

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



Année 2017

THESE

Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux.

Option
Hydrogéologie
Par

BELKSIER Mohamed Salah

Directeur de thèse: Dr CHAAB Salah Professeur Université BADJI Mokhtar Annaba

DEVANT LE JURY :

Président : **Dr KHANCHOUL Kamel** Professeur Université BADJI Mokhtar Annaba

Examineurs : Dr MAOUI Ammar Professeur Université du 8 mai 45 Guelma
Dr KACHI Slimane Professeur Université du 8 mai 45 Guelma
Dr LABAR Sofiane MCA Université CHADLI BENDJEDID El Tarf
Dr SAAIDIA Bachir MCA Université BADJI Mokhtar Annaba

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude avant tout à dieu tout puissant qui ma aidé et donné le courage pour mener a bien ce modeste travail.

Ma gratitude et mes vifs remerciements vont directement à mon directeur de Thèse Mr Chaab.S d'avoir encadré et suivi mon travail de prés avec sa rigueur scientifique exceptionnelle, ses conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier infiniment les membres du jury : Dr. Khanchoul Kamel qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Je remercie vivement Dr. Maoui Ammar, Dr Kachi Slimene, Dr Laber Soufiane et Dr Saaidia Bachir d'avoir acceptés de juger ce travail.

Mes remerciements vont à tous les enseignants du département de géologie de l'université d'Annaba.

Toute ma gratitude va à Mr Sayah Lembarek Youcef ingénieur d'état et chef service du la direction de l'ANRH « Touggourt ».

Je tiens a remercie le personnel de l'ANRH de Touggourt et Ouargla, notamment Mr.ELALMI Foudil pour sa meilleure aide, Ben Guega Salah et Senousi Salim.

Mes remerciements vont aussi à tous les techniciens de la direction de l'ANRH (Touggourt).

Mes remerciements vont les responsables de la direction de l'ADE de Touggourt.

Enfin, je tiens à remercier tous les amis et les collègues qui m'ont aidés et encouragés pour réaliser ce mémoire, je cite spécialement Bouselsal B, Kechiched R et Bouznad Imad.

Résumé

Dans la région désertique de l'Oued Righ la demande en eau est importante et est influencée par la croissance démographique et le développement de l'agriculture. Elle est satisfaite par l'exploitation intensive des nappes profondes du Complexe terminal et du Continent Intercalaire. Le surplus d'eau pompé a causé une remontée du niveau piézométrique de la nappe superficielle, inondant les oasis et les zones basses, surtout celles de Meghaier et Djamaa. Malheureusement cette situation hydrodynamique a influé sur la qualité des eaux souterraines.

L'objectif de cette étude est, dans une première phase, de définir les aspects hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques de l'aquifère superficiel de l'Oued Righ et, dans une seconde phase, d'évaluer la vulnérabilité de la nappe superficielle à la pollution anthropogénique et à celle due à l'activité agricole. L'utilisation de la méthode de GOD montre que la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de l'Oued Righ varie, d'une façon spatiale, de modérée à forte. Les parties de l'aquifère de forte vulnérabilité sont caractérisées par les terrains agricoles, les chotts et les zones urbaines.

Mots clés : aquifères, hydrochimie, pollution, vulnérabilité, Oued Righ, Algérie, GOD

Abstract:

In the desert region of the Wadi Righ, the significant water demand, because of the population growth and the development of the agriculture, is satisfied by the intensive exploitation of the deep aquifers of “Continental Intercalaire” and “Complex Terminal”. The surplus of extracted water has caused a rise of the groundwater table of the upper unconfined aquifer, which has flooded some places, particularly low-lying zones, in the regions of Meghaier and Djemaa. This hydrodynamic situation has influenced the quality of waters.

The objective of this work is to define the hydrogeologic, hydrodynamic and physicochemical aspects of the upper aquifer in the first step and in the second to evaluate its vulnerability to anthropogenic and agricultural pollution. The use of the GOD method shows that the vulnerability of the unconfined aquifer of Righ Wadi is classified from high to moderate. The high vulnerability zones are characterized by the agricultural areas, chotts and urban zones.

Key-words: aquifers, hydrochemistry, pollution, vulnerability, GOD method, Wadi Righ, Algeria.

في المنطقة وادي ريع الواقعة في الصحراء الشمالية الشرقية للجزائر يزداد الطلب على المياه مع زيادة عدد السكان الكبير والنشاط الزراعي الكبير ومن أجل تلبية هذا الطلب المتزايد قامت الجزائر بمكثف لطبقات المياه الجوفية العميقة والتمدد القاري وقد أدى التصريف العشوائي لهذه المياه بعد استعمالها في مناطق المغير وجامعة من آثار صعود المياه أيضا تدهور نوعية مياه الطبقة المائية الحرة.

الهدف من هذه الدراسة يتمثل أولاً في تحديد الخصائص الهيدروجيولوجية والهيدروديناميكية والهيدروكيميائية للمياه المالحة في وادي الرّبع و ثانياً تقييم حساسية مياه الطبقة المائية الحرة في الناتج عن المخلفات البشرية و الزراعية. وقد بينت تطبيق طريقة GOD أن مياه هذه الأخيرة ذات حساسية متغيرة حسب المنطقة و تتراوح بين متوسطة إلى عالية و تعد المناطق الحضرية و الشطوط للمياه المالحة الزراعية الأكثر حساسية

الكلمات المفتاحية: الطبقة المائية | كيمياء المياه | الحساسية للتلوث | وادي ريح |

DIDICACE

REMERCIEMENTS

RÉSUMÉ

ABSTRACT

□ □□□

Liste des tableaux

Listes des figures

Liste des Abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE

01

CHAPITRE I : CADRE GÉOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL

1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE 03

2. APERÇU SOCIO-ÉCONOMIQUE 03

3. Végétation 05

4. TOPOGRAPHIE ET GÉOMORPHOLOGIE 06

4.1 Les paysages de la vallée de l'Oued Righ 07

4.2 Les sols de la vallée de l'Oued Righ 10

CHAPITRE II : CADRE GÉOLOGIQUE

1. INTRODUCTION 12

2. GÉOLOGIE RÉGIONAL 12

3. LES BASSINS SÉDIMENTAIRES DE L'ALGÉRIE 12

3.1 Algérie alpine 12

3.2 Plateforme saharienne 13

A. Bassin Tindouf et Reggane 13

B. Bassin de Bechar 13

C. Bassin de l'Ahnet-Timimoun 13

D. Bassin de Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya 13

E. La synéclyse d'Illizi-Ghadames 13

4. SYNTHÈSE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LE BASSIN DU 15

5. CADRE GÉOLOGIQUE LOCAL [OUED RIGH] 15

5.2 Tectonique 21

6. PALEOGEOGRAPHIE 22

7. CONCLUSION 25

CHAPITRE III : APERÇU HYDRO CLIMATOLOGIE

1. INTRODUCTION 27

2. Climat 27

3. Etude des facteurs climatiques 27

3.1. La Température 27

3.1.1. Variations des températures moyennes annuelles et mensuelles 28

3.2. La pluviométrie 29

3.2.1. Variations moyennes mensuelles des précipitations 29

3.2.2.	Variations interannuelles des précipitations	29
3.3.	L'évapotranspiration potentielle (ETP)	30
3.4.	Diagramme ombrothermique de GAUSSEN	30
3.5.	Indice de De Martonne	31
3.6.	Climagramme de Louis Emberger	32
3.7.	La durée d'insolation	34
3.8.	Relation température - évaporation	35
4.	Hydrologie	35
5.	CONCLUSION	36

CHAPITRE IV: HYDROGÉOLOGIE

1.	INTRODUCTION	37
2.	HYDROGÉOLOGIE RÉGIONALE	37
3.	LES NAPPES PROFONDES	38
3.1	Le Complexe Terminal	38
	A. Piézométrie de Complexe Terminale	41
3.2	Le Continental Intercalaire	42
	A. Toit du réservoir	44
	B. Alimentation	44
	C. Epaisseur du réservoir	44
	D. La piézométrie de la nappe continentale intercalaire	44
3.3	La nappe superficielle	47
	3.3.1. Piézométrie de la nappe superficielle	47
4.	Détermination des paramètres hydrodynamiques	48
4.1	Introduction	48
4.2	Méthode d'interprétation	49
5.	CONCLUSION	53

CHAPITRE V: CARACTERISTIQUES PHYSICO-HYDROCHIMIQUES ET RISQUE DE LA SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA ZONE D'ETUDES

1	INTRODUCTION	54
2	Nappes complexe Terminal (CT) et Continentale Intercalaire (CI)	54
2.1	Le potentiel d'hydrogène (pH)	54
2.2	Conductivité électrique	55
2.3	Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)	55
2.4	Les anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--})	57
2.5	Classification chimique des eaux de la nappe CT et CI	60
2.6	Aptitude des eaux à l'irrigation	61
2.7	Typologie statistique des eaux de la nappe CT et CI	62
2.7.1	Complexe Terminal (CT)	63
2.7.2	Nappe Continentale Intercalaire (CI)	68
3	Nappes Libre	72
3.1	Échantillonnage	72
3.2	Interprétation des Résultats	73
	Origine de minéralisation de la nappe superficielle	78
3.3	Etude des rapports caractéristiques	78

3.4	Etude des rapports caractéristiques	78
3.4.1	Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	78
3.4.2	Le Couple $\text{Na}^+ / \text{SO}_4^{2-}$	79
3.4.3	Le Couple $\text{Mg}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$	79
3.4.4	Le Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$	79
3.5	Indice d'échange de base (i.e.b.)	80
4.	Conclusion	81

CHAPITRE VI : EVALAUTION DE LA VULNERABILITE DES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE A LA POLLUTION

1	Introduction	84
2	Méthodes des systèmes paramétriques	84
2.1	Le système matriciel	84
2.2	Le système de classe	84
2.3	Le système de classes pondérées	84
2.4	Méthodes de comparaison	84
2.5	Méthodes des relations analogiques et modèles numériques	84
3	Application de la méthode GOD (Foster 1987)	84
3.1	Présentation de la méthode	85
3.2	Préparation des données	85
3.3	Digitalisation	85
3.4	Description des paramètres GOD	87
3.4.1	Profondeur de la nappe (D)	87
3.4.2	Type de nappe	87
3.4.3	Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques	88
4	Interprétation de la carte de vulnérabilité de la nappe libre d'Oued Righ	89
5	Conclusion	90
	CONCLUSION GENERALE	91

LISTE DES FIGURES

Fig. 1	Situation géographique de la vallée de l’oued Righ (A. N. R. H)	4
Fig. 2	Répartition des Oasis dans la zone d’étude.	5
Fig. 3	Formation géomorphologique de la région de l’Oued Righ ()	6
Fig. 4	Coupe géologique schématique N-S passant par la cuvette Secondaire Saharienne et par la Vallée de Oued Righ (A.Cornet, 1962).	12
Fig. 5	Carte des bassins sédimentaires (d’après Sonatrach)	14
Fig. 6	La carte géologique du bas Sahara (ANRH Ouargla)	17
Fig 7	Coupe géologique N-S passant par la cuvette Secondaire Saharienne et par la Vallée de Oued Righ (A.Cornet, 1962).	20
Fig 08	Colonne stratigraphique typique du Sahara septentrional (Sonatrach Division Forage, 2004)	25
Fig. 09	Evolution de la température moyenne annuelle de la station de Touggourt (1975/2014).	28
Fig.10	Evolution des températures moyennes mensuelles station de touggourt (1975-2014)	28
Fig. 11	Evolution des précipitations mensuelle de l’Oued Righ station de touggourt (1975-2014)	29
Fig. 12	Evolution des précipitations annuelles de l’Oued Righ station de touggourt (1975-2014)	29
Fig.13	Evolution d’évapotranspirations mensuelles de l’Oued Righ station de touggourt (1975-2014)	30
Fig. 14	Courbe Ombrothermique de la station de l’Oued Righ station de touggourt (Touggourt).	31

Fig. 15	Abaque de l'indice de l'aridité de De Martonne.	32
Fig. 16	Climagramme d'Emberger de la station de l'Oued Righ station de touggourt	33
Fig. 17	Evolution durées d'insolation mensuelles de l'Oued Righ (1975-2014)..	34
Fig. 18	Relation entre la température et l'évaporation à Oued Righ station de Touggourt.	35
Fig.19	Le tracé du canal de l'oued Righ (Source ABHS)	36
Fig. 20	Carte hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes (Etude ERESS modifiée par Guendouz et Al, 2003)	38
Fig. 21	Carte des points d'eau du CI et du CT en Algérie	40
Fig. 22	Coupe hydrogéologique schématique Nord Sud du Complexe Terminal (G.Castany, 1982)	41
Fig. 23	Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)	42
Fig 24	Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI.	43
Fig.25	Carte piézométrique de la nappe du continental intercalaire (d'après SASS 2003)	45
Fig. 26	Carte piézométrique de référence du Continentale Intercalaire (OSS, 2003)	46
Fig. 27	Carte piézométrique de la Nappe superficielle (Juin 2006)	48
Fig 28	Essai de pompage longue durée à El Meghaier par la méthode de Cooper-Jacob de la descende	49
Fig. 29	Essai de pompage longue durée à El Meghaier par la méthode de Cooper-Jacob de la remontée	50
Fig. 30	Essai de pompage longue durée à Nezla par la méthode de Cooper-Jacob de la descende	51

Fig. 31	Essai de pompage longue durée à Nezla par la méthode de Cooper-Jacob de la remontée	52
Fig. 32	Histogramme de variation de (pH) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : le Continental Intercalaire (CI).	54
Fig. 33	Histogramme de variation de conductivité (Ce) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) ; (b) : le Continental Intercalaire (CI)	55
Fig. 34	Histogramme de la variation du calcium Ca^{++} dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) ; (b) : le Continental Intercalaire (CI).	55
Fig. 35	Histogramme de la variation de Magnésium (Mg^{++}) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI)	56
Fig. 36	Histogramme de la variation du sodium (Na^+) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI)	56
Fig. 37	Histogramme de la variation du potassium (K^+) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI)	57
Fig. 38	Histogramme de la variation du chlorure (Cl^-) dans les forages région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI)	57
Fig. 39	Histogramme de la variation des bicarbonates (HCO_3^-) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire	58
Fig.40	Histogramme de la variation du sulfates (SO_4^{--}) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) ; (b) : Continental Intercalaire	58
Fig.41	Histogramme de la variation du résidu sec (RS) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) ; (b) : Continental Intercalaire	59
Fig. 42	diagramme de piper du Complexe Terminal (CT) (a) et le Continental Intercalaire (CI) de la région d'Oued Righ	61
Fig. 43	Diagramme de Riverside du Copmlxe Terminal (a) et le Continental Intercalaire (b) de la région d'Oued Righ	62
Fig. 44	Carte d'implantation des forages utilisées dans la zone d'étude	63

Fig. 45	Valeurs Propres des facteurs de Charge	66
Fig. 46	Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1 F2 des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région d'Oued Righ	67
Fig. 47	Projection des individus (forage) dans le plan F1 F2 de la nappe du Complexe Terminal (CT) de la région d'Oued Righ	68
Fig. 48	Valeurs propres des facteurs de charges	70
Fig. 49	Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1 F2 des eaux du Continental Intercalaire (CI) de la région d'Oued Righ	71
Fig. 50	Projection des individus (forages) dans le plan F1 F2 de la nappe du Continental Intercalaire (CI) de la région d'Oued Righ	72
Fig. 51	Carte d'inventaire des puits de Prélèvement	73
Fig. 52	Histogramme des Teneurs des Cations des eaux de la nappe libre (Octobre 2015)	74
Fig. 53	Histogramme des Teneurs des Anions des eaux de la nappe libre (Octobre 2015)	74
Fig. 54	Diagramme de Riverside des eaux souterraines de la nappe libre (Octobre 2015)	75
Fig. 55	Valeurs propres des facteurs de charges	77
Fig. 56	Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe superficielle dans la région d'Oued Righ	78
Fig. 57	Relation Na^+/Cl^-	79
Fig. 58	Relation $\text{Na}^+/\text{SO}_4^{-2}$	79
Fig. 59	Relation $\text{Mg}^{++}/\text{SO}_4^{-2}$	80
Fig. 60	Relation $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{2+}$	80
Fig. 61	Système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987)	86
Fig. 62	méthode utilisée pour la réalisation de la carte de vulnérabilité	87
Fig. 63	carte représentant le type de nappe aquifère	88
Fig. 64	carte de la profondeur du niveau piézométrique de la nappe	88
Fig. 65	carte de la lithologie de l'aquifère	88
Fig. 66	carte de la vulnérabilité de la nappe libre d'Oued Righ selon la méthode GOD	89
Fig. 67	Répartition spatiale du degré de vulnérabilité en (%)	89

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 01	Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952)	23
Tab. 02	Tableau récapitulatif et intérêt hydrogéologique des formations géologiques [sans échelle].	24
Tab. 03	Coordonnées de la station météorologique de la région Oued Righ(Touggourt)	27
Tab. 04	Classification Climatique de l'indice de De Martonne	32
Tab. 05	La durée d'insolation mensuelle interannuelle.	34
Tab. 06	Les paramètres hydrodynamiques de la zone d'étude	52
Tab. 07	Variations des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) de la région d'Oued Righ	59
Tab. 08	Variations des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (CI) de la région d'Oued Righ	60
Tab. 09	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Complexe Terminal (CT) – région Nord de l'Oued Righ	64
Tab. 10	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI) – région Sud de l'Oued Righ	64
Tab. 11	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de la région d'Oued Righ	65
Tab. 12	Poids factoriel sur les paramètres physicochimiques à partir des données de forage de la nappe du complexe terminal de la région d'Oued Righ	66
Tab. 13	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI) – région Nord de l'Oued Righ	69
Tab. 14	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI) – région Sud de l'Oued	69

Righ

Tab. 15	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Continental Intercalaire de la région d'Oued Righ	70
Tab. 16	Poids factoriel sur les paramètres physicochimiques à partir des données de forage de la nappe du Continental Intercalaire de la région d'Oued Righ	70
Tab.17	les Noms des puits dans la zone d'étude	72
Tab. 18	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe superficielle – région de l'Oued Righ (Octobre 2015)	76
Tab.19	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe superficielle de la région d'Oued Righ (October 2015)	76
Tab.20	Poids factoriel sur les paramètres physico-chimiques à partir des données des puits de la nappe libre de la région d'Oued Righ (October 2015)	77
Tab.21	indice d'échange de base dans la nappe libre (October 2015)	81

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique. (Bourhane, 2010). Les concentrations en sels, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales (Kloppmann et al. 2011).

Les ressources en eau souterraines du Sahara sont essentiellement constituées de ressources non renouvelables représentées par deux grands aquifères profonds surmontés par une nappe superficielle (le complexe terminal et le continental intercalaire). Ces deux systèmes aquifères font du Sahara Algérien une région riche en ressources en eaux souterraines.

La région de l'Oued Righ est l'une des régions les plus anciennement cultivées Elle s'étend sur une longueur de 150 km Sud – Nord et une largeur allant de 20 à 30 km. Est- Ouest. (Guettiche S. 2005)

La salinité des eaux et du sol de l'Oued Righ a fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Jean Fabre 2004; Belksier M^{ed}., 2009; Bouznade I., 2009; Bouchahm N. et al, 2013).

La région de l'Oued Righ a acquis une position stratégique dans le domaine économique, grâce au développement de l'agriculture, car elle regroupe près d'une cinquantaine d'oasis, et de la petite industrie. Ceci a conduit à l'augmentation de la demande en eau, qui est plus que satisfaite par les quantités importantes que recèlent les trois nappes aquifères (du Continental Intercalaire, du Complexe Terminal et de la nappe superficielle).

La qualité des eaux des aquifères,

Sur la base des données collectées dans la région, l'objectif de ce travail est de définir les aspects hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques et la potabilité des eaux de la nappe superficielle et leur aptitude à l'irrigation en caractérisant le risque de salinité des eaux de la nappe superficielle. En mettant l'accent sur l'évaluation de sa vulnérabilité aux influences anthropiques et la détermination de la salinité des eaux souterraines dans les zones arides et son impact sur leur qualité, sachant qu'elle conditionne leur aptitude à l'irrigation.

Les eaux souterraines représentent l'unique ressource en eau existante dans la région du Sahara septentrionale, mais leur qualité reste toujours un sujet actualité nationale et représente un souci pour la population et les agriculteurs, c'est un facteur qui conditionne le développement démographique et économique des régions du Sud-Est de l'Algérie. Ce sujet a fait l'objet de plusieurs travaux et publications (Khachana S et al, Bouselsal B et al et Guendouz A et al).

