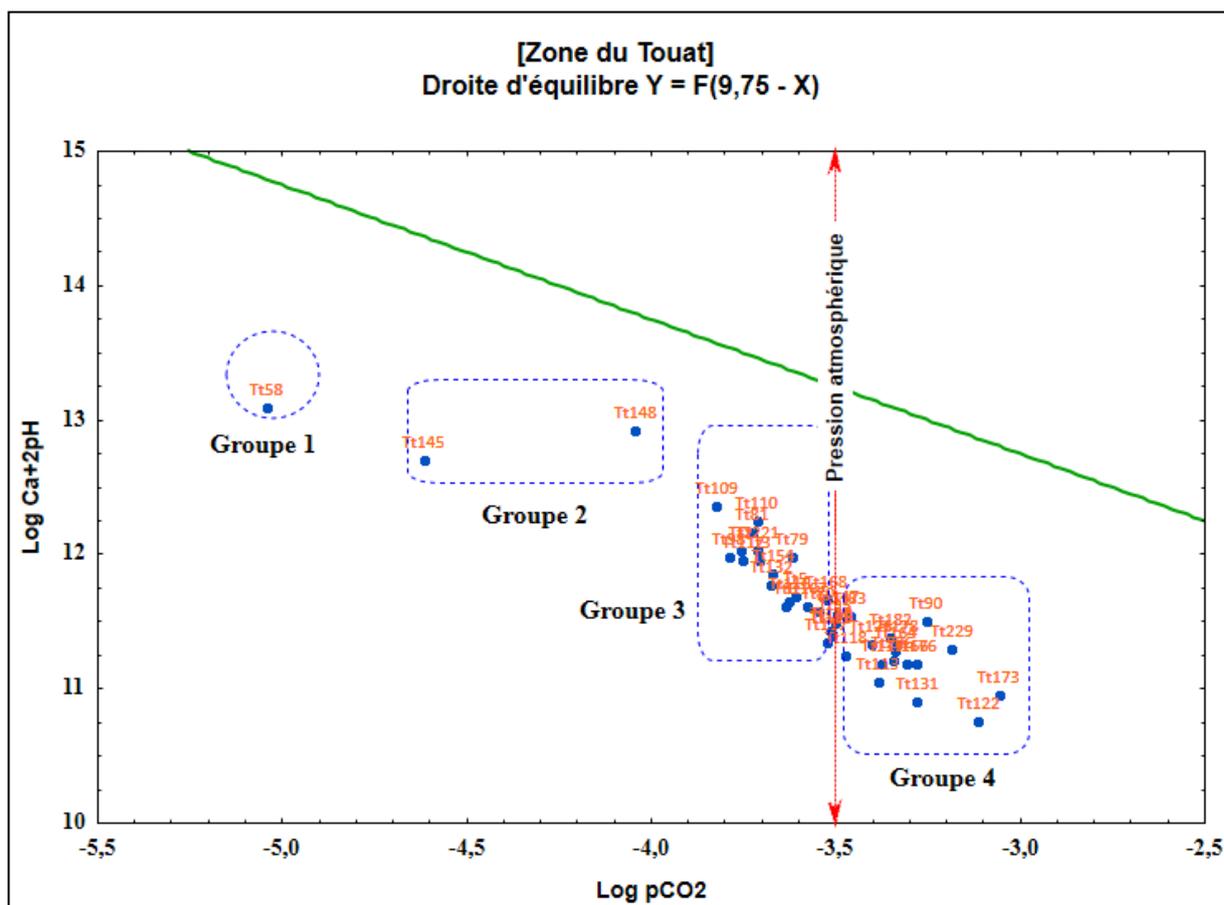


Fig. n° 127 : Diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (Zone du Touat).

Le groupe 3 qui englobe 26 points sont répartis d'après la carte (figure n° 127) en 3 familles, l'une située au nord de la zone (Tt2, Tt3 et Tt5), la seconde située au centre et qui associe 19 points et la 3^{ème} située au sud avec 4 points d'eau (Tt154, Tt176, Tt221 et Tt229). Les points de ce groupe se caractérisent par :

- Une lithologie composée de sables argileux avec des grès argileux surmontés par des marnes.
- Altitude entre 225 et 275 m.
- Profondeur entre 82 et 160 m.
- Epaisseur utile entre 105 et 270 m.
- pH entre 6,8 et 9,2.
- Niveau statique entre 3,5 et 26 m.

Le groupe 4 qui unis 14 points se situe sur le même axe que le groupe 3 mais dans la rive gauche (indiqués en mauve sur la carte), se caractérisent par :

- Des grès sableux à argileux surmontés par des marnes.
- Altitude entre 232 et 287 m.
- Profondeur entre 80 et 180 m.

- Epaisseur utile entre 54 et 115 m.
- pH entre 7 et 7,3.
- Niveau statique entre 13 et 38 m.

Il est à noter, également, qu'à Touat les eaux de cette zone sont de minéralité moyenne, sous saturées en calcite, et de faible pression dans l'ensemble des échantillons. Nonobstant, les points d'eau du quatrième groupe affichent des pressions légèrement supérieures à la pression atmosphérique mais dans les limites de -3.

c) Zone Sud (Le Tidikelt) :

Au niveau de la partie sud, et d'après le diagramme d'équilibre tracé (figure n° 128), on remarque une nette dispersion des points d'eau accompagnée par une variation de potentiel hydrogène, allant de pH acide à alcalin.

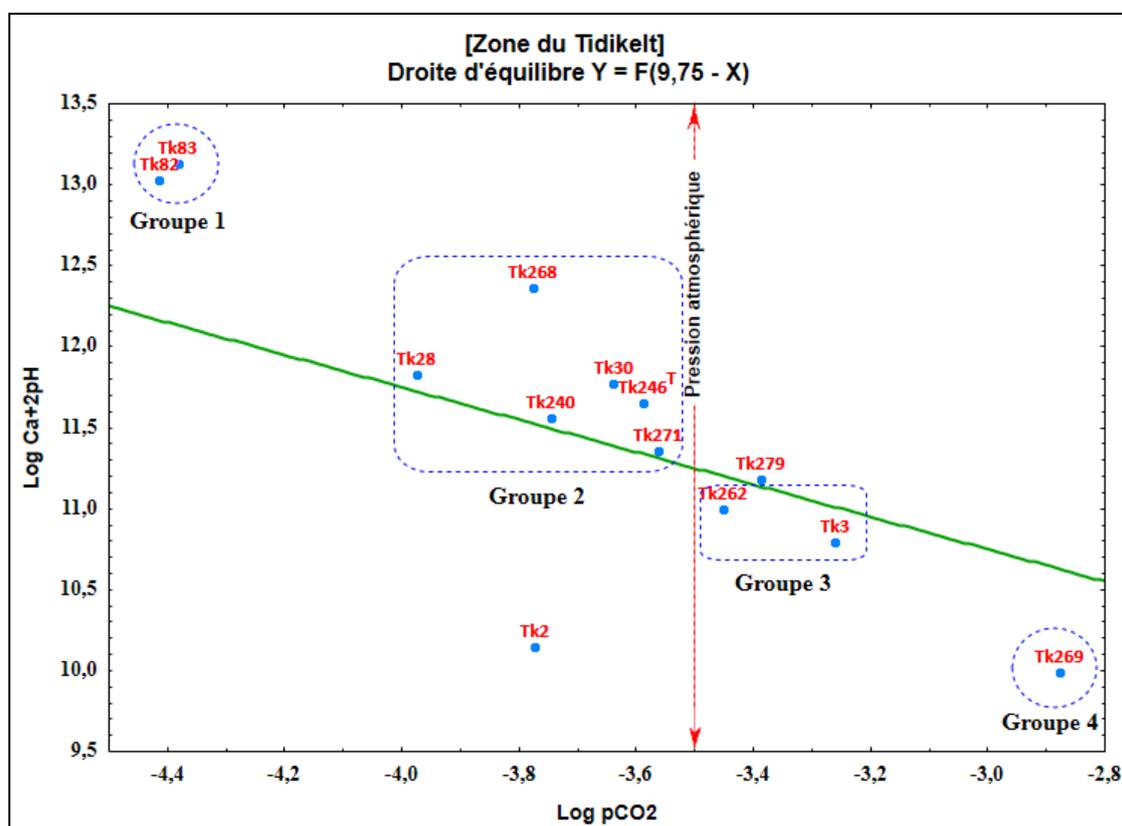


Fig. n° 128 : Diagramme d'équilibre : Eau – Calcite (Zone du Tidikelt).

On enregistre également que la majorité des points se positionnent au-dessus de la droite d'équilibre, ce qui explique un équilibre qui tend vers la sursaturation à vis-à-vis de la calcite et qui se rassemblent dans les groupes 1 et 2. Au même temps un certain d'entre eux (répartis entre les groupes 3 et 4) se situent au-dessous de cette dernière, ceci explique que cette partie de la zone d'étude joue un double rôle (zone d'alimentation et à la fois comme exutoire naturel de la nappe).

Les points (Tk82 et Tk83) rassemblés dans le groupe 1, situés à l'Est de In Salah, se caractérisent par les paramètres suivants :

- Une lithologie grès-sableuse à argileuse surmontée par des marnes.
- Altitude située entre 280 et 290 m.
- Profondeur de 160 m.
- Epaisseur utile de 25 m.
- pH de 8,15.
- Niveau statique de 2,9 m.

Six points respectifs : (Tk240, Tk246, Tk268, Tk271, Tk28 et Tk30) réunis dans le groupe 2 sont répartis en 3 familles (2 à l'Ouest, 2 au centre et 2 autres à l'Est), et qui se caractérisent par :

- Une lithologie à base de grès argileux.
- Altitude située entre 220 et 290 m.
- Profondeur entre 140 et 170 m.
- Epaisseur utile entre 100 et 190 m.
- pH entre 7,2 et 7,7.
- Niveau statique entre 24 et 35 m.

Le groupe 3 qui englobe 2 points (Tk3 et Tk262) dispersés selon (la figure n° 128) entre le centre et l'Est, se caractérisent par :

- Une lithologie composée de grès calcaireux argileux.
- Altitude entre 260 et 290 m.
- Profondeur entre 150 et 160 m.
- pH entre 6,8 et 7.
- Niveau statique de 14 m.

Le groupe 4 représenté par le point (Tk269), situé au centre de la zone est caractérisé par :

- Une lithologie composée de grès argileux siliceux.
- Profondeur entre 140 m.
- pH de 6,4.

On enregistre, également, que la majorité des points se positionnent au-dessus ou proches de la droite d'équilibre, ce qui signifie que la majorité des eaux sont sursaturées à saturées vis-à-vis de la calcite, témoignant d'une minéralisation relativement importante par rapport à celle enregistrée à Tout et Gourara. Toutefois, certains échantillons (des groupes 3 et 4) se situent au-dessous de cette dernière marquant une sous saturation et une pression équilibrante du CO₂ relativement supérieure à la pression atmosphérique.

Néanmoins, la sursaturation augmente lorsque la $p\text{CO}_2$ diminue. À l’opposé, d’autres points d’eau apparaissent localement sous saturés par rapport à la calcite pour des $p\text{CO}_2$ élevées. Par ailleurs, cette partie de la zone d’étude joue un double rôle (zone d’alimentation suite à une convergence des écoulements) et à la fois comme exutoire naturel (exhaure par les forages) de la nappe).

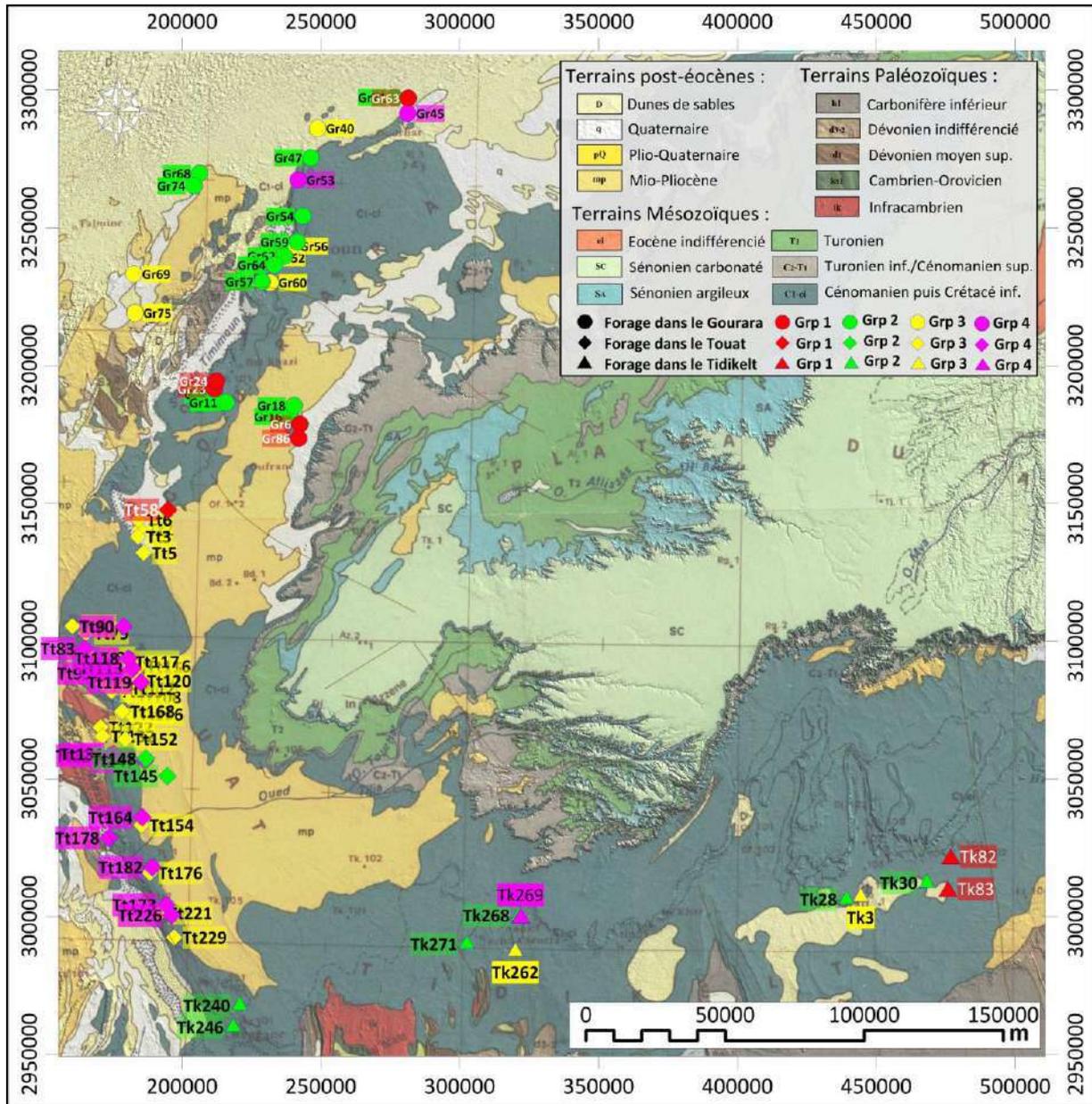


Fig. n° 129 : Carte de répartition de la pression équilibrante du CO_2 en fonction de l’activité du Ca^{2+} et le pH dans les eaux de la nappe du C.I. dans la zone d’étude.

3.5. Rapport I.S. Calcite – I.S. Dolomite et temps de séjour.

L’approche géochimique par l’établissement de diagramme d’Indice de Saturation de la Dolomie (I.S.D) versus Indice de Saturation du Calcite (I.S.C), avec I.S.C en abscisse et I.S.D en ordonnée, donne des informations précieuses, liées à l’eau prélevée, sur le caractère

« Confiné ou ouvert » de la nappe aquifère en l'occurrence l'origine relative de cette eau, le temps de séjour de l'eau en contact avec la formation encaissante (âge relatif), et sa vitesse de circulation.

Ce diagramme a été employé par plusieurs auteurs entre autres : E. SAURET, NITCHEU, M. OGGA, LASM et al. (2009) OGA et al. (2009), D. BELFAR, C. FEHDI, et all. (2015). Ils délimitent quatre domaines significatifs différents :

- Le domaine des indices (I.S.C et I.S.D) positifs qui regroupe les eaux sursaturées par rapport à la calcite et à la dolomite.
- Le domaine des eaux sursaturées en calcite (I.S.C > 0) et sous saturées en dolomite (I.S.D < 0).
- Le domaine des eaux sursaturées en dolomite (I.S.D > 0) et sous saturées en calcite (I.S.C < 0).
- Le domaine des indices I.S.C et I.S.D négatifs où les eaux sont à la fois sous saturées par rapport à la calcite et à la dolomite.

L'équilibre (saturation) exprimée par les indices de saturations (I.S) en dolomite et calcite est supposé autour de $\pm 0,5$.

Il faut signaler également que par définition le CO₂ dissous dans l'eau provient essentiellement de deux sources : l'atmosphère et le sol (CO₂ biogénique).

Dans les formations rocheuses, l'abondance du CO₂ dissous traduit la présence dans l'aquifère d'eau récente. En effet, lors de leurs infiltrations, les eaux entraînent avec elles un flux important de CO₂ à travers les pores et les fissures des roches, il intervient à ce moment dans la dissolution des roches encaissantes où sa quantité diminue au fur et à mesure que le temps de séjour des eaux augmente dans l'aquifère.

La dissolution est un processus lent qui demande un temps suffisamment long pour s'accomplir en totalité. C'est pourquoi on pense qu'une eau pauvre en CO₂ dissoute est d'âge ancien.

D'après BIEMI (1992) : La variation de la pCO₂ et du CO₂ dissous permet de distinguer cinq (5) classes d'agressivité des eaux (1992) :

- Une classe des eaux d'agressivité nulle : avec CO₂ dissous = 0 ;
- Une classe des eaux d'agressivité faible : 0 à 50 mg/L de CO₂ dissous ; (Eau récente)
- Une classe des eaux d'agressivité moyenne : 50 à 100 mg/L de CO₂ dissous ; (Eau très récente)
- Une classe des eaux d'agressivité forte : 100 à 150 mg/L de CO₂ dissous ; (Eau ancienne)
- Une classe des eaux d'agressivité très forte : CO₂ dissous > 150 mg/L ; (Eau très ancienne).

La détermination de l'âge des eaux à partir des variations des teneurs en CO₂ dissous dans l'eau est difficile. En fait les phénomènes de production du CO₂ varient dans le temps et dans l'espace. Très souvent, en raison de l'insuffisance de la vie microbienne et des matières organiques en un lieu, il arrive qu'une eau récente soit pauvre en CO₂.

a) Zone Nord (Le Gourara) :

Les indices de saturation en calcite (I.S.C) caractérisant cette zone, varient de -2,62 à 0,19 tandis que ceux de la dolomite varient de -5,33 à 0,42. Le graphique (figure n° 130) mettant en rapport ces 2 indices indique que les points s'alignent suivant une droite de régression d'équation : $I.S.D = 2,0289 \times I.S.C + 0,1489$ (avec un coefficient de corrélation significatif de $R = 0,9103$). On note également que 97% des échantillons d'eaux prélevées présentent une sous-saturation à la fois en calcite ($I.S.C. < 0$) et en dolomite ($I.S.D < 0$).

Cependant, il existe quelques échantillons d'eau (3 sur 29) qui présentent une sursaturation en calcite et en dolomite. Il s'agit respectivement des points d'eau suivant : Gr24 ($I.S.C = 0,19$ et $I.S.D = 0,42$) – Gr68 ($I.S.C = 0,02$ et $I.S.D = 0,18$) et Gr 74 ($I.S.C = 0,11$ et $I.S.D = 0,33$). Pour cela la présence d'indice de saturation positif dans ces échantillons d'eau montre peut-être la participation de l'hydrolyse acide des roches dans la minéralisation des eaux souterraines de cette partie (nord-ouest) de la région d'étude.

