

N°d'ordre :

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran 2



Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre

Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade
Master en Hydrogéologie

Option : Eau Souterraine & Environnement

Thème

**ETUDE HYDROCHIMIQUES DE LA NAPPE HASSI
ABDELLAH (WILAYA DE TINDOUF)**

Présenté par:

Melle. MOULOUDI Haiat

Soutenu le : 28/06/2015

devant la commission d'examen :

M ^r . FOUKRACHE M.	Maître Assistant (A)	Université d'Oran2	Président
M ^{me} . MEBROUK N	Professeur	Université d'Oran2	Rapporteur
M ^{elle} ABLAOUH	Maître Assistant (A)	Université d'Oran2	Examineur

Année universitaire 2014-2015

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Madame **MEBROUK-ZAIDI N.** Maître de Conférences (A) à l'université d'Oran, qui m'a fait confiance et qui a bien voulu m'encadrer. Je la remercie de m'avoir fait bénéficier de ses connaissances et de ses critiques qui m'ont beaucoup aidé à l'amélioration de ce travail. Sa méthode rigoureuse sera pour moi un bon exemple à suivre.

Je tiens également à remercier Monsieur **FOUKRACHE M.** Maître Assistant (A) à l'université d'Oran, pour ses encouragements et d'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

J'adresse aussi mes remerciements à Mademoiselle **ABLAOUI H.** Maître Assistante (A) à l'université d'Oran, pour ses conseils et son aide. Sa participation à ce jury me procure beaucoup de joie.

Je témoigne ma profonde gratitude à tous le corps professoral et tout le personnel de la faculté des Sciences de la terre.

Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin qui ont participé à la réalisation de ce travail, et que je n'ai pas cités les noms, pardon.

DEDICACES

C'est avec un très grand plaisir, que je dédie ce travail à :

- + Mes très chers parents pour qui j'exprime tout mon respect, mon affection et mon amour : Merci de m'aider durant tout mon parcours universitaire.*
- + Mes frères et sœurs ainsi que toute la famille maternelle et paternelle.*
- + Tout le corps enseignant, personnel administratif et pédagogique de l'Université.*
- + Tous mes camarades de promotion (Année Universitaire 2014-2015).*

Liste des tableaux

PARTIE I

Tableau n°01 : Valeurs des précipitations annuelles à la station de Tindouf (1973/09).....	05
Tableau n°02 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Tindouf (1973/2009).	06
Tableau n°03 : Température moyennes, maximales et minimales à la station de Tindouf (1973/2009).	06
Tableau n°04 : Piézométrie au niveau du terrain d'étude	16

PARTIE II

Tableau n°05 : Résultats d'analyse des eaux exprimés en mg/L et en méq/L.	20
Tableau n°06 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux.	21
Tableau n°07 : Classification des duretés	22
Tableau n°08 : Vérification de la Potabilité des eaux selon les normes algériennes	29
Tableau n°09 : Rapports caractéristiques	30
Tableau n°10 : Formule caractéristiques des eaux de la nappe Hassi Abdellah	31
Tableau n°11 : Indices de saturation	34
Tableau n°12: Statistique descriptives des variables.....	37
Tableau n°13 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	37
Tableau n°14 : Résultats du S.A.R.....	41

PARTIE III

Tableau n°15 : Résultats d'analyse des éléments indicateurs de pollution en mg/l.....	44
Tableau n°16 : Caractéristique des eaux des fosses septiques de l'hôpital et de l'ENHCR	45
Tableau n°17 : Présentation des résultats de l'analyse bactériologique des eaux	47

Liste des figures

PARTIE I

Figure n°01 : Situation géographique de la région Tindouf.....	02
Figure n°02 : Situation géographique de la zone d'étude	03
Figure n°03 : Variation des précipitations annuelles à la station de Tindouf (1973/2009).	05
Figure n°04 : Histogramme des précipitations saisonnières à la station de Tindouf (1973/09)	06
Figure n°05 : Variations des températures moyennes, maximales et minimales	
à la station Tindouf (1973/2009)	07
Figure n°06 : Carte géologique du bassin de Tindouf (D'après Hollard, 1967).....	09
Figure n°07 : Formation générale du bassin de Tindouf (forage Bouguerfa)	12
Figure n°08 : Carte hydrogéologique schématique montre la répartition des différents aquifère	15
Figure n°09 : Carte piézométrique de la zone d'étude	17

PARTIE II

Figure n°10 : Carte d'inventaire des points d'eaux de la nappe de Hassi Abdellah	19
Figure n°11 : Carte d'iso-minéralisation	22
Figure n°12 : Résidu Sec	23
Figure n°13 : Carte d'isoteneur en Na ⁺	25
Figure n°14 : Carte d'isoteneur en SO ₄ ²⁻	26
Figure n°15 : Carte d'isoteneur en Cl ⁻	27
Figure n°16 : Carte d'isoteneur en NO ₃ ⁻	28
Figure n°17 : Diagramme de Schoeller- Berkaloff	32
Figure n°18 : Diagramme de Piper.....	33
Figure n°19 : Variation d'Is Calcite	35
Figure n°20 : Variation d'Is Aragonite	35
Figure n°21 : Variation d'Is Dolomite	36
Figure n°22 : Variation d'Is Gypse	36
Figure n°23 : Variation d'Is Anhydrite	36
Figure n°24 : Cercle de corrélation : axe1 et 2, étude des variables	39

Liste des figures

Figure n°25 : Cercle de corrélation : axe 1 et 2 variables et individus	40
---	----

Table des matieres

Introduction générale.....	1
Partie I	
I. Généralités :	2
I.1 : Caractéristiques géographiques et climatiques :	2
I.1.1 Situation géographique :	2
I.1.2. Situation géographique de la zone d'étude :	3
I.1.3 Cadre climatique :	4
I.1.3.1 Etude des précipitations	4
I.1.3.2 Etude des températures.....	6
I.1.3.3 Les vents :	7
I.1.3.4 Indices climatiques	7
Indice d'aridité de Martonne	7
Conclusion :	8
II. Cadre géologique :	8
Introduction :	8
II.1 Description litho-stratigraphique du bassin de Tindouf :	9
II.1.1. Précambrien :	9
II.1.2. Cambrien :	9
II.1.3. Ordovicien :	9
II.1.4. Silurien :	10
II.1.5 Le Dévonien :	10
II.1.5.1. Dévonien inférieur :	10
II.1.5.2. Dévonien moyen :	10
II.1.5.3. Dévonien supérieur :	11
II.1.6 Carbonifère :	11
II.1.7 Terrains Post-Paléozoïques :	11
II.1.7.1. Tertiaire continental :	11
II.1.7. 2. Quaternaire :	12
II.2. Formations géologiques de la zone d'étude :	12
Conclusion	13
III. Hydrogéologique :	14
Introduction.....	14

III.1. Principales formations aquifères (bassin de Tindouf) :	14
III.2. Principales formations de la nappe de Hassi Abdellah :	15
III.3. Etude hydrodynamique de l'aquifère :	16
Piézométrie :	16
Intreprétation de la carte piézométrique:	17
Conclusion :	18

Partie II

I. Hydrochimie :	19
Introduction :	19
II. Contrôle des analyses par la balance ionique	20
III.1. Paramètres physiques :	21
III.1.1. Température :	21
III.1.2. Potentiel Hydrogène pH :	21
III.1.3. Conductivité électrique :	21
III.1.4. Dureté :	22
III.1.5. Réside Sec :	23
III.2. Paramètres chimiques	23
III.2.1. Cations	24
III.2.1.1. Calcium (Ca ²⁺) :	24
III.2.1.2. Magnésium (Mg ²⁺):	24
III.2.1.3. Sodium (Na ⁺) :	24
III.2.1.4. Potassium (K ⁺) :	25
III.2.2. Anions	25
III.2.2.1. Bicarbonates (HCO ₃ ⁻):	25
III.2.2.2. Sulfate (SO ₄ ²⁻):	26
III.2.2.3. Chlorure (Cl ⁻) :	26
III.2.2.4. Nitrates (NO ₃ ⁻) :	27
IV. Qualité des eaux	28
Norme de potabilité	28
V. Etude des rapports caractéristiques :	30
VI. Classification des eaux et faciès chimiques	31
VI.1. Représentation graphique des analyses d'eau	31

VI.1.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff	31
VI.1.2. Diagramme de Piper :	32
VII. Indice de Saturation :	34
VIII. Traitement statique des données hydrochimiques :	36
VIII.1. Paramètres statistiques élémentaires :	36
VIII.2. Matrice de corrélation :	37
VIX. Analyse en Composantes Principales :	38
VIX.1. Résultats obtenus :	38
VIX.2. Etude des variables :	38
VIX.3. Etude des individus :	39
X. Qualité des eaux d'irrigation :	40
Conclusion :	41

Partie III

I. Pollution	43
I.1. Définition de la pollution de l'eau :	43
I.2. Origine de la pollution :	43
I.2.1. La pollution d'origine urbaine :	43
I.2.2. Pollution d'origine agricole :	43
I.2.3. Pollution d'origine industrielle :	43
II. Etude de la pollution dans le secteur d'étude :	43
II.1. Les éléments indicateurs de pollution dans la zone d'étude :	43
II.2. Pollution par les produits azotés :	44
II.2.1 Nitrates :	44
II.2.2. Nitrites :	45
II.2.3. Ammonium :	45
II.3. Pollution par les autres éléments :	45
II.3.1. Phosphates :	45
II.3.2. Matière organique :	45
II.3.3. Silice :	46
II.4. Analyses bactériologiques :	46
II.4.1. Pollution bactériologique :	46
II.4.1.1. Les coliformes totaux :	46
II.4.1.2. Les coliformes fécaux :	46

Sommaire

II.4.1.3 Les streptocoques fécaux :.....	47
Conclusion.....	47
Conclusion générale	48

Introduction générale

L'eau, de formule H_2O , est un composé chimique simple. Présente chez les êtres vivants (en effet le corps humain est composé à 70% d'eau), la terre en possède une quantité gigantesque. 97% d'eau sur terre est salée (donc impropre à la consommation) alors qu'il n'y a que 2% d'eau douce sous forme de glace et seulement 1% d'eau douce sous forme liquide.

Dans la région de Tindouf comme dans tout le Sahara, la disponibilité des eaux constitue un facteur important pour la stabilité des populations locales. Tout développement économique est conditionné par le problème primordial de la disponibilité de l'eau.

La région de Tindouf est alimentée par la nappe phréatique de Hassi Abdallah ; c'est une nappe captée par 11 forages (4 fermés, 5 en marche et 2 pour l'irrigation).

La nappe captée par les forages (SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA9, HNT 106, Daia-Khadra, 75/B) du champ de Hassi Abdallah étant celle de la formation d'âge carbonifère réputée aquifère, représentée par le Viséen inférieur et supérieur.

La démarche adoptée dans ce travail consiste en une synthèse de la géologie, de la climatologie, de l'hydrogéologie et de l'hydrochimie de la région d'étude, avec un intérêt particulier pour la qualité de cette eau :

Ainsi, l'étude portera sur :

Chapitre I : Généralités (situation géographique de la région, détermination des paramètres et des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe, étude climatique (précipitation, température,...))

Chapitre II : Etude hydrochimique qui portera sur les caractères physico-chimiques de l'eau et qui permettra de déterminer leur qualité ainsi que les différents faciès chimiques.

Chapitre III : Pollution de la nappe

Enfin, une conclusion générale pour faire la synthèse et faire ressortir les différents résultats.

I. Généralités :

I.1. Caractéristiques géographiques et climatiques :

I.1.1. Situation géographique :

La ville des Tindouf est située au Sud-Ouest de l'Algérie à proximité des frontières algéro-marocaines à 1900 km d'Alger. Elle est comprise entre le parallèle 26°N et 28°N et le méridien 6°W et 9°W. La superficie est de l'ordre de 159000 Km². La région compte une population déclarée d'environ 67742 habitants répartis entre deux communes : Tindouf et Oum Lassel.

Elle est limitée :

- Au Nord-Est par la Wilaya de Bechar.
- Au Sud-Est par la Wilaya d'Adrar.
- Au Nord et au Nord-Ouest par le Maroc.
- Au Sud par la Mauritanie.
- A l'Ouest par le Sahara Occidental.

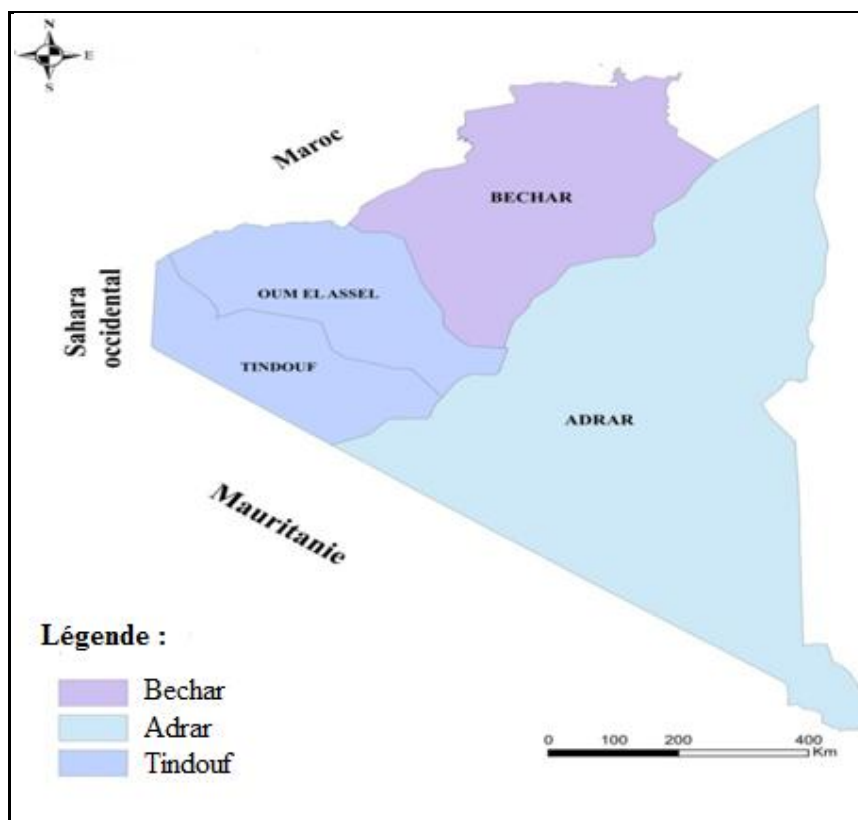


Figure n°01 : Situation géographique de la région Tindouf.

I.1.2. Situation géographique de la zone d'étude :

Le secteur d'étude fait partie de la wilaya de Tindouf, dans le Sud Ouest algérien. Il est limité au Nord par Tindouf ville à environ 21 km, au Sud par Gara Djebilet, à l'Est par la Sebkhha de Tindouf et enfin par le Sahara occidental à l'Ouest (Figure n°02).

La zone d'étude située dans le bassin de Tindouf, de forme ovoïde constitue un vaste synclinal d'une superficie égale à 190000 km².