La présente thèse est structurée en :

- Premiers chapitres sont consacrés à l'identification naturelle de la zone d'étude, en définissant la région, et en présentant les caractéristiques géographiques et géologiques.
- La deuxième partie traite les données climatiques et hydrogéologiques de la région.
- La troisième partie concerne la caractérisation physico-chimique des eaux souterraines et l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle par la méthode de GOD dans la région de l'Oued Righ.

CHAPITRE I : CADRE GÉOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL

1. Situation géographique :

La vallée de l'Oued Righ est une entité économique, qui regroupe près de 50 Oasis, situées au Nord-Est du Sahara, longeant les rives Ouest du grand Erg Oriental et au Sud du massif des Aurès (Castagny G., 1980)

Administrativement la zone d'étude englobe les daïras de M'Rhaïer et de Djamâa dans la Wilaya d'El Oued au Nord et la daïra de Touggourt dans la wilaya d'Ouargla. Elle est limitée par :

- Au Nord par la commune de Tolga (Wilaya de Biskra)
- Au Sud-Ouest par les oasis d'Ouargla.
- A l'Est par la vallée de l'Oued Souf.

Elle s'étend sur un axe Sud-Nord sur environ 150 km, entre les latitudes 32°54' à 39°9' Nord et les longitudes 5°50', 5°75' Est. Elle couvre près de 20000 ha de palmiers.

La vallée de l'Oued Righ débute à Ain Chikh au Nord à 500 km au Sud-Est d'Alger, et à 330 km au Sud de Constantine. (Castagny G., 1967)

2. Aperçu Socio-Economique

Le domaine agricole représente la principale activité qui, actuellement, accuse un faible rendement des palmiers, dû essentiellement aux effets de la salinisation des eaux et des sols, de la remontée de la nappe phréatique, le vieillissement des palmiers...etc. à cela s'ajoute le manque d'intérêt pour le travail de la terre contrairement à celui des sociétés pétrolières qui offrent des emplois plus rémunérés que l'agriculture.

Parmi les espèces cultivées; la variété de Deglat Nour prédomine, suivi par Ghars , Degla Bayda ...etc. Notons aussi l'existence d'élevage et quelques espèces animales typiques (généralement Ovins et Caprins), les chèvres sont élevées pour leur lait et les brebis pour leur chair.

Dans le domaine de l'industrie, il existe plusieurs petites usines surtout des briqueteries implantées à proximité de la source de matière primaire, ainsi que des complexes de transformations hydrocarbures, transformation des plastiques, fabrique d'aluminium, ainsi que des entreprises de conditionnement de dattes. (Boussaâda N., 2007)

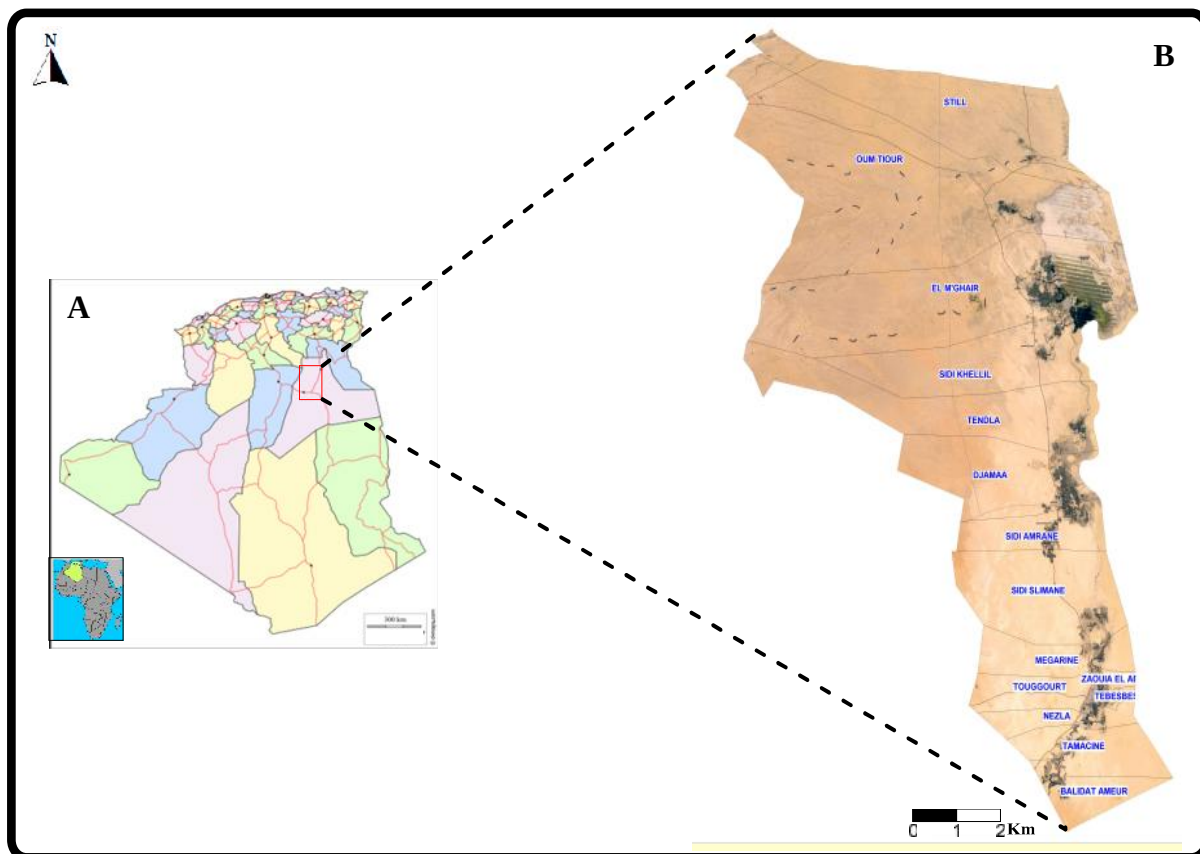


Fig. 1 : Situation géographique de la vallée de l'oued Righ (A.N.R.H, 2015)

A. Situation géographique

B. Subdivision administrative

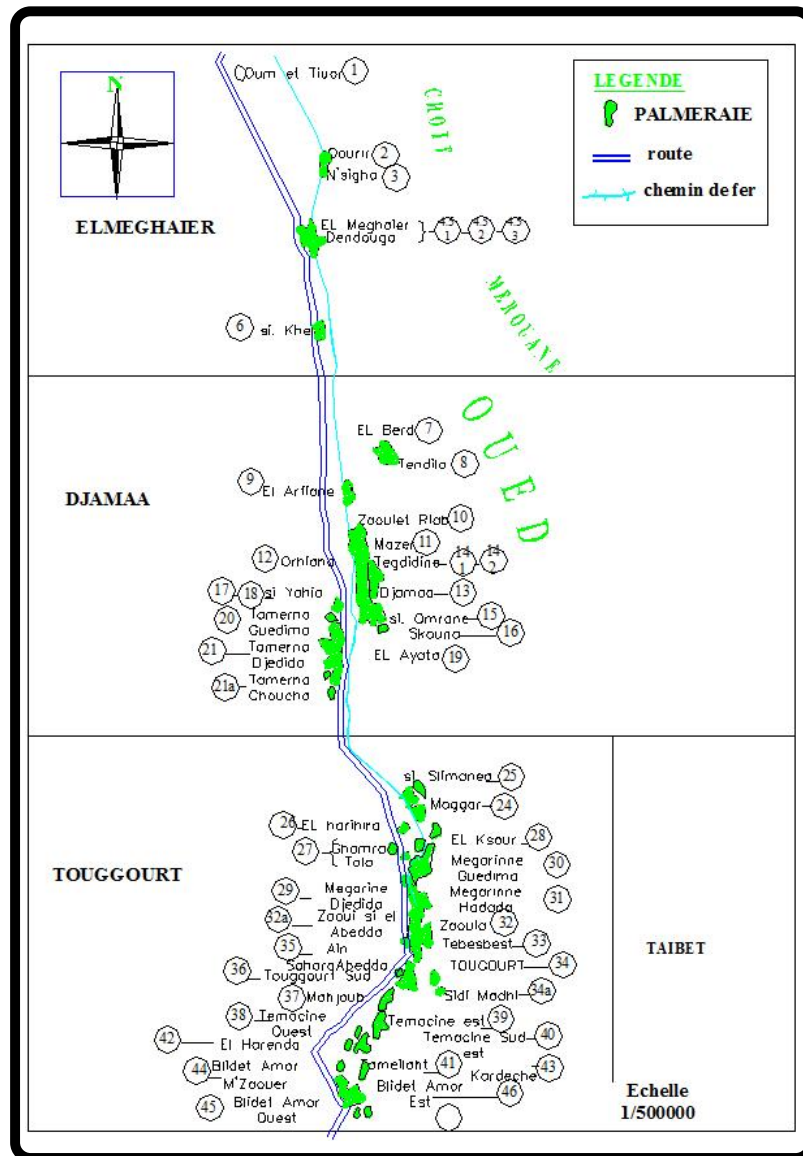


Fig. 2 : Répartition des Oasis dans la zone d'étude. (A. N. R. H ,2007)

3. Végétation

Dans le Sahara, le couvert végétal est discontinu et est représenté par des plantes vivaces, ligneuses, xérophytes et des plantes annuelles à périodes végétatives très brèves. Les parties souterraines sont extrêmement développées. On citera l'exemple d'une végétation pérenne qui est aidée par un système racinaire développée et arrive à trouver une réserve hydrique et des sels minéraux en quantités suffisantes dans la dune. (Boumaraf B. et al, 2014)

La culture du palmier dattier reste la principale activité dans la région d'Oued Righ, elle est développée et occupe entre 10% à 15 % de la superficie de la région.

Sur les reliefs, la végétation est absolument inexistante, en revanche une végétation herbacée très maigre est généralement localisée dans les lits des oueds (Aubert, 1960). La végétation joue un rôle minime dans la formation des sols sahariens, mais du point de vue biogéographique, elle présente un intérêt important (Quezel, 1958, cité par Dutil 1971).

4. Topographie et Géomorphologie

La région de l'Oued Righ est topographiquement plus ou moins aplatie (plaine). Le point le plus élevé 105 m est situé à Touggourt et le point le plus bas -20 m à Oued Righ. L'altitude moyenne est de 46 m et la pente est de 1‰. (Fig. 3)

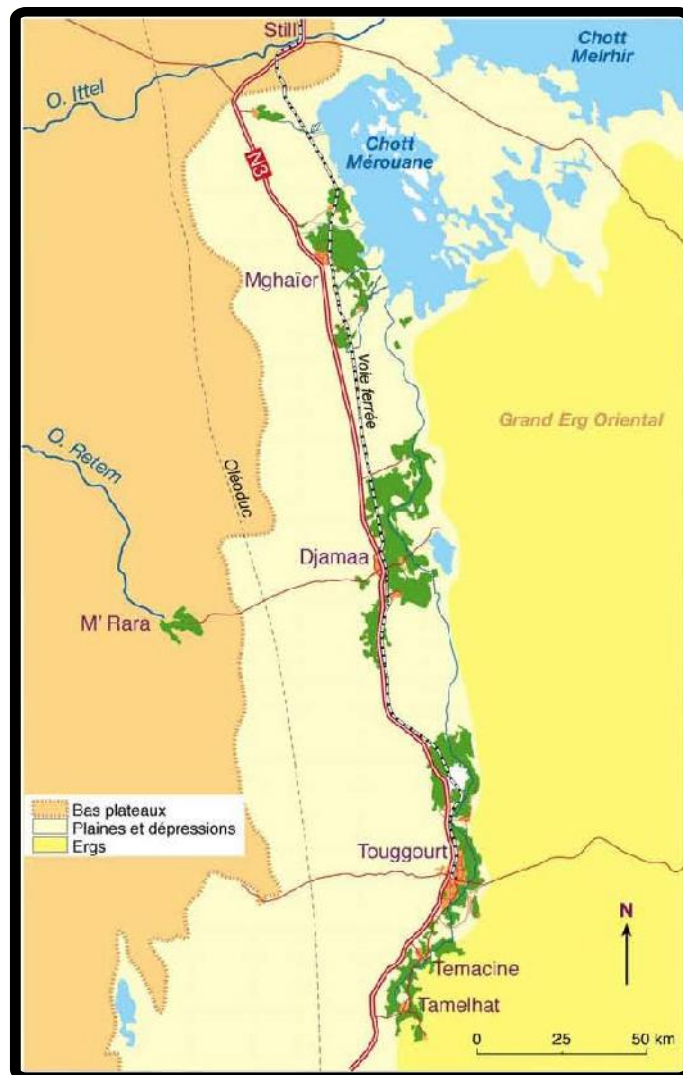


Fig. 3 : Formation géomorphologique de la région de l'Oued Righ (Ballais, 2010).

La région de l'Oued Righ fait partie de l'immense zone subdésertique qui s'étend au Sud de l'Atlas Saharien où les phénomènes d'ablation et d'apport se conjuguent constamment de façon intense. Cette région évolue dans le cadre d'un système endoréique traduisant une

diversité d'aspects morphologiques dont les plus caractéristiques sont les dépressions fermées (chotts, sebkhas) et représentent les points les plus bas de la vallée (Belkacem B., et al, 2014).

Cette région est caractérisée par une dépression allongée (large fossé) du Sud au Nord (vers les grands chotts), l'altitude passe progressivement de +100 m dans El-Goug en amont (la côte la plus haute) à – 30 m à chott Merouane en aval (N. Bouchahm, et al, 2013).

La vallée de l'Oued Righ est connue sous le nom du Bas Sahara, à cause de sa basse altitude notamment dans la zone du chott au Nord où les altitudes sont inférieures au niveau de la mer. (Bouznad Imad Eddine, 2009)

Dans la partie nord de la vallée de l'Oued Righ, au Sud de la ville de Stil, la succession des niveaux de glaciis est bien apparente. Par contre à l'Est vers Bordj El Megibra, ce sont les dunes du Grand Erg Oriental qui envahissent la jonction entre les chotts Mérouane et Melrhir.. (Belkacem B., et al, 2014)

4.1. Les paysages de la vallée de l'Oued Righ

A. Les versants :

Ce terme serait valable pour l'ensemble des formations tertiaires continentales et serait justifié par l'existence d'un âge attribué au Pliocène avec ses dépôts situés au-dessus des formations fluvio-lacustres miocènes (Nesson et al., 1975).

Selon Flammand (1911), une formation, qui longe la vallée du Sud au Nord, est d'âge Pliocène

B. Les glaciis :

Dans la vallée de l'oued Righ, les glaciis sont parallèles au front montagneux et offrent l'aspect de surfaces uniformes. Mais ils se caractérisent aussi par des colluvionnements plus fins vers l'aval qui résultent de la faible intensité des écoulements. Vers l'amont les profils se caractérisent par des revêtements de croûtes en-dessus des édifices détritiques, et se positionnent d'une façon variable dans les glaciis vers l'aval. La formation des croûtes est générée, soit par les oscillations saisonnières d'une nappe saturée en sulfates, soit par une origine éolienne ou les deux à la fois. Cependant chaque glaciis offre des conditions hydrologiques et texturales propres, et donne une interprétation chronologique des variations climatiques responsables de cette formation

et qui constituent des indicateurs essentiels pour la restitution des paléoclimats du Quaternaire.

Les accumulations éoliennes les plus répandues sont le voile éolien, la nebka et les rides de sables, localisées surtout vers l'aval en marge des chotts. (Belkacem B., et al, 2014)

C. Les sebkhas :

Les sebkhas représentent les cuvettes actuelles de décantation d'une superficie de 3375 km² pour la sebkha de Merouane et 5515 Km² pour celle de Melghir. (Anonyme, 2002)

La nappe phréatique est très proche de la surface, ce qui favorise la formation de sol sodique excessivement salin.

Les sebkhas sont le résultat de l'érosion hydro-éolienne et d'un déblaiement éolien. Ces cuvettes sont alimentées en eau de manière discontinue soit par l'écoulement des oueds lors des saisons de pluies, soit par les eaux des nappes souterraines, qui remontent vers la surface. À la surface les cristaux de sels sont soumis à l'action du vent. (Belkacem B., et al, 2014)

D. Les formations éoliennes

A l'opposé, des retombées météoriques si sporadiques, le vent par sa fréquence et son ampleur souligne plus au moins le faciès aride du paysage. Parmi toutes les formes engendrées, les dunes vives restent les plus répandues et les plus caractéristiques dans cette région, où elles constituent le seul élément dynamique de la morphologie. Elles se manifestent dans la région selon Dutil (1971) en :

- **Rides** : ou formes ondulées de faible épaisseur à la manière des ripplemarks, des plages côtières.
- **Voiles sableux** : accumulation de quelques centimètres recouvrant la surface du sol cohérent. Les particules de sable sont transportées sur des surfaces dures à topographie plane et uniforme, où elles forment des voiles sableux de plus ou moins grande épaisseur. Ce type d'accumulation éolienne est à l'origine de l'ensablement superficiel.

- **Barkhanes** : accumulation de sable en petite dunes en forme de croissant, isolées, regroupées parfois enchevêtrées. Elles sont dissymétriques avec une pente douce tournée au vent et une pente forte sous le vent et parfois dédoublée avec un talus basal au pied d'un abrupt sommital.
- **Nebkas** : elles fixent la végétation en raison des pièges à sables et à poussières que constituent les touffes de la steppe (tamarix, jujubier). A ces buttes s'accroche très souvent une flèche dunaire mobile de dimensions proportionnelles à celles de l'abri sous lequel elle s'allonge. On distingue deux types de nebkas: les **nebkas à flèche de sable** qui sont des formes dunaires ovoïdes de petites dimensions (50 cm de hauteur, 150 cm de longueur et 40 cm de largeur), allongées dans le sens du vent dominant, et les **nebkas buissonnantes**, du même genre que les précédentes, mais pouvant atteindre 2 m de hauteur et 3 à 4 m de longueur.
- **Massifs de dunes** : Le grand erg oriental est très ancien dans sa partie méridionale et d'origine très récente dans celle du nord. Il n'est pas vrai de considérer que les dunes occupent surtout les dépressions. En réalité, les zones les plus basses sont libres de sables quelque-soi la vitesse du vent comme c'est le cas dans les chotts Merouane et Melghir situés en dessous du niveau de la mer. Les dunes se massent au contraire sur les pentes extrêmement faibles des grandes dépressions.

Les études ont montré que les contours de l'erg oriental sont généralement déterminés par la forme des dépressions et des reliefs avoisinants (Dubief 1952)

4.2. Les sols de la vallée de l'Oued Righ

Les régions climatiques désertiques sont idéales pour l'extension des caractères de salinité des sols. Ainsi, les sols de la zone saharienne d'Algérie contiennent des quantités importantes de sels solubles. Leur accumulation est due à la rareté des pluies qui ne pénètrent pas profondément dans les sols pour provoquer une infiltration appréciable (Halilet, 1998).

Le paysage saharien est composé généralement, en partie amont, de sols sableux éoliens peu profonds, à croûte gypseuse, et, en partie aval, de sols sableux éoliens, plus profonds à encroûtement de nappe gypseuse plus récent (Mitimet, 1998).

Sogreah, 1971 et Abid 1995 définissent l'origine des sols dans la vallée de l'oued Righ comme un système alluvionnaire, colluviale et éolien. Les deux premières proviennent de l'érosion du niveau encroûté datant du Quaternaire ancien ou du Mio-Pliocène. Les phases successives d'érosion et de comblement du fond de la vallée, sont responsables de l'hétérogénéité texturale constatée dans les horizons profonds, contrairement aux horizons supérieurs qui ont une origine éolienne (plages sableuses plus ou moins remaniées et récentes).

D'après Guyot et Durand, (1955) les sols de la vallée d'Oued Righ contiennent de fortes proportions de gypse. La raison principale de cette accumulation dans les sols est due à la précipitation du gypse provenant des sels contenus dans la nappe aquifère et dans les ruissellements.

CHAPITRE II : CADRE GÉOLOGIQUE

1. Introduction

La zone d'étude fait partie du bassin oriental du Sahara qui est nettement mieux étudiée que sa partie occidentale grâce aux recherches pétrolières. Il se présente également comme un vaste synclinal ouvert vers le Nord.

Dans ce chapitre, nous aborderons les aspects géologiques à différentes échelles d'étude : échelle générale de la plate-forme saharienne, celle régionale du bas Sahara et locale propre au secteur d'étude. La région d'étude s'intègre dans la partie septentrionale de la plateforme saharienne et fait partie du bassin Triasique.