Selon la disposition des points sur le graphique (figure n° 130), 3 groupes d'eau peuvent être différenciés :

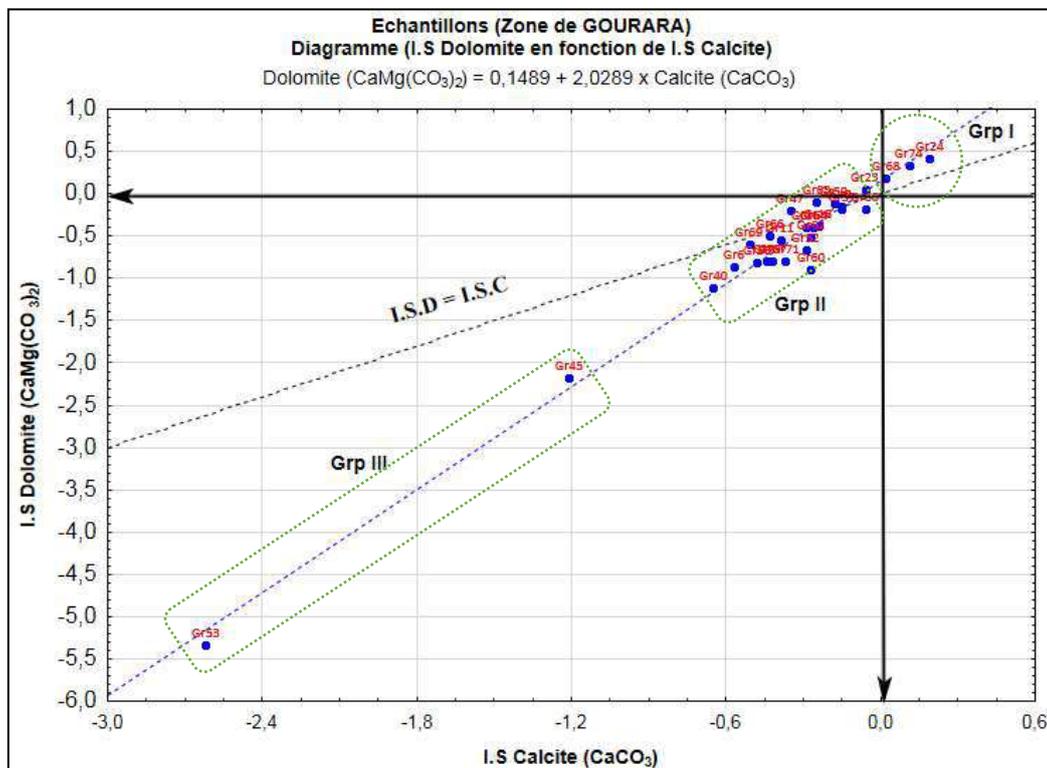


Fig. n° 130 : Diagramme I.S.D = f(I.S.C) des eaux prélevées (Zone du Gourara).

○ **Groupe I** : famille des eaux avec indice de saturation supérieur à 0 (très proches de l'équilibre par rapport aux deux carbonates). Un tel degré de saturation indique un temps de séjour long dans l'aquifère. Elle coïncide avec une zone caractérisée par un gradient hydraulique de l'ordre de $i = 0,61$. Ceci implique une vitesse de circulation des eaux très lente voire nulle.

Ainsi, les 3 échantillons caractérisant ce groupe à s'avoir (Gr24, Gr68 et Gr74), représentent 10% du nombre total de la zone nord (soit 3 sur 29). Ils enregistrent des concentrations en CO₂ très faibles variant entre (5,40 et 9,6) mg/L. Ce qui explique d'après les classes d'agressivités admises par BIEMI 1992, ce groupe se situe dans la classe des eaux d'agressivité faible : de 0 à 50 mg/l de CO₂ dissous, d'où eau récente.

○ **Groupe II** : famille des eaux avec des valeurs d'I.S.C et I.S.D négatifs. On compte 24 échantillons d'eau sur 29 (soit 83% du total). Cette famille correspond aux eaux relativement récentes dont la vitesse de circulation des eaux est lente (gradient hydraulique plus faible que le précédent $i = 0,43$). Les échantillons qui caractérisent cette classe, présentent des concentrations en CO₂ faibles et varient entre (10,67 et 24,5) mg/L.

○ **Groupe III** : d'après le graphique ce groupe correspond à une famille d'eaux jeunes ou récentes, elle est représentée par 2 échantillons (Gr 45 et Gr 53). D'après la coupe lithologique des 2 forages M05-055 et M04-322 (dont le 1^{er} a été réalisé par l'ENTP en 1993) montre que la nappe aquifère est constituée de sables jaunes à grains moyens à grossiers localement argileux surmontés par des calcaires dolomitiques d'où milieu perméable à très perméable (nappe semi-libre), ce qui indique que la vitesse de circulation des eaux est rapide surtout le gradient hydraulique est de ($i = 1,61$).

Ce qui est remarquable pour ces points qui ne représentent que 07% de la totalité, enregistrent les valeurs les plus importantes de concentration en CO₂ dans la région, elles oscillent entre 37,8 et 63,9 mg/L. Ceci indique que pour des valeurs pareilles révèlent que les eaux qui caractérisent ce groupe sont très jeunes par rapport à la disposition des classes d'agressivités (agressivité moyenne : 50 à 100 mg/l de CO₂ dissous ; eau très récente)

b) Zone Centre (Le Touat) :

Dans la partie centrale de la zone d'étude (le Touat) où on compte 43 échantillons, les I.S. de la calcite oscillent entre -0,57 et 0,68 alors que pour les I.S. de la dolomite varient entre -1,03 et 1,4.

D'après le graphique tracé (figure n° 131) les valeurs des indices s'alignent suivant une droite de régression d'équation : $I.S.D = 1,7694 \times I.S.C + 0,0893$ (avec un coefficient de corrélation significatif de $R = 0,9316$).

De même que dans la zone précédente, la quasi-totalité des valeurs présentent une sous-saturation à la fois en calcite ($I.S.C < 0$) et en dolomite ($I.S.D < 0$). Cependant on enregistre 09 échantillons d'eau sur les 43 prélevés dans cette zone (soit 20%) présentent une sursaturation en calcite et en dolomite ($I.S.D > 0$ et $I.S.C > 0$). Il s'agit respectivement des points d'eau : (Tt 2, Tt 03, Tt 79, Tt 81, Tt 90, Tt 109, Tt 110, Tt 148, Tt 152 et Tt 221).

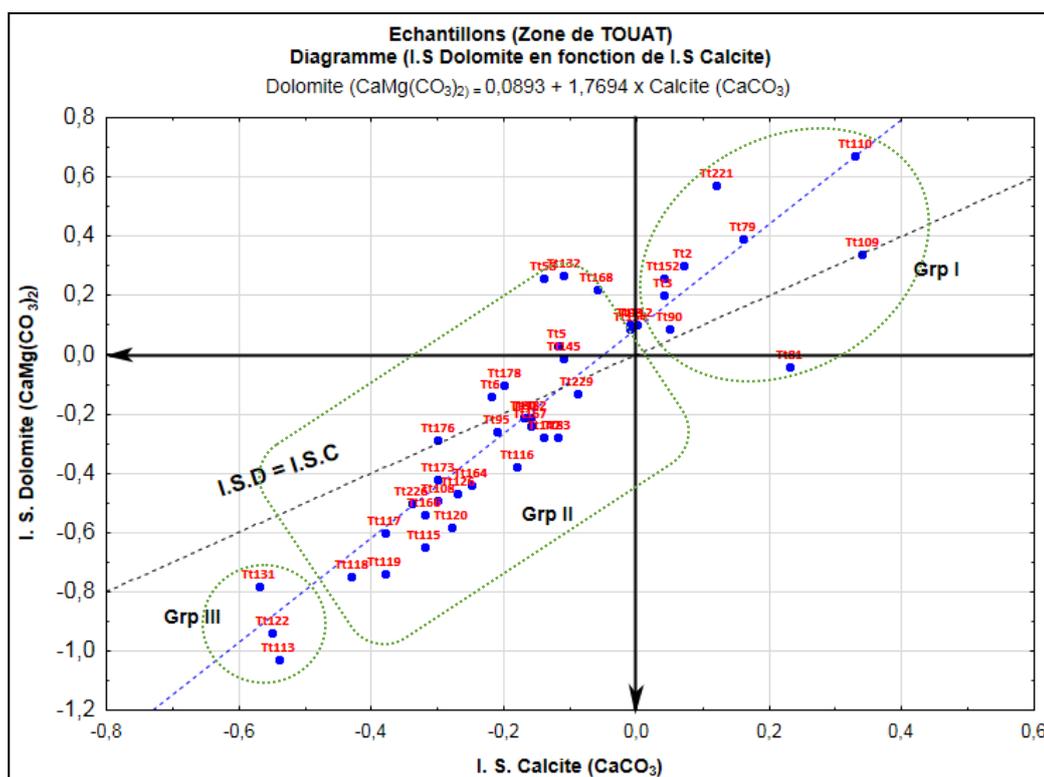


Fig. n° 131 : Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées (Zone du Touat)

De même que la région du nord et d'après ce graphique (figure n° 132), 3 groupes de familles peuvent être ressortis :

- **Groupe I** : famille des eaux plus anciennes que celles du groupe 1 de la région du Gourara. Représentée par 9 points (Tt2, Tt3, Tt79, Tt80, Tt90, Tt109, Tt110, Tt81, Tt152 et Tt221) dont l'indice de saturation est positif et où les concentrations en CO_2 varient entre 0 et 24,20 mg/L.

D'où le temps de séjour eau – roche est long, et ce suite d'une part à la vitesse de circulation qui est lente et d'autre part à la lithologie de l'aquifère dans cette partie de la zone d'étude constituée essentiellement par des grès plus ou moins argileux. Ces points représentent 21% de la totalité des échantillons de la zone centrale.

- **Groupe II et Groupe III** : famille des eaux similaire à celle des mêmes groupes de la région du Gourara (Nord).

c) Zone Sud (Le Tidikelt) :

Dans la partie sud de la zone d'étude (le Tidikelt), les variations réelles de l'indice de saturation de dolomie (I.S.D) en fonction de celui de la calcite (I.S.C) montrent que tous les points représentatifs des échantillons d'eau sont alignés le long d'une droite de régression d'équation : $I.S.D = 0,2276 + 1,8236 \times I.S.C$ (avec un coefficient de corrélation significatif de $R = 0,9734$).

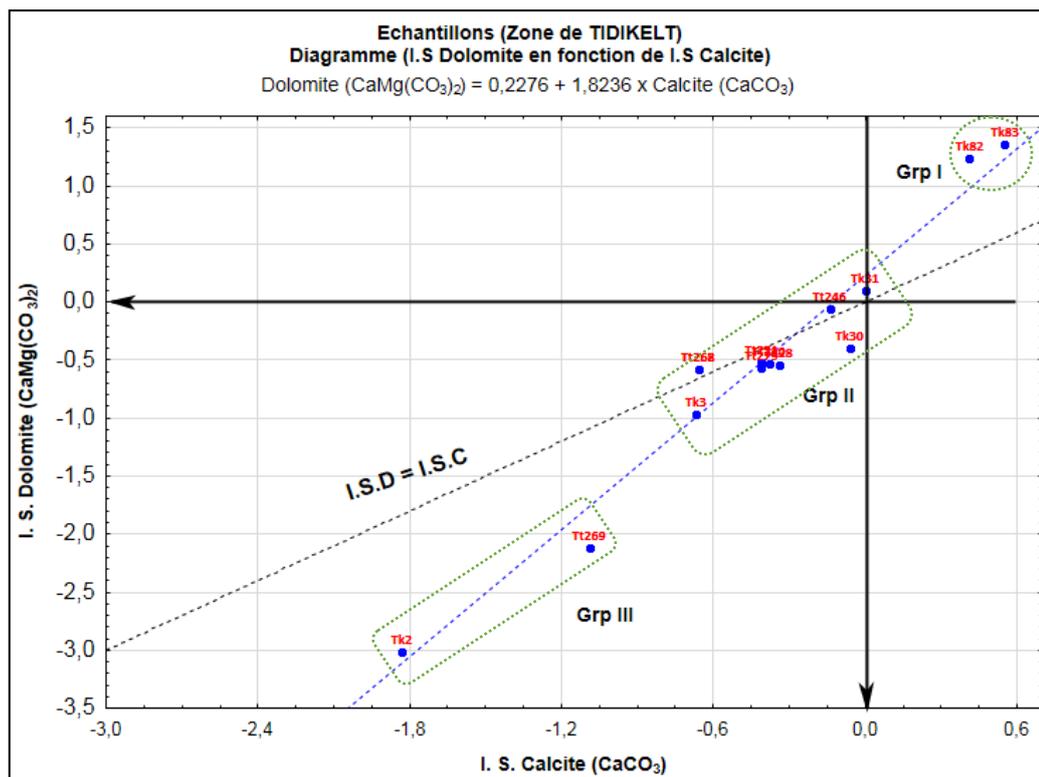


Fig. n° 132 : Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées (Zone du Tidikelt).

D'après les valeurs des indices de saturation des 14 échantillons d'eau, il ressort clairement que d'après le diagramme tracé (Figure n° 132), tous les puits d'eau caractérisant cette région sont similaires à celles des régions citées précédemment. Les I.S présentent une sous-saturation à la fois par rapport à la calcite ($-0,06 < \text{I.S.C} < -1,83$) et la dolomite ($-0,06 < \text{I.S.D} < -3,02$). Toutefois on enregistre 3 échantillons d'eau sur 14 au total, présentent une sursaturation en calcite et en dolomite.

Il s'agit respectivement des points d'eau suivant : Tk31 avec ($\text{I.S.C} = 0$ et $\text{I.S.D} = 0,1$), Tk82 : (0,41 et 1,24), Tk83 : (0,55 et 1,36).

Pareillement aux groupes précédemment définis, on constate qu'avec les 14 points caractérisant la partie sud de la zone d'étude (Le Tidikelt), les 3 groupes qui constituent les eaux de la Famille 3 représentent 16 % des eaux souterraines. Ces eaux caractérisées par des fortes salinités (1100 à 3200 mg/L), avec des teneurs moyennes en CO₂ dissous qui varient entre (1,68 et 23,79) mg/L, toute fois une valeur de 57,88 mg/L (Tt269) a été enregistrée au niveau de la région d'In Ghar (Ouest de In Salah) caractérisée principalement par les foggaras.

En regroupant l'ensemble des 86 échantillons représentatifs des 3 zones distinctes, le diagramme de l'I.S.C en fonction de l'I.S.D. (figure n° 133) montre que 75% de la totalité présentent une sous-saturation à la fois vis-à-vis de la calcite ($\text{I.S.C} < 0$) et de la dolomite ($\text{I.S.D} < 0$) ; toutefois la répartition des valeurs à ressortit la distinction de trois familles d'eau :

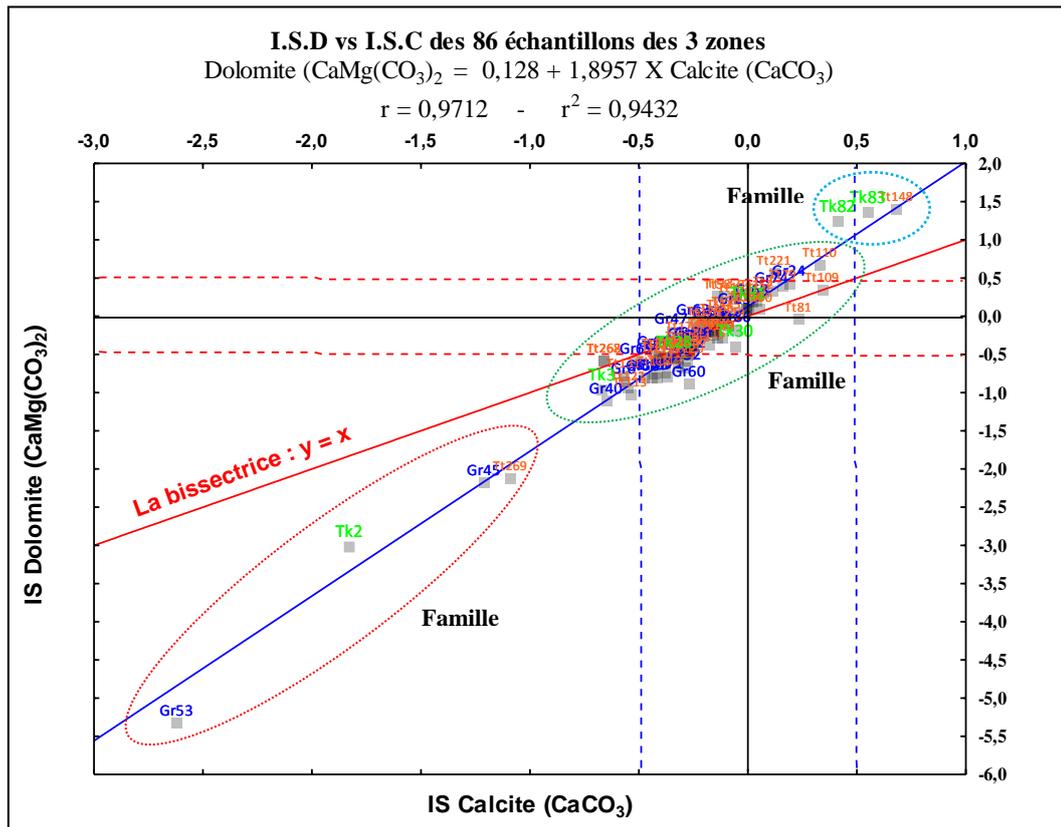


Fig. n° 133 : Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux prélevées des 3 zones.

En effet, trois familles bien individualisées (intervalles ± 0.5) ont été ressorties :

- **Famille n° 1** ($-6 < \text{I.S.D} < -2$) :

Cette famille qui renferme 4 échantillons dont 2 situés au nord de la zone d'étude, représentent les plus faibles I.S.D de l'ensemble ainsi que les valeurs de pH les plus bas (5,56 et 6,6). La sous saturation en dolomite des eaux de cette famille reflète un temps de séjour plus ou moins rapide à moins long et donc d'une vitesse de circulation rapide et qui correspond à la zone de recharge, voir carte suivante (figure n° 131).

- **Famille 2** ($-1 < \text{I.S.D} < 1$) : elle rassemble 3 sous-groupes, les eaux à $\text{I.S.D} < 0$, on compte 61 échantillons sur 86 représentatifs (soit 71% du total) caractérisé par un pH qui varie entre 6,4 et 7,9. Un autre sous-groupe, avec des $\text{I.S.D} > 0$, où on relève 16 échantillons dont le pH oscille entre 7,28 et 9,22. Et un dernier dont les eaux sont en équilibre $\text{I.S.D} = \text{I.S.C}$, indique que ces eaux sont proches de l'état de saturation primaire en carbonate (3 échantillons seulement). En effet, ce qui caractérise les échantillons d'eau de cette famille, ils représentent les teneurs en ions bicarbonatés (HCO_3^-) les plus élevés avec 3,44 méq/L ce qui indique l'existence d'une phase de consommation progressive de CO_2 (entre $1,24 \cdot 10^{-4}$ et $8,78 \cdot 10^{-4}$) suivi d'une libération lente entraînant une saturation progressive du milieu en CaCO_3 qui se traduit par un pH légèrement basique (6,82 à 7,66). Ceci explique que les eaux de cette famille ont un temps de séjour relativement plus long avec des vitesses de circulation des eaux lentes. Ce qui caractérise également cette famille d'eau, elle regroupe des échantillons des 3 zones (zone mixte), ce qui indique qu'il s'agit probablement d'un éventuel mélange d'eau.

- **Famille 3 ($1 < I.S.D < 2$)** : cette famille qui ne regroupe que 3 échantillons (Tk82, Tk83 et Tt148) tous situés au niveau du Tidikelt (au Sud), sont caractérisés par des valeurs d'ISD les plus élevés, où cette évolution est accompagnée d'une augmentation des teneurs en ions bicarbonates allant de 2,66 à 3,15 méq/L avec un pH qui oscille entre 7,87 et 8,15. Cette famille comparée aux 2 précédentes indique que les échantillons d'eau qui leurs caractérisent seraient relativement plus âgés avec des vitesses de circulation très lentes.

Et dans le but de mettre en évidence la variation spatiale du rapport I.S.D versus I.S.C, il a été jugé utile de cartographier cette variation en vue de localiser par zone, les endroits affectés par un temps de séjour lent, très lent et rapide. D'après la carte (figure n° 134) on remarque que la zone occupée par le groupe de famille d'eau à circulation lente à très lente regroupe la plus grande superficie de l'aire de l'étude. Ceci explique que l'eau en contact avec la formation encaissante occupe énormément de temps ce qui influe sur l'échange chimique entre eau et roche (temps de séjour lent). Cependant les zones affectées par une circulation rapide de l'eau de la nappe ne représentent que 5% de la superficie totale, et se situent d'une manière insignifiante au centre mais avec nette apparence au sud (Tidikelt).