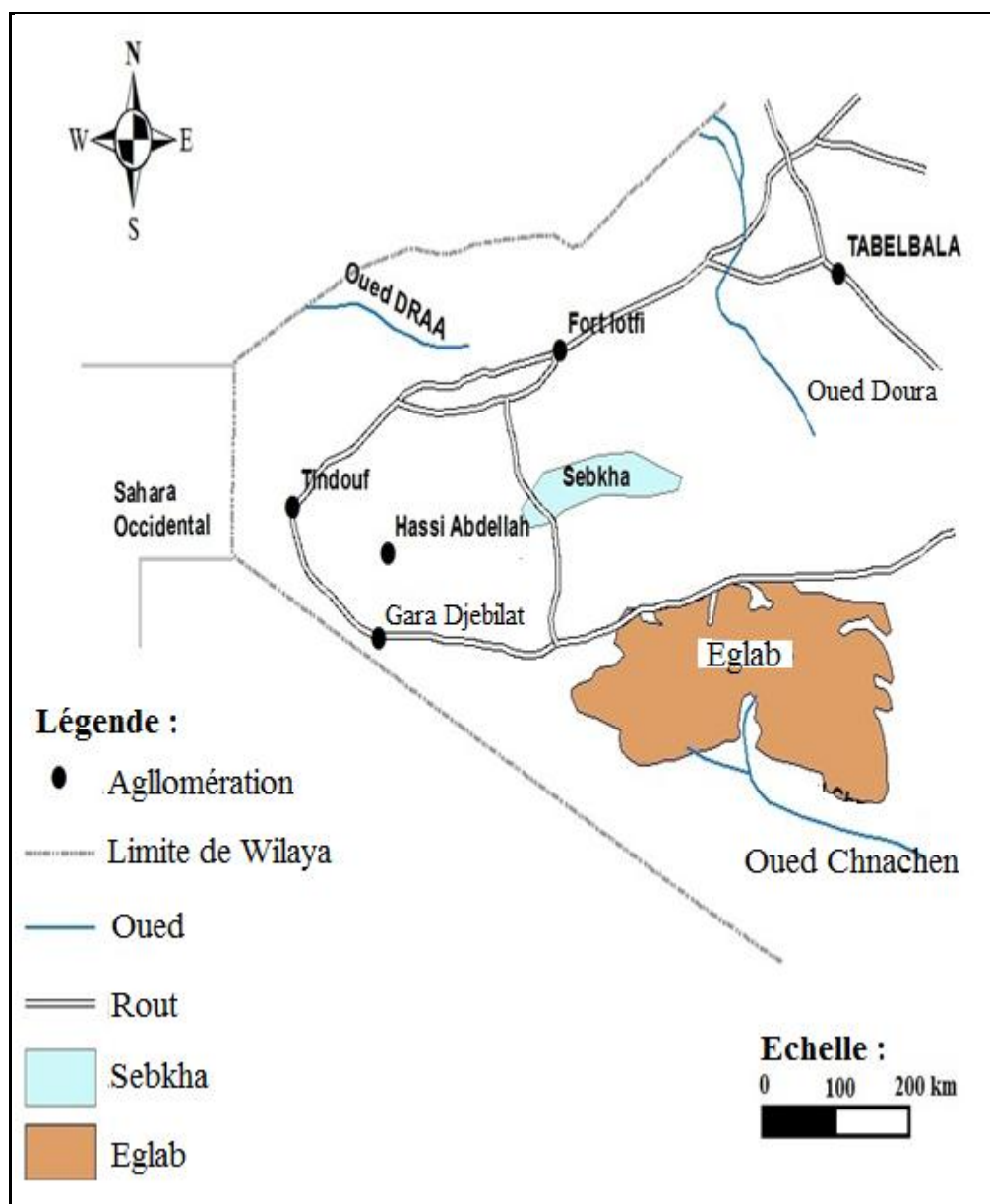


Figure n°02 : Situation géographique de la zone d'étude.

I.1.3. Cadre climatique :

Le climat est l'ensemble des phénomènes (vent, précipitation, température, évaporation...) qui varient d'un lieu à un autre de la surface terrestre.

La zone de Tindouf est soumise à un climat essentiellement saharien, caractérisé par des précipitations occasionnelles. Les vents dominants sont ceux d'Ouest et surtout ceux du Nord-Ouest. La période de forte chaleur s'étale de Mai à septembre avec une température maximale de l'ordre de 45C°.

I.1.3.1. Etude des précipitations

Les précipitations regroupent toutes les eaux météoriques recueillies par un bassin versant ou une zone déterminée.

- **Précipitations annuelles**

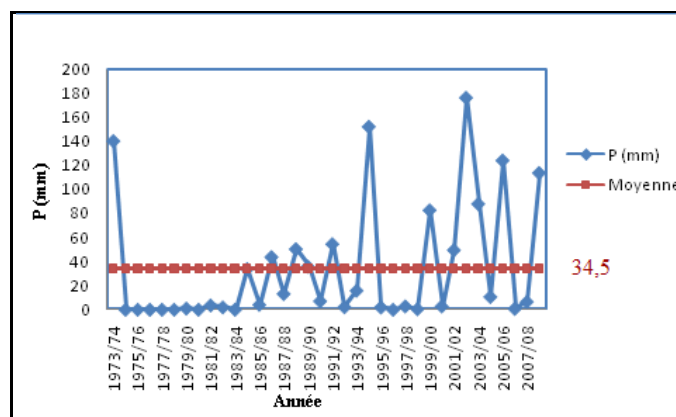
Les précipitations annuelles à la station de Tindouf sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Leur présentation sur la figure n°3 montre une asymétrie de la courbe par rapport à la moyenne des précipitations annuelles qui est de 34,5 mm/an calculée sur une période de 36 ans. Le maximum de 177 mm est observé en 2002-03 et le minimum nul (0mm), est enregistré plusieurs années durant la période considérée.

Tableau n°01 : Valeurs des précipitations annuelles à la station de Tindouf (1973/2009).

Années	P (mm)	Années	P (mm)
1973/1974	140,9	1991/1992	54,8
1974/1975	0	1992/1993	2,2
1975/1976	0	1993/1994	15,9
1976/1977	0	1994/1995	152,9
1977/1978	0	1995/1996	2,0
1978/1979	0	1996/1997	0
1979/1980	1,0	1997/1998	2,8
1980/1981	0	1998/1999	0,5
1981/1982	3,6	1999/2000	83,1
1982/1983	2,0	2000/2001	2,8
1983/1984	0	2001/2002	49,8
1984/1985	34,0	2002/2003	177
1985/1986	4,1	2003/2004	88,4
1986/1987	44	2004/2005	10,7
1987/1988	13,2	2005/2006	124,7
1988/1989	50,6	2006/2007	0,8
1989/1990	36	2007/2008	6,6
1990/1991	7,1	2008/2009	114,3

Moyenne annuelle = 34,5 mm

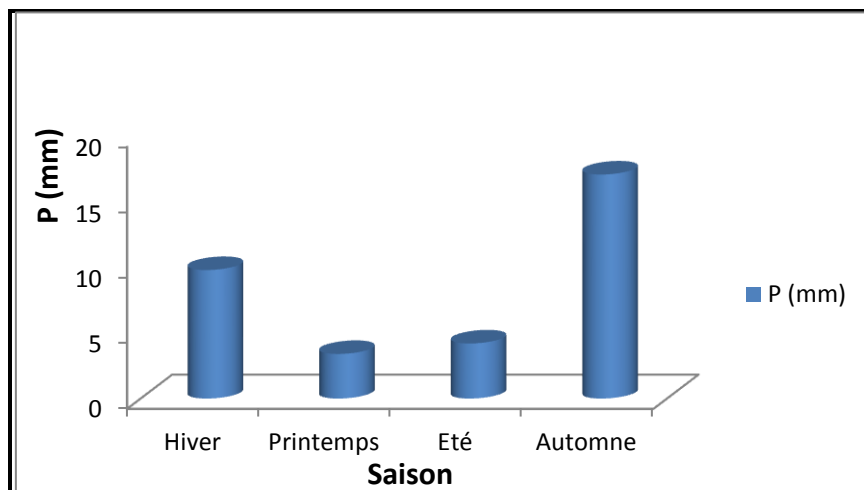
**Figure n°03:** Variation des précipitations annuelles à la station de Tindouf (1973/2009).

- **Précipitations mensuelles :**

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs des hauteurs des précipitations mensuelles de la station étudiée.

Tableau n°02 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Tindouf (1973/2009).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
P (mm)	7,5	9,1	0,5	3,3	1,2	5,3	2,0	0,4	1,0	0,4	1,4	2,4	34,5

**Figure n°04**: Histogramme des précipitations saisonnières à la station de Tindouf (1973/2009).

L'histogramme des précipitations saisonnières montre que l'automne est la saison la plus humide avec 17,1mm et l'été accuse un déficit relativement important.

I.1.3.2. Etude des températures

La température est un facteur important qui détermine le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques. Le tableau n°03 représente :

Les températures moyennes mensuelles des minima sont comprises entre 7,5°C en Janvier et 26,8°C en Août.

Les moyennes mensuelles des maxima varient entre 21,2°C en Janvier et 44,4°C en Juillet.

Quant aux températures moyennes observées, nous notons un maximum au mois de Juillet (35,4°C) et un minimum au mois de Janvier (14,4°C) (Figure n°05).

Tableau n°03 : Température moyennes, maximales et minimales à la station de Tindouf (1973/2009).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
Tm (°C)	22,9	18,3	12,4	8,4	7,5	9,6	12,8	14,4	17	21,1	26,5	26,8	16,5
TM (°C)	38,3	32,6	26,3	21,4	21,2	24,2	28,1	31	34,7	39,2	44,4	43,3	32,1
Tmoy (°C)	30,6	25,5	19,4	14,9	14,4	16,9	20,5	22,7	25,8	30,2	35,4	35,1	24,3

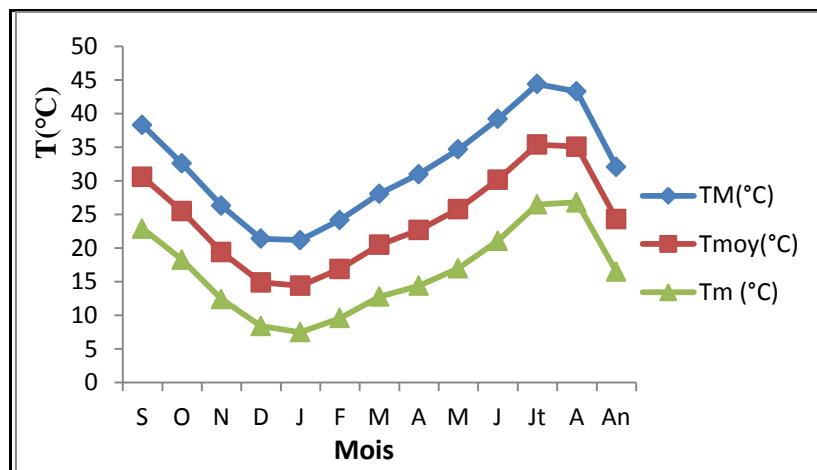


Figure n°05 : Variations des températures moyennes, maximales et minimales à la station Tindouf (1973/2009).

I.1.3.3. Les vents :

Par définition c'est le mouvement horizontal de l'air par rapport à la surface de la terre. L'apparition est liée à l'inégalité de pression atmosphérique en différents lieux et au même moment. Dans la région étudiée, le vent est fréquent durant pratiquement toute l'année. Sa violence apparaît très nettement pendant les mois de Mai, Juin et Juillet. La direction dominante est Ouest, plus précisément Nord-Ouest (Station météorologique de Tindouf)

I.1.3.4. Indices climatiques

L'utilisation des indices climatiques définis par les différents auteurs est intéressante, car elle permet de mieux cerner le type de climat de la région.

Indice d'aridité de De Martonne

Indice d'aridité annuel (I)

En se basant sur le régime des précipitations et des températures, le calcul de l'indice d'aridité annuel de De Martonne est calculé par la relation :

$$I = P / T + 10$$

Avec P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : températures moyennes annuelles (°C)

✓ $20 < I < 30$: climat tempéré.

- ✓ $10 < I < 20$: climat semi-aride.
- ✓ $7,5 < I < 10$: climat steppique.
- ✓ $5 < I < 7,5$: climat désertique.
- ✓ $I < 5$: climat hyper-aride.

$$I = 1,01$$

A la station de Tindouf, l'indice I est égale à 1,01 : le climat est donc de type hyper-aride.

Conclusion :

A partir de l'étude climatique de la station de Tindouf sur la période allant de 1973 à 2009 réalisée par l'ONM de Tindouf (station météorologique), les résultats suivants peuvent être déduits :

- La moyenne annuelle de précipitation est de 34,5 mm avec Octobre le mois le plus humide (9,1 mm) et Avril le mois le plus sec (0,4 mm).
- La moyenne annuelle de température est de 24,3°C, avec janvier le mois le plus froid (14,4°C) et juillet le mois le plus chaud (35,4°C).
- A l'échelle saisonnière, l'étude des précipitations montre que l'automne et l'hiver sont les saisons les plus humides et le printemps correspond à la saison la plus sèche.
- L'indice de De Martonne montre que la région étudiée est soumise à un climat hyper-aride.

II. Cadre géologique :

Introduction :

Le bassin de Tindouf représente une synclise dissymétrique, orientée WSW-ENE avec un axe qui se situe à environ 55 km au Nord de Tindouf et à 30 km au Sud d'Ouarkziz. Il se caractérise par la présence de séries paléozoïques (du Cambrien jusqu'au Carbonifère), qui sont parfois recouvertes par des formations continentales tabulaires d'âge tertiaire (Hamada). Le flanc Nord du bassin est marqué par des terrains plissés, matérialisés par un pendage de 8° à 12°. Par contre, les formations du flanc Sud ne présentent aucun pli et leur pendage varie de 1° à 2°. Ce qui indique la stabilité du flanc Sud par rapport au flanc Nord du bassin.

La lithostratigraphie du bassin de Tindouf, ainsi que les régions avoisinantes, est représentée globalement par la figure n°06.

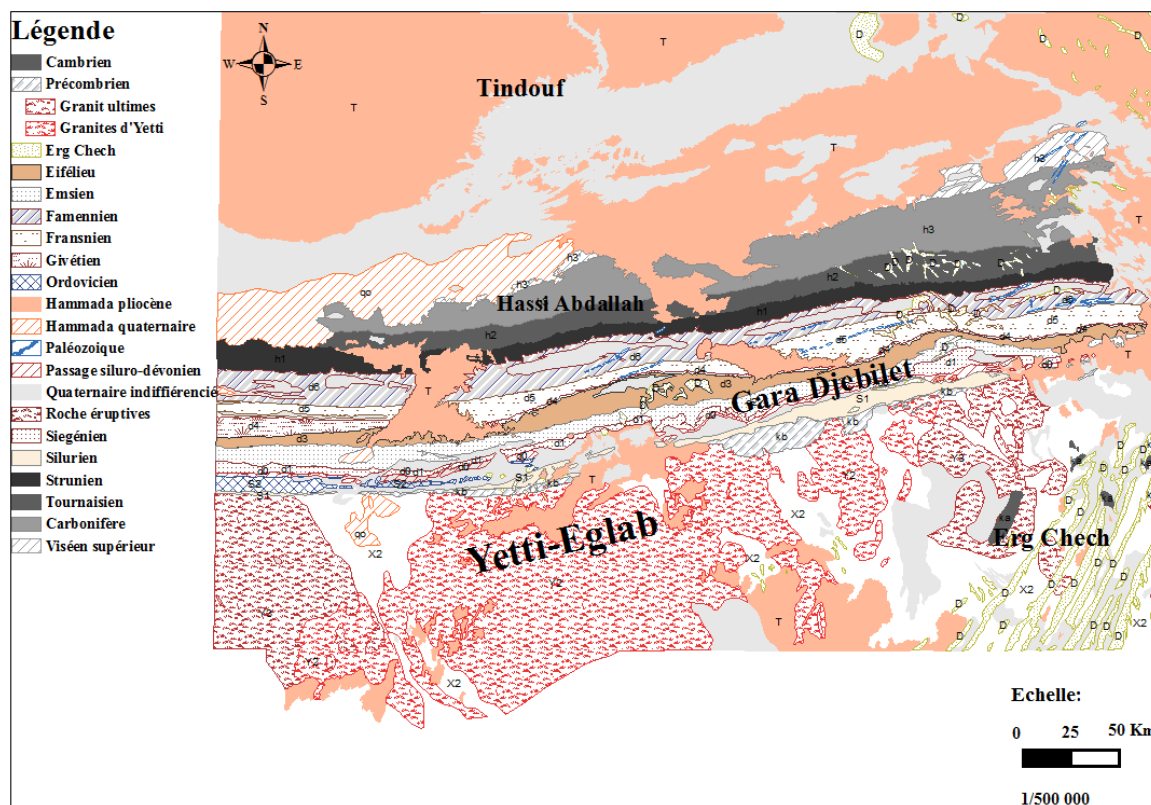


Figure n°06 : Carte géologique du bassin de Tindouf (D'après Hollard, 1967).

II.1. Description litho-stratigraphique du bassin de Tindouf :

II.1.1. Précambrien :

Représenté par des terrains cristallins et cristallophylliens surmontés par des quartzites ferrugineux. Ces terrains constituent l'essentiel des Eglab.

II.1.2. Cambrien :

Gevin (1960) a attribué quelques niveaux gréseux au Cambrien sans aucune preuve paléontologique.