2. Géologie Régionale

Cette région du Bas Sahara se présente comme une vaste cuvette (fig. 4) limitée à l'Ouest par la dorsale du Mزاب, au Sud par les hamadas du Tadmait et de Tinghert et à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien. Ses bordures, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe SSW-NNE des oueds Mya et Righ. Vers le Nord au contraire, dressée au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des Chotts et dont le fond à une côte inférieure à celle du niveau de la mer. Elle est limitée au Nord par les monts de l'Aurès et des Nememchas.

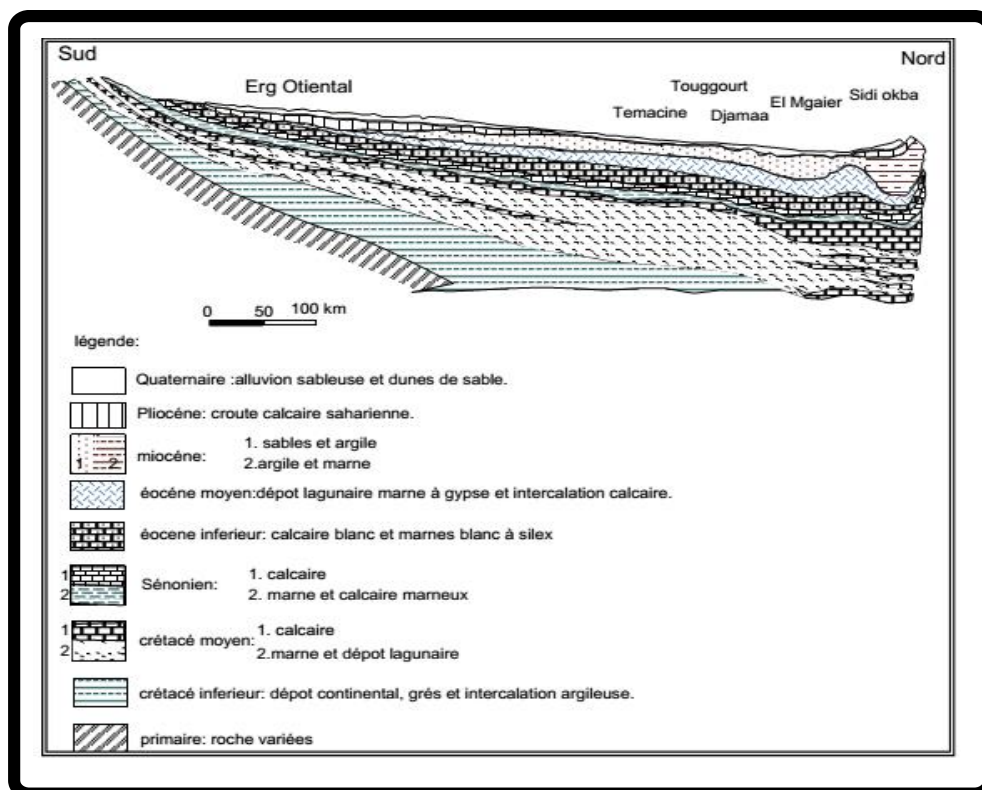


Fig. 4: Coupe géologique schématisée N-S passant par la cuvette Secondaire Saharienne et par la Vallée de Oued Righ (A.Cornet, 1962).

3. Les bassins sédimentaires de l'Algérie

3.1. Algérie alpine

Le domaine Nord est constitué par des reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. Ce domaine est constitué du Nord au Sud par les ensembles structuro-sédimentaires suivants (*Fig.5*):

- L'Atlas Tellien est le domaine des nappes de charriages avec des bassins de type intra-montagneux.
- Le Hodna est un bassin d'avant fossé dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux.

3.2. Plateforme saharienne

Elle est située au Sud de l'Atlas saharien et 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 : d'Ouest en Est nous distinguons:

A. Bassin de Tindouf - Reggane

Ce bassin est situé sur les bordures nord et nord-est du Bouclier Reguibat, où la couverture sédimentaire atteindrait **800 m** dans le bassin de Tindouf et **6500 m** dans celui de Reggane.

B. Bassin de Bechar

Il est limité au Nord par le Haut Atlas, au Sud et à l'Ouest par la chaîne de l'Ougarta, sa couverture sédimentaire serait épaisse de **8000 m** en moyenne.

C. Bassin de l'Ahnet-Timimoun

Il est limité au Nord par les hauts fonds d'Oued Namous, à l'Ouest par la chaîne Ouagarta, au Sud par le Bouclier Targui et à l'Est par la dorsale d'Idjane-Mزاب, sa couverture est de **4000 m**.

D. Bassins de Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya

Ils sont limités à l'Ouest par la dorsale d'Idjerane-Mزاب et à l'Est par la dorsale d'Amguid Elabiod, au Sud les sédiments Paléozoïques affleurent dans le Mouydir au Nord, dans la dépression d'Aguemour-Oued-Mya, comblée par une puissante série Paléozoïque (5000 m à Oued Mya), où d'importants gisements d'hydrocarbures ont été mis en évidence.

E. La synéclyse d'Illizi-Ghadames

Est limitée à l'Ouest par la dorsale d'Amguid el Abiod et à l'Est par la môle de Tihemboka et les confins Tuniso-Libyens dans le bassin de Ghadames, la couverture sédimentaire est supérieure à 6000 m.

Ainsi, les épaisseurs des séries (1000-8000m), renferment souvent les gisements hydrocarbures, notamment dans le Paléozoïque et le Trias; leur nature, les déformations tectoniques et la subsidence ont modelé la plate-forme saharienne en un certain nombre de bassins repartis en province occidentale, orientale et Triasique. Cette dernière englobe le bas Sahara, partie qui nous intéresse, et qui est située dans la partie septentrionale de la plate-forme Saharienne. La province Triasique est un anticlinorium de direction Est-Ouest, où les éléments majeurs suivants ont été individualisés :

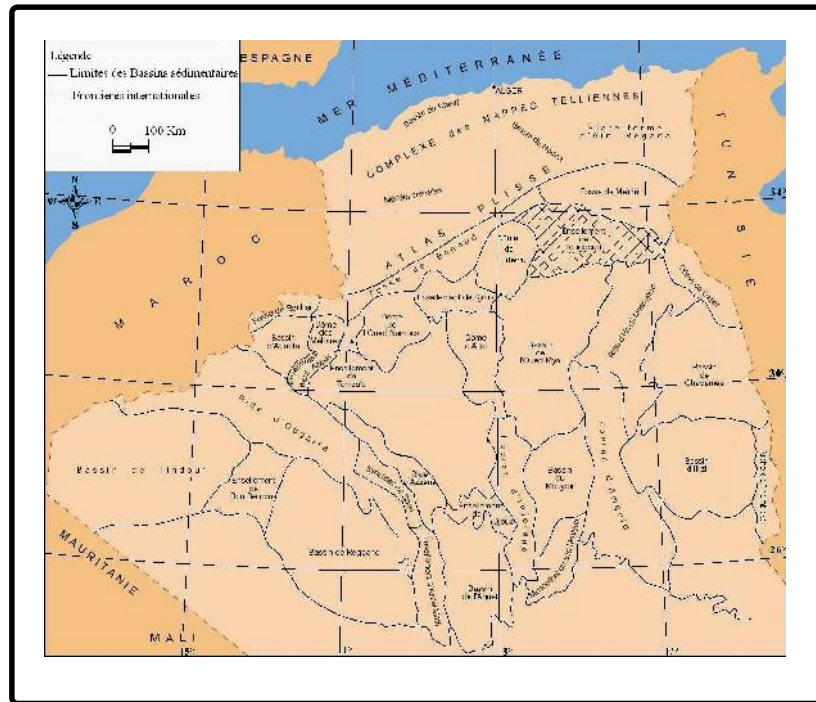


Fig. 5: Carte des bassins sédimentaires (d'après Sonatrach, WEC 2007)

- La voûte de Tilrient et le haut fond de Telemzane.
- Le système structural de Djamaa-Tougourt.
- Le système de dislocation d'El Agreb-Messaoud.
- Le môle de Dahar.

Ces éléments sont séparés par des dépressions (Oued Mya), où l'on rencontre les séries types de la province triasique. Les dépôts paléozoïques sont souvent très érodés, aussi profondément que l'Ordovicien ou le Cambrien.

Le Mésozoïque est discordant sur le Paléozoïque.

Le Cénozoïque est représenté par une série détritique du Mio- Pliocène.

La série sédimentaire du bassin triasique dépasse 4500 m d'épaisseur dans sa partie septentrionale, elle est caractérisée par une importante formation évaporitique.

4. Synthèse des travaux antérieurs sur le bassin du Bas Sahara

Le bassin du Bas Sahara est comme son nom l'indique un pays plat, déprimé, de faible altitude (200 à -30 m dans les chotts). C'est un pays d'erg (le Grand Erg Oriental) et de chotts (Chott Melrhir) où le sable et le sel dominent (*Fig. 4*). Mais c'est une région abondamment pourvue en eau bien souvent artésienne (*Cornet A. 1961*).

Les travaux de *Bel et Demargne (1966)*, de *Busson (1970)* et de *Fabre (1976)* constituent les références de base utilisées dans cette synthèse géologique.

À partir du massif ancien les couches géologiques s'enfoncent vers le Nord pour être brutalement pincées par l'accident sud atlasique. Dans l'ensemble, la couverture mésozoïque n'a pas subi de mouvements orogéniques et est demeurée tabulaire, mais elle est affectée à l'Est d'un mouvement de subsidence, qui est à l'origine de la cuvette des grands chotts algéro-tunisiens (*Fig. 6*). Le dôme central (la dorsale mozabite) forme un môle (*Paix 1956*), qui l'isole des formations occidentales (*Fig. 5*).

Au cours des périodes plus humides, l'Oued Igharghar descendait des pentes du Hoggar pour rejoindre ce grand bassin mais le réseau hydrographique est aujourd'hui masqué par la mer de dunes du Grand Erg Oriental. La grande gouttière de l'Oued Righ représente la partie avale, plus ou moins colmatée par des placages sableux et des dunes vives et jalonnée de petites sebkhas.

Nous trouvons ici le socle ancien à 3000 m ou plus de profondeur surmonté par les grès primaires plus ou moins plissés et érodés qui constituent les roches réservoirs des hydrocarbures. Au-dessus s'entassent les grès du Continental Intercalaire qui constituent l'aquifère du même nom. A la suite de la discordance cénomaniennne s'empilent encore les couches marines du Sénonien et de l'Eocène qui se terminent par la couverture continentale du Mio-Pliocène également aquifère (Complexe Terminal).

5. Cadre géologique local [Oued Righ]

La géologie de la vallée de l'Oued Righ est étudiée dans le contexte de tout le Bas-Sahara, en raison de l'ampleur des phénomènes géologiques, stratigraphiques et tectoniques caractérisant la région.

Nous distinguant de bas en haut trois (03) ensembles :

- Les terrains Paléozoïques affleurent au Sud entre les plateaux de Tadmait et Tinghert et le massif du Hoggar.

- Les terrains du Mésozoïques et Cénozoïques constituent l'essentiel des affleurements des bordures du Bas Sahara.
- Des dépôts continentaux de la fin de Tertiaire et du Quaternaire, occupent le centre de la cuvette.

La prospection géophysique et les sondages pétroliers ont précisé la profondeur du socle Précambrien (Furon, 1968) qui se situe entre 3000 et 5000 m. suivie des dépôts sédimentaires dont l'épaisseur avoisine les 4500 m.

Le long du versant sud, existe une immense fosse de subsidence dans laquelle l'épaisseur maximum des sables et des argiles de l'Oligocène et du Mio-Pliocène serait d'environ 2000 m. L'épaisseur maximum des séries post-albiennes est d'environ 3000 m.

Dans cette étude nous nous intéressons surtout à la couverture sédimentaire post paléozoïque, qui renferme les principaux aquifères du Sahara.

5.1 Litho stratigraphie

A. Secondaire

A.1 Albien

L'Albien se présente comme une série très épaisse, formée d'une alternance de couches gréseuses avec des passées d'argiles schisteuses.

A.2 Vraconien

Dans le bassin oriental du Sahara algérien, le Vraconien est le terme de passage entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomanién argilo-carbonaté (base du complexe terminal).

Le Vraconien est constitué d'une alternance irrégulière de niveaux argileux et dolomitiques, d'argiles sableuses et, rarement, de grès à ciment calcaire, difficile à reconnaître en forage. Il est souvent été interprété comme de l'Albien ou du Cénomanién. Ses limites supérieures et inférieures sont parfois assez floues. Il est raisonnable de choisir comme limite inférieure du Vraconien la disparition du faciès sableux franc de l'Albien.

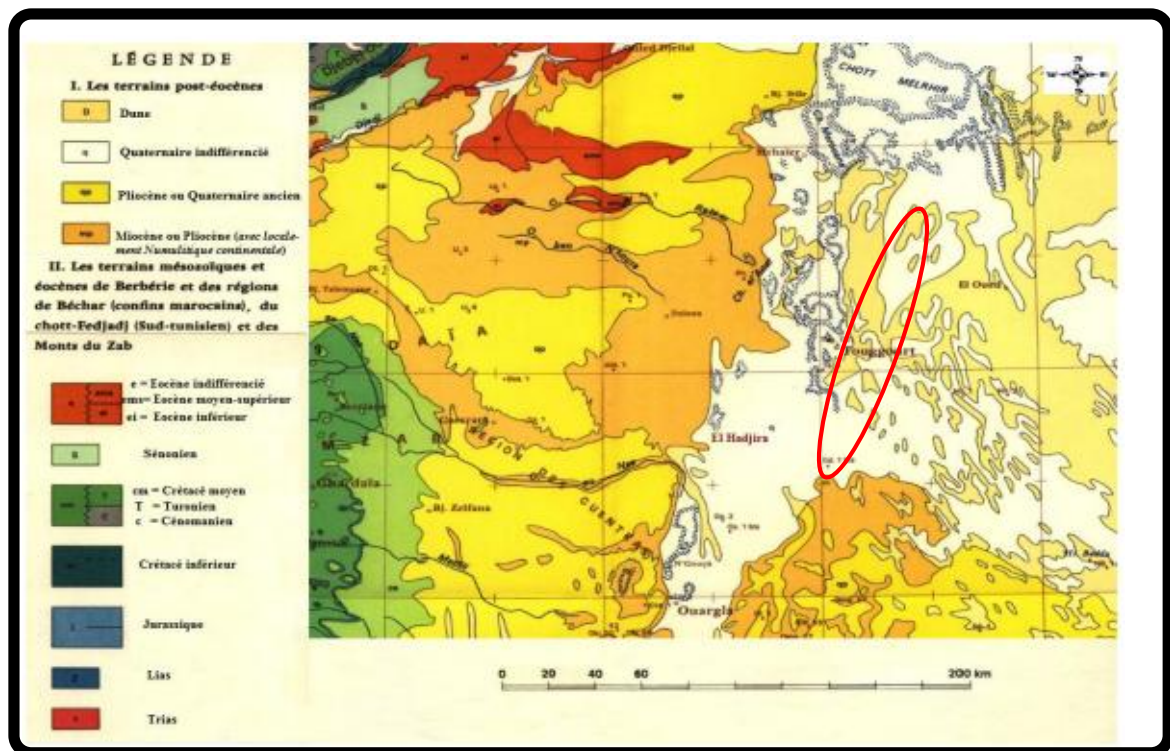


Fig 6 : La carte géologique du bas Sahara (d'après G-Busson G, 1967)

A.3 Cénomanien

Le Cénomanien est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. L'épaisseur des bancs est de 1 à 5 m environ. Dans la moitié sud du bassin, le Cénomanien est essentiellement constitué d'argiles et de marnes, avec de l'anhydrite et parfois même du sel ; les carbonates sont rares. Dans la moitié nord, au contraire, les carbonates deviennent plus importants et alternent avec des évaporites ; les argiles sont plus rares. La présence de nombreux bancs d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomanien imperméable (Bel et Cuche, 1969).

Dans certains forages, le passage du Vraconien au Cénomanien est net - un faciès sableux franc, rapporté à l'Albien, est suivi par des argiles et des évaporites rapportées au Cénomanien. Dans d'autres forages, le passage est moins visible. Il existe un niveau de transition rapporté au Vraconien, dans ce cas il est préférable de choisir comme limite supérieure du Vraconien l'apparition des évaporites et dolomies du Cénomanien. La limite supérieure du Cénomanien est toujours nette, elle correspond à l'apparition des bancs calcaires ou dolomitiques du Turonien.

A.4 Turonien

La barre calcaire turonienne est la formation sédimentaire la mieux connue et facile à identifier sur les diagraphies par sa résistance électrique élevée. Le Turonien consiste en une

épaisse barre de calcaire et de dolomie, qui tranche avec les évaporites et les argiles du Cénomanien au-dessous et du Sénonien au-dessus. Du Sud au Nord du bassin oriental, le Turonien se présente avec un faciès caractéristique, on distingue trois zones :

- Dans la zone sud du parallèle El Goléa, le Turonien est formé de deux barres : calcaire-marneux et calcaire-dolomitique encadrant un niveau marneux souvent de couleur verte. L'existence d'évaporites mélangées aux marnes vertes est signalée.
- Entre El Goléa et Djamaâ, le Turonien est uniquement formé de calcaires et de dolomies ; les marnes vertes ont disparu. l'épaisseur utile de la barre turonienne est égale ou supérieure à 85% de l'épaisseur totale (80 m).
- Au Nord de Djamaâ, le Turonien change à nouveau de faciès et devient marneux, ce changement de faciès s'accompagne d'un épaissement très important. l'épaisseur cumulée des niveaux a priori perméables devient inférieure à 25%.
- Le Turonien a une épaisseur moyenne qui varie entre 50 et 100 m. Elle augmente cependant dans la région des chotts où elle dépasse 300 m (*Bel et Cuche, 1969*).

A.5 Sénonien

Le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées :

- Le Sénonien lagunaire à la base.
- Le Sénonien carbonaté au sommet.

A.5.1 Sénonien lagunaire

Le Sénonien lagunaire est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argile et de sel, il est très peu perméable (*BUSSON, 1970*).

Les variations de faciès sont peu importantes. L'anhydrite forme des bancs dont l'épaisseur peut atteindre quelques mètres. La dolomie constitue parfois des bancs qui peuvent aller de 10 à 15 mètres. Généralement, les argiles ne dépassent pas 1 à 2 mètres. On rencontre à la base du Sénonien dans certains endroits des bancs de sel.

La limite inférieure du Sénonien lagunaire est généralement franche. Nous pouvons facilement distinguer les évaporites et les argiles sénoniennes des calcaires et des dolomies. Le toit du dernier banc d'anhydrite est pris comme limite supérieure, quand le changement est franc, par contre le changement est progressif lorsque le niveau où le pourcentage des carbonates devient supérieur à celui des évaporites.

L'épaisseur du Sénonien lagunaire varie de 0 à 500 mètres. Elle augmente vers le Nord.

A.5.2 Sénonien carbonaté

Le Sénonien carbonaté est formé de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrites. Le sommet de la formation est souvent marqué par un petit banc à silex.

La limite supérieure est toujours difficile à situer, car il y a une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène carbonaté qui le recouvre. Ces deux formations constituées de calcaire de même nature, ne peuvent se différencier qu'en ayant recours à des critères paléontologiques. Dans certaines coupes de forages pétroliers, les calcaires sont attribués à l'Eocène, en raison de la présence des nummulites.

Du fait de leur identité de faciès, le Sénonien et l'Eocène carbonatés doivent constituer une seule et même unité hydrogéologique que nous interpréterons comme un aquifère.

B. Tertiaire

B.1 Eocène

deux formations dans l'Eocène se distinguent à savoir:

- l'Eocène carbonaté à la base.
- l'Eocène évaporitique au sommet.

B.1.1 Eocène carbonaté

L'Eocène carbonaté a des caractéristiques lithologiques qui le rendent difficile à distinguer du Sénonien. Seule la présence ou l'absence de nummulites peut permettre de les différencier. Les calcaires ont tendance à prédominer sur les dolomies et les évaporites sont beaucoup plus rares que dans le Sénonien, sinon totalement absentes. Les calcaires à silex rencontrés au sommet du Sénonien carbonaté se prolongent dans l'Eocène. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500 m.