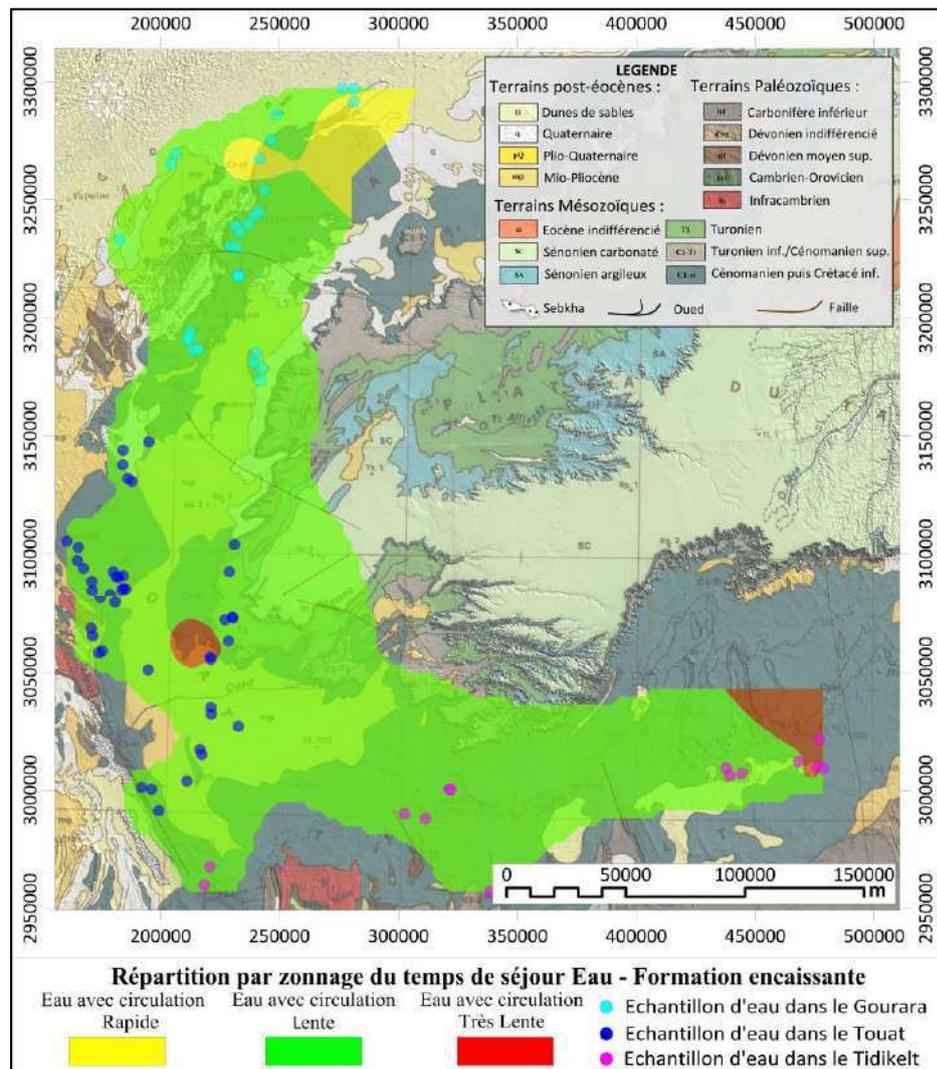


Fig. n° 134 : Répartition spatiale des temps de séjour selon le Diagramme I.S.D = f (I.S.C) des eaux de la zone d'étude.

X.2. APPROCHE ISOTOPIQUE

L'étude de la géochimie isotopique des eaux est indispensable pour toute étude hydrogéochimique, pour mieux assimiler le fonctionnement géochimique d'un aquifère et schématiser la minéralisation, et le mode de recharge ainsi que les mélanges éventuels qui peuvent se produire entre les différents types d'eaux (pluies et nappes). Parmi les isotopes de l'environnement les plus utilisés, les isotopes stables de la molécule d'eau : l'Oxygène (^{18}O) et le Deutérium (^2H). Ces 2 isotopes sont d'excellents traceurs de l'écoulement souterrain (CLARK and FRITZ, 1997). Ils peuvent, dans le cas des zones arides où les recharges s'accomplissent en général de façon localisées, associées au phénomène de mélange entre les eaux de recharge anciennes et récentes et ce, suite à la forte hétérogénéité dans la composition isotopique, apporter des informations utiles sur les différentes phases et les processus impliqués dans la recharge d'une nappe (OUSMANE, 1988 ; DODO et ZUPPI, 1997, 1999 ; FAVREAU, 2000 ; LEDUC et al, 2000 ; GUERO, 2003 ; NGOUNOU Ngatcha et al, 2007).

Les premières analyses isotopiques ayant intéressé les eaux de la nappe du Continental Intercalaire à travers le bassin du SASS remontent à 1969. Mais c'est avec l'étude des ressources en eau du Sahara septentrional (E.R.E.S.S, 1972) menée par TESCO (UNESCO) que l'investigation des caractéristiques des nappes est devenue plus claire. Puis avec le temps ces études se sont développées beaucoup plus par de nombreux auteurs notamment (CONRAD et FONTES, 1972 ; ERESS, 1972b ; GONFIANTINI et al, 1974 ; GUENDOUZ A. et MOULLA S A, 1985 ; ARANYOSSY et MAMOU, 1985 ; SALEM et al, 1996 ; EDMUNDS et al, 2003 ; OSS, 2003a ; MOULLA A S et GUENDOUZ A, al, 2012 ; PETERSON, 2012).

Rappelons qu'en géochimie isotopique, les résultats sont exprimés en différence de ces rapports (R). Où R est le rapport isotopique de l'isotope lourd sur l'isotope léger. Pour l'oxygène de la molécule de l'eau s'écrit : $R = 18\text{O}/16\text{O}$. Cette différence appelée couramment δ de l'échantillon E par rapport à un standard donné S, elle s'exprime le plus souvent en pour mille (‰) et est définie comme suit :

$$\delta_E = \left[\frac{R_E}{R_S} - 1 \right] \cdot 10^3 \quad (15)$$

Au cas où le rapport $\delta_E > 0$ on parlera d'un enrichissement en isotopes lourds ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), par contre si $\delta_E < 0$ ceci indique que l'eau est appauvrie ou affaiblie en isotopes, et par la suite on en déduit par la même occasion les phénomènes auxquels l'eau a été soumise. Dans le cas où la composition isotopique $\delta_{\text{Std}} = 0$ ‰, à ce moment-là on parlera de conditions standards ou étalons. Par définition pour les eaux naturelles, le standard est le "S.M.O.W" (Standard Mean Ocean Water). A l'échelle du globe, les teneurs en Oxygène18 et Deutérium des pluies d'origine océanique sont corrélées entre elles selon une équation linéaire dont les points s'alignent sur une droite de pente 8 appelée droite de CRAIG (1961) ou D.M.M (Droite Météorique Mondiale) ayant comme équation la forme suivante :

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (16)$$

Le diagramme illustrant la position des eaux du C.I. respectivement par rapport à la droite des eaux fossiles et celle Météorique Mondiale (D.M.M), indique que la droite des eaux du C.I se situe en dessous de la D.M.M tout en s'alignant parallèlement à celle-ci.

Cette droite appelée aussi (P.W.L) Paleo Water Line Droite, présente une équation de la forme :

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 5 \quad (17)$$

SONNTAG et al, (1978) d'après la (figure n° 135), suggère que ces eaux n'ont pas subi d'évaporation et qu'elles sont en fait dues à des précipitations d'origine océanique durant le Pléistocène. Un excès en deutérium de +5‰ indique une température plus basse et une humidité atmosphérique supérieure à celle des conditions climatiques actuelles. Ce qui explique que la recharge de cet aquifère (C.I) s'est déroulée sous des conditions plus froides et surtout plus humides.

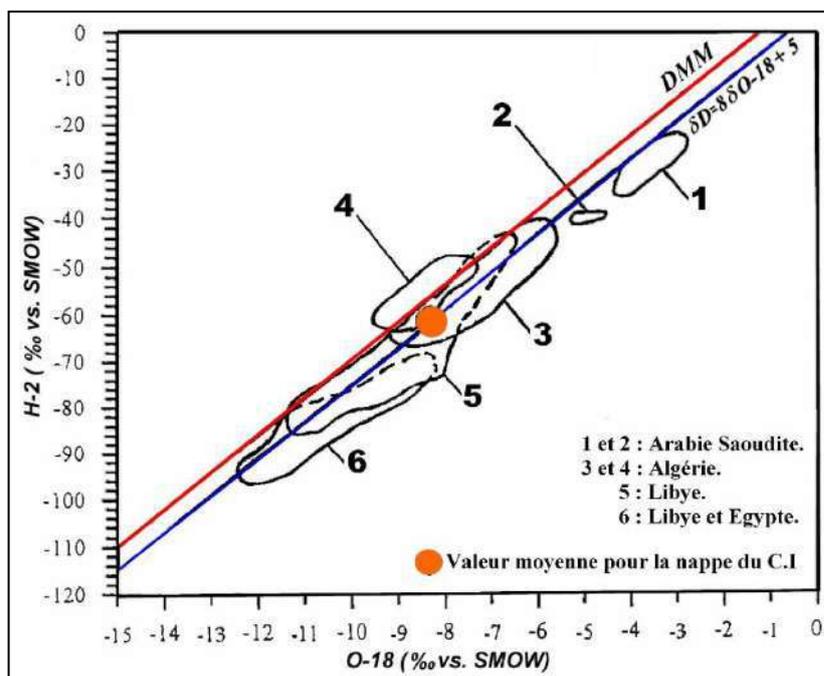


Fig. n° 135 : Diagramme $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux du C.I par rapport à D.M.M & D.E.F (SONNTAG et al, 1978 & IAEA, 1981).

L'eau dans la nature, suite à des processus qui lui rencontre, peut subir de nombreuses interactions avec l'environnement GASCOYNE & KOTZER (1995) résumant tous ces processus par le diagramme suivant (figure n° 136) qui illustre l'influence sur la composition isotopique tels que : l'évaporation de surface, de la condensation, de l'hydratation des silicates, des échanges avec le sulfure d'hydrogène, et le gaz carbonique à basse ou à haute température.

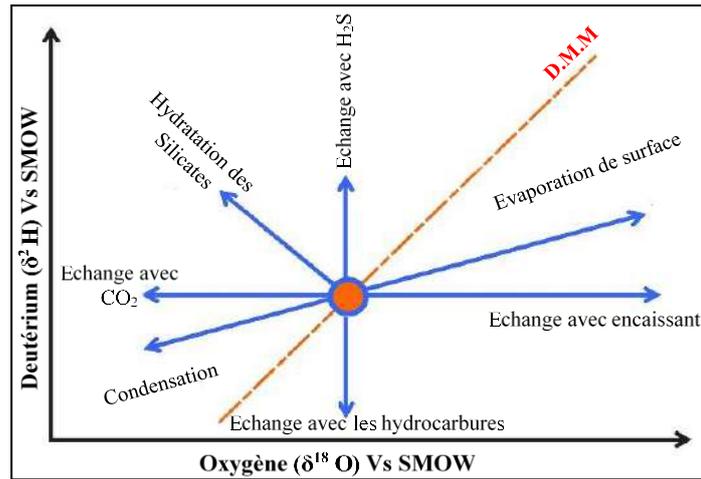


Fig. n° 136 : Les Différents processus naturels pouvant influencer les compositions en $\delta^{18}O$ et en (δ^2H) des eaux souterraines (d'après GASCOYNE & KOTZER, 1995).

L'échantillonnage a touché 25 forages (entre décembre 2018 et janvier 2019) captant la nappe du Continental Intercalaire (figure n° 138), dont 11 forages situés à Gourara (au Nord), 07 forages à Touat (zone intermédiaire) et 07 forages au Tidikelt (au Sud).

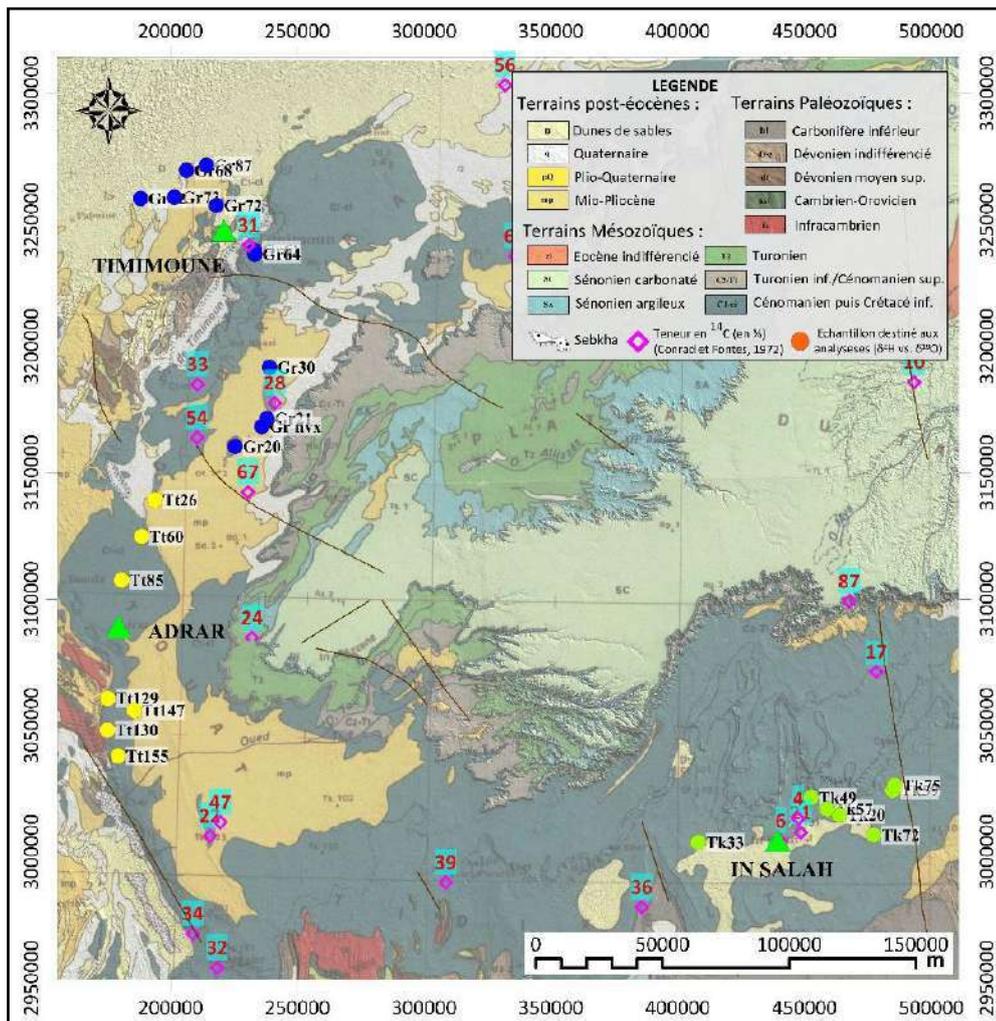


Fig. n° 137 Situation des points d'eau sélectionnés pour analyses isotopiques.

X.2.1. Résultats d'analyses.

Nous rappelons que les analyses ont été réalisées par spectrométrie Laser au sein du laboratoire du Centre Régional des Techniques Nucléaires Algérien (CRNA de Bouzerââ). La composition isotopique de nos échantillons est exprimée (en ‰) par rapport au standard international S.M.O.W (Standard Mean Ocean Water) qui représente la composition moyenne des eaux océaniques.

(Tab. n° 30) Analyse descriptive des 25 échantillons analysés pour les isotopes.

Statistique	Nb. d'Obser.	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance	Ecart-type
$\delta^{18}\text{O}$	25	-9,820	-5,040	-7,180	-7,197	1,623	1,274
$\delta^2\text{H}$	25	-73,600	-49,900	-58,900	-59,584	36,719	6,060

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en ces 2 isotopes exhibent le long de la section visitée des valeurs dont le $\delta E < 0$, ce qui indique que l'eau prélevée est appauvrie en isotopes. Ces mêmes résultats présentent pour l'ensemble des 25 échantillons, une large variation des valeurs qui s'échelonnent entre $-5,04\text{‰}$ et $-9,82\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour l'Oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) alors que pour le Deutérium ($\delta^2\text{H}$) elles varient entre $-49,9\text{‰}$ et $73,6\text{‰}$ Vs S.M.O.W. Pour la région nord au Gourara ces valeurs oscillent entre ($-5,04$ et $-7,4\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour le $\delta^{18}\text{O}$, et $-49,9$ et $-61,6\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour le $\delta^2\text{H}$), pour la région du centre au Touat, varient entre ($-6,6$ et $-7,5\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour le $\delta^{18}\text{O}$, et $-55,9$ et $-67,3\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour le $\delta^2\text{H}$) en fin pour le sud au Tidikelt, elles se situent entre ($-6,98$ et $-9,22\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour le $\delta^{18}\text{O}$, et -57 et $-73,6\text{‰}$ Vs S.M.O.W pour le $\delta^2\text{H}$).

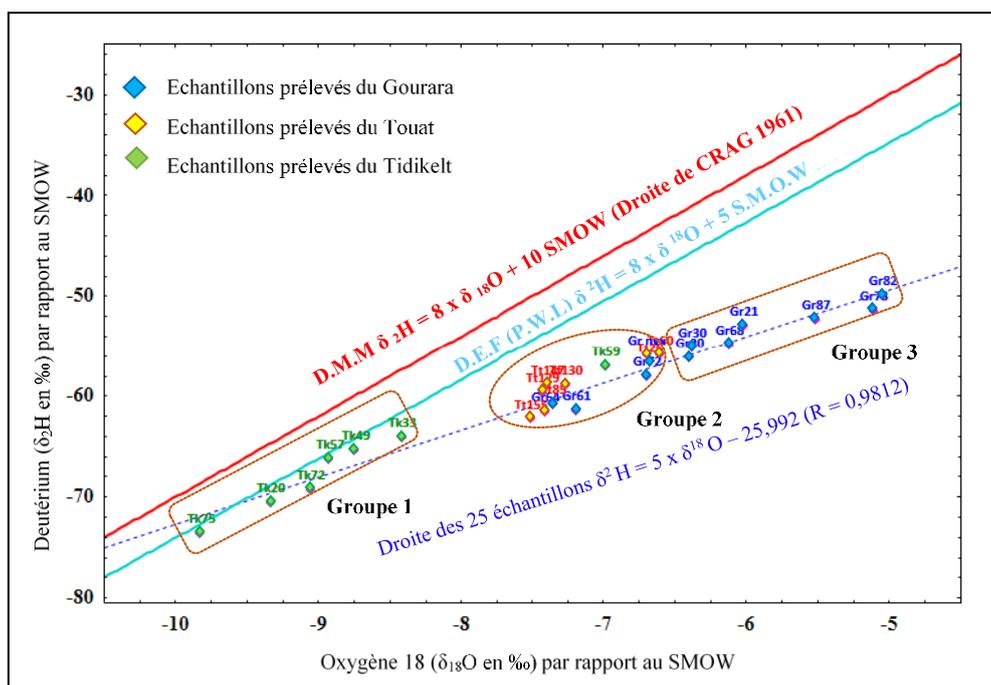


Fig. n° 138 : Tracé de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ pour les eaux du C.I. des 25 forages visités.

Le graphique mettant en évidence l'Oxygène-18 versus Deutérium (figure n° 138), indique une relation significative d'enrichissement des eaux lié au processus d'évaporation c'est le cas des points situés au Gourara et au Touat (au nord et au centre), tandis que celles du sud (Tidikelt) montrent, relativement, un écart flagrant par rapport aux zones précitées avec un extrême appauvrissement en isotopes. Ce phénomène est souvent observé dans les régions arides et semi-arides (SIMPSON et HERCZEG 1991).

On observe également que tous les points prélevés sont placés sur le diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ où on a positionné la droite météorique mondiale (DMM) définie par CRAIG (World Meteoric Water Line avec l'équation : $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ de pente 10) d'une part avec celle des eaux fossiles du Pléistocène définie selon SONATAG. C et al, (1978) par PWL « Paleo Water Line », ou DEF « Droite des Eaux Fossiles » dont l'équation est de la forme : $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 5$ (de pente 5) d'autre part. La totalité des points représentatifs des eaux de la nappe du CI dans la région d'étude forment un groupe homogène et se positionnent en dessous de la D.M.M et de la D.E.F, ceci indique que l'origine des pluies ayant rechargé la nappe de notre zone d'étude est évidemment différente de celle des précipitations actuelles.

Dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (figure n° 138), les points s'organisent autour d'une droite ajustée d'équation : $(5 \times \delta^{18}\text{O} - 25,99)$ avec un coefficient de corrélation (R égal à 0,98). La pente 5 de cette droite inférieure à 8,17 (pente de la D.M.M), révèle un faciès isotopique évaporé qui s'est produite dans des conditions de non équilibre (atmosphère non saturée).

La disposition des points par rapport à la droite météorique mondiale (D.M.M) qui passe bien en-dessous de cette dernière, fait ressortir 3 groupes de familles d'eaux :

- **Groupe 1** : il regroupe la majorité des échantillons se situant dans la partie sud de l'aire de l'étude (le Tidikelt) à s'avoir : Tk20, Tk33, Tk57, Tk49, Tk72 et Tk75. Ces points qui se rapprochent de plus en plus des 2 droites (D.M.M et D.E.F), expliquent que la recharge de la nappe dans cette s'est effectuée pendant un climat plus froid et plus humide que l'actuel. Ceci a été prouvé auparavant par des travaux antérieures (CONRAD, G., FONTES, J. Ch., 1972 ; OSS, 2003a ; MOULLA A S et GUENDOZ A, al. 1985, 2011, 2012) qui ont noté que les eaux du Tidikelt ont une activité en ^{14}C qui varie entre 4 à 40% de carbone moderne (pmC) ce qui contribue à l'alimentation locale de la nappe.