II.1.3. Ordovicien :

Les terrains ordoviciens se présentent depuis Gara Djebilet jusqu'à Erg Chech, en reposant en discordance sur les formations sous-jacentes. Généralement, ils sont formés par des grès grossiers, marqués par des stratifications obliques et entrecroisées. Leur épaisseur augmente vers l'Est où elle atteint des centaines de mètres.

II.1.4. Silurien :

Les terrains siluriens se présentent comme des séries argileuses monotones. Ils affleurent depuis le Zemmour jusqu'à Erg Chech avec une décroissance de l'épaisseur.

II.1.5. Le Dévonien :

Les terrains dévoniens sont bien représentés d'Ouest en Est, caractérisés par une variabilité de faciès. Gevin (1960) a subdivisé ces terrains en : Dévonien inférieur argilo-silteux puis gréseux ; Dévonien moyen à dominante argilo-calcaire, Dévonien supérieur, presque uniquement argilo-gréseux.

II.1.5.1. Dévonien inférieur :

Les formations du Dévonien inférieur se caractérisent par des variations de l'épaisseur (150m à Gara Djebilet, 60m à Gour Jiffa), et par succession lithologique suivante : de bas en haut (selon Gevin, 1960).

- un conglomérat de base assez généralisé, parfois remplacé par des microconglomérats ferrugineux.
- un ensemble argilo-silteux doublé à l'Ouest d'une série argilo-calcaire assez semblable à celle du Gothlandien sous-jacente ;
- un complexe gréseux et argilo-gréseux, avec des grès fréquemment grossiers et parfois ferrugineux, en renfermant des passées conglomératiques. Il est marqué par des stratifications entrecroisées des Hard-grounds.

II.1.5.2. Dévonien moyen :

Les faciès du Dévonien moyen se caractérisent par la bonne continuité latérale. Gevin (1960) a distingué les ensembles suivants :

- La "zone à cultrijigatuts" du Couvinien inférieur (passage Emsien / Eifelien) : cette zone est marquée par des couplets argilo-gréseux à l'Ouest, puis gréseux entre le Mabbes et Djebilet, vers l'Est, des marno-calcaires (Ouali Mehaji, 2004).
- Les marnes gréseuses jaunâtres à Calceoles du "Couvinien supérieur ". Cet ensemble se présente au niveau d'Oued Talha avec une puissance de 80m.
- Un ensemble calcaire et marno-calcaire du Givetien inférieur : il est marqué par une décroissance de l'épaisseur vers l'Est. Ces formations se présentent sous forme de bancs

"coralligènes" qui sont riches en polypiers, avec la présence de minces intercalations gypseuses caractérisant le sommet du Dévonien moyen (Messaoudi, 2008).

II.1.5.3. Dévonien supérieur :

L'épaisseur du Dévonien supérieur varie d'Ouest en Est. Il est subdivisé en trois ensembles, de bas en haut :

- un ensemble argilo-gréseux avec la présence de lentilles, souvent lumachelliques, plus nombreuses à l'Ouest ;
- un ensemble argileux ou argilo-silteux à "ripple-marks", contenant des lits gypseux ;
- l'ensemble supérieur, argilo-gréseux qui devient argilo-silteux, en se déplaçant vers l'Est.

II.1.6. Carbonifère :

Les dernières formations paléozoïques représentées, dans le bassin de Tindouf, sont d'âge carbonifère. Elles se distinguent en : Carbonifère inférieur marin et Carbonifère supérieur continentale. Le premier est représenté par un Tournaisien essentiellement argilo-gréso-calcaire, surmonté par un Viséen inférieur carbonaté et un Viséen supérieur gréseux avec quelques intercalations carbonatées. Le Carbonifère continental se caractérise par un Namurien argilo-gréseux clôturé par le Westphalien qui fait environ 80m d'argiles et de grès à restes de végétaux.

II.1.7. Terrains Post-Paléozoïques :

Ils sont constitués par le Tertiaire continental et les terrains actuels.

II.1.7.1. Tertiaire continental :

C'est un faciès continental qui se dépose en couches horizontales, largement étendues dans le bassin de Tindouf et portant le nom de terrains hamadiens.

La Hamada est essentiellement constituée de marnes gréseuses qui surmontent une dalle de calcaire, d'origine lacustre (Gevin, 1960). Elle ne dépasse jamais la centaine de mètres : 80m à Tindouf, 0,50m au-dessus du socle cristallin.

II.1.7. 2. Quaternaire :

Les dépôts détritiques quaternaires rencontrés sur le périmètre de la wilaya sont représentés par les formations alluviales, remplissant les oueds et les ergs. Les alluvions sont constituées de matériel détritique.

Les sables éoliens sont quartzo-feldspathiques dont la fraction est composée de grains fins, accompagnée pourtant d'une très petite quantité de fraction pélitique (Haissoune, 1998) Le forage Bouguerfa représenté ci-dessous (figure n°07) synthétise les grandes formations du bassin de Tindouf.

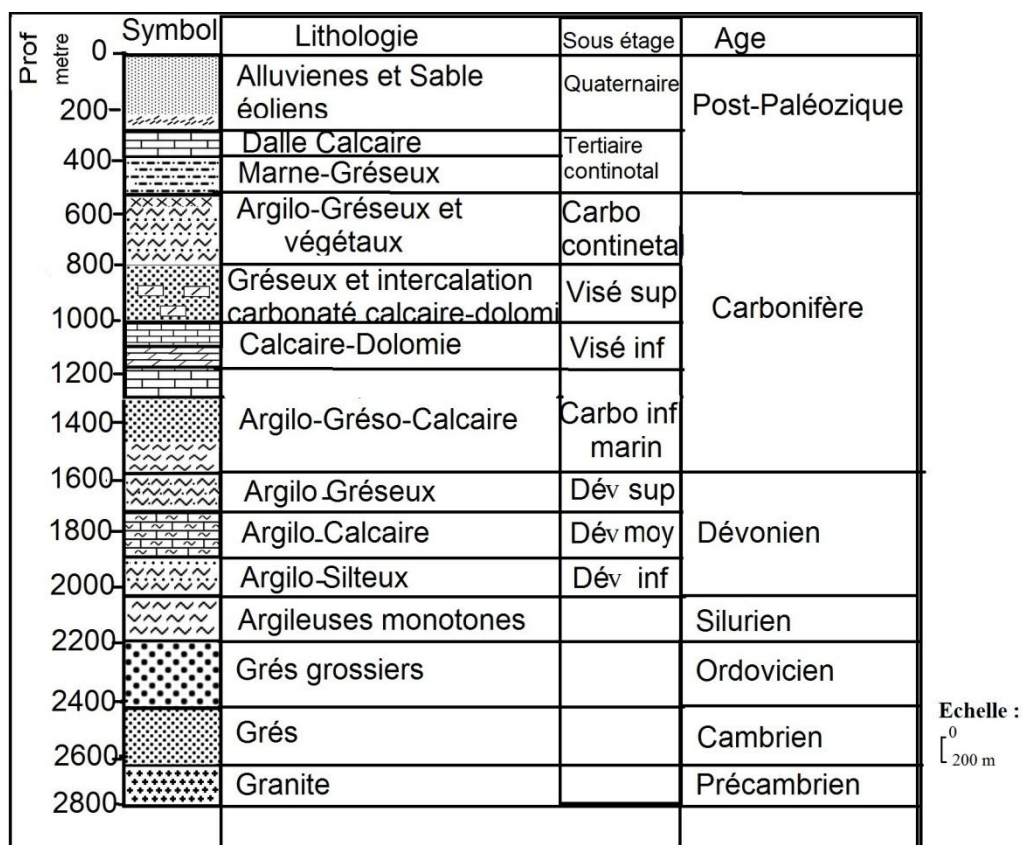


Figure n°07 : Formations générales du bassin de Tindouf (forage Bouguerfa).

II.2. Formations géologiques de la zone d'étude :

Hassi Abdellah est constitué par des formations géologiques d'âge Carbonifère (Viséen supérieur)

La succession lithostratigraphique du Viséen supérieur est la suivante, de haut en bas :

- a)- membre carbonaté supérieur, bien représenté dans le forage SA4, caractérisé par l'alternance suivante : calcaire, argile, calcaire, argile et dolomies à la base, épaisseur 80m.
- b)- membre évaporitique, représenté par des gypses et des anhydrites, épaisseur 70m.

c)- membre carbonaté inférieur, représenté par des calcaires et des dolomies parfois marneuses, épaisseur 60m.

d)- membre grés-argileux – calcaire, représenté par des grès, des siltites, des argiles et des anhydrites, par des dolomies et des calcaires parfois marneux, épaisseur 60m.

Conclusion

Du point de vue géologique, cette région est constituée à la fin du Précambrien, de deux boutonnières du socle, formées essentiellement de roches métamorphiques. Il s'agit de l'anti-atlas marocain au Nord et la dorsale Reguibate où Sud . Ces deux pointements constituent le substratum sur lequel s'effectue le dépôt des premières couvertures sédimentaires.

Au cours du Paléozoïque, les dépôts de remplissage du bassin de Tindouf ont subi des déformations sur de vastes surfaces qui ont engendré des lacunes souvent accompagnées de ravinement et de légères discordances.

III. Hydrogéologie :

Introduction

L'étude hydrogéologique nécessite une connaissance géologique et hydrodynamique de notre secteur d'étude, dont le but est comme suit :

- la détermination des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères.
- l'établissement et l'interprétation d'une carte piézométrique.
- l'étude des paramètres hydrodynamiques des aquifères.

III.1. Principales formations aquifères (bassin de Tindouf) :

L'étude hydrogéologique de la région met en évidence six niveaux susceptibles d'être aquifères. Ce sont de bas en le haut :

- Grès et grès quartzites de l'Ordovicien supérieur (grès de Rhezziane)
Cette formation est bien connue à Gara Djebilet, située à environ 150 km au Sud-Est de la région d'étude
- Grès du complexe Emsien-Pragien du Dévonien inférieur (grès de BIA)
Cet aquifère n'est connu qu'à Aouinet Belgraa situé à environ 50 Km au NE de Gara Djebilet.
- Grès du Famennien-Tournaisien du Dévonien Supérieur d'âge Carbonifère inférieur
Cette formation constitue un aquifère probable (DHW Tindouf, 2004).
- Calcaires et grès du Viséen inférieur (Kerb Es Sefiat)
Cette formation n'est exploitée par aucun forage à Tindouf.
- Calcaires et calcaires dolomitiques du Viséen supérieur (formation d'Aïn El Berka)
D'âge Carbonifère inférieur (épaisseur moyenne = 80 m), c'est un aquifère bien connu et exploité par 11 forages dont 05 à Hassi Abdellah destinés à l'alimentation en eau potable (AEP), un seul (T4) à Hamada Ed Douakel, 02 fermés (SA1 ,SA2), 1 en réserve (SA5), et 1 forage (HNT.106) destiné à l'irrigation.
- Grès plus ou moins argileux du Tertiaire (Hamada)
Ils sont très exploités à Tindouf ville, Hassi Amar, Oum El Assel, Oued Naga, et à Graret El Harth avec un débit variable (HAMOUDA et SAHARI, 2013).

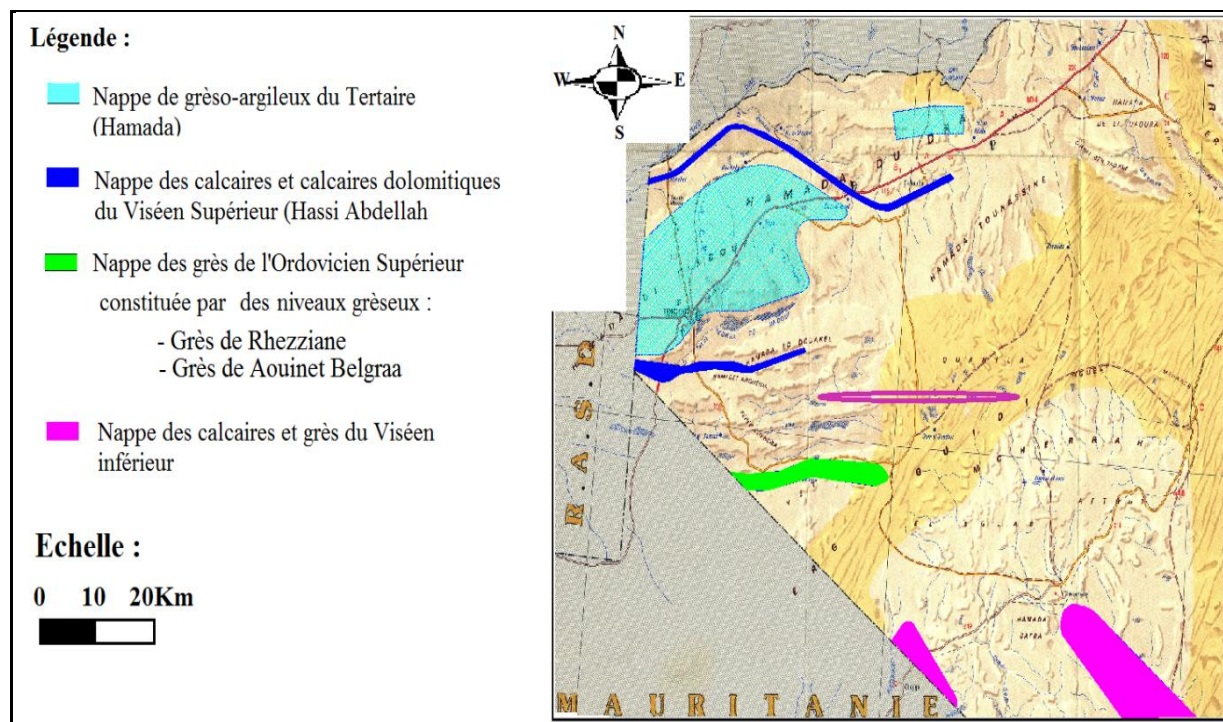


Figure n°08 : Carte hydrogéologique schématique montre la répartition des différents aquifère.

III.2. Principales formations de la nappe de Hassi Abdellah :

Introduction :

L'analyse et l'examen des informations disponibles relatives à la nappe du Viséen supérieur montre que la localité du Champ captant de Hassi Abdellah est considérée comme étant l'un des exutoires naturels de la nappe captive du Viséen supérieur (23 Km au Sud de la ville de Tindouf). L'écoulement majeur se fait à partir du territoire marocain, le long d'une bande de 15 à 20 Km de large. Arrivant à Hassi Abdellah, cet écoulement a l'allure d'être stoppé et qui s'explique par la disparition de la fissuration de la formation réservoir au Nord et Nord-Est.

Les ressources en eaux souterraines liées à des couches calcaires du Viséen supérieur sont actuellement la source principale d'approvisionnement de la ville de Tindouf, ces nappes sont mises en exploitation la première fois en 1956 (HAMOUDA et SAHARI, 2013).

Elles constituent le plus important réservoir en eau de la région. Les eaux circulent au sein d'une formation de 20m d'épaisseur formée de calcaires et dolomies attribués au Viséen Supérieur, cernés entre deux formations imperméables (argilo gypseuse et gypse).

Du point de vue structure, cette formation de calcaire et dolomie est très tectonisée. Les fissures et diaclases sont fréquentes et multidirectionnelles.

III.3. Etude hydrodynamique de l'aquifère

1-Piézométrie

L'étude du fonctionnement des aquifères passe évidemment par la définition des écoulements souterrains et par l'identification des zones d'alimentation et de décharge. Pour ce faire, nous avons repris dans le cadre de ce mémoire l'ensemble des relevés piézométriques effectués en 2013 sur la majorité des points d'eau du système aquifère.

Quoiqu'insuffisantes, ces données permettent néanmoins d'esquisser les grandes lignes des écoulements souterrains et surtout d'orienter les résultats de ce travail.

Les données de la carte piézométrique sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n°04 : Piézométrie au niveau du terrain d'étude.