B.1.2 Eocène évaporitique

Il est formé par une alternance de calcaires, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts (BEL et CUCHE, 1969).

Dans l'oued Righ, la nappe des calcaires semble être située dans un niveau carbonaté appartenant à l'Eocène évaporitique.

L'Eocène constitue le dernier épisode marin du Sahara algérien (BUSSON, 1970).

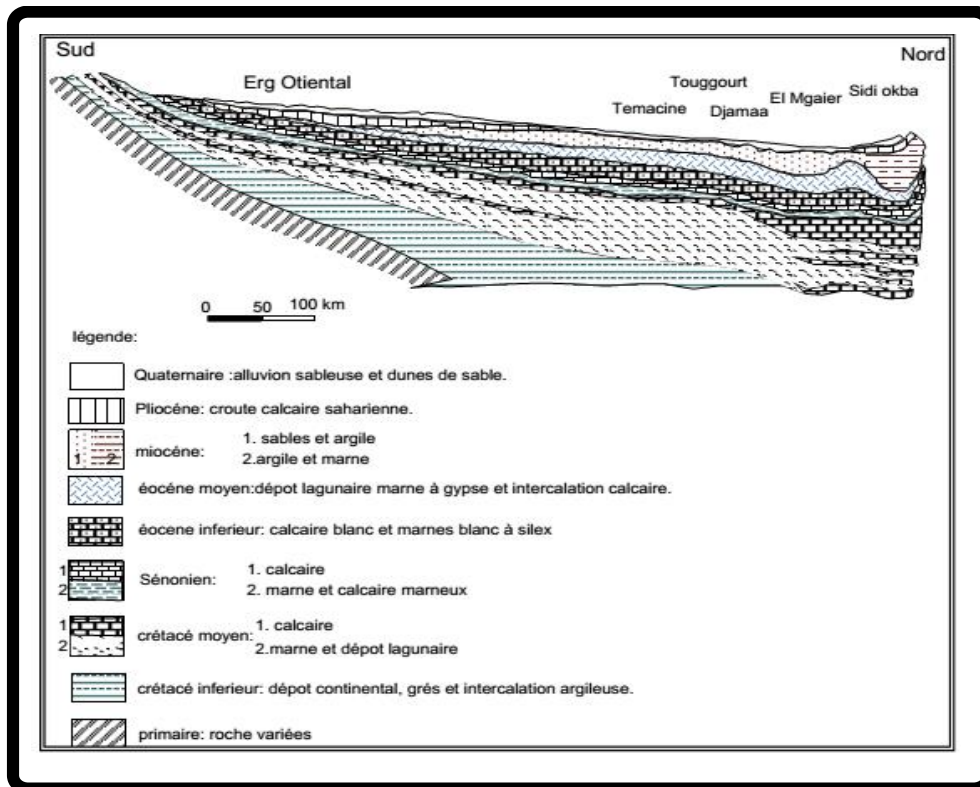


Fig. 7 : Coupe géologique schématique N-S passant par la cuvette Secondaire Saharienne et par la Vallée de l'Oued Righ (A.Cornet, 1962).

B.2 Mio-Pliocène

Dans le domaine oriental du Sahara, le Mio-Pliocène est un puissant ensemble constitué de sables et d'argiles qui reposent en discordance sur diverses formations antérieures: Primaire, Continental Intercalaire, Cénomanién, Turonien, Sénonien ou Eocène. Les niveaux sableux, argileux ou argilo - sableux ont une structure lenticulaire. Le Mio-Pliocène est caractérisé par une forte hétérogénéité, aussi bien dans les directions verticale et horizontale

Bel et Demargne en 1966, ont tenté de différencier à l'échelle du bassin oriental plusieurs niveaux alternativement sableux ou argileux. Ces auteurs décrivent quatre niveaux différents dans le Mio-Pliocène qui seraient présents sur toute l'étendue du bassin oriental.

- **le niveau 1** : de faible épaisseur et essentiellement argileux, n'existerait que dans la partie centrale du Sahara oriental, suivant une bande nord-sud.
- **le niveau 2** : grés-sableux, serait le niveau le plus épais et le plus constant. Il s'étend sur tout l'ensemble du Sahara oriental et continu dans le Sahara occidental. A la base Nous trouvons parfois des graviers, le sommet se charge progressivement en argiles pour passer au niveau 3.

- **le niveau 3** : une petite formation argilo - sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont mal définies. Cette couche imperméable n'existe que dans certaines zones, où elle n'est épaisse et constante que dans la région des chotts. Les argiles sableuses du niveau 3 séparent les sables des niveaux 2 et 4.
- **le niveau 4** : c'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocene, très épais dans la région des chotts. Son sommet affleure sur de grandes surfaces et est constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne). Il n'apparaît que lorsqu'il repose sur le niveau 3; ailleurs les niveaux 2 et 4 sont confondus.

C. Quaternaire

Il est essentiellement sableux, à la base des couches d'argiles et d'évaporites semi-perméables le séparent du Pliocène supérieur (Fig. 9). Cette formation quaternaire renferme une nappe phréatique alimentée principalement par l'infiltration des eaux des Oueds et surtout par percolation des eaux en excès lors des périodes d'irrigation.

Le Quaternaire a une épaisseur qui varie entre 39 m et 67 m.

5.2 Tectonique

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis de nouveaux mouvements post triasiques.

L'orogénèse atlasique est à l'origine de l'apparition des déformations à grand rayon. Les calcaires du M'Zab sont transformés en dorsale, ceux de Tadmait en cuvette. Au Sud l'axe d'Amguid-El-Biod s'effondre pour faire place à un axe synclinal méridien qui se poursuit jusqu'à l'Aurès (Bel et Demargne., 1966).

La géométrie actuelle des formations du Continentale Intercalaire et du Complexe Terminal du Sahara est caractérisée par l'absence des déformations tectoniques importantes.

La chaîne des Maghrébides qui a subi plusieurs phases orogéniques au Tertiaire, va avoir des contre coups sur la Plate-forme saharienne :

- ❖ Les mouvements de l'Eocène moyen à supérieur, sont bien nets, ; la phase du Miocène inférieur lui succède et donne naissance au Tell et aux Aurès.
- ❖ Enfin, la phase Plio-Quaternaire s'insère avec les précédentes dans la phase Alpine, d'où l'apparition des fractures de direction Est-Ouest qui forment la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie Sud « Sillon Sud Aurésien ». Ces

fractures régissent l'écoulement des eaux souterraines et la création des chotts Merouane et Melghire. La flexure Sud Atlasique de direction est-ouest sépare deux domaines distincts, c'est ainsi qu'on peut avoir au Nord des points culminants « Monts des Aurès » et au Sud les points les plus affaissés.

Nous présentons un tableau récapitulatif des événements tectoniques probables dans le Sahara algérien (Karpoff R., 1952).

6. Paléogéographie

Bel et Demargne en 1966 ont reconstitué l'histoire paléogéographique du Quaternaire de la vallée de l'oued Righ selon les séquences suivantes :

- Effondrement de la fosse pré atlasique (centre de la région actuelle des chotts) et entaillage de profondes et larges vallées (dont celle de l'oued Righ) dans la couverture Mio-Pliocène de la périphérie.
- Surélévation locale du sol, avec détachement de l'oued Righ de l'oued Igharghar et de son affluent l'oued Mya.
- Descente lente et continue de la région des grands chotts avec d'énormes apports fluviaux et éoliens en transformant l'oued Righ en nappe souterraine et en ne laissant que quelques chotts (les actuels en surface).

Au cours de cette époque, un affaissement marque l'effondrement progressif de la partie centrale de la zone saharienne par un dépôt lagunaire .suivit d'une période d'arrêt au cours du Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur. Une réapparition d'un dépôt lagunaire qui comble définitivement la dépression de la cuvette saharienne.

Une élévation de l'ensemble, suivit d'un nouveau mouvement de descente selon l'axe de l'Oued Righ, cet exhaussement permet d'expliquer l'absence de l'Oligocène dans le Sahara.

Cet affaissement brusque du centre de la cuvette (région actuelle des chotts). Les cours d'eau venant de l'Ouest et du Sud entaillant de larges et profondes vallées dans la couverture Mio- Pliocène.

L'Oued Righ est Oued Igharghar formaient probablement alors un seul grand Oued avec Oued Mya comme affluent.

Un comblement partiel de la région effondré et des vallées qui l'entaillent et l'exhaussement local du se là la suite duquel l'Oued Righ se sépare de l'Oued Igharghar.

Un affaissement lent de la région des grands chotts est comblement de la vallée de l'Oued Righ à la suite d'importants apports pluviaux et éoliens. Ces apports finiront par envoyer l'Oued.

Tableau 1: Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952)

Age	Style
1-Ante cambrien	Plis très aigus, failles.
2-Paléozoïque	Mouvements amples d'axes est-ouest, formations de chaînes orientés N-S, NNE-SSW ou NW-SE sur des axes antécambriens
3-Post Eocène et Ante Miocène	Rejeu des structures hercyniennes avec leur orientation ancienne
4-Post-Miocène	Premiers plis d'axe NW-SE
5-Post Pliocène	Mouvements peut être dans la région Nord seule Plis en Genoux de l'Aurès d'axe E-W
6-Fini Quaternaire Ancien	Plis affectant le Moi-Pliocène seul ou accompagnés du Quaternaire ancien, suivant deux axes orthogonaux, dont l'axe NW-SE est le principal.
7-Neolithique	Mouvements de grande amplitude à plis faibles et localisés.

Les caractéristiques paléogéographiques du Sahara Oriental, du mésozoïque à l'actuel sont :

- ◆ l'existence d'une plateforme très régulière, sur laquelle toute variation du niveau de la mer, provoque des changements remarquables dans la sédimentation.
- ◆ l'existante d'une mer peu profonde à partir de laquelle se produisent plusieurs transgressions dont l'une des plus importantes et celle du Cénomanién.
- ◆ la régression définitive de la mer à la fin de l'Eocène s'accompagne de l'érosion d'une partie des calcaires de l'Eocène et du régime continental qui a remplacé le régime marin.

Tableau 2: Tableau récapitulatif et intérêt hydrogéologique des formations géologiques

[Les épaisseurs sont variables d'une zone à l'autre].

Ere	Etage		Lithologie	Intérêt Hydrogéologique
Q u a t e r n a i r e			Sables.	Nappe superficielle (la nappe phréatique)
			Argiles, évaporites.	Substratum (imperméable)
T e r t i a i r e	Mio-Pliocène		Sables.	1 ^{ère} nappe des sables (Complexe Terminal).
			Argiles gypseuses	(semi-perméable)
		Pontien	Sables, graviers et grès	2 ^{ème} nappe des sables (Complexe terminal).
	Eocène	Moyen	Argiles lagunaires	Substratum (imperméable)
		Inférieur		Nappe des calcaires (Complexe Terminal).
S e c o n d a i r e	C r é t a c é	Sénonien calcaire	Dolomies et calcaires	
		Sénonien lagunaire	Evaporites, argiles	Substratum (imperméable)
		Cénomanién	Argiles, marnes	Substratum (imperméable)
		Albien		Nappe albienne
		Barrémien	Sables et grès	(Continental Intercalaire).

Ce tableau, résume la géologie de la région en deux grands ensembles représentant un système aquifère à différentes nappes, selon la lithologie et la perméabilité des formations.

Ainsi on note :

- ❖ Formations perméables siège de nappes aquifères nous avons:
 - La nappe superficielle constituée de sable d'âge quaternaire.
 - Le Complexe Terminal du Mio–Pliocène, constitué d'un remplissage de formations continentales sablo – argileuse, repose en discordance sur les calcaires érodés de l'Eocène inférieur.
 - Le continental Intercalaire Sablo – gréseux d'âge albien.
- ❖ Formations imperméables constituées d'argiles et de marnes servants de substratum et de toit des nappes.

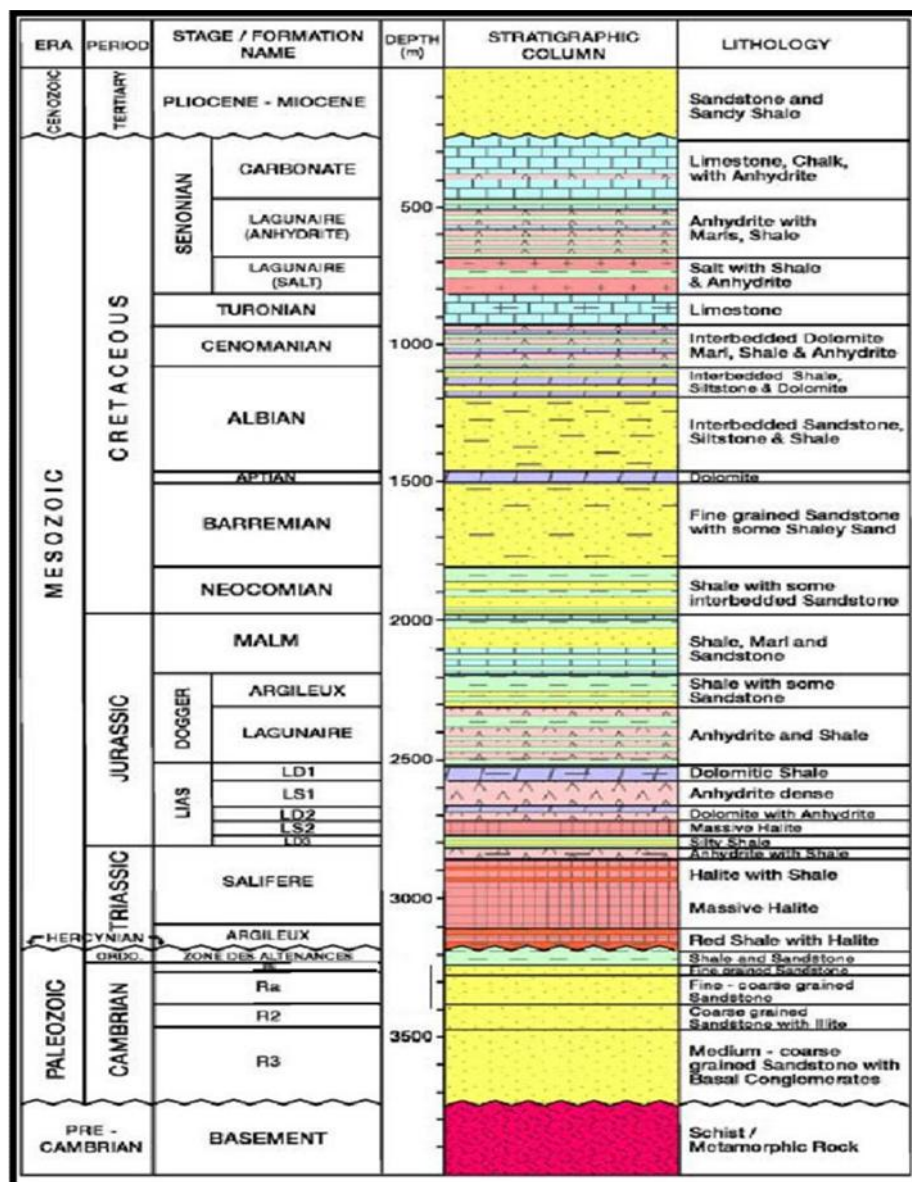


Fig. 8 : Colonne lithostratigraphique typique du Sahara septentrional (Sonatrach Division Forage, 2004)

7 Conclusion

La région de l'Oued Righ se présente comme une cuvette synclinale du Bas Sahara qui fait partie d'une large fosse de direction N-S.

Les formations géologiques allant du Cambrien au Tertiaire sont dissimulés en grande partie sous le Grand Erg Oriental. Seuls quelques affleurements sont observés, sur les bordures.

La prospection géophysique et les sondages pétroliers ont précisé la profondeur du socle Précambrien, située entre 3000 et 5000 m. Il s'ensuit que les dépôts sédimentaires ont environ 4000 m d'épaisseur.

Les formations paléozoïques affleurent au Sud, entre les plateaux de Tadmait et Tinhert et le massif du Hoggar.

Les formations mésozoïques et du début du Cénozoïque constituent l'essentiel des affleurements de bordures.

Les dépôts continentaux tertiaires et quaternaires occupent le centre de la cuvette. Cette série géologique permet de distinguer deux ensembles hydrogéologiques, Post Paléozoïques importants : le Continental Intercalaire et le Complexe terminal

Ces deux derniers représentent les principaux aquifères du bas Sahara en particulier dans la région de l'Oued Righ.

CHAPITRE III: APERÇU HYDROCLIMATOLOGIE

1 Introduction

La région d'Oued Righ se caractérise par un climat saharien aride dont l'hiver est doux et l'été chaud et sec. La pluviométrie est faible avec une forte évaporation. Dans ce chapitre, nous allons présenter, le contexte climatique de la région d'Oued Righ. Pour se faire, nous allons effectuer une étude basée sur une synthèse des données climatiques disponibles entre 1975 et 2014. Ces données ont été fournies par l'office national de météo (ONM). Cette étude a pour objet de faire ressortir les caractéristiques climatiques suivants; la température, les précipitations, l'humidité, l'insolation et la vitesse maximale du vent.

2. Le climat

Notre zone d'étude fait partie du grand bassin saharien. Le climat est typiquement saharien, caractérisé par des précipitations très peu abondantes et aléatoires, par de fortes amplitudes thermiques et par une faible humidité relative de l'air.

L'étude hydroclimatologique nécessite la connaissance des éléments climatiques tels que: les précipitations, la température et l'évapotranspiration, dont les données sont collectées à la station de Touggourt. Les coordonnées géographiques de la station météorologique de l'Oued Righ sont représentées dans le tableau suivant:

Tab. 3: Coordonnées de la station météorologique dans la région de l'Oued Righ (Touggourt)

<i>Station</i>	<i>Coordonnées</i>		
	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude (m)</i>
Touggourt	33° 11'	6° 13'	85

3. Etude des facteurs climatiques

3.1 La Température

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, surtout en surface. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent influe sur le taux de salinité des eaux.

3.1.1. Variations des températures moyennes annuelles et mensuelles

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement moyennes en hiver.

La courbe représente la variation annuelle de la température, sur une période de quarante ans (1975-2014). Elle montre que la valeur annuelle moyenne la plus élevée est de 24,35 °C, observée en 2011, la plus basse avec une moyenne 20,35°C en 1976. En général, La température moyenne pluriannuelle est de 22.20 °C. (Fig. 9)

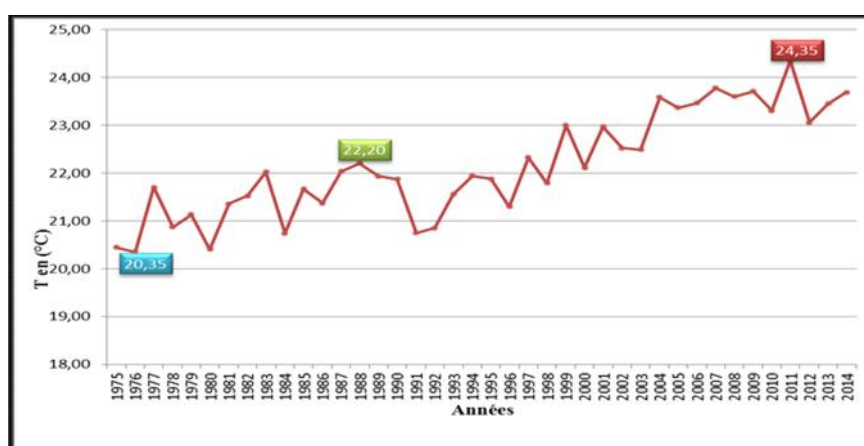


Fig. 9: Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Touggourt (1975/2014).

L'analyse de la courbe de variation de la température mensuelle, sur une période de quarante ans (1975-2014), montre que les valeurs des températures maximale sont observées pendant l'été (Juin-Août) avec des températures allant de 30,94 °C à 38,55. Les valeurs des températures minimales, qui varient de 5,62 à 10 °C, sont observées durant la période hivernale (Novembre – Mars), avec un minimum pendant le mois de Janvier (4,65 °C).