- **Groupe 2** : qui correspond à une zone de mélange où il regroupe à la fois les 7 points de la partie centre (le Touat), quelques points de la partie nord tels que (Gr61, Gr64, Gr72 et Gr.nvx) et 1 point qui fait partie de la zone sud (Tk59). Dans cette partie les eaux marquent un appauvrissement en compositions isotopiques stable qui pourrait être lié au long séjour de ces eaux dans le réservoir et que les teneurs en isotopes enregistrent dans cette partie des valeurs plus élevées que dans le Tidikelt, ceci peut être traduit par l'effet de l'intercommunication entre les différents niveaux aquifères de la nappe albienne accentuée sans doute par la tectonique du fait que cette région est affectée par de nombreuses failles.

Ce qui est remarquable dans le diagramme (figure n° 139), c'est que tous les points se situent loin des 2 droites ce qui témoigne que l'origine de l'eau de cette région provient d'autres sources.

Ceci peut être expliqué par la communication inter-nappes (phréatique et Albien) probablement due par l'effet de retour des eaux d'irrigations.

- **Groupe 3** : qui correspond ce dernier réuni 65% (soit 7 sur 11) de la totalité des échantillons prélevés dans la partie nord de la zone d'étude (le Gourara), à savoir (Gr20, Gr21, Gr30, Gr68, Gr73, Gr83 et Gr87). Les teneurs en isotopes lourds admises par ces points montrent des variables similaires à celles enregistrées dans la partie du Touat. Ceci peut être expliqué que les eaux albiennes dans cette partie de l'aire de l'étude ont subi une recharge récente là où les teneurs en isotopes lourds sont compatibles avec le tracé régional des courbes piézométriques. Selon la carte des zones d'infiltration et de ruissellement du CI (annexe n° 7) élaborée par J. O. PETERSEN (2014, p.329), les zones de recharges sont faiblement minéralisées (en particulier dans l'Atlas) ceci a été démontré par l'absence de tritium thermonucléaire, ce qui indique que les eaux testées datent de plus de 30 ans. Egalement des teneurs significatives en carbone 14 (C^{14}) ont été mesurées proches des affleurements, indiquant une recharge récente.

Conjointement, des compléments d'informations ont été exposés par Baba Sy (2005, p.171), récapitule aussi les calculs de recharge effectués sur le C.I, par le biais des méthodes hydrologiques (par estimation) où les résultats vont de 12 à 25 m^3/s (selon l'O.S.S., 2003) est respectivement 9,4 et 11,3 m^3/s . (selon Baba Sy, 2005).

Par ailleurs selon les données isotopiques sur les eaux de la nappe du C.I (annexe n° 8), dans le Gourara. D'après CONRAD et FONT 1974, les eaux sont nettement plus minéralisées que dans la partie centrale et occidentale de l'erg par suite de l'écoulement de la nappe vers des régions à déficit hygrométriques de plus en plus grand. Le tritium n'a été décelé que dans les eaux du puits de Haiha, par contre les activités en carbone-14 sont toutes supérieures à 50 % de carbone-moderne ce qui indique que nous avons là des eaux récentes. Ces eaux représentent un mélange entre les eaux d'origine septentrionale (sens de l'écoulement) de la zone centrale de l'erg et celles de la faible recharge locale, actuelle.

Il est à signaler que l'ensemble des points d'eau appartenant aux groupes 2 et 3, présentent un aspect évaporé, en indiquant une divergence par rapport à la droite des eaux fossiles D.E.F, tout en témoignant l'enrichissement des eaux de la nappe par les isotopes lourds sous l'influence de l'évaporation atmosphérique en surface, alors que le groupe 1 s'aligne parfaitement avec la droite D.E.F et parallèle à la droite D.M.M, en confirmant de son origine météorique fossile.

X.2.2. Relation entre $\delta^{18}O$ et profondeur des forages.

Comme le montre le graphique suivant (figure n° 139), les endroits de faibles profondeurs (Gourara et Touat), présentent des concentrations élevées en Oxygène ($\delta^{18}O$). Cependant les points d'eau où le niveau de la nappe est profond montrent des faibles teneurs en cet isotope.

Ceci peut être expliqué par le taux élevé d'évaporation au nord de la zone d'étude conjugué à un appauvrissement en Oxygène ($\delta^{18}O$) au Sud. Cela veut dire que la profondeur de la nappe est inversement proportionnelle à la teneur en Oxygène ($\delta^{18}O$) vs S.M.O.W.

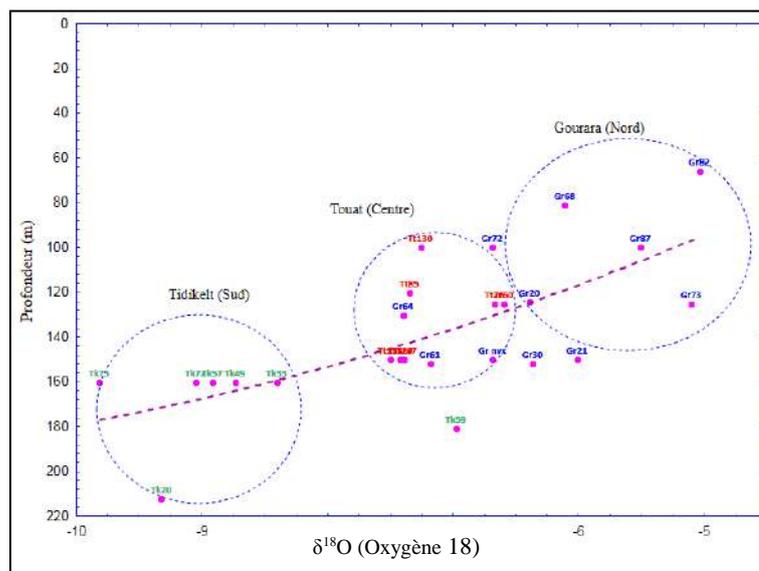


Fig. n° 139 : Tracé de $\delta^{18}\text{O}$ vs Profondeur des 25 forages visités.

X.2.3. Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et conductivité de l'eau échantillonné.

La mise en évidence de la relation entre la conductivité des eaux albiennes et la teneur en isotope stable l'Oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) caractérisant la zone d'étude, nous indique selon le diagramme suivant (figure n° 141), que l'appauvrissement en cet isotope lourd ($\delta^{18}\text{O}$) se fait du Nord vers le Sud et ce selon l'augmentation de la minéralisation soit dans le sens d'écoulement des eaux de la nappe.

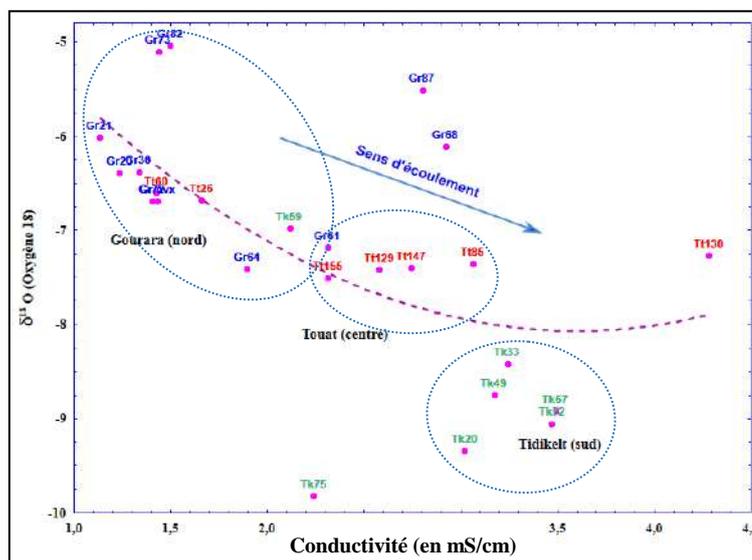


Fig. n° 140 : Tracé de $\delta^{18}\text{O}$ vs Conductivité CE en abscisses des eaux du C.I des 25 forages visités.

X2.4. Comparaison des résultats avec le ^{14}C (CONRAD, 1972).

Dans le but de comparer nos résultats d'isotopes stables (2019) avec les résultats des âges radiométriques au ^{14}C obtenus par CONRAD et FONTES en 1972 (figures : n° 138 & n° 141), et ce dans le cadre du projet E.R.E.S.S 1972 (a) et (b).

Cette étude (CONRAD et FONTES, 1972) montre clairement que la répartition spatiale des âges au ^{14}C des eaux du Continental Intercalaire le long du bassin SASS, est définie comme suit :

Au niveau du Bassin Central, les eaux sont toutes anciennes (âge supérieur à 20000 ans), et les âges évoluent de la périphérie vers le golfe de Gabès vers l'Exutoire Tunisien, où les âges les plus élevés (20000 à 40000 ans) s'observent en Algérie, dans la partie confinée de la nappe autrement dit au niveau du Grand Erg Oriental (CONRAD et FONTES, 1972 ; ERESS, 1972b ; GONFIANTINI et al., 1974 ; ARANYOSSY et MAMOU, 1985 ; GUENDOOUZ, 1985 ; EDMUNDS et al., 2003 ; GUENDOOUZ et al, 2003). Tandis que dans la partie occidentale, les eaux du C.I sont toutes jeunes (âge inférieur à 10000 ans). Tout au long de leur parcours (plus de 500 km) de la zone de recharge (l'Atlas saharien) jusqu'à l'exutoire principale qu'est la vallée du Gourara, du Touat et du Tidikelt, les eaux albiennes continuent de se renouveler, cette observation est en cohérence avec la géologie régionale où l'absence du Crétacé supérieur permet à la nappe du C.I de se mettre dans certains endroits à surface libre.

La confrontation entre les valeurs de concentrations en ^{14}C des eaux du C.I publiés par (CONRAD et FONTES) avec les résultats obtenus à l'aide du diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ (figure n° 142), nous a permis de tirer ce qui suit :

- **Au Gourara** : où les teneurs en ^{14}C de cette région varient entre 56 et 80 %, indiquent que les eaux de cet endroit sont jeunes (puisque l'actuel lui correspond une désintégration totale du ^{14}C égale à 100%).
- **Au Touat** : d'après les valeurs en ^{14}C qui oscillent entre 47% et 67%, indiquent également que les eaux de cette région sont relativement jeunes.
- **Au Tidikelt** : dans l'extrême sud de la zone d'étude, les faibles valeurs en ^{14}C obtenues (entre 4 et 21%), indiquent que les eaux ont une datation très ancienne comparée à ceux des autres régions du bassin occidental. Par ailleurs, cette assertion est également confirmée dans les eaux du CI du bassin oriental.

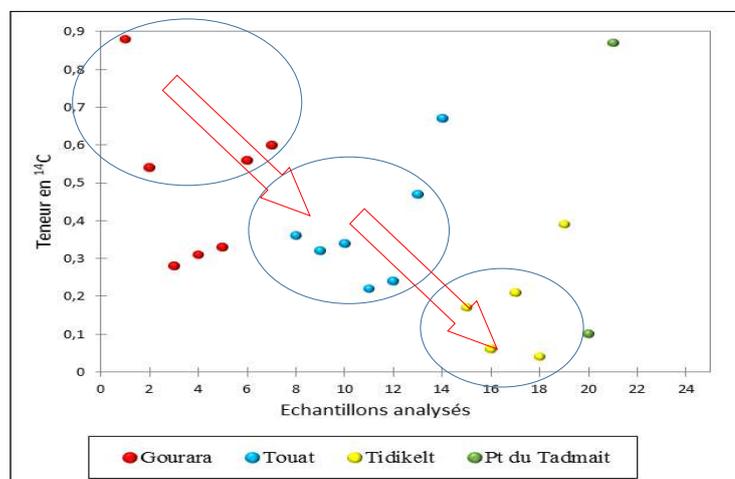


Fig. n° 141 : Variation par régions des teneurs en ^{14}C (pmC) en ordonnées des eaux du C.I (D'après CONRAD et FONTE 1972).

Les résultats du ^{14}C reportés sur le graphique (figure n° 141), coïncident avec ceux obtenus dans le diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$, qu'on en déduit que les valeurs importantes en cet élément se localisent au Nord (Gourara), les moins fortes au centre (Touat) alors que les plus faibles se situent au Sud (Tidikelt).

Et comme par les concentrations en ^{14}C sont inversement proportionnelles à l'âge, d'où les eaux sont plus anciennes au Sud (exutoire) que celles situées au Nord (zone de recharge).

Conclusion de la Partie n° 03

Cette partie, représente la résultante de notre travail de thèse, puisqu'elle consiste d'établir des liens et de vérifier la relation de complémentarité entre les différentes approches employées.

Dans l'approche géologique, le programme RockWorks, nous a permis de déterminer après modélisation et interpolation des données, l'existence d'une anomalie stratigraphique mettant en contact les grès albiens du Crétacé inférieur avec les argiles schisteuses du Dévonien inférieur. Ce contact apparait au Nord-Ouest, au Sud et au Sud-Ouest de la zone d'étude, et même au Sud du Gourara (zone de recharge).

L'approche hydrogéologique, nous a indiqué que la nappe du CI a reconnu, sur une période de 40 ans, un rabattement intense de la surface piézométrique (de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres d'où la disparition de l'artésianisme dans certaines régions notamment au Tidikelt). Cette fluctuation a influencé négativement sur l'hydrodynamisme de la nappe, surtout que la zone d'étude se situe dans un milieu saharien aride conjugué à un facteur évaporant important et d'une recharge très insignifiante. Tous ces facteurs ont influencé sur les caractéristiques chimiques des eaux particulièrement au niveau des endroits d'affleurement de cette nappe aquifère

L'hydrochimie a ressortie les conclusions suivantes :

- La synthèse des teneurs des différents paramètres physico-chimiques testés, révèle que leurs concentrations répondent aux normes algériennes de potabilités, hormis quelques-uns à savoir le $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ pour les cations, et le $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ pour les anions, qui enregistrent des valeurs trop élevées par rapport aux moyennes permises. Sur l'ensemble des 11 paramètres chimiques analysés, seuls les Sulfates, les Chlorures et les Sodiums représentent le pourcentage le plus élevés.

- Les faciès chimiques dominants sont Chloruré Sodique (avec 71%) et Sulfaté Sodique (avec 22%)

- La cartographie spatiale des faciès, montre que le faciès Sulfaté Sodique se localise beaucoup plus au Sud de la zone d'étude qu'au Nord, et ce selon l'axe d'écoulement des eaux du Nord vers le Sud. Alors que celui Chloruré Sodique domine toute l'aire de l'étude. Toute fois le faciès peut changer en fonction de la nature lithologique de la formation aquifère.

L'approche hydrogéochimique a montré une évolution concordante de la conductivité électrique avec les différents paramètres chimiques suivant l'axe d'écoulement principal (carte piézométrique) orienté Nord-Sud, ceci explique que la concentration de ces éléments chimiques est contrôlée par la conductivité.

Les différents profils hydrochimiques élaborés suivant l'axe d'écoulement des eaux de la nappe, ont montré parfois une simultanéité entre les éléments conforme à la lithologie qui caractérise la matrice aquifère des 3 régions. En effet, l'affinité entre le Calcium et les Bicarbonates entre le sodium et le chlorure ainsi qu'entre le magnésium et les sulfates ce qui apparaît nettement sur les profils de ces différents ions et suggère l'origine commune des paires d'anions-cations suscités.

Les profils correspondants à l'évolution hydrogéochimique spatiale des faciès en fonction de la lithologie de la nappe et du sens d'écoulement des eaux, montre pour la région du Gourara, que le faciès début chloruré calcique à l'Ouest pour devenir chloruré sodique à l'Est cependant ce phénomène change au fur et à mesure qu'on se déplaçant vers la région de Touat, où le faciès débute chloruré sodique puis il change pour devenir sulfaté sodique. Puis il change de nouveau quand on se rapproche de la région de Tidikelt pour devenir similaire à celui rencontré au Gourara « chloruré calcique ». Alors que tout à fait au Sud de la zone d'étude où le sens d'écoulement s'effectue selon l'axe orienté Est-Ouest, le faciès chimique dominant est le sulfaté sodique, ceci peut être due à la prédominance des formations argileuses qui affectent les grès perméables de la matrice acquière.

En vue de ressortir l'origine de certains éléments chimiques et éventuellement la source de la minéralisation qui caractérise l'eau de la région, de nombreux diagrammes binaires et rapports caractéristiques ont été élaborés, les principaux résultats enregistrés montrent que les chlorures et les sulfates de l'ensemble des échantillons d'eaux prélevées augmentent simultanément avec la conductivité électrique. Ce qui explique que ces deux éléments en l'occurrence les Sulfates et les Chlorures participent rigoureusement à la minéralisation des eaux dans la zone d'étude. En plus cette conductivité électrique évolue avec la même cadence des 2 paramètres mais avec une tendance accrue avec les chlorures ce qui explique qu'elle est beaucoup plus due aux chlorures qu'aux sulfates.

Il est à mentionner également que la répartition spatiale de certains rapports caractéristiques a confirmés que le phénomène d'interaction eau – roche est en relation directe avec le temps de séjour qu'effectue l'eau au cours de son parcours. Les valeurs de l'Indice d'Échange de Bases (IEB) calculés indiquent que les eaux de la nappe étudiée échangent leurs cations Ca^{2+} et Mg^{2+} contre ceux Na^+ et K^+ de la roche encaissante, en confirmant l'abondance des alcalins des formations traversées au détriment des alcalino-terreux de l'eau.

L'application des méthodes statistiques multivariées basée sur l'emploi de l'ACP sur des échantillons d'eau prélevés, nous a permis de classer les échantillons en 3 groupes distincts, en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisées en passant par une zone de transition ou de mélange. Ce classement se fait du Nord qui coïncide avec la zone d'alimentation (l'amont) vers le Sud qui correspond à l'exutoire (l'aval) et ce suivant l'augmentation de la minéralisation des eaux parallèlement au sens d'écoulement principal des eaux de la nappe.

L'approche isotopique : A l'instar des eaux du CI dans le bassin oriental la totalité des eaux de la même nappe dans bassin occidental sont pauvres en isotopes stables (D et ^{18}O) dans la région d'étude. Les eaux prélevées entre Décembre 2018 et Janvier 2019 des forages visités sont relativement homogènes et se positionnent en dessous de la droite météorique mondiale D.M.M et de la droite des eaux fossiles D.E.F, ce qui confirme que les pluies ayant rechargé la nappe sont évidemment différentes de celles des précipitations actuelles. Néanmoins, les eaux de Touat et Gourara présentent un aspect évaporé témoignant d'un faible apport (eaux météoriques actuelles) des eaux de la nappe par les isotopes lourds sous l'influence de l'évaporation atmosphérique en surface, alors qu'au niveau de Tidikelt, l'ensemble des points s'aligne parfaitement avec la droite DEF confirment de son origine exclusivement météorique fossile. Cette dernière nous a confirmé, selon la droite météorique mondiale, que l'origine des eaux albiennes de la partie occidentale du bassin résulte de la contribution de deux mécanismes ; caractérisant les eaux du Touat et Gourara d'une part et celles du Tidikelt d'autre part.

L'application de la méthode de calcul des indices de qualité des eaux, nous a montré, l'existence de 4 classes principales à s'avoir :

- La classe des eaux d'excellente qualité (située au Nord).
- Une deuxième classe la plus dominante, qui correspond aux eaux de bonne qualité et qui occupe une bonne partie de l'aire de l'étude.
- Une troisième de qualité médiocre.
- Et une dernière correspondante aux eaux classées mauvaises, dont la répartition des indices de qualité ne dépassent pas les 1%.

Ce qu'il faut retenir c'est que l'application de cette méthode est valable pour d'autres types de nappes.



Conclusion Générale
Recommandations et Perspectives

CONCLUSION GENERALE.

Le but de ce travail porte sur l'hydrogéochimie des eaux albiennes dans la partie occidentale du bassin SASS, à partir d'un ensemble d'approches pluridisciplinaires. Notre zone d'étude se situe le long du Touat - Gourara - Tidikelt, ce terme oasisien composé de trois noms correspond à l'un des coins les plus chauds et les plus secs du Sahara algérien. Cette zone célèbre par ses foggaras et qui couvre une superficie de plus de 200.000 Km² kilomètres carrés, chevauche entre 2 wilayas Adrar et Tamanrasset. La grande majorité de ce vaste territoire est occupée par de grands traits morphologiques représentés par des dépressions, des regs, des ergs et plateaux, qui abritent la nappe du CI. Le climat est hyper aride caractérisé, des précipitations rares et très irrégulières entre 12 et 20 mm, des températures élevées peuvent dépasser 45 °C, favorisant ainsi une forte évaporation conjuguée à une faible humidité relative de l'air. Les vents sont relativement courants et leur vitesse est importante d'avril à juillet. De telles conditions arides défavorables n'ont pas empêchés l'existence d'une nappe potentielle qui fait l'objet de cette étude.