Nom	X (m)	Y (m)	N.P. (m)
SA2	588897	3042139	384,45
SA3	590619	3039352	380,23
SA5	587161	3039357	401,58
SA6	590645	3039536	382,5
SA7	591126	3037601	376,6
SA8	587708	3039669	396,8
SA9	588876	3037492	386,2
H N T 106	557178	3018504	420
Daia-khdra	581791	3037997	405,5
75/B	564342	3025954	417,5

N.P : niveaux piézométriques

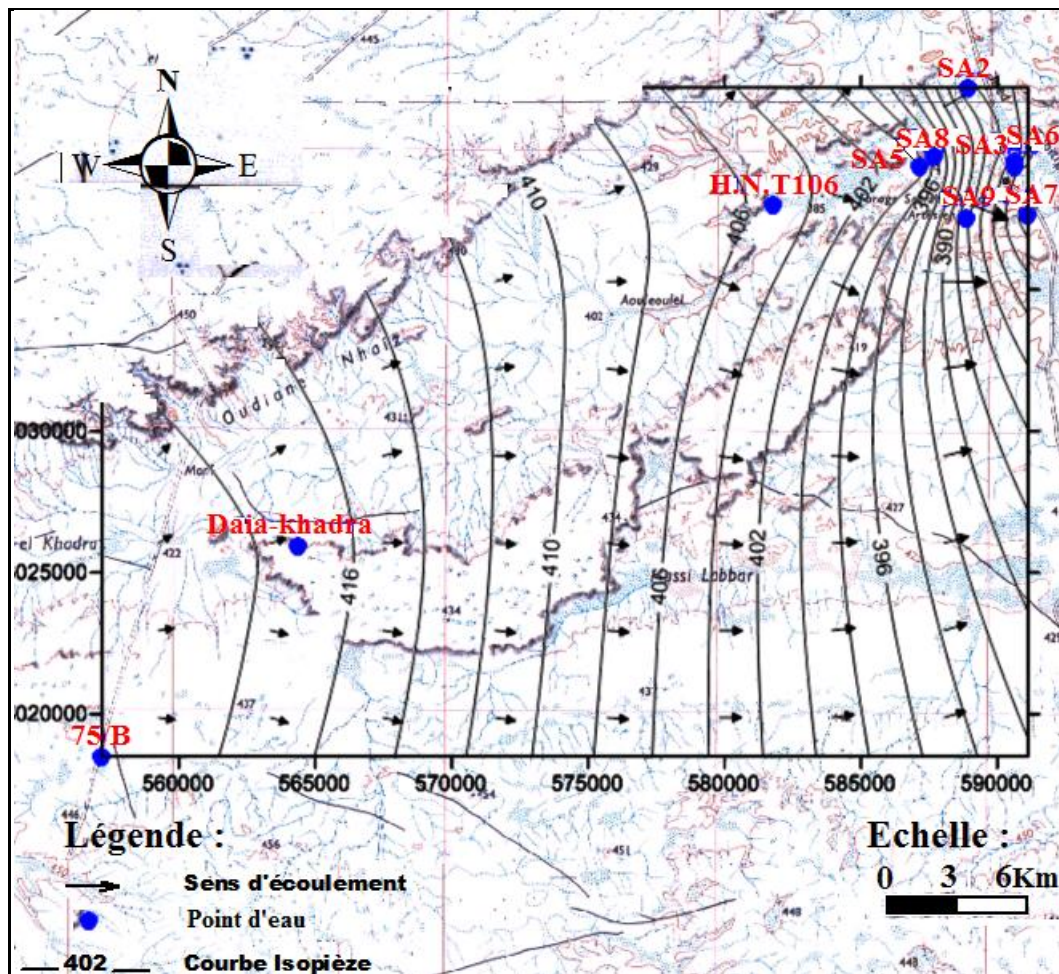


Figure n°09 : Carte piézométrique de la zone d'étude (2013).

- Interprétation de la carte piézométrique

La carte piézométrique représente une synthèse importante dans l'étude hydrogéologique et son interprétation contribue à l'étude éventuelle du comportement hydrodynamique de la nappe.

L'étude piézométrique effectuée à partir des mesures des niveaux d'eau dans les différents forages de Hassi Abdallah, montre que l'écoulement des eaux souterraines suit une direction Ouest-Est.

- L'écoulement suit un trajet de l'Ouest vers l'Est les courbes se resserrent vers le Nord
- L'alimentation de la nappe serait régie par les précipitations sur les formations hamadiennes qui peuvent être en continuité hydraulique avec les calcaires sur une large bande orientée Ouest-Est.

Elle pourrait provenir également des apports des zones d'affleurements de l'aquifère situées dans l'Atlas.

La carte piézométrique réalisée dans les formations calcaires et dolomitiques du Viséen permet grosso modo de donner une idée sur le sens de la direction d'écoulement mais ne permet en aucun cas de calculer les débits ou les gradients hydrauliques car c'est un milieu discontinu où les lois de l'écoulement (loi de Darcy) ne peuvent être appliquées.

Conclusion

La région de Tindouf constitue 6 aquifères :

- Grès et quartzite de l'Ordovicien supérieur (Gara Djebilet).
- Grès du complexe Emsien-Pragien du Dévonien inférieur (Aouinet Belgraa).
- Grès du Famennien-Tournaisien du Dévonien supérieur- Carbonifère inférieur.
- Calcaires et grès du Viséen inférieur (Kerb Esfiat).
- Calcaires et calcaires dolomitiques du Viséen supérieur (formation d'Ain El Berka).
- Grès plus ou moins argileux du Tertiaire (Hamada).

L'étude piézométrique effectuée à partir des niveaux d'eau dans les différents forages de Hassi Abdallah, montre que l'écoulement des eaux souterraines suit une direction Ouest-Est. Dans ce cas, l'alimentation de l'aquifère serait possible, soit directement à partir des zones d'affleurement de l'aquifère existant dans l'Atlas, soit indirectement à travers les terrains hamadiens.

I. Hydrochimie :

Introduction :

L'étude physico-chimique nous permet de déterminer les caractéristiques de l'eau, et le suivi de la variation spatiale et temporelle de ses différents constituants.

Notre présente étude a porté sur l'analyse de **10** échantillons, prélevés dans les forages captant la nappe de Hassi Abdallah (voir la carte d'inventaire des points d'eau en Figure n°10).

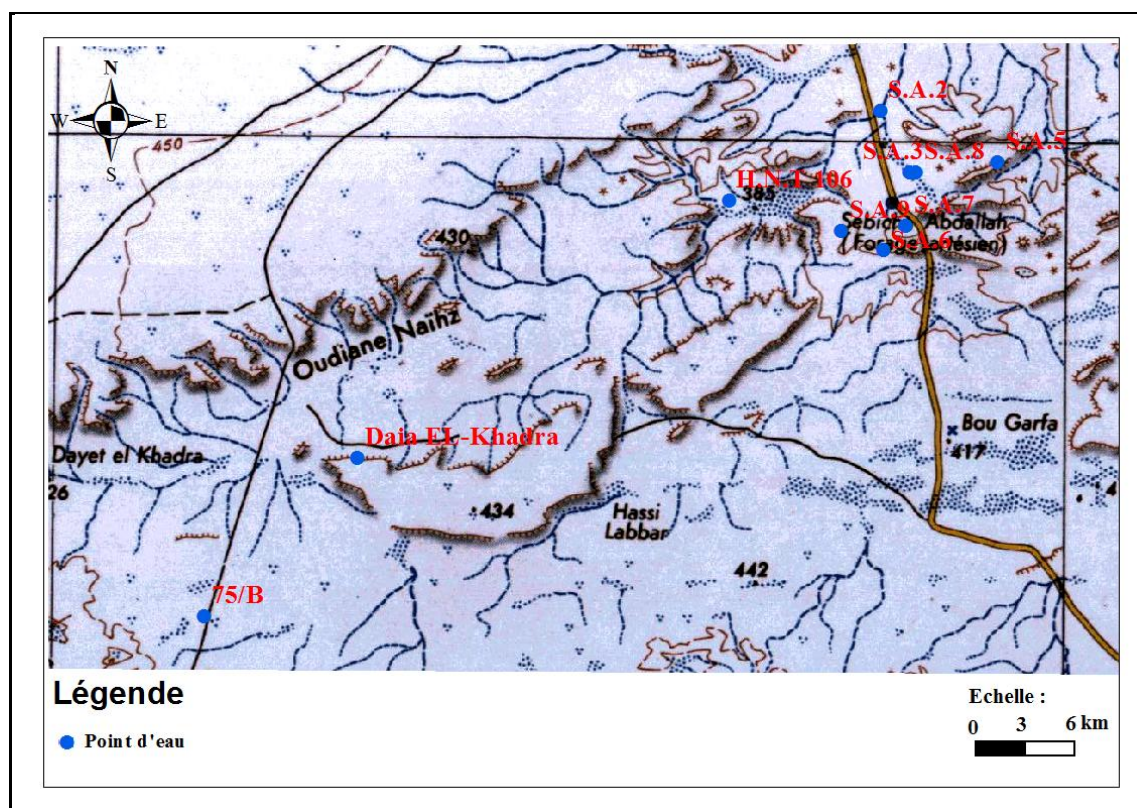


Figure n°10 : Carte d'inventaire des points d'eaux de la nappe de Hassi Abdallah.

Les analyses chimiques des échantillons ont été effectuées au niveau de l'ANRH d'Adrar, (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) à la demande du laboratoire de chimie ADE (Algérienne Des Eaux) de Tindouf au mois de mars 2015.

Les analyses ont porté sur les éléments majeurs suivants :

- Les cations : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} ;
- Les anions : Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} et NO_3^- ;
- Le potentiel d'Hydrogène ;
- La conductivité électrique ;
- Le résidu sec ;
- La minéralisation.

II. Contrôle des analyses par la balance ionique

Les analyses peuvent être contrôlées par la balance ionique (BI) donnée par la formule suivante :

$$BI = \left| \frac{\sum r^+ - \sum r^-}{\sum r^+ + \sum r^-} \right| \times 100$$

avec :

r : quantité en réaction.

- si $BI < 2\%$ → bonne analyse.
- si $2\% < BI < 5\%$ → analyse acceptable.
- si $BI > 5\%$ → mauvaise analyse.

Les valeurs des quantités en réaction sont exprimées en méq/l, les résultats sont insérés dans le tableau n°5.

Tableau n°05 : Résultats d'analyse des eaux exprimés en mg/L et en méq/L.

	Unité	SA2	SA3	SA5	SA6	SA7	SA8	SA9	H.N.T106	DaiaKhadra	75/B
Ca ⁺⁺	mg/l	180	180	150	163	171	196	216	157	91	82
	méq/l	8,98	8,98	7,48	8,13	8,53	9,78	10,77	7,83	4,54	4,09
Mg ⁺⁺	mg/l	116	117	120	102	145	135	112	122	126	112
	méq/l	9,55	9,63	9,88	8,39	11,93	11,11	9,22	10,04	10,37	9,22
Na ⁺	mg/l	390	380	410	440	540	464	360	280	145	175
	méq/l	16,96	16,53	17,83	19,14	23,48	20,17	15,65	12,17	6,30	7,61
K ⁺	mg/l	6	5	7	6	8	9	4	6	6,6	6
	méq/l	0,15	0,13	0,18	0,15	0,20	0,23	0,10	0,15	0,17	0,15
∑ cations	méq/l	35,64	35,27	35,19	35,81	44,14	41,30	35,74	30,19	21,38	21,07
Cl ⁻	mg/l	610	600	650	680	830	710	550	500	330	310
	méq/l	17,18	16,92	18,31	19,15	23,38	20	15,49	14,08	9,30	8,73
SO ₄ ⁻²	mg/l	605	630	620	600	740	800	800	630	489	405
	méq/l	12,60	13,13	12,92	12,5	15,42	16,66	16,66	13,13	10,19	8,44
HCO ₃ ⁻	mg/l	253	220	250	244	247	244	246	201	299	308
	méq/l	4,15	3,61	4,10	4,00	4,05	4,00	4,03	3,30	4,90	5,05
NO ₃ ⁻	mg/l	80	92	50	50	92	89	90,2	92	63	59
	méq/l	1,29	1,48	0,81	0,81	1,45	1,48	1,44	1,48	1,02	0,95
∑ anions	méq/l	35,22	34,45	36,14	36,46	44,13	42,44	37,63	31,79	25,41	23,17
Balance	%	1,09	0,90	0,02	1,16	2,58	0,61	1,08	2,58	8,61	4,75

(Source : ADE de Tindouf, Mars 2015)

III.1. Paramètres physiques (voir tableau n°06) :

III.1.1. Température :

La température joue un rôle important dans la solubilité et la dissolution des sels, lorsqu'elle est élevée, elle diminue la solubilité de l'oxygène. Les valeurs de température de notre région d'étude varient entre 24 et 26,5°C.

Tableau n°06 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux.

	Unité	SA2	SA3	SA5	SA6	SA7	SA8	SA9	H.N.T106	Daia-Khadra	75/B
pH		7,10	7,26	7,10	6,96	7,15	6,89	7,06	7,24	7,5	7,21
Conductivité	μS/cm	3323	3460	3340	3570	4410	4000	3660	3020	2030	2010
TH	°F	92	93	87	83	102	104	100	89	75	67
Minéralisation	mg/L	2518	2622	2531	2706	3343	2577	2729	2289	1539	1531
Résidu sec	mg/L	2340	2438	2230	2340	2851	2710	2360	1860	1350	1300
T° (eau)	°C	25	26	26	25,5	25,5	26,5	26,5	26	25	24

(Source : ADE de Tindouf, Mars 2015)

III.1.2. Potentiel Hydrogène pH :

Le pH (potentiel d'hydrogène) est par définition une mesure de l'activité des ions H⁺ contenus dans une eau : $\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$.

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité, il est mesuré à l'aide du pH-mètre. Le pH des eaux des forages étudiés varie entre 6,89 et 7,50 et sont à 100% dans l'intervalle fixé par les normes algériennes : 6,5 et 8,5.

III.1.3. Conductivité électrique :

Elle permet une estimation approchée de la minéralisation des eaux. Elle augmente avec la teneur en sels dissous (conductivité élevée => eau chargée). La conductivité électrique est exprimée en μS/cm. Elle varie entre 2010 et 4410μS/cm. Cette élévation de la conductivité est essentiellement due au faible taux de renouvellement, à l'évaporation importante, ainsi qu'à l'exploitation intensive des eaux de la nappe.

D'une façon générale, les eaux de la zone d'étude sont relativement minéralisées. L'examen de la carte d'isoteneur, représentée par la figure n°11 nous permet de faire les observations suivantes :

- les fortes valeurs (2706 et 3343 mg/l) sont localisées au niveau des forages SA7 et SA6 au Nord-Est de la région d'étude.

- Les faibles valeurs (1531 et 1539 mg/l) sont localisés au niveau des forages 75/B, Daia-Khadra dans la partie Sud-Ouest de notre secteur d'étude.

D'une façon générale, la minéralisation augmente du Sud-Ouest vers le Nord-Est de notre secteur d'étude, conformément à la direction d'écoulement.

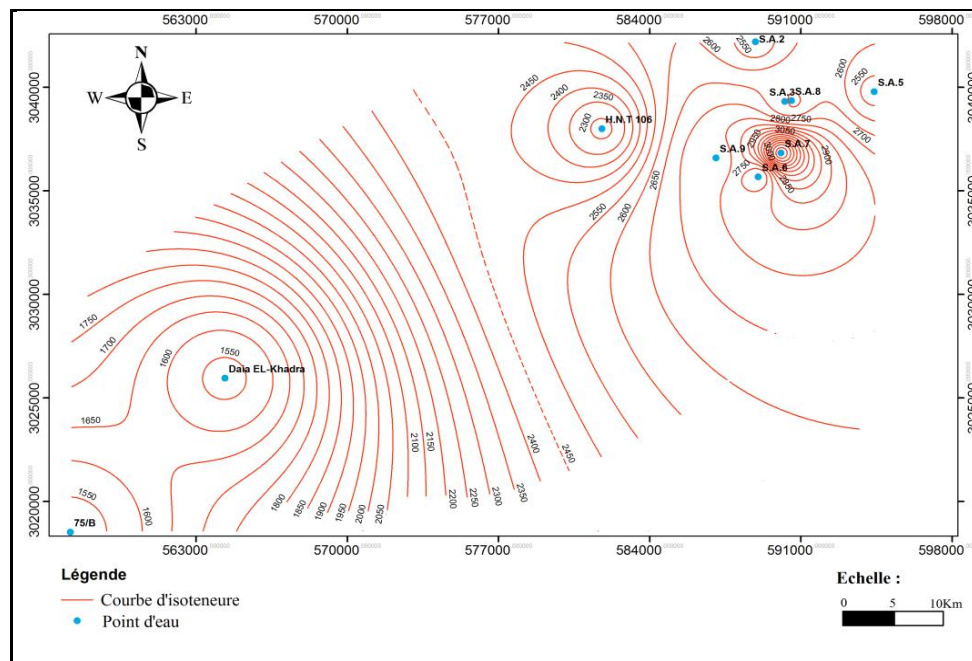


Figure n°11 : Carte d'iso-minéralisation en mg/l.