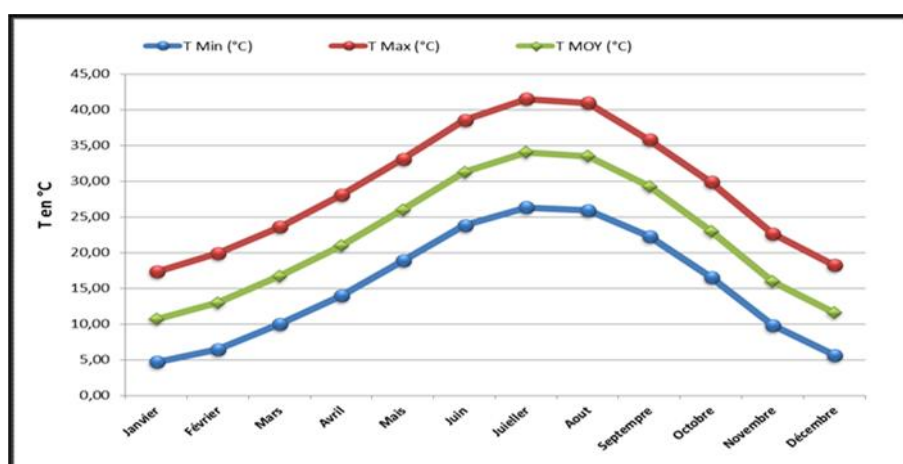


Fig. 10: Evolution des températures moyennes mensuelles station de Touggourt (1975-2014)

3.2. La pluviométrie

3.2.1. Variations moyennes mensuelles des précipitations

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de quarante ans (1975-2014) montre que le mois de Janvier est le plus pluvieux, avec une précipitation de 12,61 mm tandis que le mois de juin est le plus sec, avec 0,85 mm (Fig. 11)

3.2.2. Variations interannuelles des précipitations

L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations effectuée sur une période de quarante ans (1975-2014) montre que les années 1980 et 1990 sont les plus arrosées avec une précipitation de 12,75 et 12,37 mm et les deux années 1989 et 2008 sont les plus sèches avec 0,95 et 1,2 mm. Notons que les précipitations moyennes inter annuelles sont évaluées à 5,14 mm (Fig. 12).

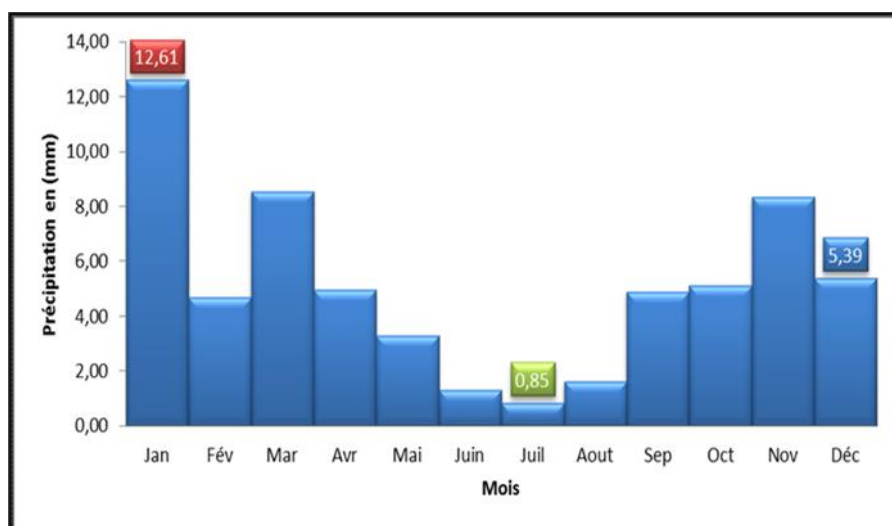


Fig. 11: Evolution des précipitations mensuelles de l'Oued Righ à la station de Touggourt (1975-2014)

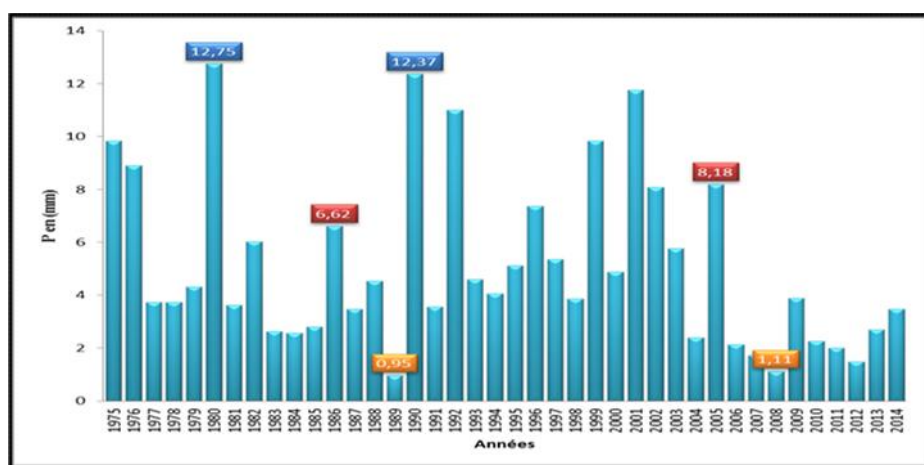


Fig.12 : Evolution des précipitations annuelles de l'Oued Righ à la station de Touggourt (1975-2014)

3.3. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Les températures élevées et les vents fréquents et violents provoquent une évapotranspiration potentielle considérable. Elle est mesurée par un évaporomètre type Piche. Le mois de Juillet représente la valeur maximale d'évaporation de 442 mm voir (Fig. 13).

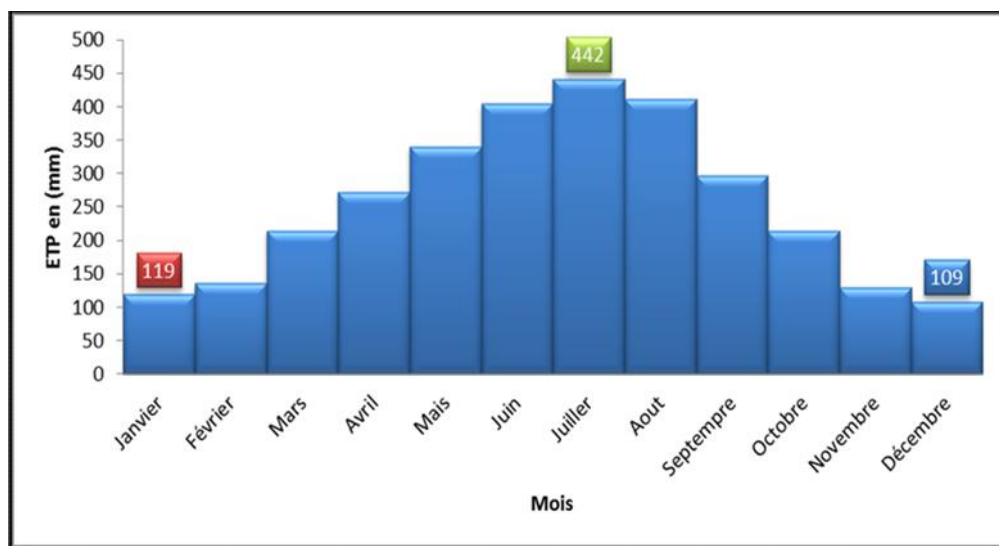


Fig. 13: Evolution de l'évapotranspiration mensuelle de l'Oued Righ à la station de Touggourt (1975-2014)

3.4. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen est l'un des indices le plus utilisé. Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et de la température (T en °C) et donne une expression relative à la sécheresse estivale en durée et en intensité (Gaussen et Bagnouls, 1952). Un mois donné est considéré comme sec quand $p < 2t$, c'est-à-dire quand les pertes en eaux (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (précipitations).

Nous constatons que la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de Gaussen (Fig.15) a permis de mettre en évidence une saison humide débutant au mois de novembre et se termine au mois de février, et une saison sèche qui s'étale du mois d'Avril jusqu'au mois de Novembre.

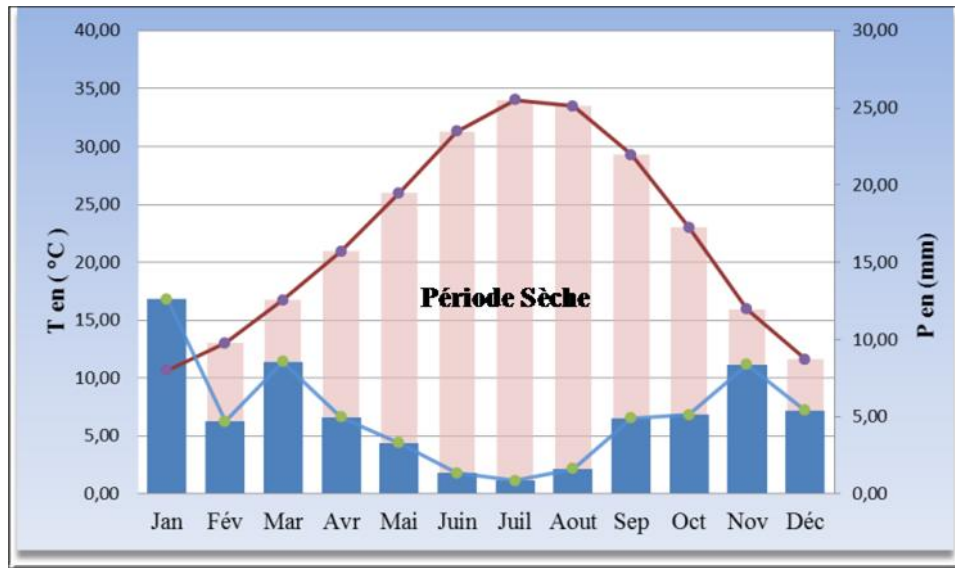


Fig. 14: Courbe Pluviothermique de la région de l'Oued Righ à la station de Touggourt.

3.5. Indice de De Martonne

Cet indice est calculé en fonction des températures et des précipitations ; L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. L'indice de Martonne (1926) a défini l'aridité du climat à l'échelle annuelle par l'équation :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Où

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : température moyenne annuelle en °C.

Application :

P = 5,14 mm

T = 22,16 °C

Ce qui donne :

$I = 0.16$

Selon les valeurs de (I) l'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne (1962) a proposé différents types de macroclimat et a établi la classification suivante :

Tab. 4: Classification climatique de l'indice de de Martonne (1926)

Intervalle de l'indice	Type de Climat
$I < 5$	Climat hyperaride
$5 < I < 7,5$	Climat désertique
$7,5 < I < 10$	Climat steppique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré

Selon l'indice, calculé avec les paramètres enregistrés au niveau de la station de Touggourt, la région de l'Oued Righ est caractérisée par un climat hyperaride (Fig. 15)

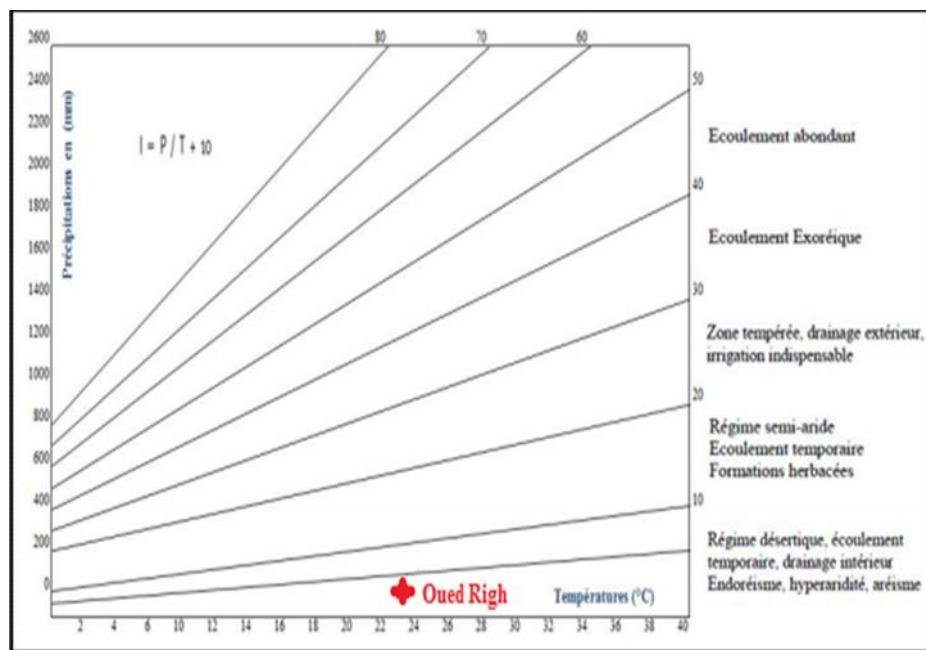


Fig. 15: Abaque de l'indice d'aridité de De Martonne (1926).

3.6. Climagramme de Louis Emberger :

Pour déterminer le climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q2, qui dépend des précipitations moyennes

annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement des mois le plus froid et le plus chaud. Il propose donc la formule suivante :

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

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/Kelvin).

m : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin).

L'application numérique donne les résultats suivants :

P = 5,14 mm

M = 306,15 °K

m = 279,68 °K

Ce qui donne :

$$Q_2 = 0.38$$

Le rapport de la station de Touggourt montre que le climat de la région de l'Oued Righ est de type saharien. (Fig. 17)

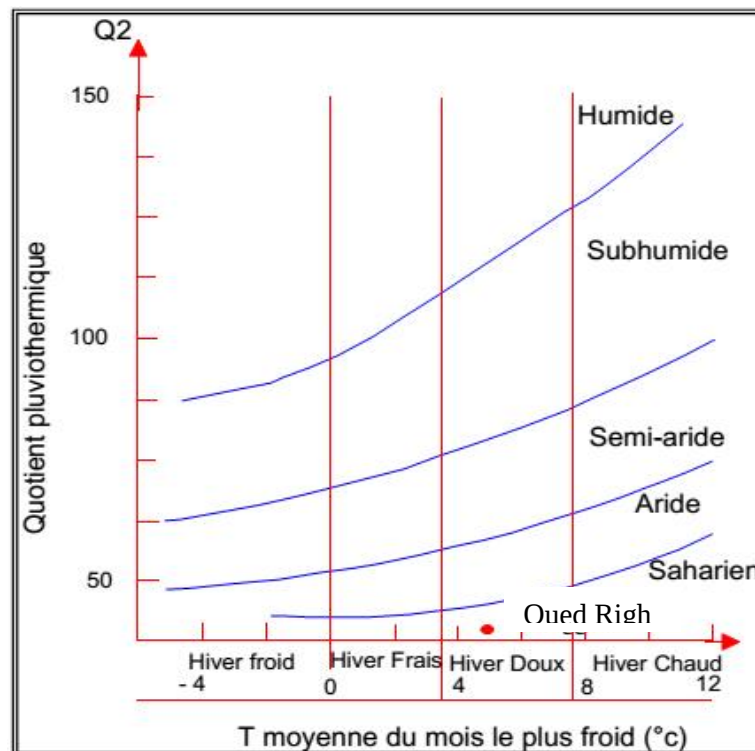


Fig. 16: Climagramme d'Emberger dans la région de l'Oued Righ à la station de Touggourt.

3.7. La durée d'insolation :

L'insolation est la durée d'apparition du soleil, elle est exprimée en heure. Elle varie en fonction de l'altitude qui détermine la longueur des jours et le degré d'obliquité des rayons solaires.

- La durée d'insolation moyenne mensuelle interannuelle :

Le tableau suivant donne les valeurs d'insolation moyennes observées en 39 ans d'observation (1975-2014).

Tab. 5: La durée d'insolation mensuelle interannuelle.

Mois	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jeill.	Aout	Sep.	Oct.	Nouv.	Déc.
Insolation en heures	231,7	237,74	268,82	284,41	309,3	311,8	350,1	335,4	278,5	261,9	241,4	231,0

D'après le tableau de répartition de l'insolation mensuelle (1975-2014), les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre correspondent aux mois les plus chauds, et les mois de Novembre, Janvier, Décembre et Février sont les plus froids. La durée maximale est de 350 heures d'insolation au mois de Juillet et la minimale au mois de Décembre avec 231.01 heures.

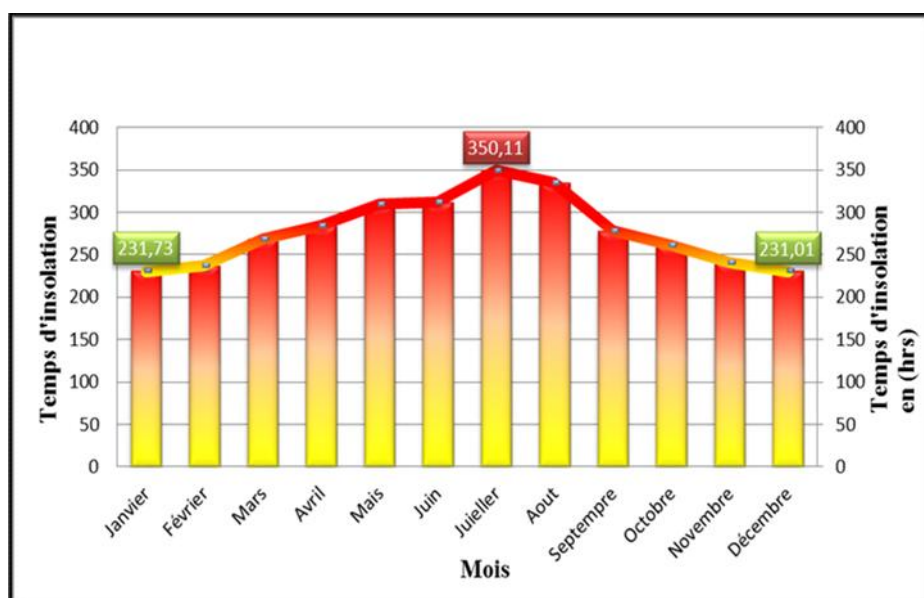


Fig. 17: Evolution de la durée d'insolation mensuelle de l'Oued Righ (1975-2014) à la station de Touggourt.

3.8. Relation température - évaporation :

La relation entre la température et l'évaporation montre une corrélation positive, car l'augmentation de température provoque une évaporation intense

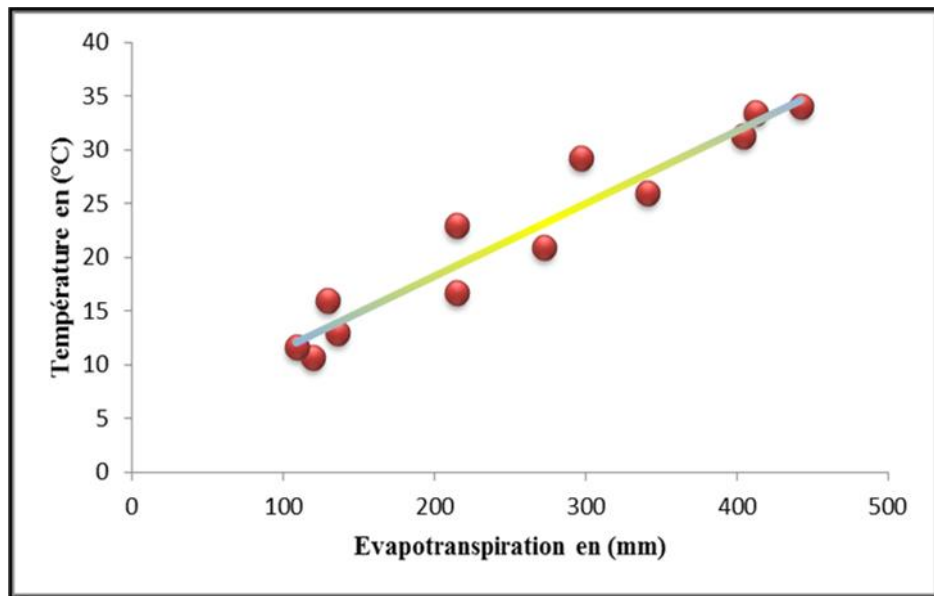


Fig.18: Relation entre la température et l'évaporation à Oued Righ station de Touggourt.