La carte des affleurements géologiques de la zone d'étude fait apparaître la présence de 3 formations à savoir :

- Les formations dunaires d'âge Quaternaires qui couvrent la partie Nord.
- Les formations sédimentaires d'âge secondaire et tertiaire, s'étalent sur la totalité de l'aire de l'étude.
- Les formations primaires occupant la partie Ouest et Sud de la zone d'étude.

Par ailleurs des failles et des mega-fractures orientées Nord-Sud sont bien individualisées sur la carte géologique, en outre des contacts anormaux ont été visibles sur les coupes géologiques élaborées mettant ainsi les formations secondaires du crétacé inférieur (grès albiens du C.I) sur celles du primaire (argiles schisteuses du Dévonien).

L'étude hydrogéologique a montré que le C.I est l'aquifère le plus sollicité pour les besoins en eau. Il affleure dans certaines régions mais en totalité, il est couvert par les formations marneuses de céno-manien. Cette nappe constituée par des successions perméables de bancs gréseux, de sables fins et de niveaux argileux, sa profondeur moyenne varie entre 60 et 200m.

L'écoulement des eaux se fait vers les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt qui sont les seules sorties visibles naturelles puisque l'on peut considérer qu'elles se sont substituées aux sources originelles.

La qualité des eaux de cette nappe demeure bonne comparée à celle issue du CI dans la partie orientale du bassin (entre 700 et 1200 mg/L de RS).

Ce qu'on peut tirer comme conclusions peut être cité comme suit :

- La concentration des eaux sous l'effet du climat conjugué à une exploitation intensive a provoqué une concentration des minéraux dissouts qui ont tendance à se précipiter, sans avoir négligé les échanges ioniques qui jouent un rôle important dans le phénomène d'interaction eau-roche encaissante.
- La différenciation entre les faciès chimiques prouve l'hétérogénéité lithologique de la matrice aquifère, où les faciès chimiques dominants sont de type chloruré sodique et sulfaté sodique.
- Le diagramme de Piper, a indiqué une évolution du pôle bicarbonaté au pôle Chloruré-Sulfaté-Sodique ce qui explique l'apport joué par les Sulfates et les Chlorures (anions) et le Sodium et Potassium (pour les cations).
- Les rapports caractéristiques de certains éléments chimiques à titre d'exemple : le $Cl/SO_4 > 1$, indique une dominance du Cl par rapport à SO_4 ce qui confirme la dominance du faciès Chloruré Sodique et du Sulfaté Sodique ceci explique la dominance d'ions évaporitiques par les chlorures par rapport aux ions gypsifères.
- Le rapport $(Ca+Mg+HCO_3)/(Na+Cl+SO_4)$ est inversement proportionnel à la Conductivité, ce qui explique que la Conductivité est beaucoup plus conditionnée par les Chlorures. Le rapport $Na/Mg > 1$, indique la dominance d'ions en Na par rapport à ceux du Mg, ce qui explique la dominance du faciès Sodique.
- Egalement l'évolution proportionnelle entre le Ca et le SO_4 confirme l'origine gypsifère des sulfates issus par dissolution du gypse.
- Les valeurs du rapport Mg/Ca, montrent que les fortes teneurs coïncident avec les endroits où l'écoulement est rapide (Piézométrie), ceci explique que leurs répartitions sont

en relation avec le phénomène d'interaction lié au temps de séjour et ce, d'après le diagramme I.S.D vs I.S.C

- Le diagramme Ca vs SO₄ montre un bon coefficient de corrélation (0,7) ce qui explique le Ca est d'origine non pas carbonaté mais beaucoup plus évaporitique, et ce suite à la dissolution du gypse. En plus d'après SCHOELLER, il indique que l'augmentation du SO₄, entraîne non seulement une augmentation du calcium, mais aussi du magnésium, le gypse renfermant toujours une proportion plus ou moins grande de Mg. D'ailleurs, une fois la saturation de CaSO₄, atteinte, le Ca ne peut plus augmenter. Seul le MgSO₄, peut encore se dissoudre. Ceci a été confirmé par le diagramme Ca vs HCO₃.

- Une corrélation positive indiquée par le diagramme Na vs SO₄, prouve que l'excès en Sodium provient probablement de la dissolution du Sulfate de Sodium ainsi que du phénomène d'change de base.

- Les valeurs calculées avec la formule des Indices d'Echanges de Bases, des 470 échantillons testés d'où 74% d'entre eux contre 26% enregistrent des valeurs négatives, ce qui explique la présence en force de ce phénomène. Ceci a été confirmé par le diagramme (Ca)/(HCO₃+SO₄) vs (Na/Cl).

- Les diagrammes de Gibbs et de Korjinsky utilisés dans cette approche nous ont montrés l'influence de la matrice évaporitique et silicaté sur la minéralisation des eaux de l'aquifère.

- Le 1er diagramme montre l'importance du processus de dissolution/précipitation de l'encaissant, celui d'équilibre fait apparaitre que les eaux de la zone d'étude sont en équilibre dans le domaine de la stabilité de la kaolinite, ce qui explique que le phénomène d'hydrolyse des minéraux enrichirait les solutions en silice dissoute, surtout que les coupes géologiques ont confirmées le contact indirect entre l'albien et les formations primaires. Sans oublier l'importance des argiles dans la matrice cénomaniennne.

- D'après les diagrammes de concentrations, on constate une grande dispersion des échantillons que ce soit pour les anions ou pour les cations, ce qui explique que les solutions qui caractérisent les eaux de la nappe ne sont pas identiques et que les processus géochimiques qui régissent sont très variés.

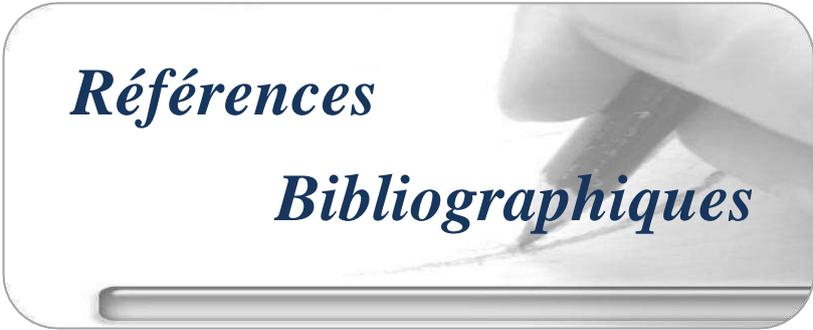
Ce qui est remarquable, tous les points sont sous saturés vis-à-vis des minéraux sulfatés alors que ceux carbonatés tendent vers un équilibre et tournent au tour de la normalisation, la même chose est constatée pour les minéraux silicatés.

Aussi les indices de saturation respectivement de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite augmentent régulièrement avec l'augmentation du pH ce qui explique que l'alcalinité produite par la dissolution des minéraux carbonatés est la cause de cet accroissement.

- Par ailleurs la représentation graphique du rapport entre l'I.S. Dolomite et l'I.S. Calcite souvent utilisée pour comparer les eaux entre elles par rapport à leur temps de séjour. Nous a ressorti 3 classes différentes, une eau récente localisée au Nord de la zone d'étude, une autre relativement récente à ancienne située au centre (entre le Gourara et le Touat) et une dernière située au Sud de la zone caractérisée par des eaux anciennes.

Comme perspectives en vue de mieux développer la présente thématique, nous proposons les points suivants :

- Procéder à l'analyse de la formation aquifère (analyse pétrographique) afin d'approfondir la relation eau-roche.
- L'analyse de la formation aquifère et en particulier le toit Cénomaniens Mener une étude structurale et hydrodynamique pour comprendre le transfert de flux dans la nappe
- Effectuer des analyses chimiques sur le maximum possible d'éléments chimiques sur l'eau et le sol, afin de mener une étude géochimique suffisamment exhaustive.
- Il est également judicieux d'entamer une étude hydrodynamique pointue, dans le but d'étudier de près le mode d'écoulement des flux et comment s'effectue le transfert vertical et horizontal.
- Mener une étude hydrologique approfondie, en vue d'établir un bilan hydrique entre les volumes d'eau entrants (alimentation) et ceux sortants (exploitation). En tenant compte des oueds qui longent la région notamment celles du nord (Gourara) et du sud (Tidikelt), par l'installation de stations hydrométriques automatisées (opération en cours prise en charge par la Direction Régionale Sud-Ouest de l'ANRH à Adrar).



Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- **A. PERON (1883)** : Essai d'une Description géologique de l'Algérie. LIBRAIRE DE L'ACADEMIE DE MEDECINE, Paris – 200 pp.
- **A.G.P Martin, (1908)** : Les oasis sahariennes (Gourara-Touat-Tidikelt), Ed. SNED - Imprimerie Algérienne, 406p. Alger.
- **ABOUBAKER M, (2012)** : Caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique. Exemple de l'aquifère des basaltes de Dalha, sud-ouest de la République de Djibouti. Thèse. Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers. France. 239p.
- **ALLISON G.B., (1998)** : Stables isotopes in soil and water studies. Hydrologie et géochimie isotopique : symposium International la mémoire de Jean-Charles Fontes. ORSTOM, paris, p. 23-38.
- **ANRH - Direction Régionale Sud-Ouest Adrar DRSO. (2008)**, Projet de réalisation d'un piézomètre de 600 ML au niveau du champ de captage d'In Salah.
- **ANRH - Direction Régionale Sud-Est Ouargla DRSE. (2002)**, Inventaire des points des points d'eau et enquête sur les débits extraits de la zone d'In Salah (W de Tamanrasset). 43p.
- **ANRH - Direction Régionale Sud-Ouest Adrar DRSO. (2011)**, Interprétation des données des essais de pompages des forages implantés de long de la zone Touat - Gourara - Tidikelt.
- **ASKRI H. et al, (2001)** : Géologie de l'Algérie, SONATRACH Division Exploration, Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement. 93p.
- **BESBES. M & M. BABSSY, (2003)** : Ages des eaux, recharge et structure hydrodynamique de la nappe du Continental Intercalaire saharien. OSS, Tunis, 12 p.
- **BESBES. M A. LARBES, M. BABSSY et B. MERZOUGUI, (2005)** : Bassin Occidental ; Hydrogéologie et Modèle conceptuel, OSS, Tunis, 64p.
- **BANWART et al., (1994)** : *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*, a Biotite gneiss with mica schist reported in Stromberg. Determined for field site with mineralogy given in column. 1.
- **BEL F. et Demargne F. (1966)** : Etude géologique du continental Intercalaire ; DEMRH. Alger.
- **BITAM. L, Jean Fabre (1996)** : Géodynamique du craton ouest africain central et oriental : Editions du Service géologique de l'Algérie - 311 pages.
- **BUSSON G. (1971)** : Principe, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse. Paris VI, 443 p.

Références Bibliographiques

- **BUSSON G.** (1971) : Le mésozoïque saharien, 1ère et 2ème partie. Essai de synthèse des données des sondages Algéro-tunisiens. C.R.Z.A., série géologie, N° 11, Edition CNRS.
- **BUSSON G.** (1989) : Dynamique sédimentaire de plate-forme épicontinentale : Le Crétacé moyen du Sahara Algéro-tunisien, Editions Technip, pp 125-144.Sc., Paris, 238 p.
- **BRL (1998a)** : Etude du plan directeur général de développement des régions sahariennes. Rapport sur les connaissances d'ensemble. A.N.R.H. Algérie.
- **BRL Ingénierie (2000)** : Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, Volet n° 03, 112.
- **BENHAMZA MESSAOUD, (2013)** : Aperçu hydrogéologique et hydrochimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines « Foggara » dans la zone du Touat (Adrar) – Magister – Université d'Annaba – 161 pp.
- **BOUBALLI. S, (2018)** : Impact des rejets urbains et domestiques sur la qualité des eaux de l'Oued Saf-Saf: Inventaire et mise en évidence d'une contamination par des polluants organiques et leurs conséquences sur l'environnement. Thèse de Doctorat. Université d'Annaba - 216 pp.
- **CASTANY, Gilbert, (1968)** : Auteur. Editeur : Prospection et exploitation des eaux souterraines - Dunod. Paris Date de publication : Format : XXII-718 p. : ill. ; 25 cm. Langue : français.
- **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.
- **CHRISTIANE Causse et Françoise Gasse, 1998.** Hydrologie et Géochimie isotopique. Editions de l'Orstom IFRS pour le Développement en Coopération collection Colloques et Séminaires.
- **CIDU, R., BIDDAU, R. & FANFANI, L., (2009)** : Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). Journal of Geochemical Exploration, 100: 125–132.
- **COIFFAIT, (1992)** : Un bassin post-nappe dans son cadre structurel l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord Orientale).
- **CLARKE, FE, Jones, BF. (1972)** : Importance de la chimie des eaux souterraines dans les performances des puits tubulaires du Sahara septentrional en Algérie et en Tunisie.
- **COOK, Peter G., Herczeg, Andrew L, (2000)** : Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Editors. (Eds.) Free Preview. Buy this book.

Références Bibliographiques

- **CORNET, (1947)** : Ressources artésiennes dans le Touat-Gourara-Tidikelt. Rapport de terrain de 3 parties, SES : 18 p.
- **CORNET A. et all (1959)** : Sur la fosse Sud-Aurésienne. C.R. Somm. Soc. Géol. France, pp 83-84.
- **CORNET A. (1964)** : Introduction à l'hydrogéologie saharienne, Revue de géographie Physique et de géol. Dyn. 2, Vol. VI, Fasc. 1, 5-72.
- **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.
- **DENIS DAKOURE 1. Détails (2013)** : Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du Bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina-Faso – Mali). Thèse d'Etat. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003. Français.
- **DUBIEF J. (1963)** : Le climat du Sahara. Institut de Recherches sahariennes, Algérie, Mémoire hors-série.
- **DUNALD Langmuir. (1997)** : Aqueous Environmental Geochemistry, Imprimerie des Etats Unies d'Amérique, Université de Colorado. 618p.
- **DJIDI K., Bakalowicz M. and Benali A. (2008)** : Mixed, classical and hydrothermal karstification in a carbonate aquifer hydrogeological consequence. The case of the Saida aquifer system, Algeria. C.R. *Geosci.*, 340: 462–473.
- **DJEMAI. R, (2007)** : Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien) — Thèse de Doctorat. Institut National d'Agronomie d'El Harache - Alger – 177 pp.
- **DRAOUI. A.M, (2013)** : Faciès et évolution séquentielle du “Continental Intercalaire” de la cuvette de Sbaâ (Sahara occidental, Algérie) - Université d'Oran, Es- Sénia – 111 pp.
- **DRISSI Abderrazzaq, (2014)** : Intérêt de la section d'Ain El Hadjadj (Plate-forme Saharienne) pour l'étude du passage Cénomaniens-Turonien, thèse Magister, Université Tlemcen.38 p.
- **EDMUNDS, WM, Shand, P, Guendouz, AH, Moulla, AS, Mamou, A, Zouari, K. (1996)** : Caractéristiques de recharge et qualité des eaux souterraines du bassin du Grand Erg oriental : deuxième rapport intérimaire.
- **EDMUNDS, WM, Shand, P, Guendouz, AH, Moulla, AS, Mamou, A, Zouari, K. (1997)** : Caractéristiques de recharge et qualité des eaux souterraines du bassin du Grand Erg oriental : rapport final.
- **EDMUNDS, et al, (2003)** : Renewable and non-renewable groundwater in semi-arid and arid regions : Developments in Water Science Volume 50, 2003, Pages 265-280.

Références Bibliographiques

- **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.
- **FLANDRIN J. (1941)** : Rapport sur l'hydrogéologie du bas Sahara. DEMRH Alger.
- **FONTES J. CH. (1976)** : Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles. Quelques aspects. Thèse de Docteur ès Sciences. Université de Paris VI. Paris.
- **FONTES J. CH, (1976)** : Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. Houille Blanche, N° spécial - pp. 205-221.
- **Frédéric HUNEAU, (2008)** : Etude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (Sud-Est de la France) - Académie d'Aix-Marseille. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. 207 pp.
- **FRED G. Bell. Bell, F. G. (Frederic Gladstone, (1998)** : Environmental geology : principles and practice, English, Book, Illustrated edition: / Get this edition.
- **GAUTIER É.-F., (1908)** : Missions au Sahara par E.-F. Gautier et R. Chudeau, tome 1 : Le Sahara algérien, Paris, A. Colin, 371 p. (96 phototypies hors-texte).
- **Gautier É, (1951)** : Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration. Paris, Payot, 232 p.
- **GEORGES D, (1952)** : Les problèmes de l'eau en Afrique du Nord-Ouest. UNESCO : 225p.
- **GEOPETROLE, (1964)** : Etude analogique de la nappe du Continental Intercalaire saharien pour l'org. de mise en valeur sous-sol saharien. Direction Générale des Ressources en Eau, Tunis.
- **GONFIANTINI R. et Dinçer T. (1975)** : Environnemental isotope hydrologie in the Hodna région, Alegria. Rapport FAO. IAEA- SM – 182/14.
- **GONFIANTINI R., CONRAD G., FONTES J. C., SAUZAY G., PAYNE B. R., (1974)** : Etude isotopique de la nappe du continental intercalaire et de ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional. *I.A.E.A.*, Vienne.
- **GROUPEMENT STUCKY - BG – IBG. (2004)** : Etude d'avant-projet détaillé de l'alimentation en eau potable de la ville de Tamanrasset à partir d'In Salah.
- **G. MICHARD, (1967)** : Faculté des sciences de Paris, St. Maur (France).
- **GIBBS diagram (1970)** : Mechanisms Controlling World Water Chemistry, Science. Author(s): Ronald J. Gibbs. Reviewed work(s). Source: Science, New Series, Vol. 170, No. 3962 (Dec. 4, 1970), pp. ... face waters (5, 6) plot as two diagonals.

Références Bibliographiques

- **HASSAN KERMANDJI, (2009)** : Stratigraphie du Dévonien Inférieur du Plateau du Tidikelt d'In Salah (Sahara Central Algérie) – Communication en es Géologie, INETI 2009, t. 96, pp. 67-82.
- **HENDRY et al., (1989)** : Google Scholar. M.J. Hendry, H.R. Krouse, M.A.Shakur Interpretation of oxygen and sulfur isotopes from dissolved sulfates in tills of southern.
- **HEM, J.D. (1989)** : Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Waters. 3rd Edition, US Geological Survey Water Supply Paper 2254.
- **HAMZAOUI A, BOUHLILA & GUEDIRI (2012)** : Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques. *Geo-Eco-Trop*, 49-62p.
- **JEAN-CHARLES FONTES. (1998)** : Hydrogéologie et hydrochimie isotopique, ÉDITEURS SCIENTIFIQUES Christiane Causse, Française Gasse, URA 723, CNRS-Université de Paris-Sud, 320p.
- **JACQUES, G. and Telouk, P. (2008)** : Isotope Geochemistry - The copper isotope geochemistry of rivers and the oceans. *Earth and Planetary Vlastelic, I., Koga, K., Chauvel* Stable boron isotope fractionation between dissolved $\mathbf{B(OH)_3}$ and $\mathbf{B(OH)_4}$ - pp 37.
- **JADE ORIANE PETERSEN (2013)** : Traçage isotopique (^{36}Cl , ^4He , ^{234}U) et modélisation hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional - Application à la recharge Quaternaire du Continental Intercalaire, Thèse de Doctorat. Aix Marseille Université. 329 pp.
- **JANARDHANA Raju, (2016)** : Prevalence of fluorosis in the fluoride enriched groundwater in semi-arid parts of eastern India: Geochemistry and health implications. *Quaternary Intern-Journal*, 443.
- **KARIM A, TRABELSI R, ZOUARI K & ABIDI B. (2009)** : Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire (Sud Tunisien), *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 54(3) Juin 2009.
- **KAZI TANI, N. (1986)** : Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine : le domaine intraplaque nord-algérien, approche méga séquentielle.
- **KILLIAN C. et Féher D., (1938)** : La vie dans les régions désertiques nord-tropicales de l'Ancien Monde, Paris, Paul Le Chevalier.
- **KHODJAOUI A, (2008)** : Dévonien inférieur du bassin de Reggane (Sahara occidentale) algérien): sédimentologie, bio-stratigraphie, stratigraphie séquentielle, mémoire magister, université de Boumerdès, 130p.
- **KOMOR and Anderson, (1993)** : Concepts and Applications in Environmental Geochemistry These $\delta^{15}\text{N}$ values indicate multiple sources when compared to the data from; the positive correlation of the $\delta^{15}\text{N}$ with sodium.