III.1.4. Dureté :

- Dureté totale :

La dureté des eaux souterraines est principalement liée à la nature des terrains traversés. Si l'eau présente une forte concentration en sels minéraux, on dit qu'elle est dure. A l'inverse, si cette concentration est faible, l'eau est dite douce.

Ce paramètre indique la dureté de l'eau qui correspond à la somme des teneurs en calcium et magnésium :

$$TH = r(Ca^{2+} + Mg^{2+}) \text{ méq/l.}$$

On peut classer les eaux en fonction de leurs duretés (tableau n°07).

Tableau n°07 : Classification des duretés.

TH (°F)	0 à 3 °F	3 à 15 °F	15 à 30 °F	> 30 °F
TH de l'eau	Très douce	douce	Dure	Très dure

Les données d'analyses montrent que la dureté des eaux des échantillons étudiés, varie entre **67°F** et **104 °F**. D'après le tableau, c'est une eau très dure pour tous les points d'eaux, ce qui est en liaison avec la nature fortement minéralisé des points d'eau.

III.1.5. Réside Sec :

Le résidu sec représente la minéralisation totale de l'eau, soit la totalité des sels dissous et des matières organiques contenus dans l'eau. Pour une eau potable, le résidu sec ne doit pas dépasser 2000 mg/l.

Le résidu sec des échantillons varie entre 1300 et 2710 mg/l (Figure n°12).

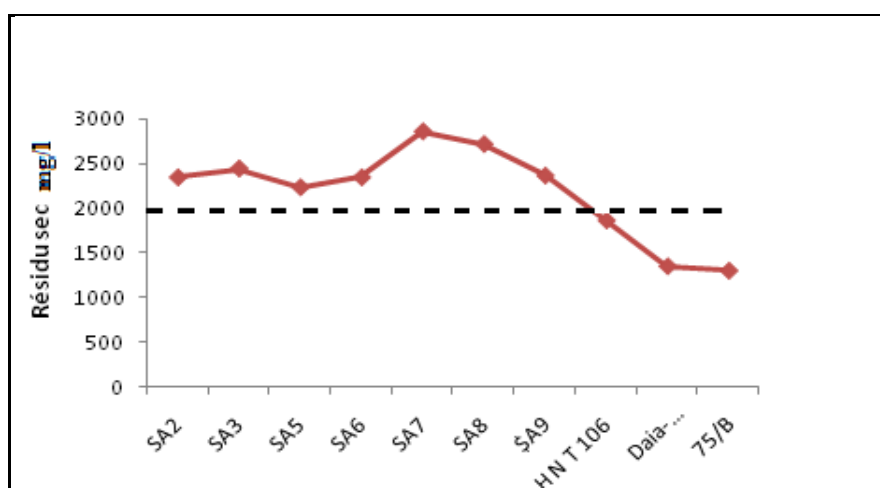


Figure n°12 : Résidu Sec.

III.2. Paramètres chimiques

Les paramètres chimiques mesurés concernent :

- Les cations : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} .
- Les anions : Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} et NO_3^- .

L'analyse des cations et des anions majeurs des eaux souterraines est une opération indispensable, qui permet une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques qui interviennent dans les nappes.

III.2.1. Cations :

III.2.1.1. Calcium (Ca^{2+}) :

Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles. Les teneurs en Calcium des forages analysés varient entre 82 et 216 mg/l. La concentration la plus élevée a été relevée au niveau du forage SA9 (Cf. tableau n°05).

III.2.1.2. Magnésium (Mg^{2+}):

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium et provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens. Les teneurs en Magnésium des échantillons étudiés sont comprises entre 102 et 145 mg/l. La teneur élevée est détectée au niveau du forage SA7 (Cf. tableau n°05).

III.2.1.3. Sodium (Na^+) :

Le sodium est un des constituants majeurs de l'écorce terrestre, il existe dans la totalité des eaux, vue la solubilité très élevée de ses sels. L'activité humaine emploie beaucoup de sels de sodium dans ses diverses industries.

En agriculture, il constitue un associé aux autres éléments alcalins et alcalinoterreux, il est un élément de maintien de la perméabilité de sols.

La carte des teneurs en sodium (Figure n°13) montre que la majorité des forages dans la région d'étude présentent de fortes teneurs. Les valeurs varient entre 280 et 540 mg/l et se localisent dans la partie Nord-Est.

Cette concentration serait due au lessivage par les eaux superficielles des formations marno-gypseuses (la formation géologique de la nappe de Hassi Abdellah).

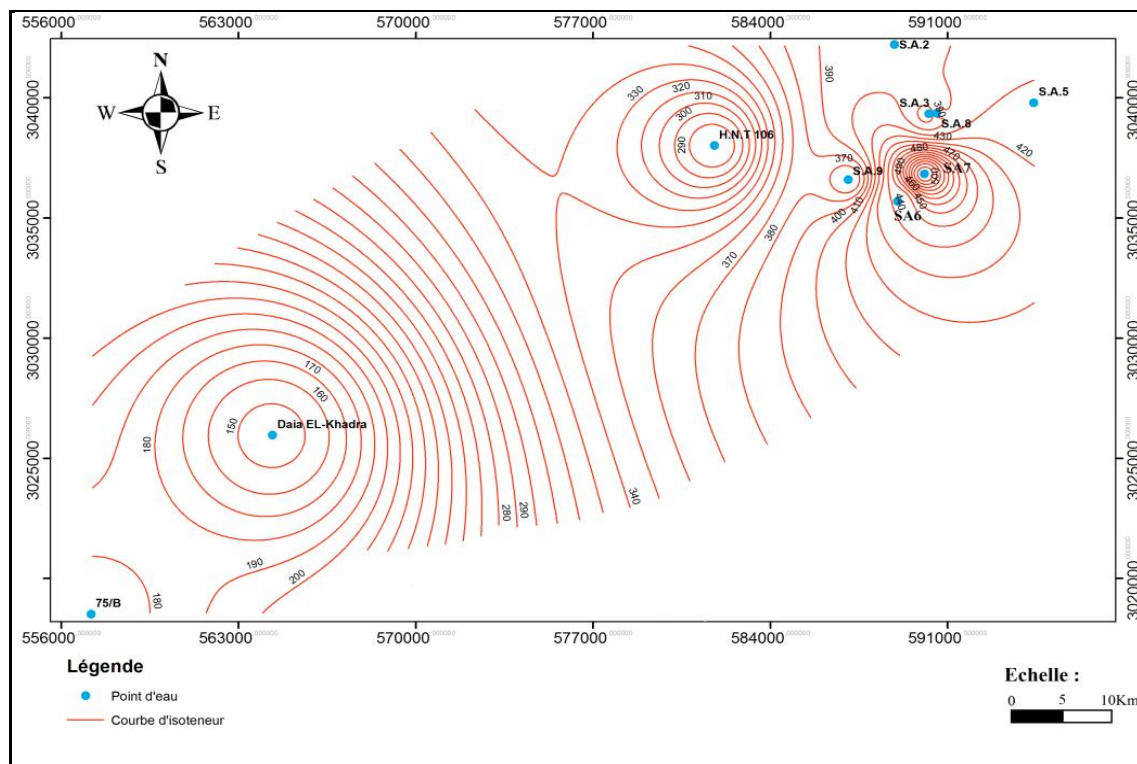


Figure n°13 : Carte d'isoteneur en Na^+ .

III.2.1.4. Potassium (K^+) :

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques.

Les teneurs en potassium sont comprises entre 4 et 9 mg/l, la valeur 9 mg/l a été mesurée au niveau du forage SA8 (Cf. Tableau n°05).

III.2.2. Anions

III.2.2.1. Bicarbonates (HCO_3^-):

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

Les teneurs en bicarbonates des échantillons analysés sont comprises entre 201 et 308 mg/L, la valeur élevée a été enregistrée au niveau du forage 75/B (Tableau n°05).

III.2.2.2. Sulfate (SO_4^{2-}):

Les sulfates sont le composant naturel des eaux, qui sont liées aux cations majeurs : Calcium, Potassium et Sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des formations gypseuses.

La carte d'isoteneur en sulfates (Figure n°14) montre que les fortes valeurs comprises entre 605 et 800 mg/l sont localisées au Nord-Est du secteur d'étude.

L'origine des sulfates est liée à la nature lithologique des formations géologiques de la nappe de Hassi Abdallah (gypse et marne).

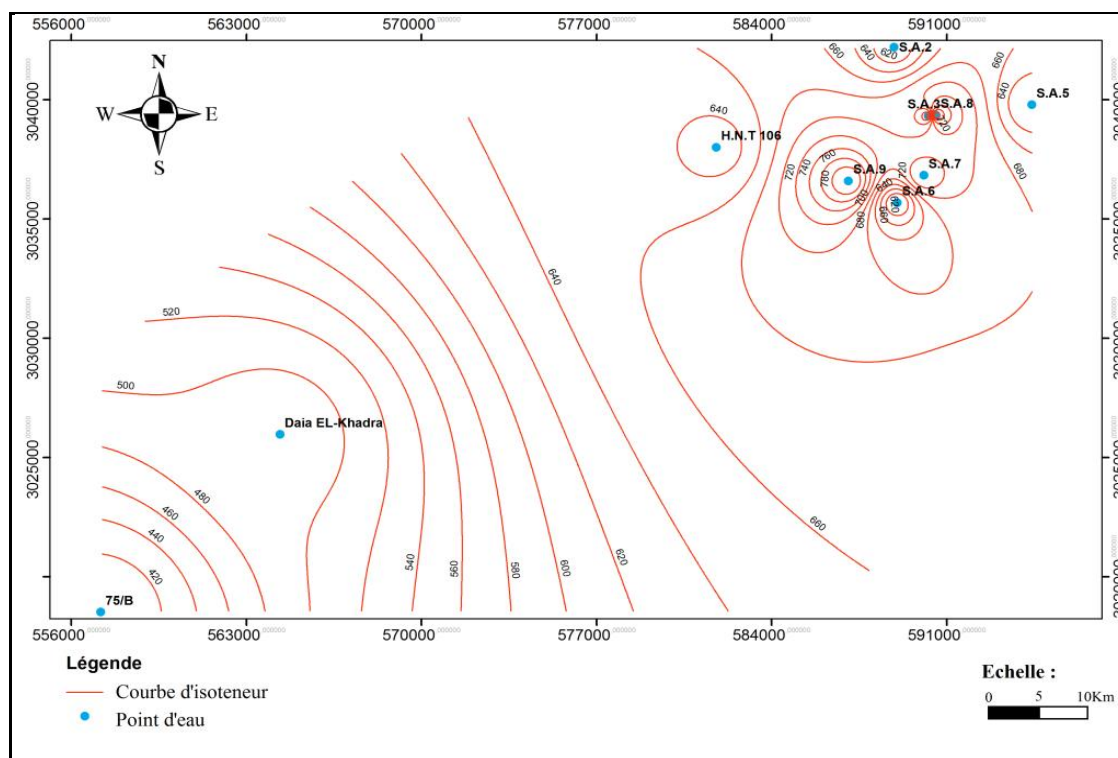


Figure n°14 : Carte d'isoteneur en SO_4^{2-}

III.2.2.3. Chlorure (Cl^-) :

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables.

D'après la carte d'isoteneur en chlorures (Figure n°15), nous observons que les valeurs augmentent du Sud-Ouest vers le Nord-Est selon le sens d'écoulement des eaux souterraines (310 et 830 mg/l).

Les ions chlorures peuvent avoir plusieurs origines :

- la dissolution des chlorures de sodium.

- dissolution des formation salifère et l'évaporation dans les milieux fermés à système endoréique (Sebkha de HassiAbdella à proximité de la nappe).

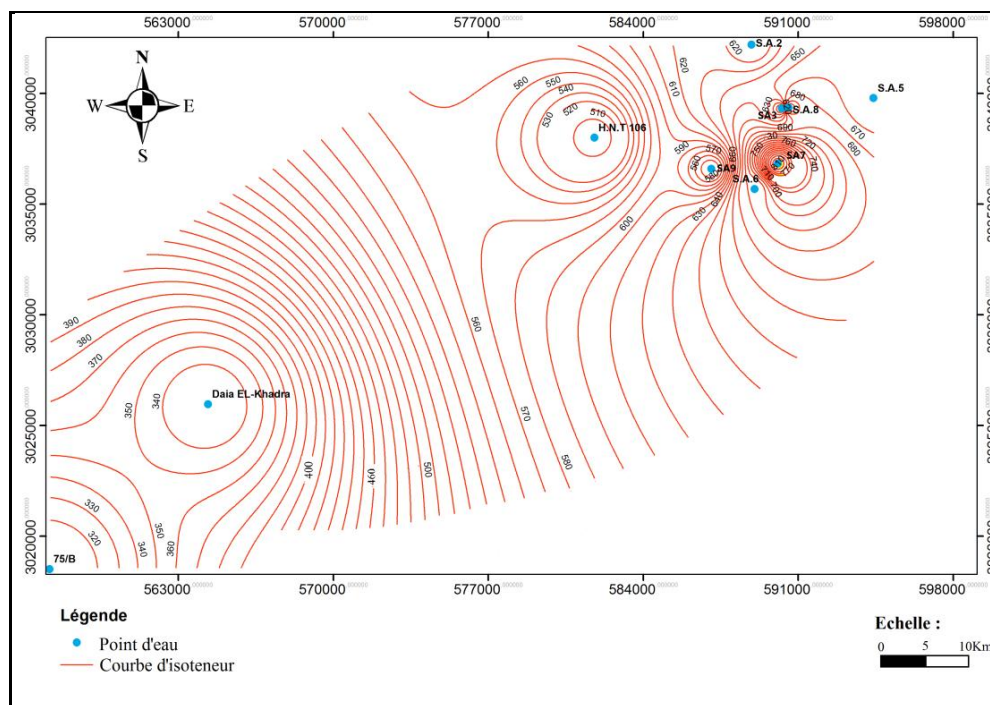


Figure n°15 : Carte d'isoteneur en Cl.

III.2.2.4. Nitrates (NO_3^-) :

Les nitrates, en faible quantité dans les eaux souterraines proviennent de la nitrification de l'azote organique des sols par les bactéries et de l'oxyde d'azote atmosphérique apporté par la pluie. Dans le cas de la région de Tindouf, ils proviennent d'engrais chimique et organique et des rejets des eaux usées.

A partir de la carte des teneurs en nitrates (Figure n°16), on peut distinguer que la majorité des forages dépassent 50 mg/l et la concentration en NO_3^- augmente globalement du Sud Ouest vers Nord-Est.

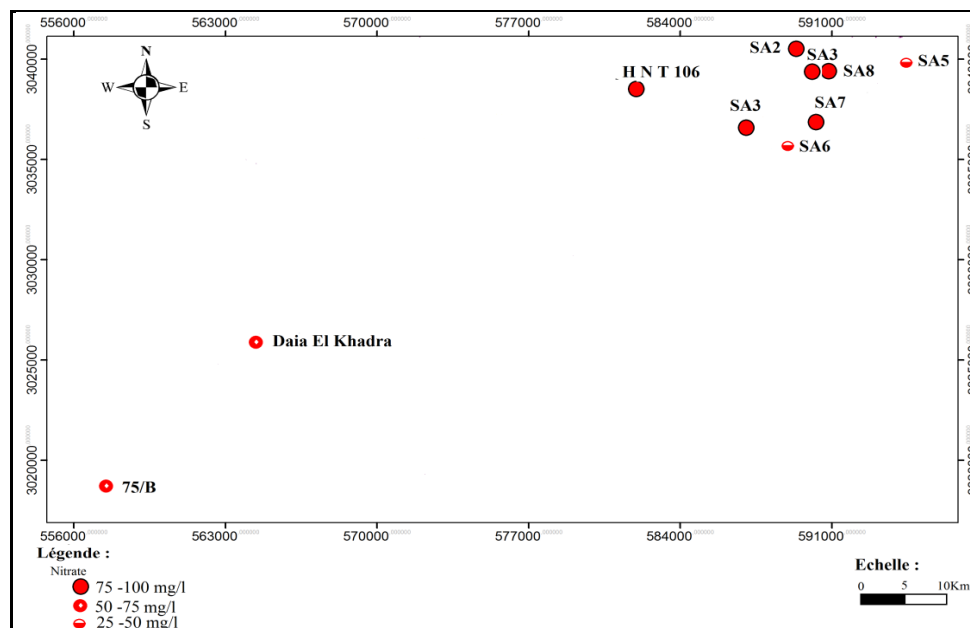


Figure n°16 : Carte d'isoteneur en NO_3^- .