4. Hydrologie

Le système de drainage de la vallée de l'Oued Righ est assuré par un canal à ciel ouvert, sur une longueur de 150 km à partir de la localité de Goug (daïra de Temacine) jusqu'au chott Mérouane à Mélghir (wilaya d'El Oued), ce canal a été initialement construit en 1924, la pente d'écoulement est de l'ordre de 1‰. Le tiers sud du canal est d'origine naturel ; les deux tiers Nord ont été creusés. Le canal de l'Oued Righ joue un rôle très important dans :

- Le rabattement de la nappe phréatique ;
- L'assèchement de la vallée par l'évacuation des eaux d'irrigation excédentaires;
- L'évacuation des eaux d'assainissement des zones urbaines qui sont situées de part et d'autre du canal. (ANRH, 2006)

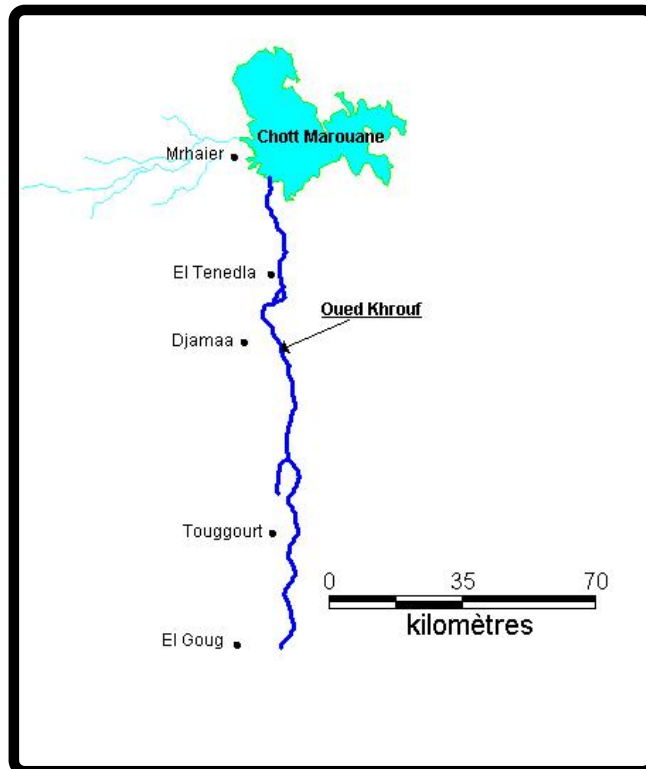


Fig. 19: Le tracé du canal de l'oued Righ (Source ABHS, 2002)

5. Conclusion

La région de l'Oued Righ fait partie de Sahara septentrional. Elle est caractérisée par un climat de type hyper-aride. Les études hydroclimatologiques ont permis de déduire que :

Le climat de la région est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver froid.

Cette zone est caractérisée par l'irrégularité et la faiblesse de ses précipitations. Les précipitations moyennes annuelles pour la période 1975 –2014 sont de 5.14 mm.

La température moyenne est de 34°C avec un maximum de 41,51°C au mois de juillet et un minimum au mois de janvier avec 4,65°C.

Les températures sont élevées, 24,35°C en moyenne annuelle pour la période (1975-2014), et 41,51°C au mois le plus chaud, ce qui explique la forte évaporation.

CHAPITRE IV: HYDROGÉOLOGIE

1 Introduction

Le Sahara algérien renferme d'importantes ressources en eaux souterraines dans deux grands aquifères, à savoir : la nappe du Continental Intercalaire (CI) et complexe terminal (CT) et surmonté par la nappe superficielle. Dans ce chapitre sera présentée une synthèse des caractéristiques hydrogéologiques globale et local des deux aquifères du Sahara septentrional.

2 Hydrogéologie Régionale

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » (OSS, 2003) s'étend sur une vaste zone couvrant une superficie d'environ 1.000.000 de km² dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye (Fig. 20 et 21)

L'alternance de couches imperméables et perméables d'une part, et l'existence d'un fossé de subsidence d'autre part, ont conduit à la mise en place de deux grands systèmes aquifères qui se partagent les ressources en eau souterraines dans la vallée de l'oued Righ : le Complexe Terminal (CT) (Bel et Demargne, 1966 ; Pallas, 1980 ; Mamou, 1990), et le Continental Intercalaire (CI) (Cornet, 1964 ; Salem et Baruni, 1990).

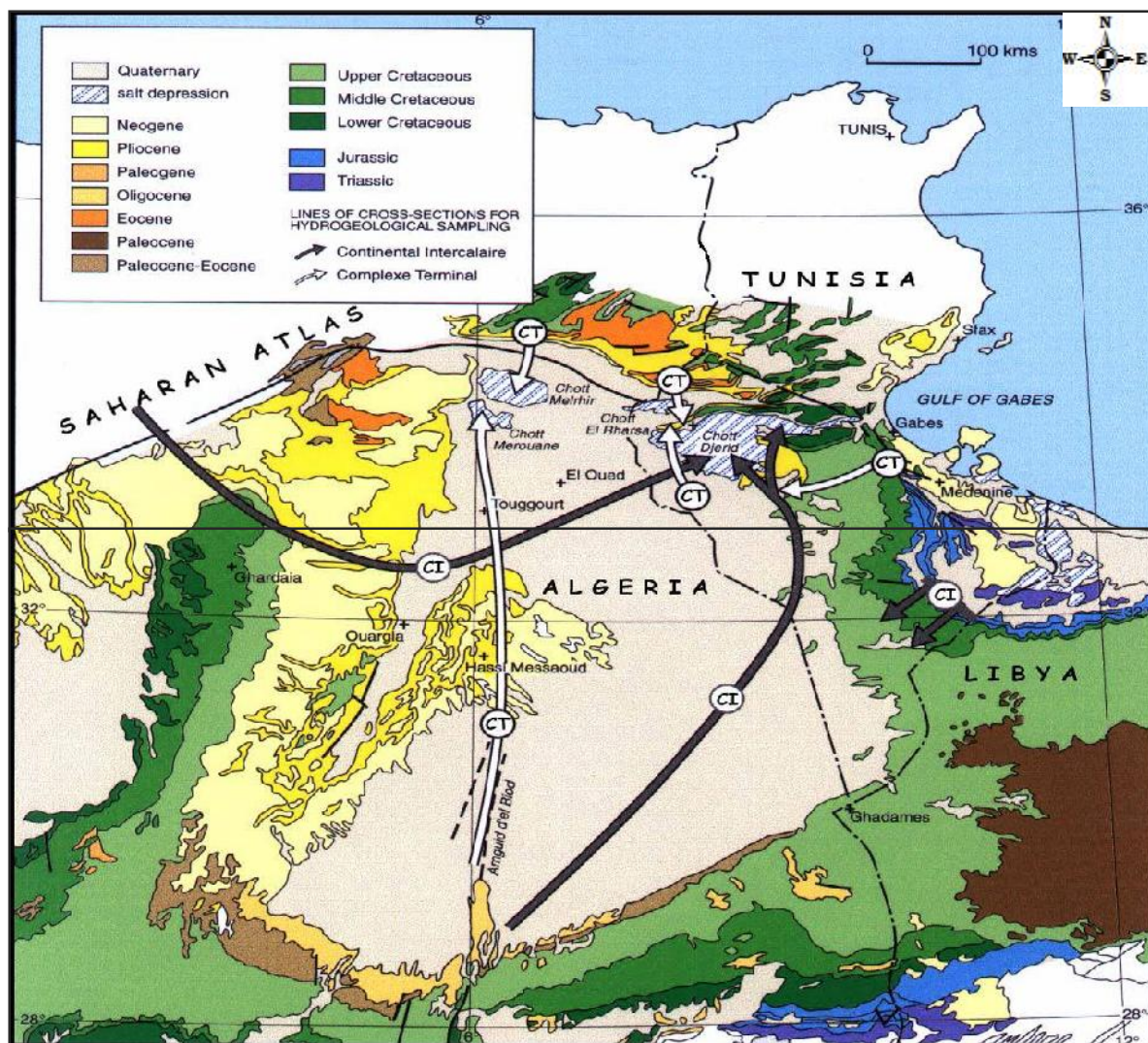


Fig. 20 : Esquisse géologique des deux nappes du Sahara septentrional indiquant le sens d'écoulement des eaux souterraines des deux nappes (Etude ERESS modifiée par Guendouz et al, 2003)

En termes de volume stocké, ces ressources en eau souterraine sont considérées, probablement, parmi les plus importantes au monde. (Fig.21). (ERESS ; 1972).

3 Les Nappes Profondes

3.1 Le Complexe Terminal

Le système aquifère du Complexe Terminal est moins étendu que le CI, néanmoins il couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sur environ 350.000 Km²; sa profondeur oscille entre 100 et plus de 500 m et son épaisseur, en moyenne, est de 220 m.

Ce complexe est constitué d'un remplissage de formations continentales sablo-argileuses qui reposent en discordance sur les calcaires érodés de l'Eocène inférieur. Il s'étend sur une superficie de 350.000 Km² et affleure aux endroits suivants :

Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens à l'Est, le long du flanc oriental du Dahar et du J. Nafusa,

- au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït,
- à l'Ouest, sur la dorsale du M'zab.

Sous le nom de Complexe Terminal (CT) sont désignées les formations les plus récentes, déposées au Bas-Sahara. Il se compose de deux ensembles aquifères principaux d'âge et lithologie différentes, et sont séparées par des formations semi-perméables ou imperméables. La structure hydrogéologique du complexe terminal se présente comme suit :

➤ Au sommet, les sables du Mio-Pliocène couvrent en discordance pratiquement la totalité de l'Erg Oriental depuis la dorsale de M'zab à l'Ouest jusqu'au Dahar Tunisien à l'Est. L'épaisseur des sables est minimale dans la région de Hassi Messaoud avec 30 m, puis augmente vers le Sud jusqu'à 400 m, pour atteindre au Nord les 600 m. L'épaisseur moyenne est de 100 m.

➤ Les formations carbonatées du Sénonien supérieur s'étendent sur l'ensemble du Bassin Oriental. L'Eocène inférieur ne couvre que la zone située au Nord sur la ligne de Djamaa – Tozeur.

➤ Les calcaires et les dolomies du Turonien sont reliés hydrauliquement aux formations carbonatées précédentes par l'aquifère des sables du Mio-Pliocène. L'épaisseur moyenne du réservoir carbonaté est de 150 m. Elle atteint 500 m au Nord sous le chott Melghir et 600 m dans la fosse Atlasique.

➤ Le substratum du complexe aquifère est d'une manière générale, constitué par la formation lagunaire du Sénonien.

La nappe du complexe est en charge au Nord et libre dans sa partie sud. Sa porosité dépend de la lithologie, elle est estimée à 30% dans les sables du Mio-Pliocène et à 20% dans les calcaires du Sénonien et de l'Eocène supérieur.

D'une manière générale l'écoulement des eaux est orienté du Sud vers le Nord (dans le bassin oriental) et converge vers les chotts Merouane et Melghir ainsi que vers l'exutoire souterraine du Golf de Gabes

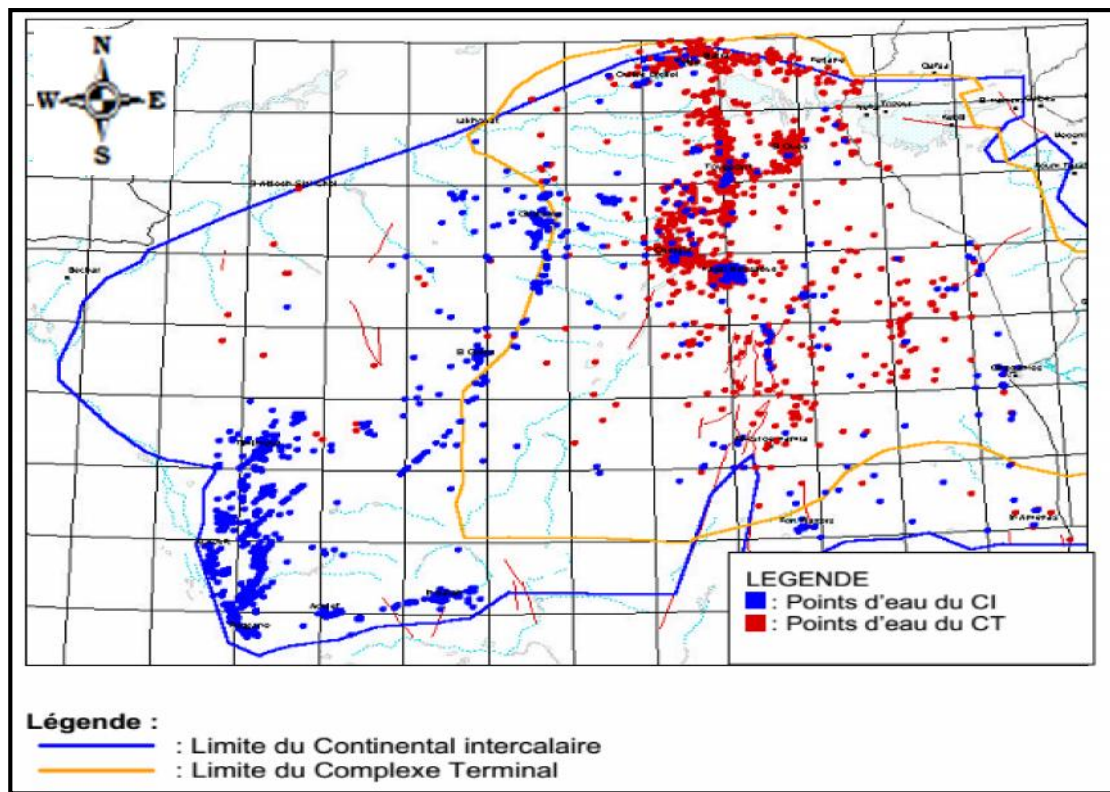


Fig. 21 : Carte des points d'eau du CI et du CT en Algérie (OSS, 2003)

Dans le bassin occidental, une partie importante de l'écoulement rejoint les séries sous-jacentes du Continental Intercalaire et contribue à l'infero-flux de l'oued Saoura.

L'alimentation de la nappe du complexe terminal se fait sur les affleurements perméables, par infiltration des eaux de ruissellement apportées par les oueds qui descendent les reliefs des bordures. Un apport non négligeable se fait par l'impluvium propre du Grand Erg oriental. (Guettiche S., et Benabdasadok D., 2005)

L'écoulement des eaux souterraines de ces aquifères est dirigé du Sud vers le Nord (Fig. 20). Le niveau piézométrique passe de 80 m à El Goug à une quarantaine de mètres en bordure des chotts. Dans la partie nord du bassin la différence de niveau peut atteindre une quarantaine de mètres (Guettiche S., et Benabdasadok D., 2005)

En 1970, le Complexe Terminal fournissait $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (ERESS; 1972) dont les deux tiers proviennent d'eau jaillissantes, le reste étant pompé. L'essentiel de l'artésianisme est concentré dans la partie Nord du bassin entre Tinedla et El Meraier, alors que le pompage domine plus au Sud, de Touggourt à Blidet Amor. Cependant à 'El Goug, la plus méridionale des palmeraies, est encore totalement alimentée par des eaux artésiennes.

Le complexe terminal a une profondeur qui se situe entre 100 et 500 m. Les eaux de cet aquifère se caractérisent par une température peu élevée, allant de 25 à 30°C.

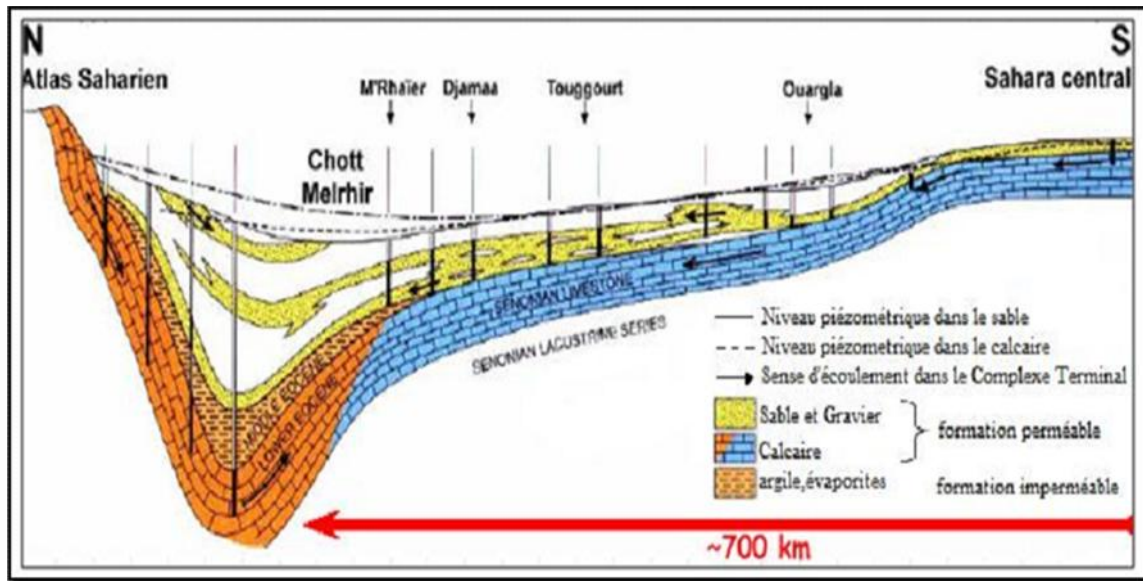


Fig. 22: coupe hydrogéologique schématique Nord-Sud du Complexe Terminal (G.Castany, 1982)

A. Piézométrie de Complexe Terminal

L'établissement des cartes piézométriques est une étape importante dans l'étude hydrogéologique. Elle permet d'étudier l'hydrodynamisme de la nappe en définissant le sens d'écoulement des eaux souterraines, leur alimentation, leur exutoire et également leur vitesse de déplacement. La cartographie a été réalisée d'une façon numérique avec le logiciel Surfer.

Le sens principal de l'écoulement dans la région de l'Oued Righ est orienté vers le chott Merouane (exutoire naturel). Dans la région d'Oum Thiour au Nord le sens d'écoulement est également orienté vers le chott de direction NO-SE. Dans la partie sud, au niveau des localités de Sidi Amrane, djamaa, Tendla, Sidi khlil et Meghaier, le sens d'écoulement est de direction Sud-Nord.

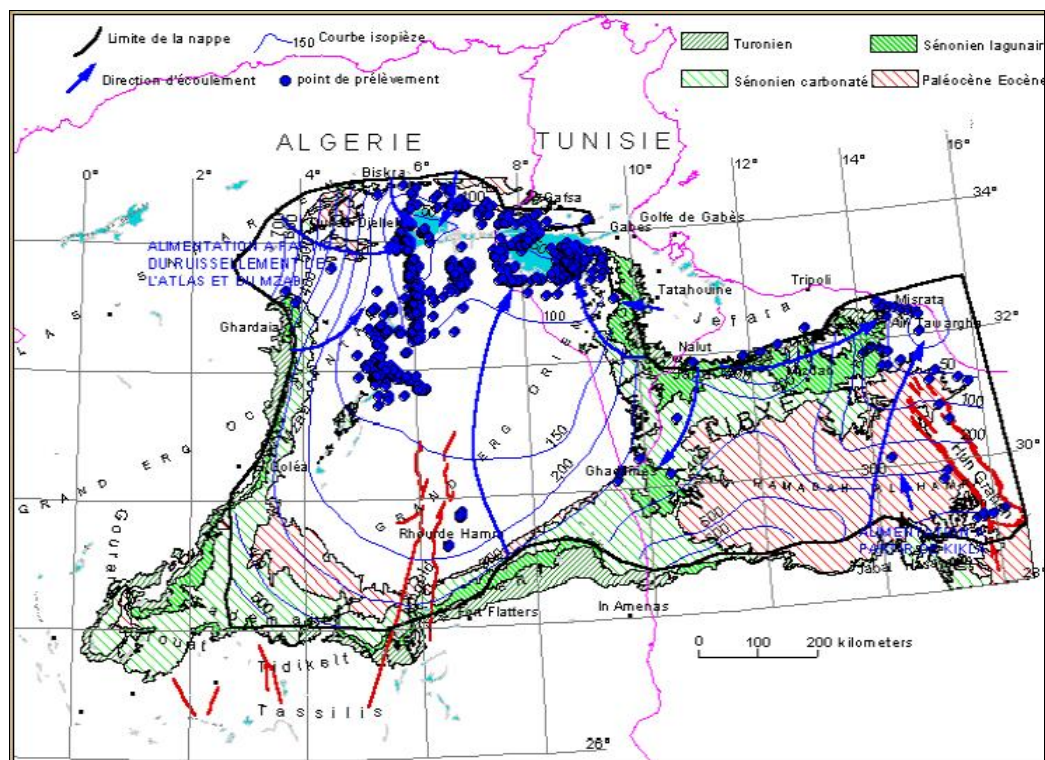


Fig 23: Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)

3.2 Le Continental Intercalaire

Cette nappe s'étend sur les trois pays maghrébins (l'Algérie, la Tunisie et la Libye). Elle couvre 600 000 km² dans la partie algérienne et stocke un volume d'eau considérable, estimé à 3.5.10⁹ Milliards m³ environ. Elle est plus connue sous la dénomination de la « nappe de l'Albien ». Le terme Continental Intercalaire, par contre désigne l'ensemble des couches détritiques qui se sont déposées au Mésozoïque inférieur au Sahara entre deux cycles marins. C'est le plus puissant aquifère du Sahara avec une épaisseur qui peut atteindre 1000 m (Tesco, 1986).