Références Bibliographiques

- **KOUAME Xavier KOUASSI, (2011)** : Mémoire Online, Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau de la région centre : cas du département de Didiévi en Côte d'Ivoire.
- **LAYACHI GOUIDIA (2008)** : Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien), 160p.
- **LEFRANC, J. Ph. & Guiraud, R., (1990)** : The Continental Intercalair of northwestern Sahara and its equivalents in the neighbouring regions, *J. Afr. Earth Sci.*, v. 10, No. 1/2, pp. 27–77.
- **MARCEL LARNAUDE, (1946)** : La géographie du Sahara et l'institut de recherches sahariennes *Annales de géographie* 300 pp. 294-299.
- **MAMOU A., (1990)** : Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du Sud tunisien. Thèse Doctorat ès-Sciences. Univ. Paris Sud, 426p.
- **MARIE-Solange Oga Yéï, (1998)** : Thèse, Ressources des eaux souterraines dans la région du grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : approche hydrochimique et isotopique. Univ. Paris 11.
- **MELISSA LENCZEWSKI, Drewes et al., Godfrey et al., 2007; Langford et al (2003)** : Water quality and physical hydrogeology of the Amarapura township, Mandalay, Myanmar.
- **MOULLA, AS, Guendouz, A, Reghis, Z, Chaid, Z, Larbes, M, Quarezki, S, Rezka, A. (2005)** : Un aperçu de quelques résultats d'hydrologie isotopique importants obtenus au Sahara algérien.
- **MAITI and Subba Rao, (2006)** : Interpretation of groundwater quality using principal component analysis from Anantapur district, Andhra Pradesh, India - *Environmental Geosciences*, v. 13, no. 4 (December 2006), pp. 239–259.
- **M.THANGARAJAN, (2007)**: Groundwater: Resource evaluation, augmentation, contamination, restoration, modeling and management. Springer - pp.334-356
- **MOUSSAOUI. A, (2011)** : Systèmes hydrauliques traditionnels dans le Gourara et le Touat, AREA-ED Brazakh, 62p.
- **M. S. ABDOUBABAYE, (2012)** : Evaluation des ressources en eau souterraines dans le bassin de LIPTAKO – Niger. Académie d'Aix-Marseille - Thèse de Doctorat. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse – 238 pp.
- **MOULLA, A, Guendouz, A, Cherchali, M-H, Chaid, Z, Ouarezki, S, (2012)** : Updated geochemical and isotopic data from the Continental Intercalair aquifer in the Great Occidental Erg sub-basin (south-western Algeria).
- **MECHLEM, K., (2014)** : Legal Aspects of the North-Western Sahara Aquifer System.

Références Bibliographiques

- **MECHLEM, K, (2014)** : Strengthening Regional Consultation and Coordination of the SASS Aquifer.
- **N. Stambuk-Giljanovic, (1999)** :“Water Quality Evaluation by Index in Dalmatia,” Water Research, Vol. 33, No. 16, pp. 3423-3440.
- **NEZLI, I .E. (2004)**. Mécanismes d’acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l’Oued M’Ya (Ouargla). Mémoire de Magister en Géologie, Université d’Annaba, Algérie 100p.
- **NEZLI I E, (2009)** : Techniques de mesures et d’analyses, Thèse de Doctorat Approche hydrogéochimique à l’étude des Aquifères de la basse vallée de l’Oued M’Ya (Ouargla).
- **NEDJARI. A, et all, (2018)** : Le Gourara – Timimoune : De la synecclise hercynienne atypique aux Continentaux, 2019 - Petrophysical Analysis in Reservoir Characterization – Application in the Triassic Hamra Gas Field, Algeria.
- **NIOX Gustave, (1921)** : Algérie. Géographie physique, par le commandant Niox. Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France – 470 pp.
- **O.S.S (2003)** : Système aquifère du Sahara septentrional. Hydrogéologie, Vol 1, 156p.
- **O.S.S (2004)** : Système aquifère du Sahara septentrional, Modèle Mathématique, Volume 4, 271p.
- **OULD BABA SY M. (2005)** Recharge et paléo recharge du Système Aquifère du Sahara Sptentrional. Thèse Doctorat en Géologie, Univ. Tunis, El Manar.
- **P. SIMONNEAU et G. AUBERT, (1963)** : L’UTILISATION DES EAUX SALEES AU SAHARA - Service des & études scientifiques appliquées à l’Hydraulique, Alger - Section de Pédologie, O.R.S.T.O.M (Frame) – 15 pp.
- **PACHECO, A. J. and S. A. CABRERA, (1997)** : Ground water contamination by nitrates in the Yucatán peninsula, Mexico. *Hydrogeol. J.*, 2, 47-53.
- **Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., (1999)** : User’s Guide to PHREEQC (Version 2) – A Computer Program for Speciation, Reaction Path, 1D-Transport, and Inverse Geochemical Calculations.
- **PIERRE D. Glynn · L. Niel Plummer, (2005)**: “Geochemistry and the Understanding of Groundwater Systems,” *Hydrogeology Journal*, Vol. 13, No. 1, 2005, pp. 263-287.
- **PIERRE PENANT, (2015)** : Caractérisation des sources de nitrate dans les aquifères cristallins du Centre du Bénin Travail de fin d’étude présenté en vue de l’obtention du grade de master « Ingénieur Civil des mines et géologue à finalité approfondie » - Université de Liège – 97 pp.
- **RENE MAUNIER, (1951)** : Géologie du Gourara et Touat, Voyage et exploration, 364 p.

Références Bibliographiques

- **ROBERT MAURICE WINN, (1973)** : Hydrogeology of the Albian formation, Algeria. Texas Tech University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of PHD – 157 pp.
- **RICHTER, B.C. and Kreitler C.W.,(1993)** : Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization, 258 p.
- **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.
- **RAVINDRA K, V.K. GARG, (2007)**: «Hydro-chemical survey of groundwater of Hisar City and assessment of de fluoridation methods used in India». Environ Monit Assess, N°132,
- **RODIER.J et all (2009)** : L'Analyse de l'eau, 8^e Edition, Dunod, Paris, 1383p.
- **SAVORNIN J. (1945)** : Le plus grand appareil hydraulique du Sahara (nappe albienne). Trav. Inst. Rech. Sahara, IV.
- **SAVORNIN, J, Britt, S. (1947)** : Géologie et grands barrages en Algérie.
- **SCHOELLER H, (1967)** : Geochemistry of Groundwater. An international guide for research and practice, UNESCO, Chapter 15.
- **SJ VAN der Hoven, DK Solomon, (2005)** : GR Moline - Natural spatial and temporal variations in groundwater chemistry in fractured, sedimentary rocks: scale and implications for solute transport Applied geochemistry, – Elsevier. Natural tracers (major ions, $\delta^{18}O$, and O₂).
- **S. VISWANATHAN, (2008)** : Geochemistry of Dykes around Arabail, Western Dharwar Craton and Petro genetic Interferences: By VS. Hegde and V.C. Chavadi. Jour. Geol. Soc. India, v.71, 2008, pp.651-660.
- **SEKKOUM, K, Talhi, MF, Cheriti, A, Bourmita, Y, Belboukhari, N, Boulenouar, N, Taleb, S. (2012)** : L'eau au Sahara Algérien : impact environnemental et sanitaire. L'eau au Sahara algérien : impact sur l'environnement et la santé.
- **TAKHRIST D., (1990)** : Document et travaux centre géologique et géophysique – CNRS – 211 pp.
- **TRAVY Y. (1994)** : The evolution of alkaline groundwater in the continental Intercalair aquifer Of Irhazer Plain, Niger. Water resources research. Vol. 30, n°1, pp 45-61.
- **UNESCO (1972)**. Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional. Nappe du Continental Intercalaire, Projet. ERESS. Rapport final.
- **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.

Références Bibliographiques

- **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.
- **UNESCO (1983)**: Actualisation de l'étude des ressources en eau du Sahara Septentrional.- Rapport final. 490 p
- **VINAS & Joukov, DEMRH Sous-Direction des ressources en sol (1974)** : Etude agro pédologique du Touat – Gourara. Plaquette 1.
- **Yousfi M. (1984)** : Etude géochimique et isotopique de l'évaporation et de l'infiltration en zone non saturée sous climat aride : Beni Abbes. Algérie. 229 p.
- **WALTHER HERMANN Nernst (25 June 1864 – 18 November 1941)** : Formule de Thermodynamique et cinétique électrochimique expérimentale.

DOCUMENTS AYANT SERVIS EN CARTOGRAPHIE

- **BUSSON, (1967)** : Carte Géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien et ses abords. (Planche 2 – 1/2000.000^e – Muséum National d'histoire naturelle).
- **UTEXAS, (1952)** : Cartes topographiques NG-31 et NH – 31, d'Adrar – Timimoune et In Salah.
- **J. F. LEFRANC - CRZA, (1972)** : Carte topographique NH 31 – SO (Timimoune), 1/500.000^e.
- **J. F. LEFRANC - CRZA, (1972)** : Carte topographique NG30 – SO (Adrar), 1/500.000^e.
- **J. F. LEFRANC - CRZA, (1972)**: Carte topographique NG30 – SO (In Salah), 1/500.000^e.
- **J. F. LEFRANC - CRZA, (1972)** : Carte topographique NH31 – SO (Karzaz), 1/500.000^e.
- **IGN, France (1974)** : Fond topographique (Carte International du Monde – Djanet, NG 32 - 1/1000.000^e).
- **IGN, France (1974)** : Fond topographique (Carte International du Monde – Hassi Messaoud, NH - 32 1/1000.000^e).
- **IGN, France (1974)** : Fond topographique (Carte International du Monde – In Salah, NG 31 - 1/1000.000^e).

Références Bibliographiques

- **IGN, France (1974)** : Fond topographique (Carte International du Monde – Ouargla, NH 31 - 1/1000.000°).
- **IGN, France (1974)** : Fond topographique (Carte International du Monde – Sfax, NI 32 - 1/1000.000°).



ANNEXES

Annexes

- Annexe n° 01 : Paramètres physiques des 478 forages d'eau inventoriés en 2012 (liste partielle).

Ord	Groupe	Région	BIRH	Désignation	Z_(m)	Date Fin	Usage	Prof (m)	Epsr (m)	N-Sq (m)	N-Pz (m)
1	Gr1	GOURARA	N003-00033	BOUDA3 (SIDIMOUSSA)	249	1988	IRR	103		6,91	242,09
2	Gr2	GOURARA	N004-00171	DELDOUL II	260	1986	AEP	150	76,65	4,65	255,35
3	Gr3	GOURARA	N004-00274	OULED RACHED	253	1991	AEP	150	92,75	7,75	245,25
4	Gr4	GOURARA	N004-00302	IGOSTENE	234	1991	AEP	110	57	3	231
5	Gr5	GOURARA	N004-00509	ZAOUIT SIDI ABDELAH 17	302	1995	IRR	150	129	15	287
6	Gr6	GOURARA	N004-00290	TIBERGHAMINE 2	303	1984	AEP	150	110,2	8,95	294,05
7	Gr7	GOURARA	N004-00299	DELDOUL 07	310	1994	AEP	150	95,1	36,54	273,46
8	Gr8	GOURARA	N004-00304	OULED ABDESSAMED	307	1987	IRR	150	89,4	12,11	294,89
9	Gr9	GOURARA	N004-00279	Z,S ABDELLAH 02	303	1987	IRR	150	102,23	12,23	290,77
10	Gr10	GOURARA	N004-00312	SAHLA METARFA	263	1993	AEP	112	78,24	6,24	256,76
101	Tt10	TOUAT	N004-00237	KASDI2	286	1993	IRR	160	115	10	276
102	Tt11	TOUAT	N004-00263	KASDI3	283	1993	IRR	150	112,16	10,16	272,84
103	Tt12	TOUAT	N004-00264	KASDI4	284	1993	IRR	150	100,44	10,44	273,56
104	Tt13	TOUAT	N004-00265	KASDI5	284	1995	IRR	150	111,65	9,65	274,35
105	Tt14	TOUAT	N004-00262	KASDI6	282	1995	IRR	150		9,8	272,2
106	Tt15	TOUAT	N004-00495	KASDI8	295	1995	IRR	150		9,11	285,89
107	Tt16	TOUAT	N004-00271	KASDI9	295	1995	IRR	150	131,3	11,3	283,7
108	Tt17	TOUAT	N004-00494	KASDI10	294	1995	IRR	150		13,1	280,9
109	Tt18	TOUAT	N004-00213	TOUATI 1	278	1979	IRR	220	-	-	-
110	Tt19	TOUAT	N004-00224	TOUATI 3	274	1990	IRR	140	110,5	10,5	263,5
401	Tk23	TIDIKELT	X001-64	FG 06	268	1987	IRR	200	268	0	268
402	Tk24	TIDIKELT	O007-00069	FS 100	275	1981	IRR	180	275	0	275

Prof : Profondeur - Epsr : Epaisseur - N-Sq : Niveau Statique - N-Pz : Niveau Piézométrique.

Annexes

Ord	Groupe	Région	BIRH	Désignation	Z_(m)	Date_Fin	Usage	Prof (m)	Epsr (m)	N-Sq (m)	N-Pz (m)
403	Tk25	TIDIKELT	O007-00064	Sahla tahtania	274	1968	IRR	163,45	274	0	274
404	Tk26	TIDIKELT	O007-00062	FS 21	259	1968	IRR	162,68	259	0	259
405	Tk27	TIDIKELT	X001-65	FS 28	273	1980	MXT	160	273	0	273
406	Tk28	TIDIKELT	X001-66	FS 41	269	1985	IRR	170	269	1,04	267,96
407	Tk29	TIDIKELT	X001-67	FS 62	284	1987	IRR	160	284		
408	Tk30	TIDIKELT	X001-68	FS 75	273	1989	IRR	160	273	0	273
409	Tk31	TIDIKELT	X001-69	FZ 30	289	2000	AEP	160	289		
410	Tk32	TIDIKELT	X001-70	FS 49	268	1987	IRR	160	268	0	268

- Annexe n° 02 : Paramètres Chimiques exprimés en mg/L des 478 forages d'eau inventoriés en 2012 (liste partielle).

Ord	Groupe	Région	Désignation	Ca	Na	K	HCO ₃	Cl	RS	Cd	pH	NO ₃	PO ₄	SiO ₂	F	Dur.	Alk.	NO ₂
1	Gr1	GOURARA	BOUDA3 (SIDIMOUSSA)	85	290	27	134	360	1390	2070	7,91	28	0		0,66	41	11	0
2	Gr2	GOURARA	DELDOUL II	78	280	22	146	380	1340	1970	7,35	33	0	7,35	1,14	40	12	0
3	Gr3	GOURARA	OULED RACHED	83	250	20	137	320	1350	1990	7,45	30	0	8		47	11	0
4	Gr4	GOURARA	IGOSTENE	83	370	30	168	470	1625	2240	7,29	43	0	11	0,83	42	14	0
5	Gr5	GOURARA	ZAOUIT SIDI ABDELAH 17	61	140	10	149	191	822	1220	7,1	30	0		1,54	33	12	0
6	Gr6	GOURARA	TIBERGHAMINE 2	48	140	10	79	210	735	1120	7,32	26	0	12,5	1,5	28	7	0
7	Gr7	GOURARA	DELDOUL 07	65	235	16	122	280	1200	1690	7,2	40	0	10,75		37	10	0
8	Gr8	GOURARA	OULED ABDESSAMED	73	401	34	131	490	1700	2510	7,39	44	0		0,91	39	11	0
9	Gr9	GOURARA	Z,S ABDELLAH 02	52	136	9,5	107	180	800	1150	7,43	30	0			28	9	0
10	Gr10	GOURARA	SAHLA METARFA	65	300	26,5	186	400	1400	2030	7,39	28	0		0,69	37	15	0
101	Tt10	TOUAT	KASDI2	89	100	15,5	134	250	920	1380	7,15	55	0			40	11	0
102	Tt11	TOUAT	KASDI3	43	100	10	135	180	650	873	8,34	49	0			4	0	0

Annexes

Ord	Groupe	Région	Désignation	Ca	Na	K	HCO ₃	Cl	RS	Cd	pH	NO ₃	PO ₄	SiO ₂	F	Dur.	Alk.	NO ₂
105	Tt14	TOUAT	KASDI6	39	130	21	46	205	700	1130	8,48	2	0	10,5	-	21	4	0
103	Tt12	TOUAT	KASDI4	17	135	14	48	210	600	950	9,06	-	0	10	-	13	2	0,045
104	Tt13	TOUAT	KASDI5	47	122	16,4	21	210	790	1140	8,17	-	0	-	-	22	2	0
106	Tt15	TOUAT	KASDI8	39	130	21	46	205	700	1130	8,48	2	0	-	0,82	21	4	0
107	Tt16	TOUAT	KASDI9	170	270	20	92	400	1600	2370	7,23	39	0	10,5	-	54	8	0
108	Tt17	TOUAT	KASDI10	91	105	13	137	245	900	1310	7,19	45	0	-	-	40	11	0
109	Tt18	TOUAT	TOUATI 1	91	133	13	122	160	950	1475	7,82	43	0	-	-	43	10	0,04
110	Tt19	TOUAT	TOUATI 3	30	270	21	128	300	1120	1710	7,84	40	0	10,55	-	22	11	0,1
401	Tk23	TIDIKELT	FG 06	151	390	28	128	630	2100	2900	7,28	21	0,001	68	-	65	11	0,009
402	Tk24	TIDIKELT	FS 100	208	348	33	125	505	2330	3100	7,28	39	0,001	34,5	-	96	10	0,005
403	Tk25	TIDIKELT	Sahla tahtania	174	380	38	146	580	2300	3000	7,28	73	0,001	28	-	84	12	0,001
404	Tk26	TIDIKELT	FS 21	226	470	43	140	700	2750	3400	7,28	35	0,0001	35	-	98	12	0,026
405	Tk27	TIDIKELT	FS 28	190	400	42	140	680	2400	3000	7,28	25	0,001	33,9	-	87	12	0,005
406	Tk28	TIDIKELT	FS 41	209	500	52	58	750	3000	3750	7,28	68	0,001	26	0,65	108	5	0,16
407	Tk29	TIDIKELT	FS 62	183	398	36	143	760	2230	3200	7,28	12	0,001	-	0,67	90	12	0,001
408	Tk30	TIDIKELT	FS 75	161	335	24	119	330	1800	2500	7,28	73	0,001	14	0,66	57	10	0,001
409	Tk31	TIDIKELT	FZ 30	132	230	13,5	159	340	1610	2370	7,28	47	0,001	35,3	0,63	65	13	0,14
410	Tk32	TIDIKELT	FS 49	227	360	31	153	600	2300	3000	7,31	20	0,001	32,4	-	95	13	0,01

- Annexe n° 03 : Valeurs des Indices de Qualité des Eaux Souterraines (liste partielle).

Ord	Groupe	X Utm	Y Utm	Prof. (m)	I.Q.E.S	Ord	Zone	X Utm	Y Utm	Prof. (m)	I.Q.E.S
1	Gr1	168402,82	3204550,85	103	81,4	107	Tt16	198141,29	3131064,5	150	89,3
2	Gr2	213541,55	3186479,65	150	77,9	108	Tt17	201318,93	3128543,42	150	61,8

Annexes

Ord	Groupe	X Utm	Y Utm	Prof. (m)	I.Q.E.S
3	Gr1	168402,82	-	103	81,4
4	Gr2	213541,55	-	150	77,9
5	Gr5	232917,89	-	150	53,4
6	Gr6	242395,89	-	150	48,5
7	Gr7	216944,11	-	150	71,6
8	Gr8	212326,88	-	150	96,9
9	Gr9	239210,19	-	150	50,8
10	Gr10	214019,03	-	112	79,3
100	Tt9	196514,09	-	180	67,5
101	Tt10	197492,99	-	160	65,8
102	Tt11	198864,6	-	150	52,3
105	Tt14	202390,49	-	150	44,3
106	Tt15	197273,1	-	150	44,3

Ord	Zone	X Utm	Y Utm	Prof. (m)	I.Q.E.S
109	Tt18	-	3129419,08	220	64,6
110	Tt19	-	3129282,85	140	71,7
400	Tk22	-	2994465,48	192	59,3
401	Tk23	-	3004667,16	200	102,8
402	Tk24	-	3018002,44	180	121,8
403	Tk25	-	3017619,56	163,45	128,9
404	Tk26	-	3009542,17	162,68	137,4
405	Tk27	-	3015803,57	160	118,4
406	Tk28	-	3006243,77	170	155,1
407	Tk29	-	3009448,78	160	110,2
408	Tk30	-	3012261,25	160	108,1
409	Tk31	-	3009159,66	160	90,6
410	Tk32	-	3015303,41	160	112,4

- Annexe n° 04 : Valeurs des Indices de Saturations des minéraux prépondérants (liste partielle des 86 Echantillons).