IV. Qualité des eaux

Normes de potabilité

Les normes algériennes (N.A.6360-1992) sont inspirées de ceux de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) relatives aux eaux et des normes prescrites dans les directions de la Communauté Economique Européenne (C.E.E). La présente norme a pour objet de fixer les spécifications organoleptiques, physico-chimiques et toxicologiques des eaux destinées à la consommation.

A partir du tableau ci-dessous (tableau n°08), nous pouvons constater que la plupart des résultats d'analyses d'eau de cette nappe sont conformes aux normes de potabilité sauf pour les chlorures, les sulfates, le sodium et la minéralisation.

Tableau n°08 : Vérification de la Potabilité des eaux selon les normes algériennes.

Paramètre	Unité	Niveau Guide	Concentration Maximale Admissible	Résultats des analyses Chimiques	
				Eau potable	Eau non potable
Ca ²⁺	mg/L	75	200	SA2-SA3- SA5-SA6 -SA7-SA8-75/B- DaiaKhadra - H.N.T106	SA9
Mg ²⁺	mg/L		150	SA2-SA3-SA5-SA6- SA7-SA8-SA9-75/B- DaiaKhadra H.N.T106	
Na ⁺	mg/L		200	75/B-DaiaKhadra	SA2-SA3-SA5-SA6- SA7-SA8-SA9- H.N.T106
K ⁺	mg/L		20	SA2-SA3-SA5SA6- SA7-SA8-SA9-75/B- DaiaKhadra H.N.T106	
Cl ⁻	mg/L		500	75/B- DaiaKhadra H.N.T106	SA2-SA3-SA5-SA6- SA7-SA8-SA9
SO ₄ ⁻²	mg/L	200	400		SA3 - SA6 - SA7 - SA8 - SA9-75/B- DaiaKhadra
Ph		6,5	8,5	SA2-SA3-SA5-SA6 - SA7 -SA8 - SA9 75/B-DaiaKhadra H.N.T106	
Minéralisation	mg/L		1000		SA2-SA3-SA5 SA6 - SA7 -SA8 - SA9- 75/B-DaiaKhadra H.N.T106
Conductivité	µs/cm		2880	75/B-DaiaKhadra	SA3 - SA6 - SA7 - SA8 - SA9

V. Etude des rapports caractéristiques :

L'étude des rapports caractéristiques les plus courants en hydrochimie permet de préciser le milieu de provenance des eaux souterraines et comparer leur concentration en éléments chimiques. L'étude a concerné les rapports suivants : $r(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})$, $r(\text{Na}^+/\text{Cl}^-)$, $r(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°09 : Rapports caractéristiques.

	$r \text{ Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	$r \text{ Na}^+/\text{Cl}^-$	$r \text{ SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$
SA2	0,56	0,98	0,73
SA3	0,58	0,97	0,78
SA5	0,55	0,97	0,71
SA6	0,43	0,99	0,65
SA7	0,49	1,004	0,66
SA8	0,55	1,008	0,83
SA9	0,59	1,010	1,08
H.N.T 106	0,82	0,86	0,93
Daia-Khadra	1,64	0,67	1,10
75/B	1,21	0,87	0,97

V.1. Rapport caractéristique $r \text{ Mg}^{2+} / r \text{ Ca}^{2+}$

Pour l'ensemble des points d'eau, les valeurs obtenues indiquent un rapport inférieur à l'unité (rapport<1) montrant la prédominance du calcium sur le magnésium. Cette prédominance est à la faveur de la dissolution des calcaires dolomitiques.

V.2. Rapport caractéristique $r \text{ Na}^+ / r \text{ Cl}^-$

On remarque que la plupart des valeurs obtenues, sont inférieures à l'unité (rapport<1) montrant que l'eau de cette nappe est plus chlorurée que sodique.

V.1. Rapport caractéristique $r \text{ SO}_4^{2-} / r \text{ Cl}^-$

Nous pouvons constater que la plupart des valeurs du rapport sont inférieures à l'unité (rapport<1) montrant que les chlorures dominent par rapport aux sulfates sauf en quelques forages. L'abondance des chlorures résulte des formations gypseuses qui bordent la nappe.

VI. Classification des eaux et faciès chimiques

Pour déterminer les faciès et principales familles chimiques des eaux de notre région, nous avons établi les formules caractéristiques (tableau n°10) et utilisé des diagrammes de représentation graphique des résultats d'analyse.

Tableau n°10 : Formule caractéristiques des eaux de la nappe de Hassi Abdellah.

Forage	Anion	Cation	Faciès des eaux
SA2	$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	$Na^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{+} > K^{+}$	Eau chlorurée sodique.
SA3	$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	$Na^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{+} > K^{+}$	Eau chlorurée sodique.
SA5	$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	$Na^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{+} > K^{+}$	Eau chlorurée sodique.
SA6	$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	$Na^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{+} > K^{+}$	Eau chlorurée sodique.
SA7	$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	$Na^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{+} > K^{+}$	Eau chlorurée sodique.
SA8	$rCl > SO_4^{2-} > HCO_3^-$	$Na^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{+} > K^{+}$	Eau chlorurée sodique.
SA9	$rSO_4^{2-} > rCl > rHCO_3^-$	$Na^{2+} > Ca^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$	Eau sulfatée sodique.
H.N.T 106	$Cl > SO_4^{2-} > HCO_3^-$	$rNa^{+} > rMg^{2+} > rCa^{2+} > rK^{+}$	Eau chlorurée sodique.
Daia-Khadra	$rSO_4^{2-} > rCl > rHCO_3^-$	$rMg^{2+} > rNa^{+} > rCa^{2+} > rK^{+}$	Eau sulfatée magnésienne
75/B	$Cl > SO_4^{2-} > HCO_3^-$	$rMg^{2+} > rNa^{+} > rCa^{2+} > rK^{+}$	Eau chlorurée magnésienne

VI.1. Représentation graphique des analyses d'eau

VI.1.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme semi logarithmique de Schoeller-Berkaloff est utilisé pour la représentation graphique des analyses chimiques. Il permet de déterminer le type de faciès des eaux ainsi que leur évolution.

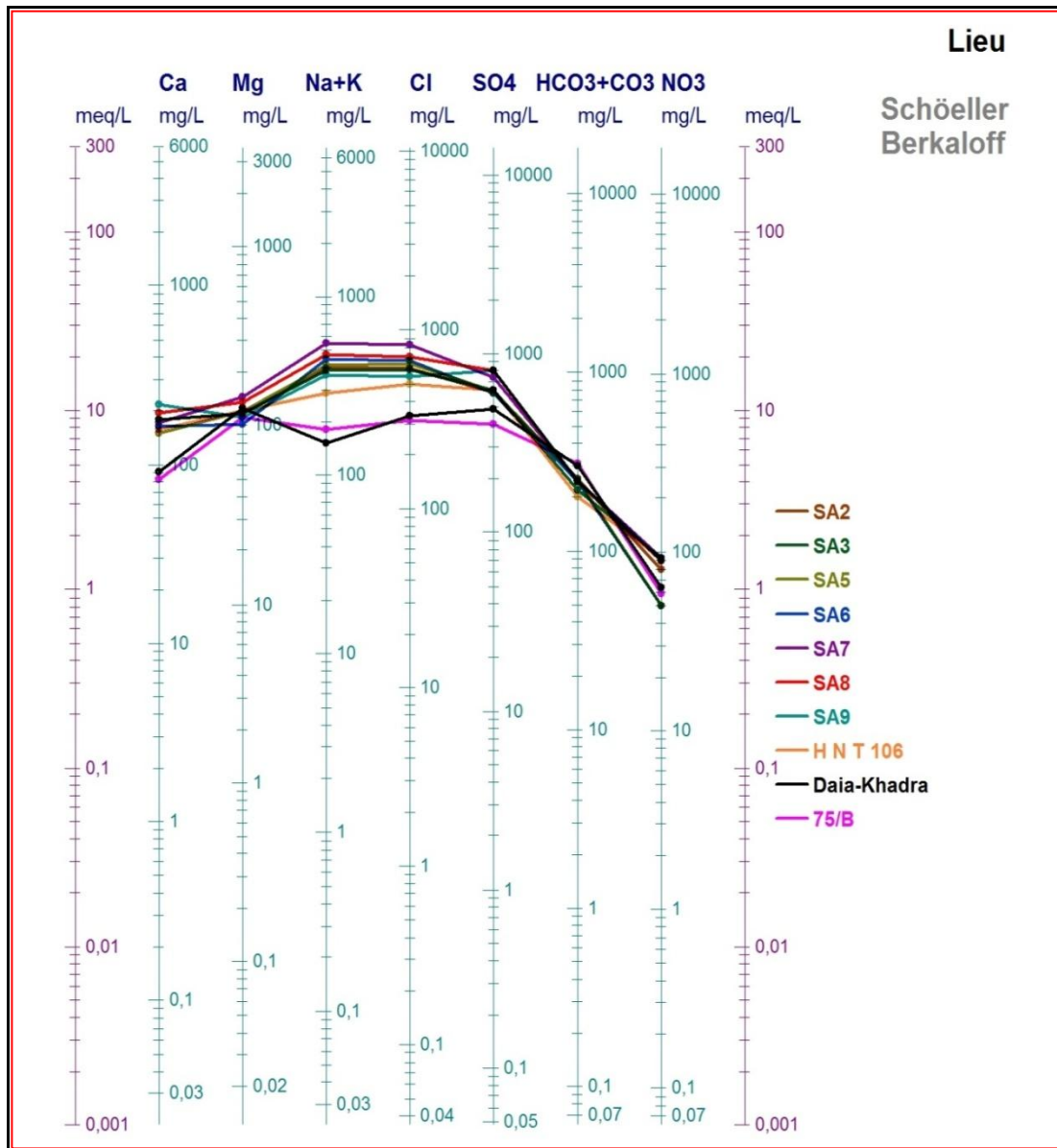


Figure n°17 : Diagramme de Schoeller- Berkaloff.

Le diagramme de Schö eller et Berkaloff permet de classer les eaux selon 2 faciès :

- Chloruré sodique : SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA9, H N T 106.
- Sulfaté magnésien : 75/B, Daia-Khadra.

VI.1.2. Diagramme de Piper :

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de catégoriser les faciès chimiques des échantillons d'eau prélevés sur le terrain.

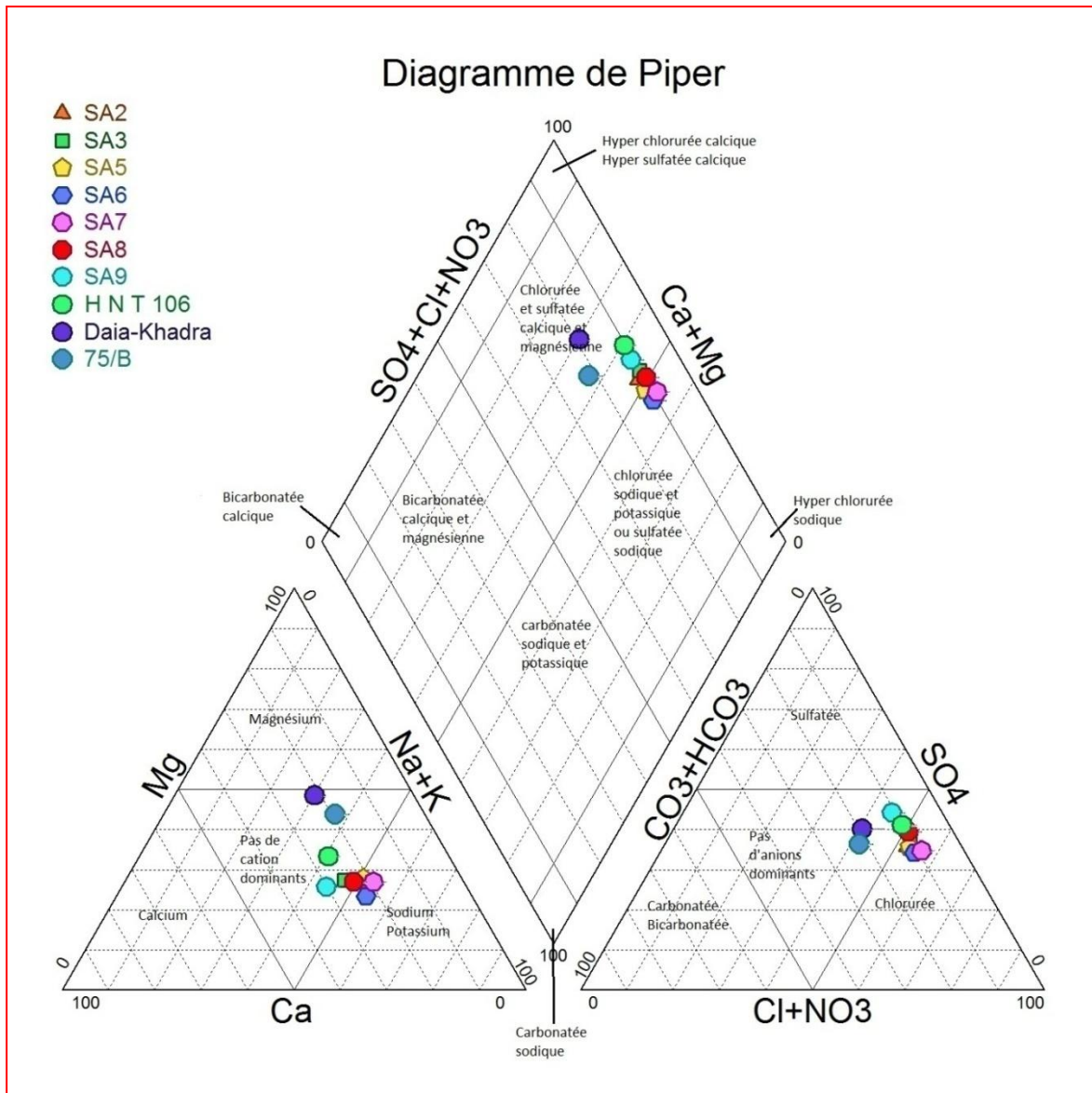


Figure n°18 : Diagramme de Piper.

Le diagramme de Piper (Figure n°18) permet de classer les eaux selon deux faciès :

- Eau chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.
- Eau chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

La majorité des eaux de cette nappe sont regroupés en deux principaux faciès selon le diagramme de Piper : Sulfatée sodique et Chlorurée sodique (Tableau n°09).

VII. Indices de Saturation :

Ces indices permettent de déterminer l'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux.

$$SI = \text{Log} (IAP/K)$$

IAP : représente le produit de solubilité exprimé à l'aide des activités ioniques.

K : la constante d'équilibre relative à la dissolution du minéral.

Pour le cas de la calcite : $\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3^{-2}$

Donc le produit d'activité ionique :

$$IAP = a_{\text{Ca}^{+2}} \cdot a_{\text{CO}_3^{-2}}$$

($a_{\text{Ca}^{+2}}$: activité de l'ion Ca)

A l'état d'équilibre thermodynamique, le produit de la calcite (KCaCO₃)

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

Alors, l'indice de saturation exprimé est :

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

Si :

IS = 0 : l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite.

IS > 0 : l'eau est sur saturée par rapport à la calcite.

IS < 0 : il montre que l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite.

Le calcul des indices de saturation a été obtenu en utilisant le logiciel Diagramme.

Les résultats sont représentés dans le tableau n°11

Tableau n°11 : Indices de saturation.