La nappe du Continental Intercalaire CI est limitée au Nord par l'Atlas Saharien, à l'Ouest par l'axe Béchar-Regane et au Sud par l'axe Reggan-Ain Amenas; à l'Est elle se prolonge au-delà des frontières Algéro-Libyenne et Algéro-Tunisienne. Il est partagé par la dorsale du M'Zab en deux bassins :

- Le bassin Occidental Oriental.
- Σ Le bassin Oriental qui englobe le Bas Sahara.

Cette nappe est ainsi captive, à l'exception des bordures.

Les eaux du Continental Intercalaire sont caractérisées par :

- Une température qui dépasse les 60°C, sauf aux endroits où l'aquifère est proche de la surface du sol.

➤ Le résidu sec de l'eau oscille entre 1 et 2 g/l, il peut atteindre les 5 g/l.

L'alimentation de la nappe s'est faite en grande partie durant les périodes pluvieuses du Quaternaire

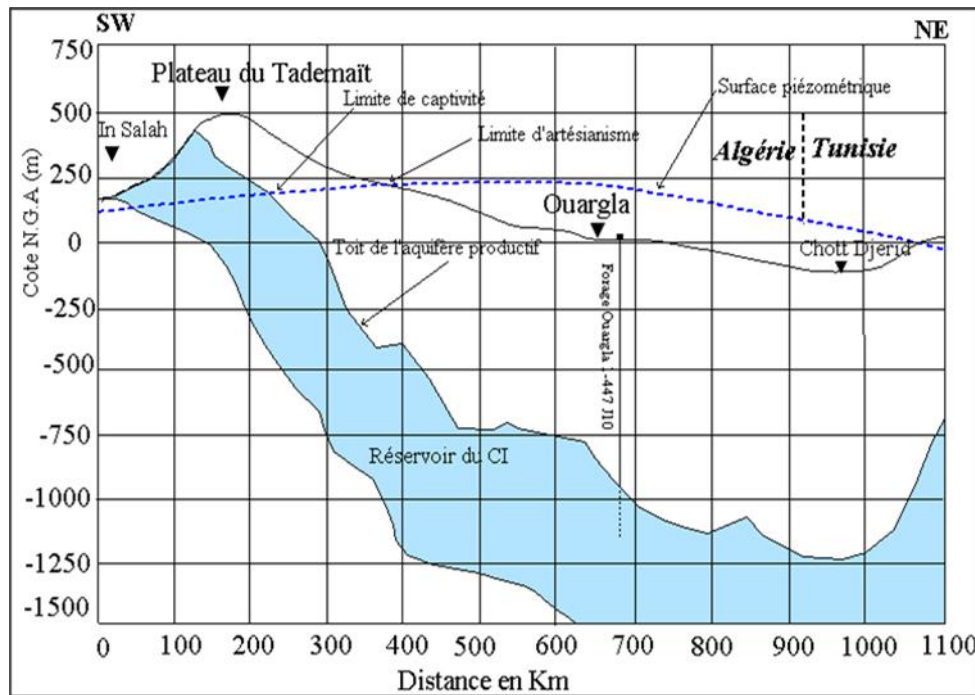


Fig. 24: Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI

(ANRH, 2003).

La transgression cénomaniennne donne au Continentale Intercalaire une limite supérieure beaucoup plus uniforme que sa limite inférieure.

Il se termine en biseau sur les anciens reliefs hercyniens et atteint une grande puissance dans les anciennes cuvettes d'accumulation. (ANRH, 2003)

A. Puissance du réservoir

L'épaisseur utile de ce réservoir a été déterminée à partir de plusieurs centaines des forages pétroliers et de nombreuses compagnes de géophysiques qui ont traversé la totalité des terrains Secondaires. Cette épaisseur correspond à la somm des couches perméables (grés et sables argileux) dont la fraction sableuse est supérieure à 50%. Les plus fortes épaisseurs sont localisées à l'Est d'El Goléa, où elles sont comprises entre 750 mètres et 1000 mètres. La vallée de l'Oued Righ est un peu moins bien lotie avec des valeurs inférieures à 350 mètres.

B. Alimentation

L'alimentation de la nappe s'est faite en grande partie durant les périodes pluvieuses du Quaternaire, sur la base des études antérieures (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972, 1972 ; Pallas, 1978). Actuellement, son taux de recharge reste faible et s'effectue surtout à partir du piémont de l'Atlas Saharien. La quantité d'eau qui tombe annuellement sur les affleurements du Crétacé inférieur continental est estimée à 2,5 milliards m^3 /an. Les conditions climatiques caractérisées par une hauteur de pluie faible et une évaporation intense rendent difficile l'estimation du coefficient d'infiltration.

Le volume d'eau emmagasiné dans le CI, évalué à $3,5.10^9$ Milliards m^3 , représente un débit continu de $1000 m^3/s$ pendant 1000 ans.

Les exutoires sont représentées par :

- **Les foggaras** longues galeries de drainage des eaux, utilisant la topographie locale avec une pente faible pour permettre l'écoulement libre de l'eau vers des points bas (cas du bassin occidental).
- **Les puits artésiens** (bassin oriental).
- **Les sebkhas** vastes étendues humides et salines, surfaces évaporantes dont le débit total n'est pas négligeable.

C. Epaisseur du réservoir

L'épaisseur utile, souvent déterminée à partir des diagraphies, correspond à la somme des épaisseurs des horizons perméables gréseux et des couches calcaires dolomitiques de l'Aptien, immergées au sein de cette série gréseux-sableuse.

Les plus fortes épaisseurs sont localisées à l'Est d'El Goléa où elles sont comprises entre 750 m et 1000 m. Cependant dans la vallée de l'Oued Righ et des Zibans, l'épaisseur est moins importante et sa valeur est inférieure à 350 m.

Le toit de la nappe du Continental Intercalaire est formé par les argiles du Cénomanién et est affecté par quelques failles importantes. Il s'agit des accidents de la dorsale d'Amguid-El Biod. Ces failles favorisent les fuites verticales (drainance) vers la nappe du complexe terminal. (Ben hamida R. et Talbi, 2006)

D. La piézométrie de la nappe continentale intercalaire

Des cartes piézométriques ont été établies par Cornet (1964), ERESS (1972), OSS (2003) et font apparaître deux grands bassins sahariens séparés par la dorsale du M'Zâb. Sur la carte établie en 2003 (Fig.25) par l'OSS, il en ressort 3 domaines hydrogéologiques : le bas Sahara

à écoulement d'Ouest en Est ; le grand erg occidental, le Touat-Gourara et le Tidikelt à écoulement du Nord vers le Sud et le Sud-ouest. Dans le bassin oriental, bassin en général artésien, avec des pressions d'artésianisme très fortes comprise entre 5 et 25 bars (Guendouz, 1997 ; In CHABOUR ; 2006), des sens d'écoulement semble être du Nord-Ouest vers le Sud-est pour être repris ensuite par un sens d'écoulement du Sud vers le Nord-est. Les eaux convergent vers l'exutoire tunisien par la faille de Médenine. (Fig. 25).

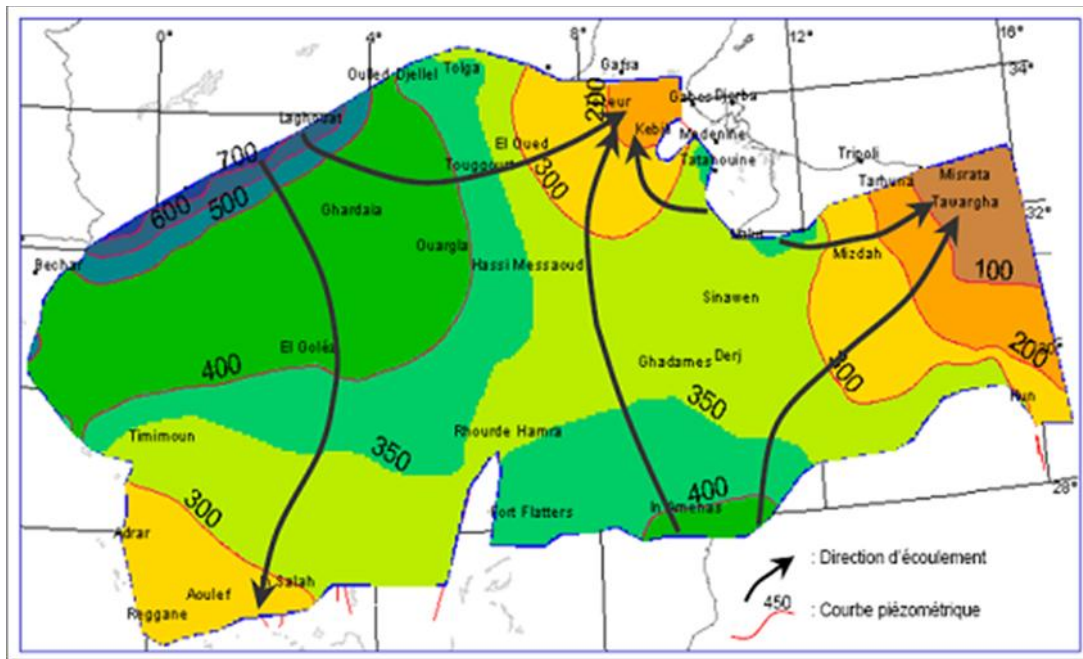


Fig. 25. Carte piézométrique de la nappe du continental intercalaire (d'après SASS 2003)

Cette carte définit l'écoulement de la nappe à l'état naturel, peu ou pas influencé par le pompage.

Dans la zone d'étude de l'Oued Righ, l'écoulement de cette nappe se produit dans le sens Ouest-Est, où les eaux proviennent de l'Atlas Saharien (Fig. 26). La carte piézométrique montre trois cônes de dépression qui apparaissent autour de Tougourt, Sidi Slimane et Djamaa. Ce qui indique que ces zones sont le siège d'une surexploitation et se localisent principalement dans les principales palmeraies et les grandes villes.

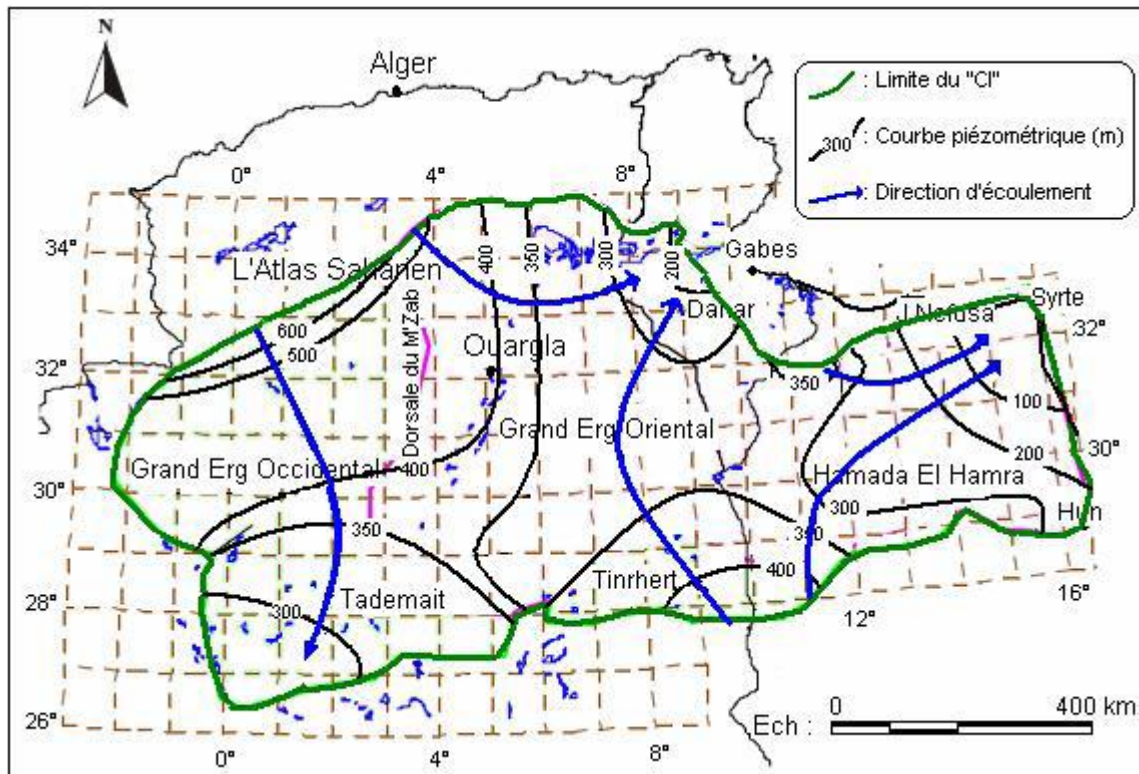


Fig. 26: Carte piézométrique de référence du Continentale Intercalaire (OSS, 2003)

3.3 La nappe superficielle

La nappe superficielle est présente dans toutes les oasis de la vallée. Elle est contenue dans les sables fins à moyens d'âge quaternaire avec des cristaux de gypse. Son épaisseur, d'une vingtaine de mètres en moyenne, augmente du Sud vers le Nord.

Elle est caractérisée par une forte salinité des eaux, confirmée par des valeurs de la conductivité électrique élevée et qui varient de 4.91ms/cm à 13.44 ms/cm.

La remontée du niveau piézométrique de la nappe superficielle est constamment observée suite aux excès des pompages d'eau du CI et du CT pour l'irrigation. C'est pour drainer ce surplus que le réseau de drainage artificiel a été réalisé dans la dépression de l'oued Righ.

3.3.1. Piézométrie de la nappe superficielle

L'établissement de la carte piézométrique est la base de toute étude hydrodynamique, c'est dans ce but qu'une campagne de mesure du niveau d'eau dans les différents puits et forages des nappes superficielles et du Complexe Terminal dans la région de l'Oued Righ.

La détermination de la côte Z de chaque point à l'aide d'un GPS.

Les coordonnées des points ont été relevées à l'aide d'un GPS et les mesures du niveau avec une sonde piézométrique sonore et lumineuse.

La cote du niveau piézométrique NP est établie en faisant la différence entre la cote Z (m) du sol au point de mesure et la profondeur à l'eau P_e (m).

Le gradient hydraulique est calculé à partir du rapport entre la différence des valeurs de deux courbes piézométriques et la distance qui les séparent (L), selon la formule suivante :

$$i = \frac{H_1 - H_2}{L}$$

➤ **Carte piézométrique de la nappe libre :**

La carte piézométrique de Complexe Terminal (CT) montre un sens d'écoulement général qui suit la topographie du sol, c'est-à-dire du Sud vers le Nord et présente des zones de convergences indiquant les zones de surexploitation au niveau des palmeraies et des villes.

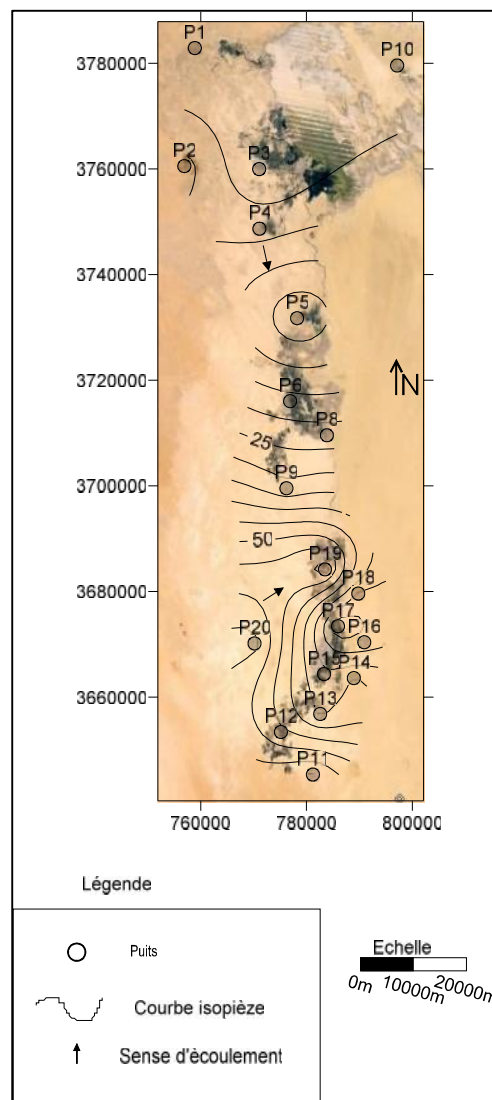


Fig. 27 : Carte piézométrique de la nappe superficielle (Octobre 2015)

4. Détermination des paramètres hydrodynamiques

4.1. Introduction :

La détermination des différents paramètres hydrodynamiques est indispensable pour l'évaluation de la capacité de l'aquifère et de son comportement. Les résultats du pompage d'essai exécuté au niveau de deux forages dans la nappe CT₁ à El Meghaier au Nord et à Touggourt au Sud.

4.2. Méthode d'interprétation

L'interprétation des données du pompage a été réalisée grâce à l'utilisation d'un logiciel informatique « Aquifertest de Waterloo hydrogéologic Inc, release 2.56 », selon la méthode de pseudo-équilibre de C.E. Jacob.

➤ Forage FN1 SM3 à El Meghaier :

Coordonnées : X= 5° 56' 56" E ; Y= 4° 0' 3" N et Z : 2 m

Profondeur du forage: 60 m

Rabatement maximal : 4,65 m

Niveau dynamique maximal : 9,65 m

Niveau statique : 5 m.

Epaisseur de la couche aquifère: 50 m

L'essai a été réalisé dans l'aquifère à nappe captive dans les sables gréseux avec intercalation d'argiles et des traces de grès.

La durée du pompage est de 68400 s avec un débit constant de 5 l/s

Courbe de descente :

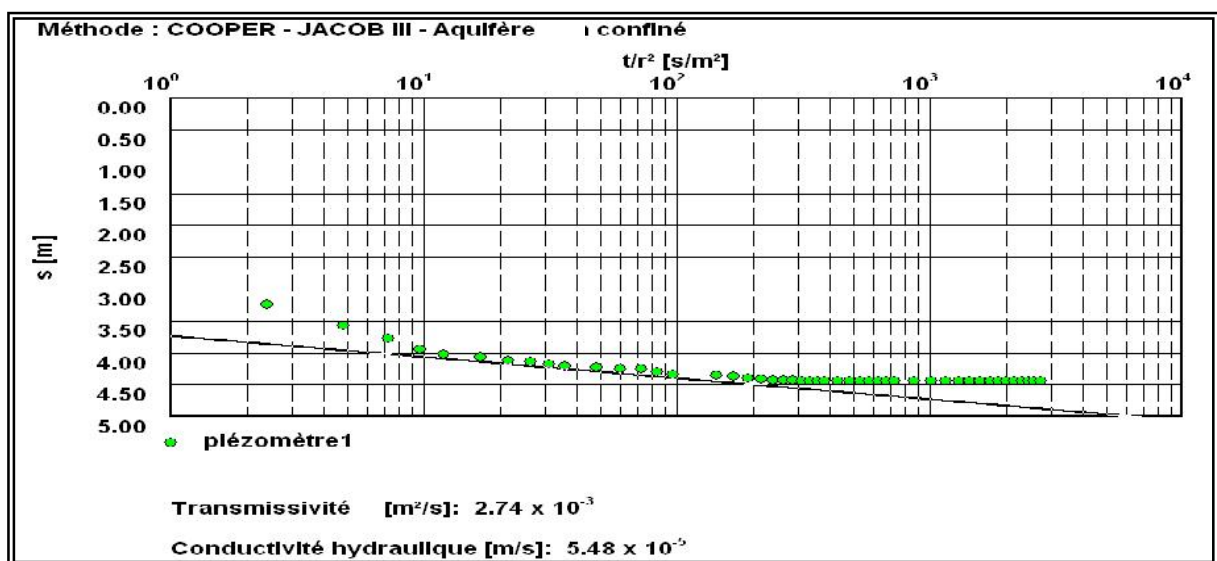


Fig. 28 : Essai de pompage longue durée lors de la phase de la descente du forage FN1 SM3 à El Meghaier selon la méthode de Cooper-Jacob.