Groupe	Log Ca ²⁺	Log Mg ⁺²	Log Na ⁺	Log K ⁺	Log Cl ⁻	Log SO ₄ ⁻²	Log HCO ₃	Log CO ₃	Log F ⁻	IS (CaSO ₄)	IS (NaCl)	IS (CaSO ₄)	IS (CaCO ₃)	IS (CaCO ₃)	IS (Sépiolite)	IS (Talc)	IS (Fluorine)	IS (CaF ₂)
Gr2	-3,034	-3,006	-1,983	-3,322	-2,037	-2,812	-2,614	-5,593	-4,320	-1,57	-5,59	-1,26	-0,29	-0,15	-0,14	-4,1	-1,96	-1,07
Gr4	-3,029	-3,011	-1,866	-3,193	-1,950	-2,765	-2,557	-5,596	-4,463	-1,52	-5,39	-1,21	-0,29	-0,15	-0,14	-3,83	-1,63	-1,35
Gr6	-3,172	-3,032	-2,270	-3,649	-2,281	-3,059	-2,865	-5,874	-4,184	-1,95	-6,12	-1,65	-0,71	-0,57	-0,86	-3,59	-1,3	-0,94
Gr11	-3,141	-3,036	-2,059	-3,488	-2,232	-2,755	-2,707	-5,726	-4,577	-1,62	-5,86	-1,31	-0,53	-0,39	-0,54	-3,79	-1,57	-1,7
Gr16	-3,125	-3,063	-2,202	-3,162	-2,209	-2,996	-2,680	-5,649	-4,493	-1,84	-5,98	-1,54	-0,44	-0,29	-0,4	-3,88	-1,68	-1,51
Gr18	-3,025	-3,052	-2,279	-3,220	-2,235	-3,069	-2,659	-5,698	-4,492	-1,82	-6,08	-1,51	-0,39	-0,24	-0,38	-4,05	-1,95	-1,41
Gr23	-3,106	-3,065	-1,888	-3,202	-2,065	-2,604	-2,743	-5,431	-4,414	-1,43	-5,52	-1,13	-0,2	-0,06	0,06	-2,37	0,52	-1,33

Annexes

Groupe	Log Ca ²⁺	Log Mg ⁺²	Log Na ⁺	Log K ⁺	Log Cl ⁻	Log SO ₄ ⁻²	Log HCO ₃	Log CO ₃	Log F ⁻	IS (CaSO ₄)	IS (CaCO ₃)	IS (CaCO ₃)	IS (Sépiolite)	IS (Talc)	IS (Fluorine)	IS (CaF ₂)
Gr24	-2,945	-3,028	-1,961	-3,156	-1,977	-2,773	-2,639	-5,348	-4,382	-1,14	0,04	0,19	0,42	-2	1,03	-1,11
Gr40	-3,118	-3,051	-2,461	-3,551	-2,426	-2,973	-2,696	-6,014	-4,454	-1,51	-0,8	-0,65	-1,11	-3,95	-1,99	-1,43
Gr45	-3,184	-3,080	-2,302	-3,445	-2,302	-3,017	-2,795	-6,504	-4,465	-1,62	-1,35	-1,21	-2,18	-6,33	-5,44	-1,51
Tt2	-3,035	-3,005	-2,275	-3,451	-2,307	-2,886	-2,578	-5,377	-4,611	-1,34	-0,08	0,07	0,3	-5,86	-4,18	-1,66
Tt3	-2,968	-2,984	-2,233	-3,511	-2,222	-2,891	-2,601	-5,469	-4,446	-1,28	-0,1	0,04	0,2	-3,16	-0,62	-1,26
Tt5	-2,968	-2,826	-2,161	-3,472	-2,153	-2,839	-2,633	-5,632	-4,273	-1,22	-0,26	-0,12	0,03	-3,41	-0,99	-0,91
Tt6	-3,044	-2,877	-2,263	-3,468	-2,222	-2,859	-2,656	-5,655	-4,623	-1,32	-0,36	-0,22	-0,14	-3,46	-1,08	-1,69
Tt58	-3,601	-3,183	-2,034	-3,492	-2,047	-3,476	-3,042	-5,021	-4,527	-2,49	-0,29	-0,14	0,26	-0,21	3,85	-2,06
Tt79	-2,823	-2,875	-1,808	-3,098	-1,816	-2,768	-2,571	-5,500	-4,496	-1,01	0,01	0,16	0,39	-2,55	0,19	-1,21
Tt80	-2,983	-2,983	-2,128	-3,322	-2,139	-2,736	-2,618	-5,667	-4,489	-1,14	-0,31	-0,17	-0,21	-3,65	-1,39	-1,36
Tt81	-2,719	-3,360	-1,836	-3,067	-1,851	-2,609	-2,638	-5,527	-4,582	-0,75	0,09	0,23	-0,04	-3,91	-1,76	-1,28
Tt83	-2,824	-2,983	-1,918	-3,196	-1,952	-2,728	-2,632	-5,781	-4,614	-0,97	-0,27	-0,12	-0,28	-3,8	-1,67	-1,45
Tt90	-2,476	-2,614	-1,772	-3,180	-1,636	-2,583	-2,614	-5,953	-4,764	-0,48	-0,09	0,05	0,09	-4,05	-2	-1,4
Tk269	-2,890	-2,963	-2,019	-3,415	-2,041	-2,671	-2,789	-6,678	-4,132	-0,98	-1,23	-1,09	-2,12	-7,54	-7,14	-0,55
Tk271	-2,944	-2,785	-1,863	-2,925	-1,865	-2,600	-2,764	-5,943	-4,608	-0,96	-0,55	-0,41	-0,52	-4,19	-2,14	-1,56
Tk279	-2,961	-2,838	-1,907	-3,228	-1,945	-2,650	-2,670	-5,929	-4,559	-1,03	-0,55	-0,41	-0,57	-4,06	-2,03	-1,48
Tk2	-3,293	-2,790	-1,783	-2,909	-1,697	-3,006	-3,405	-7,014	-4,577	-1,72	-1,97	-1,83	-3,02	-4,43	-2,75	-1,85
Tk3	-2,826	-2,589	-1,760	-3,036	-1,651	-2,670	-2,803	-6,322	-4,628	-0,91	-0,81	-0,67	-0,97	-4,53	-2,75	-1,48
Tk28	-2,727	-2,709	-1,755	-2,978	-1,766	-2,458	-3,047	-6,096	-4,614	-0,6	-0,49	-0,34	-0,54	-2,13	0,72	-1,36
Tk30	-2,784	-3,183	-1,914	-3,296	-2,106	-2,543	-2,712	-5,761	-4,556	-0,75	-0,21	-0,06	-0,4	-3,9	-1,79	-1,3
Tk31	-2,850	-2,868	-2,075	-3,542	-2,091	-2,627	-2,586	-5,635	-4,592	-0,9	-0,15	0	0,1	-2,06	0,76	-1,43
Tk82	-3,232	-2,944	-1,982	-3,321	-2,025	-2,846	-2,636	-4,835	-4,528	-1,5	0,27	0,41	1,24	-0,48	3,41	-1,69
Tk83	-3,170	-3,030	-1,971	-3,589	-2,127	-2,633	-2,584	-4,763	-4,479	-1,22	0,4	0,55	1,36	-1,48	2,06	-1,53

Annexes

- Annexe n° 05 : Valeurs des Facteurs de Concentrations des éléments chimiques (liste partielle des 86 Echantillons).

Groupe	Log FC	Log m Cl	Log m Ca	Log m Mg	Log m Na	Log m K	Log m SO4	Log m Si	Log m F	Log pCO₂
Gr2	0,68	-1,97	-2,71	-2,67	-1,91	-3,25	-2,45	-3,91	-4,22	-3,61
Gr4	0,77	-1,88	-2,68	-2,65	-1,79	-3,11	-2,39	-3,74	-4,36	-3,49
Gr6	0,42	-2,23	-2,92	-2,77	-2,22	-3,59	-2,76	-3,68	-4,10	-3,83
Gr11	0,48	-2,17	-2,82	-2,70	-1,99	-3,42	-2,42	-3,73	-4,49	-3,67
Gr16	0,49	-2,15	-2,85	-2,78	-2,14	-3,10	-2,69	-3,81	-4,41	-3,69
Gr18	0,47	-2,18	-2,76	-2,78	-2,22	-3,16	-2,75	-3,78	-4,41	-3,60
Gr23	0,65	-1,99	-2,74	-2,68	-1,81	-3,12	-2,24	-3,68	-4,31	-4,03
Gr24	0,74	-1,91	-2,61	-2,68	-1,89	-3,08	-2,40	-3,55	-4,28	-3,91
Gr40	0,27	-2,37	-2,86	-2,78	-2,41	-3,49	-2,68	-3,38	-4,38	-3,35
Gr45	0,40	-2,25	-2,93	-2,82	-2,25	-3,39	-2,73	-3,63	-4,39	-3,06
Tt2	0,40	-2,25	-2,75	-2,70	-2,22	-3,39	-2,56	-4,74	-4,52	-3,76
Tt3	0,49	-2,16	-2,67	-2,68	-2,17	-3,45	-2,55	-3,76	-4,35	-3,71
Tt5	0,56	-2,09	-2,65	-2,50	-2,09	-3,40	-2,46	-3,77	-4,16	-3,61
Tt6	0,49	-2,16	-2,75	-2,57	-2,20	-3,40	-2,51	-3,76	-4,52	-3,63
Tt58	0,65	-1,99	-3,37	-2,95	-1,98	-3,44	-3,20	-3,81	-4,45	-5,04
Tt79	0,91	-1,74	-2,46	-2,50	-1,73	-3,01	-2,34	-3,55	-4,37	-3,62
Tt80	0,57	-2,07	-2,65	-2,64	-2,06	-3,25	-2,38	-3,68	-4,39	-3,55
Tt81	0,88	-1,77	-2,33	-2,95	-1,75	-2,98	-2,20	-3,73	-4,49	-3,73
Tt83	0,77	-1,88	-2,47	-2,61	-1,84	-3,11	-2,33	-3,60	-4,51	-3,46
Tt90	1,11	-1,54	-2,03	-2,16	-1,67	-3,07	-2,03	-3,68	-4,60	-3,25
Tk269	0,68	-1,97	-2,54	-2,59	-1,95	-3,34	-2,29	-3,88	-4,03	-2,88
Tk271	0,86	-1,78	-2,55	-2,38	-1,78	-2,84	-2,17	-3,82	-4,48	-3,56
Tk279	0,78	-1,87	-2,59	-2,45	-1,83	-3,14	-2,24	-3,64	-4,44	-3,39

Annexes

- Annexe n° 06 : Les moyennes mensuelles interannuelles des Températures et Précipitations des 3 stations météo. (Source ONM).

- Station d'Adrar :

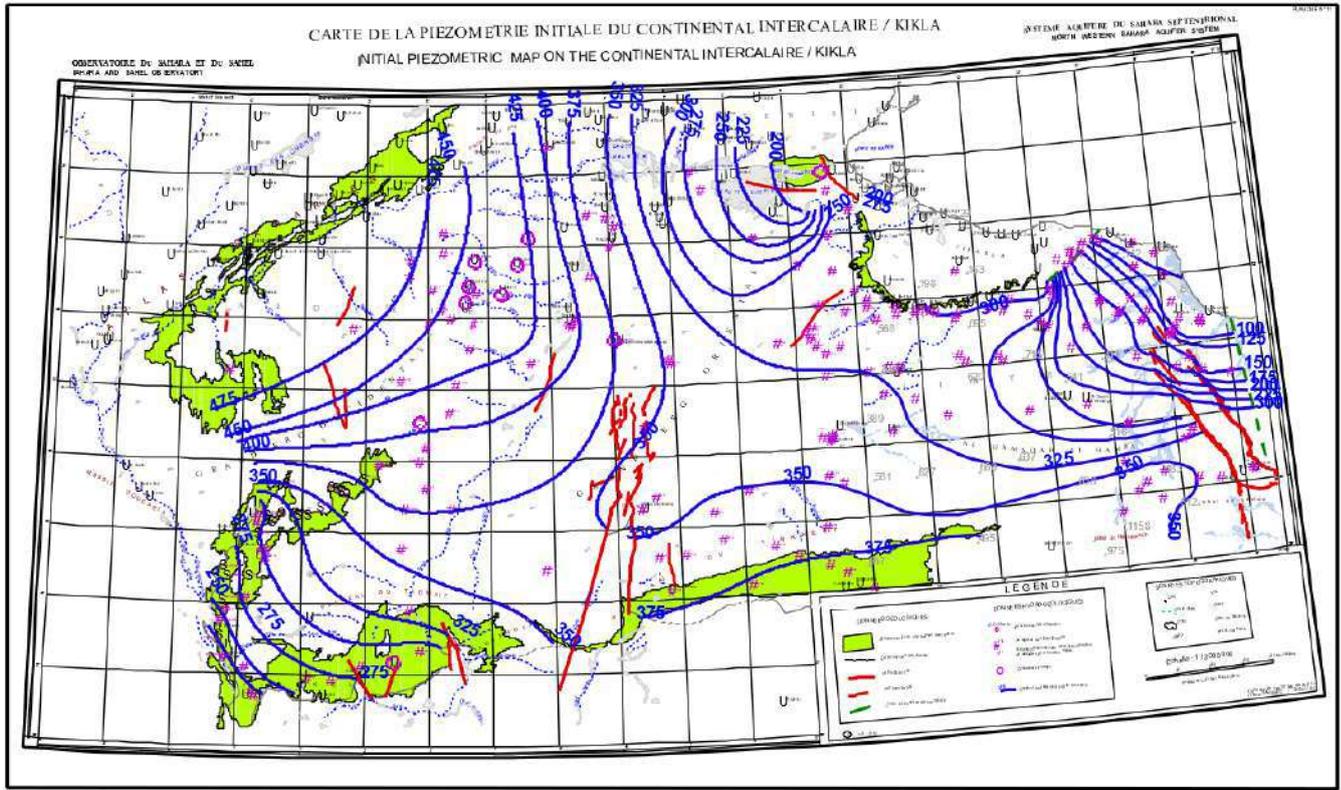
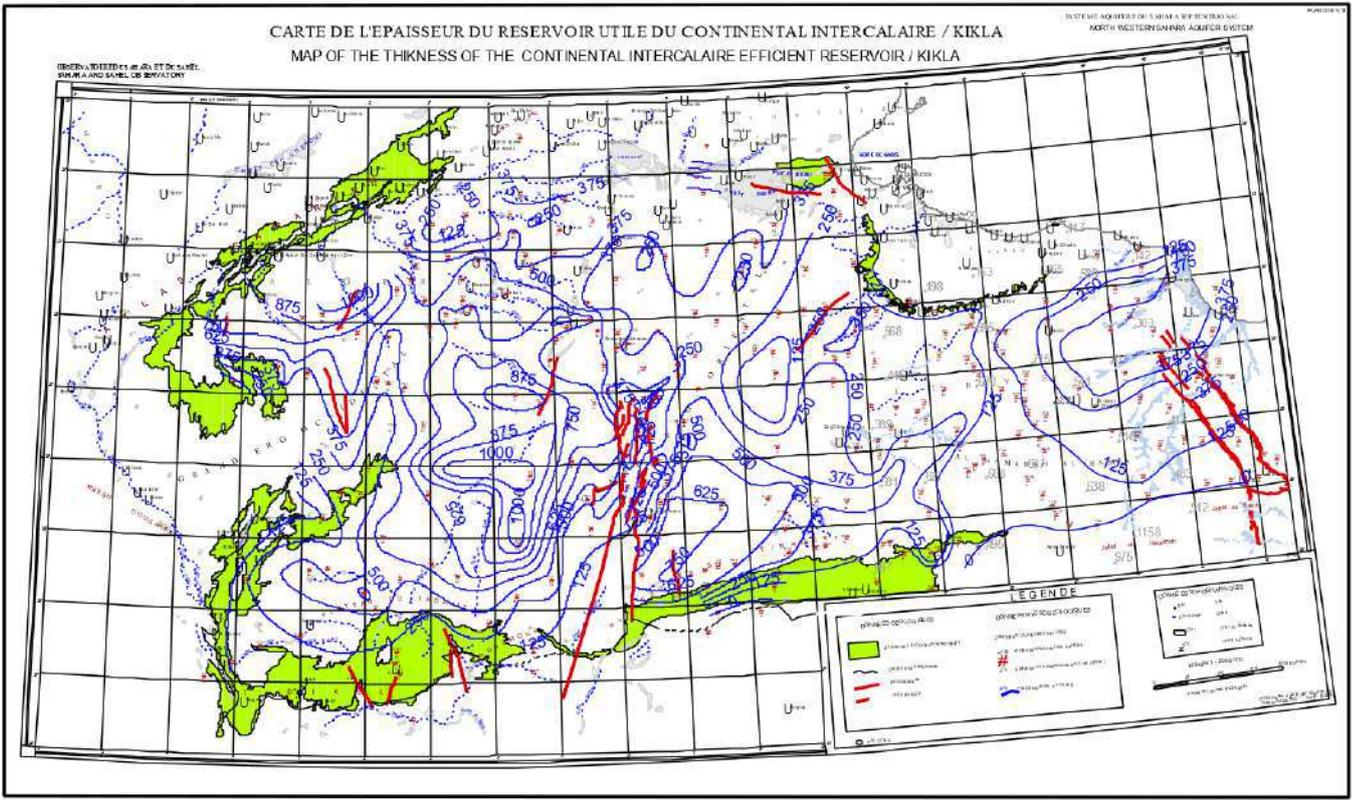
2010/2014	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aou.
T moy (°C)	33,48	27,62	19,5	14	13,4	14,9	20,88	25,52	30,8	35,46	38,92	37,38
PP (mm)	0,712	0,306	0,508	0	4,014	0,204	2,236	0	0,152	0,408	0,204	0,202