Forages	Cl	Is Calcite	Is Aragonite	Is Dolomite	Is Gypse	Is Anhydrite
SA2	610	0,23	0,08	0,62	-0,47	-0,69
SA3	600	-0,07	-0,22	0,01	-0,53	-0,75
SA5	650	0,12	-0,03	0,52	-0,45	-0,67
SA6	680	-0,09	-0,23	0,03	-0,36	-0,58
SA7	830	0,14	0,00	0,35	-0,30	-0,52
SA8	710	0,13	-0,02	0,42	-0,49	-0,71
SA9	550	0,04	-0,10	0,35	-0,56	-0,78
H N T 106	500	0,12	-0,02	0,49	-0,51	-0,73
Daiakhadra	330	0,35	0,21	1,20	-0,82	-0,82
75/B	310	0,04	-0,10	0,57	-0,94	-0,92

Les chlorures étant le principal élément conditionnant la minéralisation des eaux, nous avons représenté sur les digrammes des figures 19 à 23, les indices de saturation des différents minéraux carbonatés et sulfatés en fonction des chlorures.

La figure n°19 montre une légère sursaturation des eaux par rapport à la calcite, pour les plupart des forages sauf le forage Daia-Khadra avec une saturation importante. Les forages SA3 et SA6 restent légèrement sous-saturés.

La figure n°20 montre une sous-saturation des eaux par rapport à l'Aragonite de l'ensemble des forages, à l'exception des forages Daia -Khadra et SA2 qui restent légèrement sursaturés

La figure n°21 montre une sur-saturation par rapport la dolomie, avec tendance vers l'équilibre des eaux les plus chargées en Cl.

Les figures 22, 23 montrent une sous-saturation par rapport au gypse et anhydrite pour l'ensemble des points d'eau considérés, avec une tendance vers l'équilibre des eaux les plus chargées en chlorures.

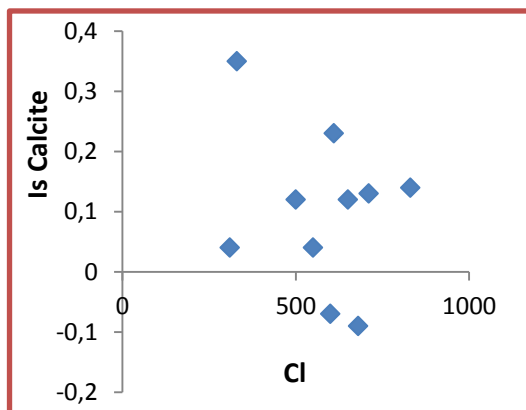


Figure n°19 : Variation d'Is Calcite.

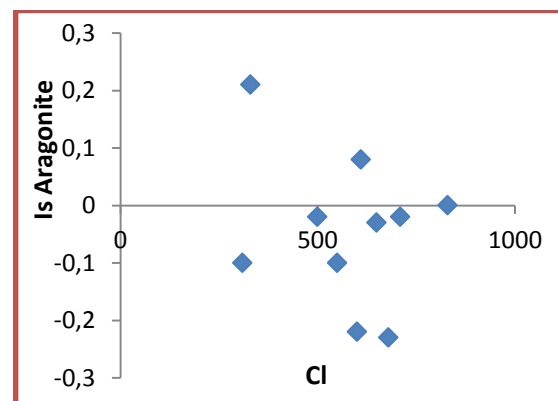


Figure n°20 : Variation d'Is Aragonite.

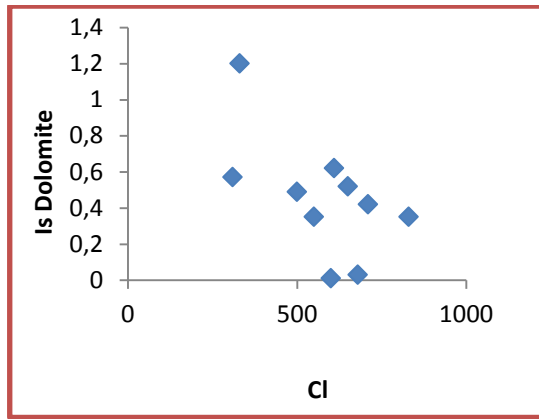


Figure n°21: Variation d'Is Dolomite

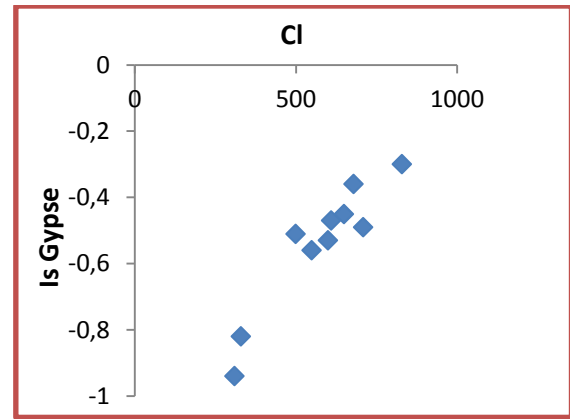


Figure n°22: Variation d'Is Gypse.

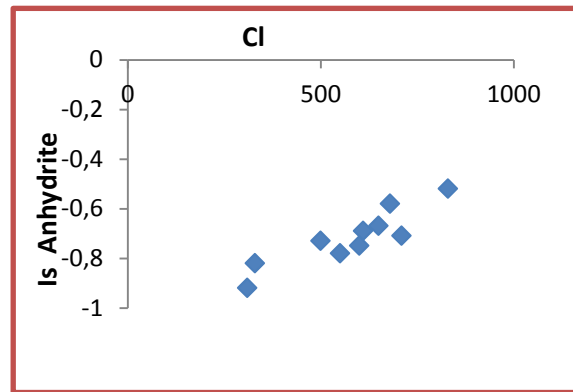


Figure n°23 : Variation d'Is Anhydrite

VIII. Traitement statique des donnés hydrochimiques :

Nous avons entrepris une étude statistique sur 10 échantillons et 10 variables

(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , pH, Conductivité) .

VIII.1. Paramètres statistiques élémentaires :(tableau n°12)

Le calcul des paramètres statistiques permet de donner pour chaque variable les valeurs extrêmes (Minimum et Maximum), la moyenne et le coefficient de dispersion (écart-type).

Tableau n°12 : Statistique descriptives des variables :

Variabes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart- type
Ca ²⁺	82	216	158,6	42,55
Mg ²⁺	102	145	120,7	12,30
Na ⁺	145	540	358,4	124 ,17
K ⁺	4	9	6,36	1,42
Cl ⁻	310	830	577	162,69
SO ₄ ²⁻	405	800	631,9	125,61
HCO ₃ ⁻	201	308	251,2	31,90
NO ₃ ⁻	50	92	75,72	16,80
pH	6,89	7,5	7,15	0,17
Conductivité	2010	4410	3282,3	767,72

Parmi les cations, c'est le sodium qui prédomine avec une concentration moyenne de 358 mg/l devant le calcium (159 mg/l), et le magnésium (121mg/l).

Parmi les anions, ce sont les sulfates qui prédominent avec une concentration moyenne de 632 mg/l devant les chlorures (577mg/l).

Nous pouvons remarquer que les valeurs des écarte -type sont également plus importantes pour Cl, SO₄ et Na.

VIII.2. Matrice de corrélation :

Les coefficients de corrélation entre les teneurs des différents éléments majeurs sont donnés sur le tableau suivant

Tableau n°13 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.

Variable	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	C E
Ca ²⁺	1								
Mg ²⁺	-0,1001	1							
Na ⁺	0,6413	0,2362	1						
K ⁺	-0,1887	0,7374	0,3722	1					
Cl ⁻	0,5614	0,3087	0,9928	0,4467	1				
SO ₄ ²⁻	0,8459	0,3196	0,6370	0,1605	0,5925	1			
HCO ₃ ⁻	-0,5335	0,1220	-0,3301	0,1958	-0,3233	-0,349	1		
NO ₃ ⁻	0,4622	0,5335	0,1705	0,0526	0,1730	0,5054	-0,4978	1	
C E	-0,7368	0,1397	-0,7052	-0,2388	-0,7161	-0,668	0,3132	0,0384	1

Nous remarquons une bonne corrélation par ordre décroissant entre :

1. Na⁺ et Cl⁻(r=0,9928).
2. Ca²⁺ et SO₄²⁻ (r=0 ,8459).
3. Mg²⁺ et K⁺ (r=0,7374).
4. Ca²⁺ et Na⁺ (r=0,6413).
5. SO₄²⁻ et Na⁺ (r=0,6370).

VIX. Analyse en Composantes Principales :

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique multidimensionnelle essentiellement descriptive, utilisable comme aide à l'interprétation d'une matrice de données.

Les matrices de données physico-chimiques comportent « m » analyses (ou points échantillonnés) sur « n » variables (ou éléments mesurés).

Bien que le nombre d'échantillon considéré soit faible, nous avons procédé à une analyse en composantes principales.

Pour visualiser les variations du chimisme de l'eau dans la nappe de Hassi Abdellah comme les relations entre les différents éléments en solution, Dans ce cadre, nous avons considérés 10 éléments dont les teneurs sont exprimées en mg/l.

Il s'agit des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), des anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-) et de la conductivité électrique.

Les facteurs sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Chaque variable contribuant au facteur intervient avec un coefficient dit "vecteur propre". Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de variance totale, le second explique le plus grand pourcentage de variance résiduelle.

Le but de l'A.C.P, consiste donc à transformer les principales variables quantitatives initiales, toutes plus ou moins corrélés appelés composants.

VIX.1. Résultats obtenus :

-Diagonalisation :

On obtient 57% pour l'axe 1, 18% pour le second. Donc, la variance expliquée est de 76% pour les deux axes.

VIX.2. Etude des variables :

- Selon l'axe 01 : on constate que les éléments sont corrélés positivement sauf le HCO_3^- . Le HCO_3^- et Ca^{2+} sont inversement proportionnels entre eux.

Le K^+ et Ca^{2+} s'éloignent vers l'intérieur du cercle, ce qui indique leur moindre corrélation avec les autres éléments.

- Selon l'axe 02 : les éléments Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et la conductivité forment un groupe homogène et sont bien corrélés entre eux (Figure n°24).

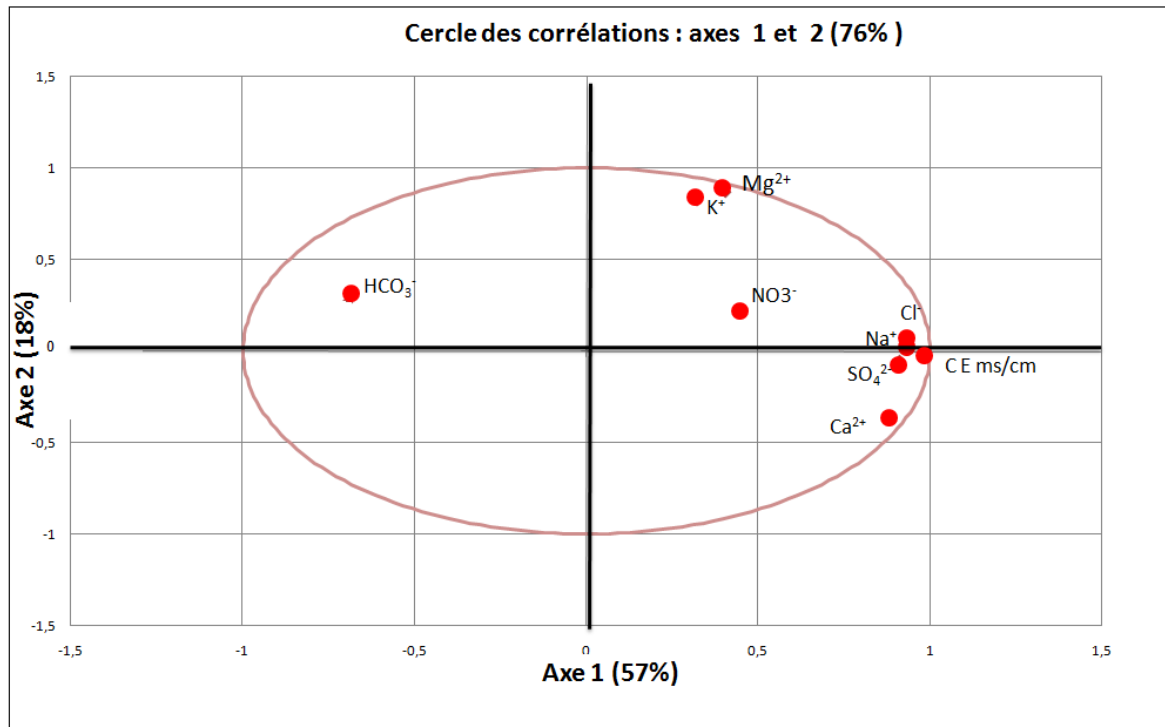


Figure n°24 : Cercle de corrélation : axe1 et 2, étude des variables.

VIX.3. Etude des individus :

D'après la figure des individus (Figure n°25), deux ensembles sont distingués en fonction de leur minéralisation.

- Groupe 1 : (Daia –khadra ,75/B, H N T 106), cet ensemble est caractérisé par sa faible minéralisation variant entre 1,5 et 2,3 g/l.
- Groupe 2 : (SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA9), cet ensemble caractérise les eaux avec une minéralisation assez élevée variant entre 2,5 et 3,3 g/l.

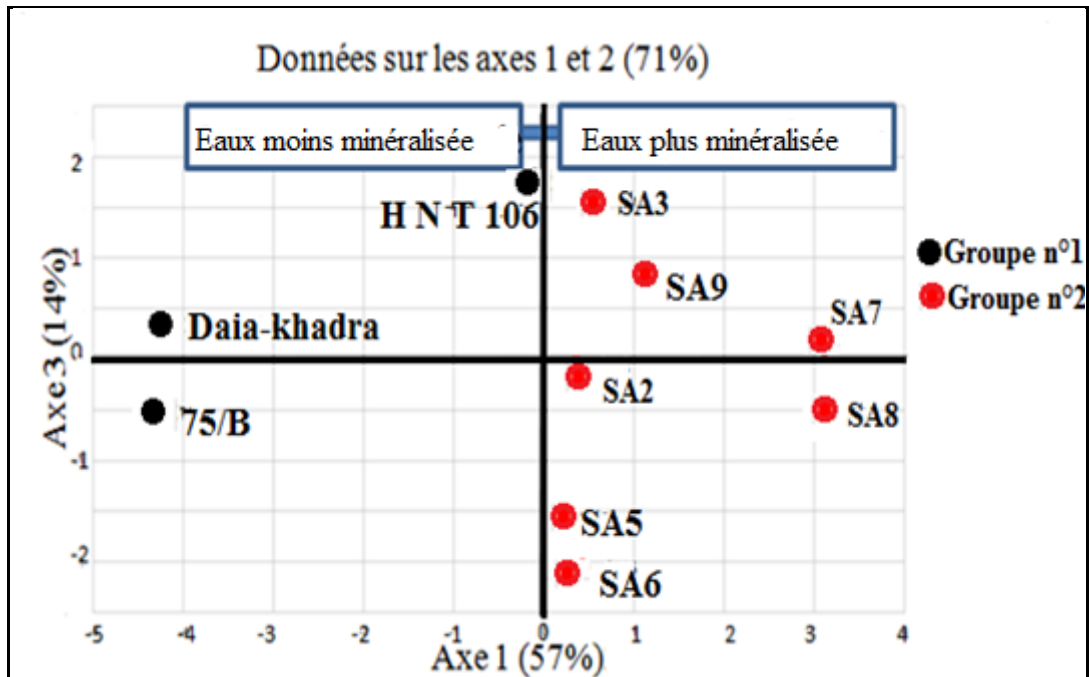


Figure n°25 : Cercle de corrélation : axe 1 et 2 variables et individus.

X. Qualité des eaux d'irrigation :

Les eaux superficielles et souterraines peuvent être utilisées aussi bien pour l'A.E.P (alimentation en eau potable) que pour l'irrigation ou l'industrie.

La qualité des eaux d'irrigation dépend du type de sol, des conditions climatiques, et de la qualité de l'eau. Une eau d'irrigation très minéralisée peut présenter un risque d'alcalinisation et de salinisation des sols par le remplacement des ions de calcium et de magnésium par le sodium et ce rapport ionique que l'on appelle le S.A.R (Sodium Absorption Ratio) s'exprime en « méq/l »

Le S.A.R est donné par la formule :

$$S.A.R = Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2}$$

La concentration de chaque ion est exprimée en méq/l. Selon le taux d'absorption du Sodium (S.A.R), on a la classification suivante tableau n°14.

- S.A.R < 10 : eau à faible danger d'alcalinisation des sols, (eau excellents).
- 10 < S.A.R < 18 : eau avec un danger d'alcalinisation assez appréciable (eau bonnes).
- 18 < S.A.R < 26 : eau avec un danger d'alcalinisation important (eau convenables).
- S.A.R > 26 : eau présentant un danger d'alcalinisation très fort (eau médiocres).

Tableau n°14 : Résultats du S.A.R.

Nom	S.A.R	Qualité d'eau
SA2	5,58	Excellents
SA3	5,42	Excellents
SA5	6,04	Excellents
SA6	6,67	Excellents
SA7	7,34	Excellents
SA8	6,24	Excellents
SA9	4,95	Excellents
H.N.T106	4,03	Excellents
Daia-Khadra	2,31	Excellents
75/B	2,95	Excellents

On remarque que la qualité des eaux d'irrigation dans la nappe de Hassi Abdellah est excellente

Conclusion :

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe de Hassi Abdellah permet de constater que :

- ❖ La teneur en chlorures, sulfate, sodium est importante.
- ❖ La conductivité supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et donc une minéralisation relativement élevée variant entre 1,5 et 3.3 g/l.
- ❖ Les paramètres physico-chimiques des eaux sont conformes au niveau guide et admissible rapportées aux normes de potabilité algériennes.
- ❖ L'étude des rapports caractéristiques montre que les éléments prédominants sont les chlorures, le sodium et sulfates, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré sodique dans la plupart des forages et sulfaté sodique ou sulfaté magnésien.
- ❖ L'étude des indices de saturation montre :
 - une légère sursaturation des eaux par rapport à la calcite
 - une sous-saturation des eaux par rapport à l'aragonite de l'ensemble des forages
 - une sursaturation par rapport à la dolomie, avec tendance vers l'équilibre des eaux les plus chargées en Cl.
 - une sous-saturation par rapport au gypse et anhydrite pour l'ensemble des points d'eau considérés, avec une tendance vers l'équilibre des eaux les plus chargées en chlorures.
- ❖ L'étude du S.A.R a confirmé que les eaux du secteur étudié sont excellentes pour l'irrigation.

- ❖ L'étude statistique des échantillons analysés par l'analyse en composante principal ACP fait apparaître deux groupes selon leur minéralisation.

I. Pollution

I.1. Définition de la pollution de l'eau :

Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où qu'elle présente un danger pour l'environnement.

I.2. Origine de la pollution :

Selon l'origine de pollution, on peut distinguer trois grandes catégories de pollutions

I.2.1. La pollution d'origine urbaine :

La pollution d'origine urbaine, correspond à des apports hétérogènes liés aux activités domestiques, économiques et industrielles, etc.

I.2.2. Pollution d'origine agricole :

L'agriculture est entrée dans un stade de modernisation, où les cultivateurs font parfois recours à une utilisation abusive d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires (insecticides, fongicides, herbicides, etc.). L'utilisation irrationnelle de ces produits peut entraîner des risques graves et polluer les eaux souterraines.

I.2.3. Pollution d'origine industrielle :

Elle peut être provoquée par les rejets industriels, thermiques et chimiques. Sa nature est aussi variée que celle des industries. La pollution par les éléments toxiques est la plus dangereuse pollution incluse dans ce type

2. Etude de la pollution dans le secteur d'étude :

2.1. Les éléments indicateurs de pollution dans la zone d'étude :

Les principaux éléments analysés sont : les nitrates, les nitrites, l'ammonium, les phosphates, la matière organique, la silice.

Les résultats de l'analyse des éléments indicateurs de pollution sont figurés dans le tableau n°15

Tableau n°15 : Résultats d'analyse des éléments indicateurs de pollution en mg/l.

Nom	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	Matière organique	Phosphates	Silice
SA2	80	0,010	0,02	4	0,2	9
SA3	92	0,015	0,04	4,7	0,22	11
SA5	50	0,010	0	4,3	0,2	10
SA6	50	0,035	0	4,9	0,19	13
SA7	92	0,025	0	4,6	0,19	8
SA8	89	0,016	0	6,7	1,57	11,9
SA9	90,2	0,005	0	4,5	1,2	19,5
H N T 106	92	0,050	0,03	3,6	0,001	24,5
Daia-Khadra	63	0,020	0,022	2,5	0,3	13,25
75/B	59	0,010	0,022	3,8	0,1	13

(Source : ADE de Tindouf, 2015).

2.2. Pollution par les produits azotés :

L'azote peut se présenter sous différentes formes et à degrés variable. Ses dérivés les plus importants sont NH₃⁺, les dérivés ammoniacaux (NH₄⁺), les nitrites (NO₂⁻) et les nitrates (NO₃⁻).

2.2.1 Nitrates :

D'après les résultats des analyses, on constate pour la plupart des forages une teneur élevée en nitrates dépassant largement les normes de potabilité (45-50g/l) (tableau n°15).

La concentration élevée en nitrates est causée par :

- la présence de fosses septiques et perdues, favorisant une infiltration des eaux usées comme c'est le cas actuellement (Hôpital et Haut Commissariat des Nation Unies pour les Réfugiés) (tableau n°16).

- les rejets de déchets contrôlés ou incontrôlés.

- le Projet d'élevage de poulailler pondeuse de Nkhila (à 4 Km à l'Ouest de SA3).

Tableau n°16 : Caractéristique des eaux des fosses septiques de l'hôpital et de l'ENHCR.

Paramètres physico-chimiques	Unité	Fosse septique de l'hôpital	Fosse septique de l'ENHCR
Ph		7,70	8,22
Conductivité	µS/cm	4070	3980
Turbidité	NTU	12,90	15,80
Paramètres de pollution	Unité	Fosse septique de l'hôpital	Fosse septique du ENHCR
Ammonium(NH ₄)	mg/l	41,90	48
Nitrate (NO ₃)	//	120	95
Nitrite (NO ₂)	//	<0,02	<0,855
Phosphates (O-PO ₄)	//	<0,09	<0,09
Demande chimique en oxygène (DCO)	mgO ₂ /l	96	288
Paramètres bactériologique	Unité	Fosse septique de l'hôpital	Fosse septique du ENHCR
Coliformes totaux	Ge/100 ml	2400	20000
Coliforme fécaux	//	0	0
Streptocoques fécaux	//	22000	5200

(Source : ADE de Tindouf, 2006).

2.2.2. Nitrites :

Contrairement aux nitrates, les teneurs dans tous les forages sont faibles, ne dépassent pas les normes de potabilité (0,10), avec une teneur variant entre 0,010 et 0,050mg/l. (Cf. tableau n°15)

2.2.3. Ammonium :

Dans notre secteur d'étude, les résultats obtenus sont nettement inférieurs aux normes de potabilité admises (0,50) (Cf. tableau n°15)

2.3. Pollution par les autres éléments :

2.3.1. Phosphates :

Le teneur en phosphate ne dépasse pas les normes de potabilité (<0,5) (Cf. tableau n°15).

2.3.2. Matière organique :

Les résultats d'analyses indiquent que l'eau de cette nappe présente des teneurs élevées en matières organiques dépassant les normes de potabilités (3mg/l) (Cf. tableau n°15).

2.3.3. Silice :

La silice est rencontrée dans l'eau, soit à l'état dissous, soit à l'état colloïdal; les eaux des régions granitiques peuvent en contenir plusieurs dizaines de milligrammes par litre. Une eau potable de bonne qualité ne contient pas plus de 20 mg/l de silice.

Dans notre secteur d'étude, les valeurs des teneurs en silice varient entre 9 et 24,5 mg/l, dans la plupart des forages sauf le forage HNT 106 où elle dépasse les normes (Cf. tableau n°15).

2.4. Analyses bactériologiques :

Les analyses bactériologiques des échantillons d'eau avaient été réalisées au niveau de l'A.N.R.H d'Adrar à la demande du laboratoire de chimie ADE de Tindouf au 2006.

2.4.1. Pollution bactériologique (tableau n°17)

Les micro-organismes, ayant pour origine la pollution fécale de l'eau, sont très nombreux et très variés, sous forme de germes et virus. Pour ces différentes raisons, il est préférable de rechercher des germes qui sont toujours présents en grand nombre dans les matières fécales des hommes et des animaux.

Ces germes sont dénommés "germes indicateurs" d'une contamination fécale. Leur mise en évidence dans l'eau n'est pas la preuve de la présence de danger, mais elle permet de le suspecter fortement.

Ces germes sont :

2.4.1.1. Les coliformes totaux :

Ce sont des bactéries en forme de bâtonnet, aérobies ou anaérobies facultatives. Ils se présentent naturellement dans le sol et dans le tube digestif des humains et des animaux. Par conséquent, leur présence dans l'eau pourrait indiquer une contamination fécale et également pourrait signifier que les eaux de surface s'infiltrent dans la nappe.

2.4.1.2. Les coliformes fécaux :

C'est un sous-groupe de coliformes totaux, mais ils sont présents uniquement dans l'intestin des humains et des animaux. L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est l'*Escherichia Coli* (E. Coli).

Leur présence dans l'eau d'un puits, indique surement une pollution d'origine fécale, issue du fumier ou des eaux usées provenant d'une fosse septique avoisinante.

2.4.1.3 Les streptocoques fécaux :

Ce sont d'excellents indicateurs de pollution et sont généralement pris en compte comme des témoins de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal.

Tableau n°17: Présentation des résultats de l'analyse bactériologique des eaux.

Point d' eau	Paramètre bactériologique	Coliformes totaux (Ge/100ml)	Coliformes fécaux (Ge/100ml)	Streptocoques fécaux (Ge/100ml)
SA2		0	0	5
SA3		0	0	11
SA5		0	0	2
SA6		160	0	21
SA7		0	0	3
SA8		0	0	1
SA9		0	0	1
H.N.T 106		0	0	2
Daia-Khadra		0	0	2
75/B		0	0	1

(Source : ADE de Tindouf, Mars2006).

A partir des résultats des analyses bactériologiques, nous remarquons que tous les forages présentent une pollution par les bactéries, avec une importante pollution par les Coliformes totaux au forage SA6.

Conclusion

Il apparait que la majorité des échantillons prélevés présente des teneurs en nitrates supérieures aux normes de potabilité. Les autres paramètres restent dans des normes acceptables. Toutefois, les eaux sont de mauvaise qualité bactériologique avec présence de germes indicateurs de contamination fécale. Cette contamination serait due à l'absence de réseau d'assainissement et donc prolifération de fosses perdues.

Conclusion générale :

Cette étude nous a permis de synthétiser les contextes géographique et climatique de la région ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques.

Le secteur du champ captant de Hassi Abdellah fait partie de la wilaya de Tindouf dans le Sud Ouest Algérien, situé à environ 2000 Km d'Alger.

Cette étude nous conduit aux conclusions suivantes :

Du point de vue climatique, la région est caractérisée par un climat hyper-aride, avec des températures très élevées (45C°) et des précipitations faibles.

Sur le plan géologique, cette description est basée sur les études menées dans les différents étages structuraux du bassin de Tindouf et qui ont mis en évidence la présence d'un socle cristallin d'âge Précambrien, représenté par des schistes, des quartzites et des roches granitiques.

La succession lithostratigraphique des calcaires du Viséen supérieur est représentée par quatre membres :

- a)- membre carbonaté supérieur.
- b)- membre évaporitique.
- c)- membre carbonaté inférieur.
- d)- membre gréso-argileux – calcaire.

Du point de vue hydrogéologique, les aspects lithologiques et structuraux des grandes formations géologiques de la zone d'étude déterminent les principaux systèmes aquifères, à savoir :

- Grès et quartziques de l'Ordovicien supérieur (Gara Djebilet).
- Grès du complexe Emsien-Pragien du Dévonien inférieur (Aouinet Belgraa).
- Grès du Famennien-Tournaisien du Dévonien supérieur- Carbonifère inférieur.
- Calcaires et grès du Viséen inférieur (Kerb Esfiat).
- Calcaires et calcaires dolomitiques du Viséen supérieur (formation d'Ain El Berka).
- Grès plus ou moins argileux du Tertiaire (Hamada).

L'étude piézométrique de la nappe a permis la mise en évidence du sens de l'écoulement de direction Ouest-Est. L'alimentation de la nappe serait régie par les précipitations sur les

formations hamadiennes qui peuvent être en continuité hydraulique avec les calcaires sur une large bande orientée également Ouest- Est.

L'étude hydrochimique a permis de caractériser les principaux paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés

Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que ces eaux sont caractérisées par :

- ❖ La teneur importante en chlorures, sulfate et sodium.
- ❖ La conductivité supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et donc une minéralisation relativement élevée variant entre 1,5 et 3.3 g/l.
- ❖ Les paramètres physico-chimiques des eaux sont conformes au niveau guide et admissible rapportées aux normes algériennes.
- ❖ L'étude des rapports caractéristiques montrent que les éléments prédominants sont les chlorures, sodium et sulfates, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré sodique dans la plupart des forages et sulfaté sodique ou sulfaté magnésien.
- ❖ L'étude des indices de saturation montre :
 - une légère sursaturation des eaux par rapport à la calcite
 - une sous-saturation des eaux par rapport à l'aragonite de l'ensemble des forages
 - une sursaturation par rapport la dolomie, avec tendance vers l'équilibre des eaux les plus chargées en Cl.
 - une sous-saturation par rapport au gypse et anhydrite pour l'ensemble des points d'eau considérés, avec une tendance vers l'équilibre des eaux les plus chargés en chlorures.
- ❖ L'étude du S.A.R a confirmé que les eaux du secteur étudié sont excellentes pour l'irrigation.
- ❖ L'étude statistique des échantillons analysés par l'analyse en composante principal ACP fait apparaître deux groupes selon leur minéralisation.

Concernant les éléments indicateurs de pollution, il apparaît que la majorité des échantillons d'eau prélevée présentent des teneurs en nitrates supérieures aux normes de potabilité. Les eaux restent de mauvaise qualité bactériologique avec présence de germes indicateurs de contamination fécale. La présence des nitrates et des bactéries pourrait s'expliquer par leur origine anthropique commune. Ce secteur (Hassi Abdellah) se caractérise par l'absence de réseau d'assainissement et donc prolifération de fosses perdues.

Bibliographies

AMRANE T. et AYAD A., (2011) : Rapport de synthèse (géologie, hydrogéologie, prospections géophysique, travaux de forages et piézomètres) du bassin de Tindouf. Direction Hydraulique – service exploitation. P12.

BELLARADJ M., (2013) : Caractérisation des eaux souterraine de plaine de la M'leta (Algérie, Nord-Ouest) par application de méthode statistique multi variées et modélisation géochimique.

BOUHAI A. et KADDOUR H., (2007) : Etude hydrogéologique sur le champ captant de Hassi Abdellah « Tindouf ».pp2-8

D.H.W, (2004) : Etude hydrogéologique de la région de Tindouf (rapport de synthèse).p5.

GEVIN P., (1958) : Notice explicative des cartes géologiques au 1/500000 TINDOUF EGLAB.

HAISSOUNE D., (1998) : Contribution à l'étude hydrogéologie de la nappe hammadienne de Tindouf .p20.

HAMOUDA M. et SAHARI A., (2013) : Contribution à l'étude hydrogéologique du champ captant Hassi Abdellah (Viséen Supérieur).p 27.

Laboratoire de chimie ADE(Algérienne Des Eaux) de Tindouf, **2015**.

MESSAOUDI H., (2008) : Lithostratigraphie, paléontologie, biostratigraphie et environnements sédimentaires dans les terrains du Dévonien Inférieur et Moyen de Gara Djebilet (bassin de Tindouf).p6.

NASRI B., (2004) : Rapport sur la qualité des eaux de la wilaya de Tindouf. p4.p13.

SILMANOU F. et AMRANE T., (2004) : Rapport de fin de travaux du forage de reconnaissance profond Bougurefa et Hassi Abdellah.

SONAREM (1976), Etude hydrogéologie de la région de Tindouf (rapport final). p36.

STATION METEO TINDOUF, 2012: les données de la climatologie.

YAHIAOUI A., (2011) : Rapport de constat sur le champ captant Hassi Abdallah Tindouf – Service mobilisation de la Ressource et Alimentation en eau potable (DRE) W. Tindouf.p10.

Bibliographies

YAHIAOUI A. (2011) : Proposition d'investigation pour les ressources en eaux souterraines de la région de Tindouf. DRE (Tindouf).