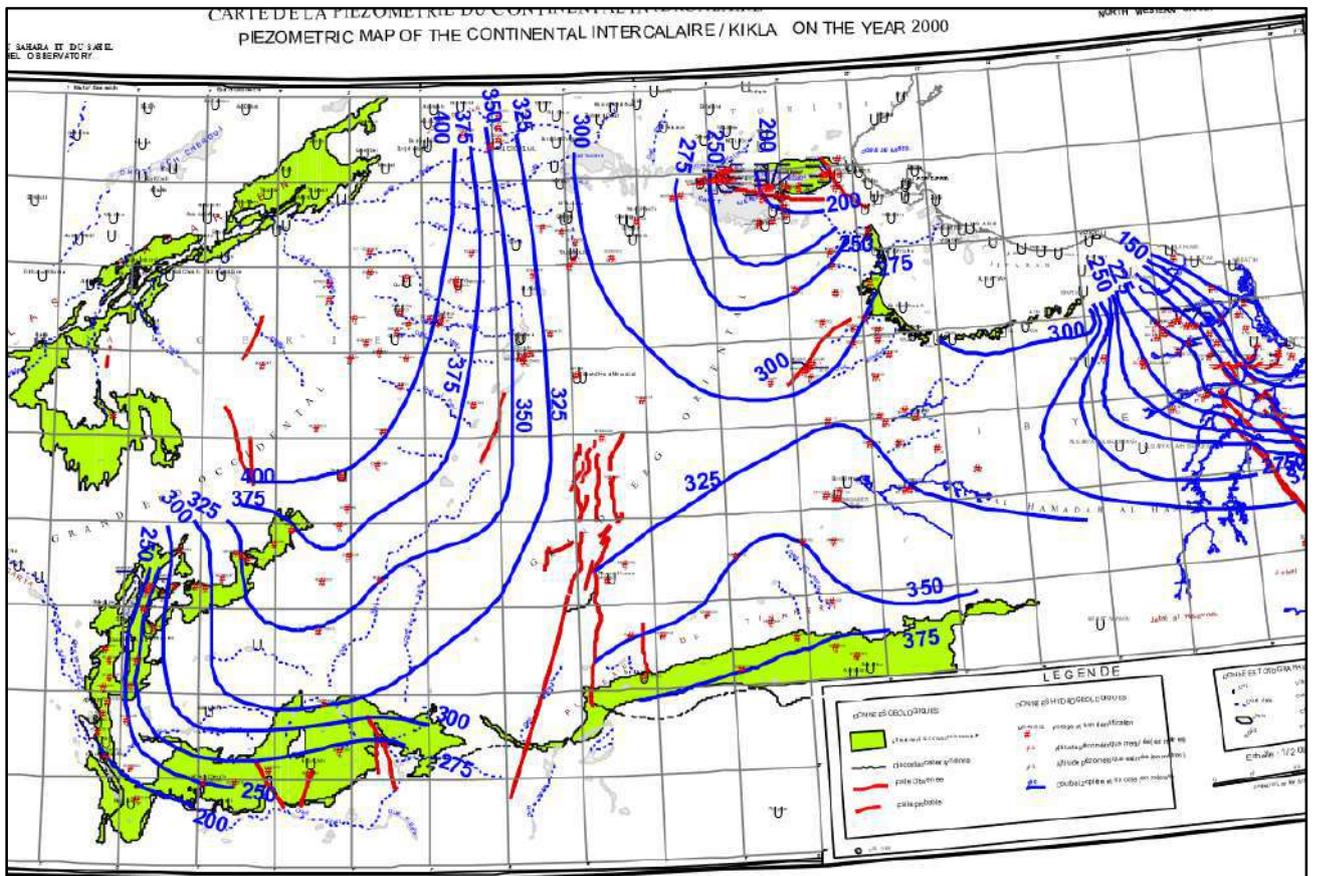
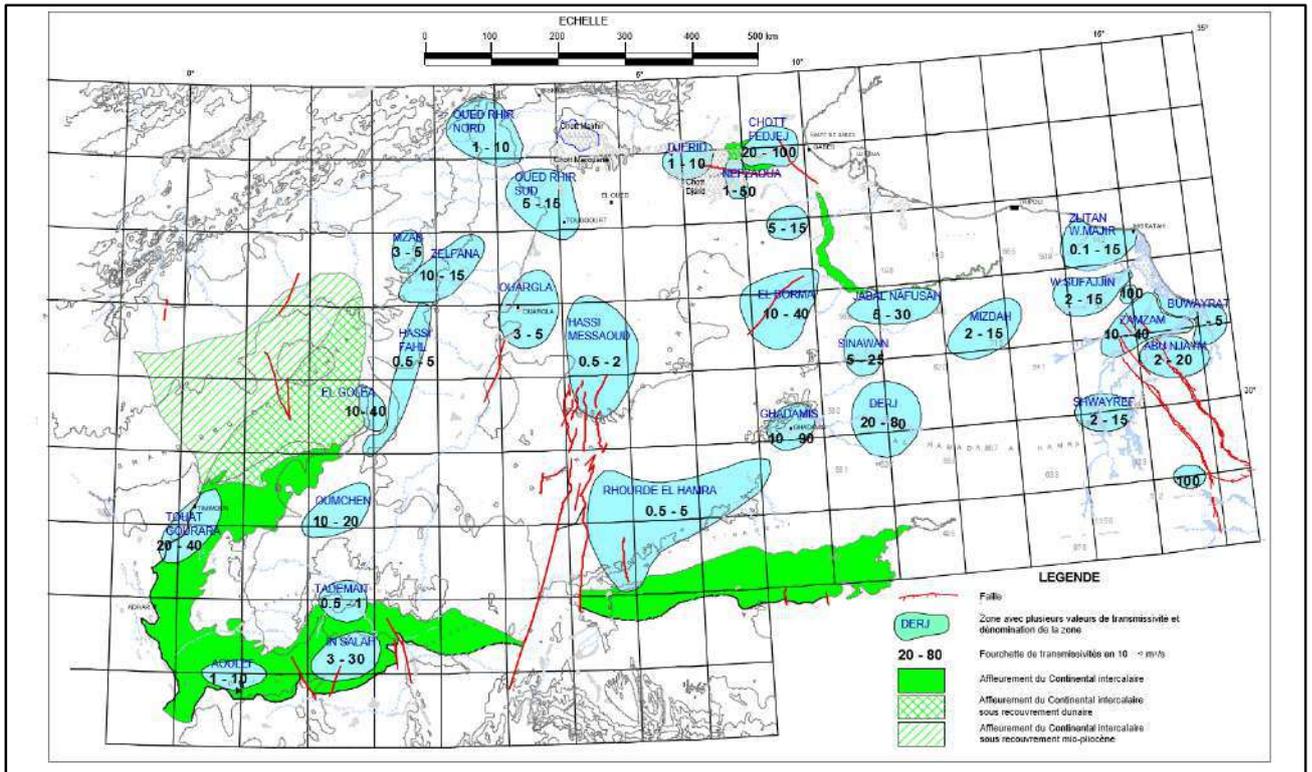
- Station de Timimoune :

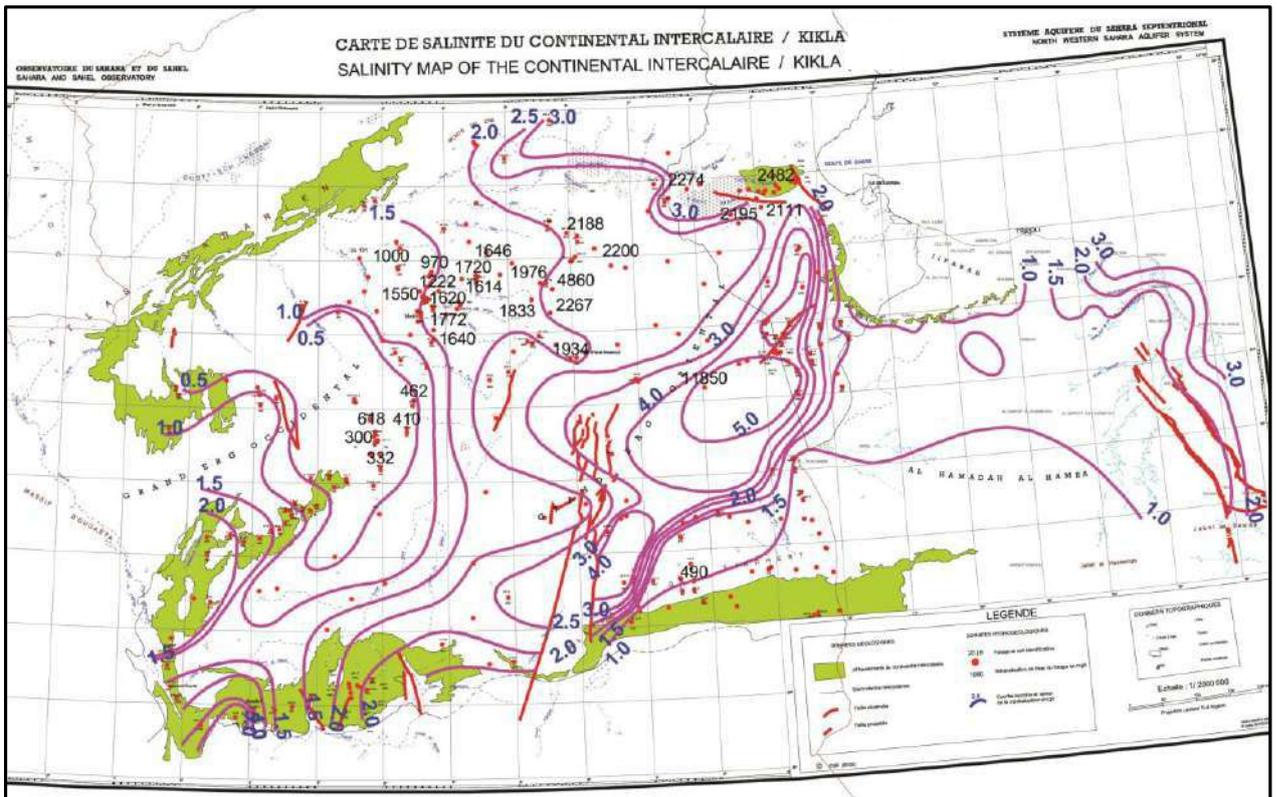
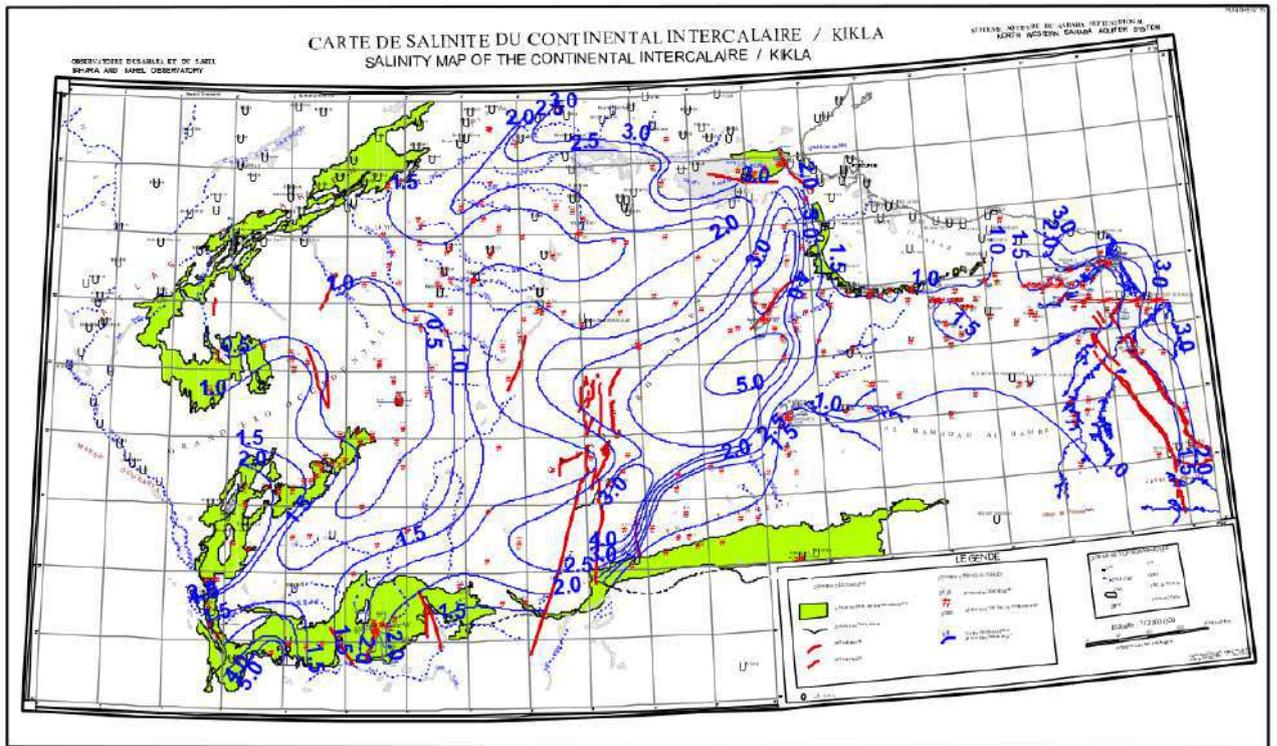
2010/2014	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Jui.	juil.	Aou.
T moy (°C)	33,48	27,62	19,5	14	13,4	14,9	20,88	25,52	30,8	35,46	38,92	37,38
PP (mm)	0,712	0,306	0,508	0	4,014	0,204	2,236	0	0,152	0,408	0,204	0,202

- Station d'In Salah :

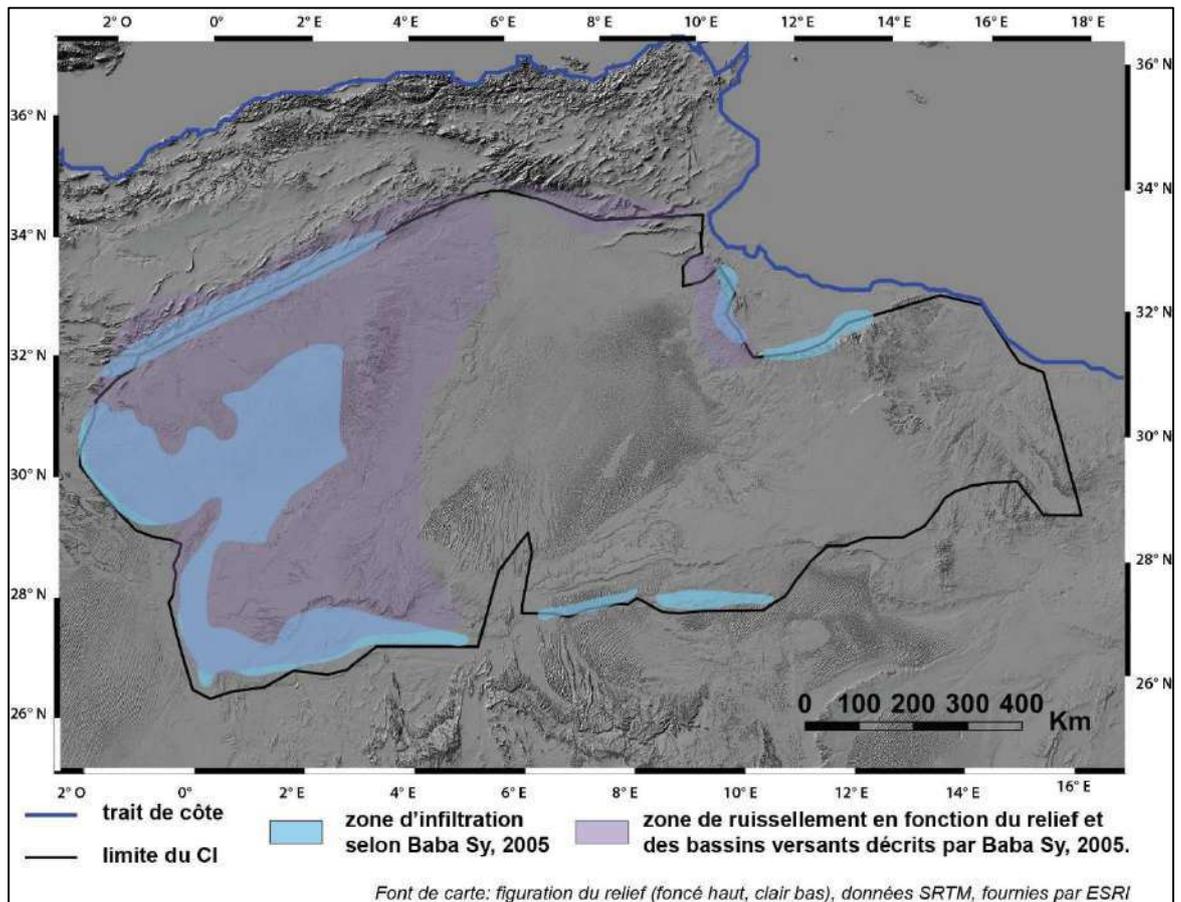
2010/2014	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aou.
T moy (°C)	35,34	28,28	18,42	11,76	13	16,66	22,48	27,28	31,64	36,3	38,76	37,76
PP (mm)	0,812	0,794	2,438	0,61	0,356	0	1,676	0	0,204	0,406	0	0







- Annexe n° 7 : Carte des zones d'infiltration et de ruissellement du CI à partir des données de Baba Sy (2005, p.108 ; 161).



- Annexe n° 8 : Données isotopiques sur les eaux de la nappe du C.I, dans le Gourara. D'après CONRAD et FONT 1974.

N°	Localisation	date	$\delta^{18}O$ ‰/‰	δ^2H ‰/‰	^{14}C %	$\delta^{13}C$ ‰/‰	3H UT	R.S. en g/l
70/17	Ksabi, puits	16-12-70	- 4,7		?	- 4,8		1580
72/20	Ksabi, puits	15-05-72	- 5,2		?	- 8,0	≤ 1	3576
73/76	Ksabi, puits	18-12-73	- 2,9		?			2077
72/23	Talmine Boukezim	18-05-72	- 3,5		78,0±3,0	- 8,4	≤ 1	2676
72/24	Charouine, foggara Mansour	18-05-72	- 4,1		57,5	- 7,1	≤ 1	2328
72/26	Ajdír	19-05-72	- 4,4		93,2	- 8,4		5238
72/7	Talha, foggara	04-05-72	- 4,5		63,1±2	- 6,8		1578
72/25	Haïha	19-05-72	- 6,4		?	- 6,1	2 ± 1	1103

Geochemical approach to the study of the Northern Sahara Aquifer System (S.A.S.S.),
Application to the water table of the Western Sahara Continental:
Touat - Gourara - Tidikelt.

For the geological and economic interests of its natural resources, Western Sahara has been the subject of various studies for a long time where the Touat, Gourara and Tidikelt make up this part of the basin. Among these resources that characterize it, the permeable sandstone levels of Lower Cretaceous age known as "Albian or Continental Intercalary" that constitute good water reservoirs both quantitatively and qualitatively. However, this water table, which remains highly exploited, is characterized by a very insignificant recharge. The present study focused mainly on the hydro geochemical analysis of the Continental Shelf (C. I) aquifer in the western part of the SASS basin, combined with other approaches, is the only multidisciplinary study where numerous supports have been treated, including geological, hydrogeological, hydro chemical, geochemical, statistical and isotopic, in order to visualize on a regional scale, the functioning of the hydro geochemical mechanism of this aquifer.

The geological study having confirmed the heterogeneity of the aquifer, the normal and abnormal structural contacts between the different geological formations were revealed. Hydrogeology has enabled us to monitor the piezometric evolution and its influence on the chemical composition of the waters, which indicates that the exploitation of the aquifer has reached a critical limit, beyond which excessive exploitation would lead to a harmful degradation of the qualitative state of the water resource. The hydrochemistry, on the one hand, determined the acquisition processes of water mineralization along the main flow axes and, on the other hand, revealed the different complex hydrochemical facies on the basis of the respective dominance of cations and anions. Geochemistry played an important role in the speciation and origin of the mineralization. The results of the analysis of stable environmental isotopes (Oxygen O18 and Deuterium H2) are compatible and in perfect agreement with those issued from hydrochemistry and statistics.

Keywords:

Arid climate – Western Erg – Continental Intercalary – Hydrochemistry – not very renewable resource
– Lithological heterogeneity Hydrochemistry – Stable isotopes – Hydrochemistry and statistics.

مدخل للدراسة الهيدروجيوكيميائية لنظام طبقات المياه الجوفية في الصحراء الشمالية (S.A.S.S.) ، وتطبيقها
على طبقة المياه الجوفية للمتداخل القاري بالعرق الغربي الكبير لمنطقة : توات - غورارة - تيديكلت

نضرا لأهمية الموارد الطبيعية التي تتميز به منطقة (توات - قورارة - تيديكلت) والمتواجدة بالجنوب الغربي للصحراء الجزائرية التي هي محل دراستنا، مكنتها منذ مدة بإدراج عدة دراسات علمية قام بها باحثون من الداخل والخارج في جميع الميادين ومن بين هذه الموارد الأساسية، المياه الباطنية المعتبرة للمتداخل القاري المتمركزة بتشكيلات الحجر الرملي التي تكونت في العصر الطباشيري السفلي والتي تسمى عادة بالحوض الليباني. وما يميز هذا المجمع المائي رغم وفرة مياهه الا انه نضرا للاستغلال الغير عقلاني والمستمّر لهذا المورد مع حدودية شحنه وتشبعه طبيعيا، أصبح يطرح اشكالا كبيرا مما أثر سلبيا على نوعية المياه المستخرجة والمستغلة حاليا خاصتا لما نتكلم على الميزة المناخية الحارة والجافة في نفس الوقت لهذه المنطقة.

وتركزت هذه الدراسة أساسا على التحليل الهيدروجيوكيميائي لمياه الحوض في جزئه الغربي للجنوب الصحراوي بالاقتران مع مناهج أخرى. والدراسة التي نحن في صدد معالجتها تعتبر الوحيدة من نوعها حاليا وذلك راجع الى تعدد التخصصات التي طرحت في معالجتها مع الاخذ بعين الاعتبار الكثير من الدعائم، بما في ذلك الدعم الجيولوجي والهيدروجي والكيميائي والجيوكيميائي والإحصائي والنظائر، وهذا من أجل وضع صورة شاملة على نطاق إقليمي كيفية عمل الآلية الهيدروجيوكيميائي في هذا الخزان المائي الجوفي.

وكشفت الدراسة الجيولوجية، التي أكدت عدم تجانس طبقات المياه الجوفية عن وجود اتصالات هيكلية طبيعية وغير طبيعية بين مختلف التشكيلات الجيولوجية، اما الدراسة الهيدروجيولوجية فقد سمحت لنا عن طريق الاحتذاء الزمني لتطور المستوى البيوزومتري وتأثيره على التكوين الكيميائي للمياه الباطنية مما يدل على أن استغلال طبقة المياه الجوفية قد وصل إلى حد خطير، ومن ثم فإن الاستغلال المفرط سيؤدي حتما إلى تدهور في نوعية هذا المورد المائي.

اما الجيوكيمياء فقد لعبت دوراً هاماً في تحديد أصل الملوحة لهذا المورد الطبيعي اما بالنسبة لنتائج تحليل النظائر المستقرة لعنصري الأوكسجين (O^{18}) وديوتريوم (H^2) فقد بينت النتائج انها متوافقة تماما مع النتائج التي تم الحصول عليها في الدراسة الهيدروجيوكيميائية والاحصائية.

الكلمات الأساسية:

المناخ الجاف - العرق الغربي - المتداخل القاري - مورد مائي قليل التجدد - التباين في نوعية الترسبات - الهيدروجيومياء - النظائر المستقرة.