L'interprétation numérique de la courbe de descente par la méthode de C.E. Jacob donne la valeur des paramètres suivants :

$$T = 2,74 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$K = 5,48 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Phase de la remontée du niveau:

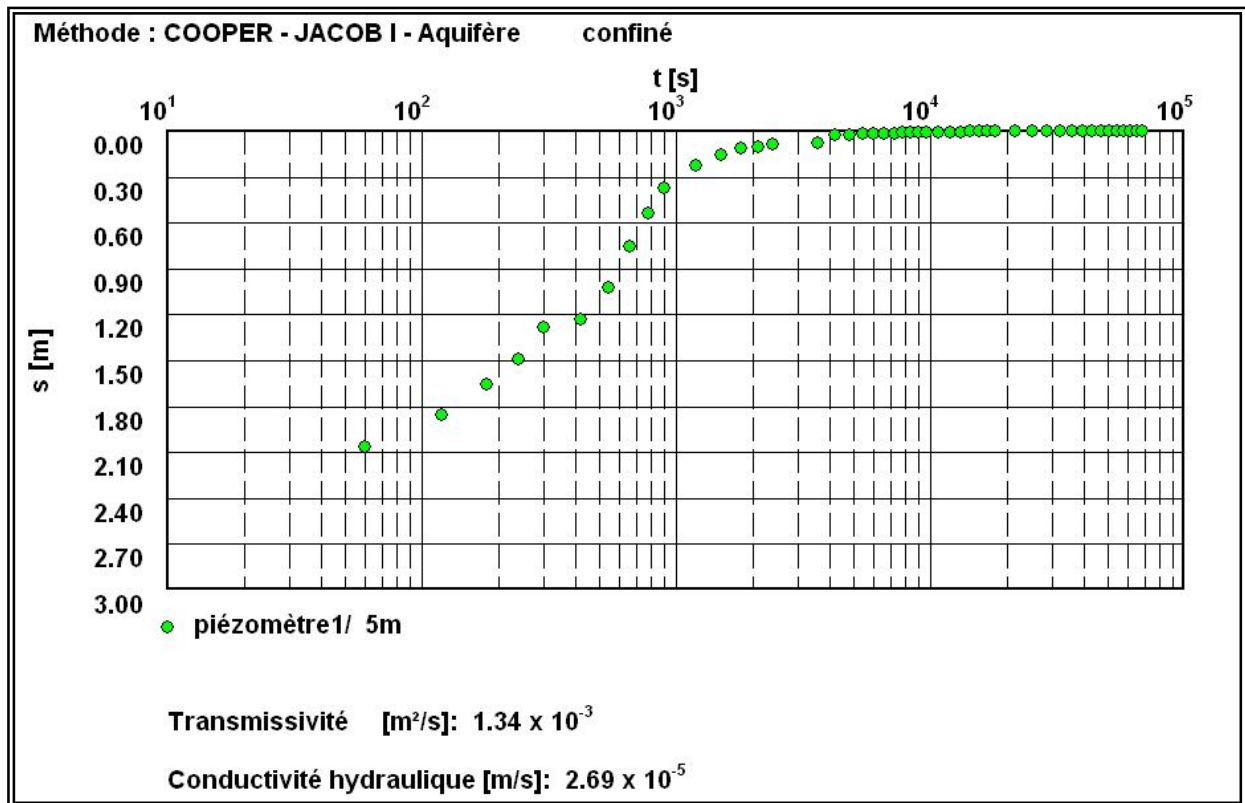


Fig. 29 : Phase de la remontée du niveau du forage FN1 SM3 à El Meghaier selon la méthode de Cooper-Jacob.

L'interprétation automatique de la courbe de la remontée donne la valeur des paramètres hydrodynamiques suivants :

$$T = 1,34 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$K = 2,69 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Les valeurs moyennes des paramètres hydrodynamiques pour les deux phases - descente et remontée sont les suivantes :

$$T_{\text{moyenne}} = 2.04 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_{\text{moyenne}} = 4,08 \times 10^{-5} \text{ m/s}.$$

➤ **Forage D35 F15 à Touggourt (zone de Nezla) :**

Coordonnées : X : 6° 04' 31" E, Y : 33° 04' 08" et profondeur : 18 m.

Rabatement maximal : 1 m.

Niveau dynamique maximal : 3,1 m.

Niveau statique : 2,1 m.

Le sondage capte l'aquifère à nappe captive, avec une épaisseur de 30 m de sables fins à moyen avec intercalation de calcaire et de gypses.

L'essai a été réalisé avec un débit constant 15 l/s.

Phase de la descente

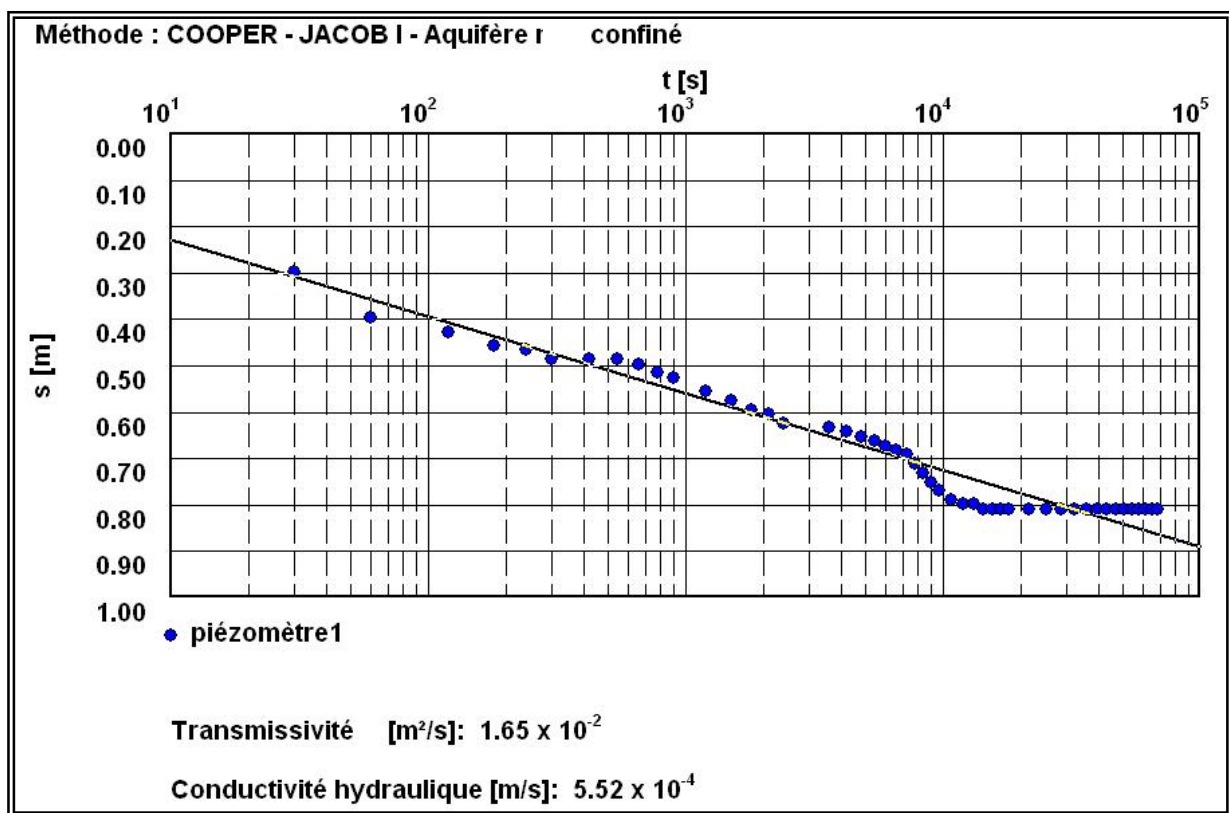


Fig. 30 : Essai de pompage longue durée lors de la phase de la descente du forage D35 F15 à Nezla selon la méthode de Cooper-Jacob.

L'interprétation automatique de la courbe de la remontée donne la valeur des paramètres hydrodynamiques suivants :

$$T = 1,65 \times 10^{-2} m^2 / s$$

$$K = 5,52 \times 10^{-4} m / s$$

Phase de la remontée du niveau:

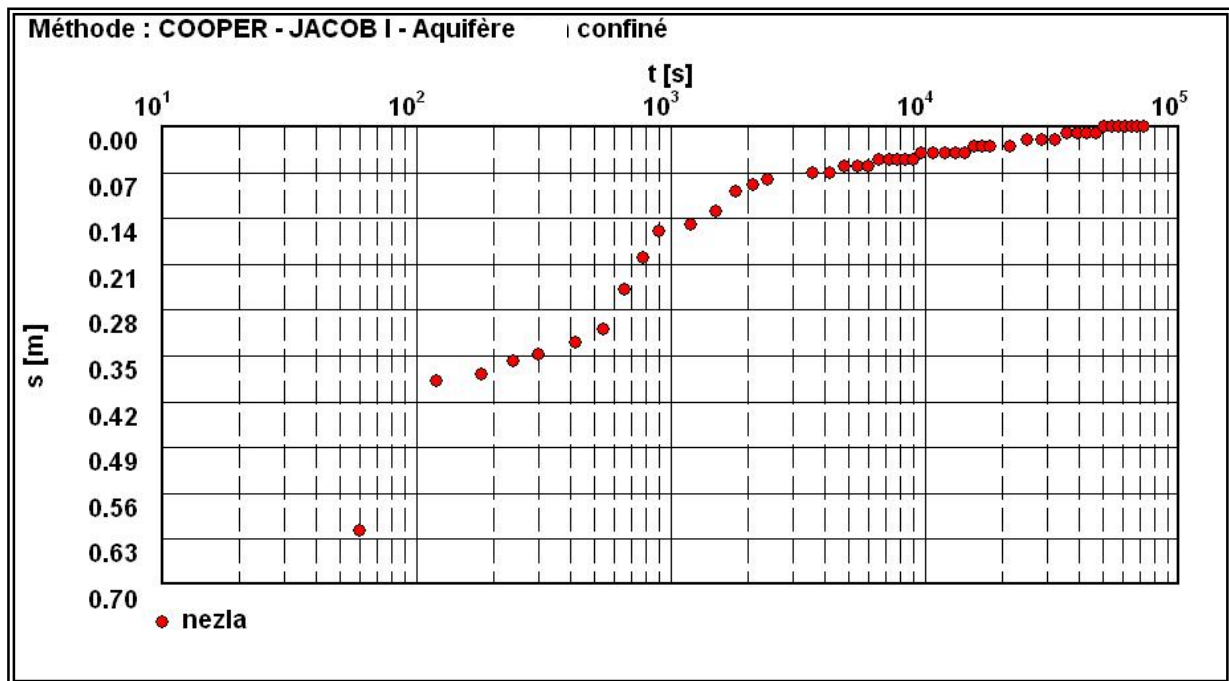


Fig. 31 : Phase de la remontée du niveau du forage D35 F15 à Nezla selon la méthode de Cooper-Jacob.

L'interprétation numérique a donné les valeurs des paramètres hydrodynamiques suivants :

$$T = 0.99 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$K = 3,31 \times 10^{-4} \text{ m} / \text{s}$$

Les valeurs moyennes des paramètres hydrodynamiques du Forage D35 F15 à Nezla pour les deux phases - descente et remontée sont les suivantes :

T moyenne de l'ordre de $1.32 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$

K moyenne = $4,41 \times 10^{-4} \text{ m} / \text{s}$

D'après les résultats, on trouve également que les valeurs de transmissivité et celles de perméabilité sont importantes au niveau des deux forages, et cela est montré dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Les paramètres hydrodynamiques de la zone d'étude.

Puits	K (m/s)	T (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement
Meghaier	$4,08 \times 10^{-5}$	2.04×10^{-3}	/
Touggourt	$4,41 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-2}$	/

5. Conclusion

Dans le bassin de l'Oued Righ, les aquifères sont représentés par deux systèmes aquifères : le Continental Intercalaire (CI), constitué en grande partie par des sables et des grès d'âge Albien et le Complexe Terminal (CT), qui est un système hydrogéologique multicouche, peu profond, moins étendu que le CI et constitué de deux ensembles différents:

- Le premier composé de formations calcaires d'âge Sénonien-Eocène CT3
- Le deuxième de sables, graviers et des grès d'âge Mio-Pliocène. Ce dernier inclut la 1ère nappe (CT1) et la 2ème nappe des sables du Complexe Terminal (CT2).

Un aquifère superficiel formé de sables fins à moyens d'âge quaternaire à récent et qui repose sur ces deux ensembles.

Les cartes piézométriques sont importantes pour schématiser le comportement hydrodynamique de l'aquifère et évaluer l'écoulement des eaux souterraines.

**CHAPITRE V: CARACTERISTIQUES PHYSICO-
HYDROCHIMIQUES ET RISQUE DE LA SALINITE
DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA ZONE
D'ETUDES**

1. Introduction :

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour. Le chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques (Ca^{++} , HCO_3^-) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial (Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^-) et des éléments d'origine biologique (NO_3^-). La concentration de ces éléments naturels est conditionnée par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface. L'intérêt principal de cette partie est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de l'Oued Righ et sa distribution dans l'espace et son évolution dans le temps.

Les eaux de l'Oued Righ se répartissent en trois nappes :

- Nappes Libre.
- Complexe Terminale (Nappes des sables argileux et des calcaires) ;
- Nappe du Continental Intercalaire

L'interprétation des analyses hydrochimique est basée sur les données collectées en 2013 pour les nappes du CT et du CI, mais pour la nappe libre superficielle les données sont plus récentes et datent de la période d'Octobre 2015.

2. Nappes du complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI):

2.1. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs du potentiel d'hydrogène (pH) varient légèrement de 6,62 à 8.71 pour le complexe terminal. Elles restent aux normes algériennes (Fig. 32- a). Les eaux du Continental Intercalaire sont basiques avec des valeurs qui varient entre 7,25 et 8,46 (Fig.32- b) (annexe1).

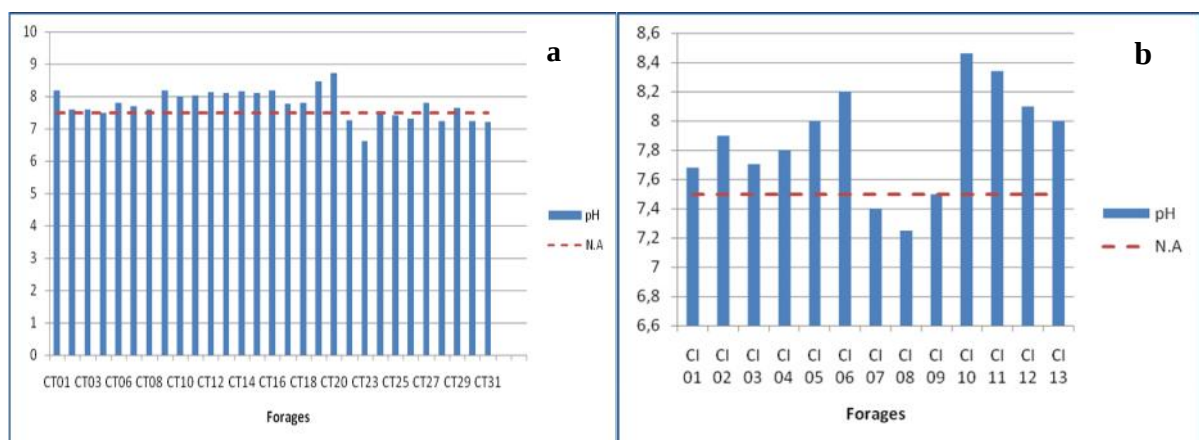


Fig. 32 : Histogramme de variation du pH dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : le Continental Intercalaire (CI).

2.2. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) du Complexe Terminal varie entre 2910 $\mu\text{S/cm}$ et 7200 $\mu\text{S/cm}$. Cette dernière est enregistrée au forage (CT28) (Fig.33-a). Les eaux de la nappe du Complexe Terminal ont une forte minéralisation qui dépasse dans la plupart des forages les normes algériennes. Cependant, pour le Continental Intercalaire, la conductivité électrique est moins importante que celle du Complexe Terminale à l'exception des forages : CI 01 et CI08 (Fig. 33. b).

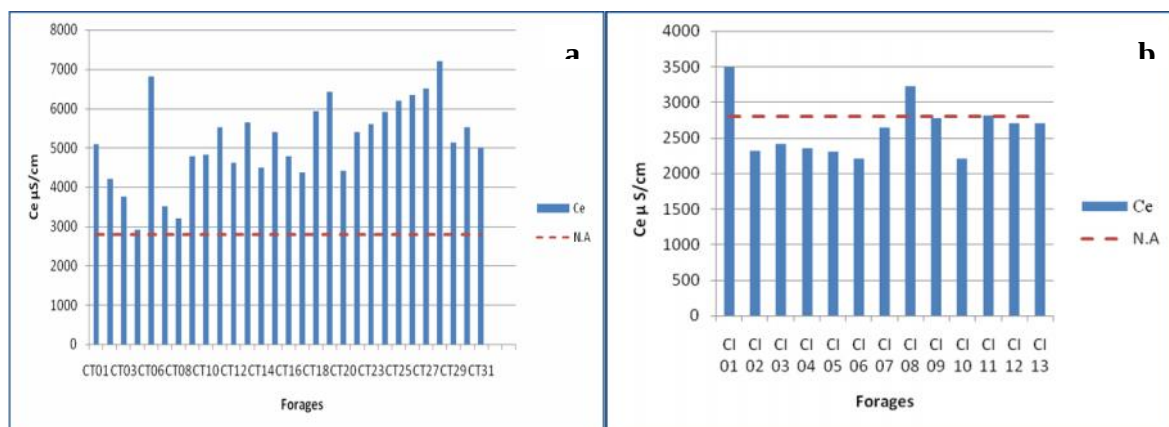


Fig. 33: Histogramme de la variation de la conductivité électrique (Ce) dans les forages dans la région de l'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) ; (b) : le Continental Intercalaire (CI).

2.3. Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)

➤ Le Calcium (Ca^{++})

Les valeurs obtenues pour cet élément au niveau des forages varient entre 56.01 et 621.2 mg/l (Fig.34 -a), dont la valeur maximale est observée au niveau du forage (CT28). La valeur minimale a été enregistrée au niveau du forage (CT20). Dans l'ensemble les valeurs de Calcium (Ca^{++}) dépassent les normes algériennes. Le Continental Intercalaire enregistre des concentrations moins faibles que le Complexe Terminale et sont aux normes algériennes.

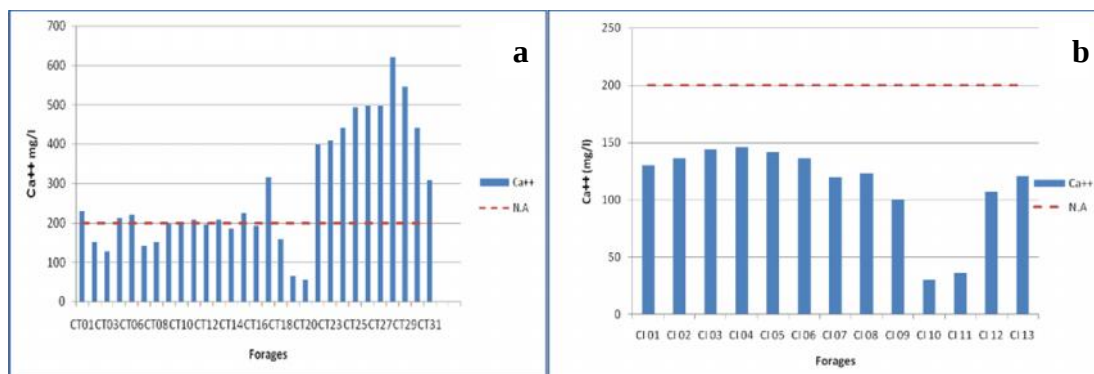


Fig. 34: Histogramme de la variation du calcium Ca^{++} dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) ; (b) : le Continental Intercalaire (CI).

➤ Le Magnésium (Mg^{++})

Les teneurs du magnésium (Mg^{++}) obtenues au niveau des forages de Complexe Terminal varient entre 101 à 591 mg/l (Fig.35-a). La valeur maximale est observée au niveau du forage (CT6). La valeur minimale a été enregistrée au niveau du forage (CT4). La plupart de ces valeurs dépassent les normes algériennes. Par contre les eaux du Continental Intercalaire présentent des concentrations à la limite des normes algériennes, sauf pour quelques forages (CI08) et (CI11) (CI12), (CI13) (Fig.35-b).

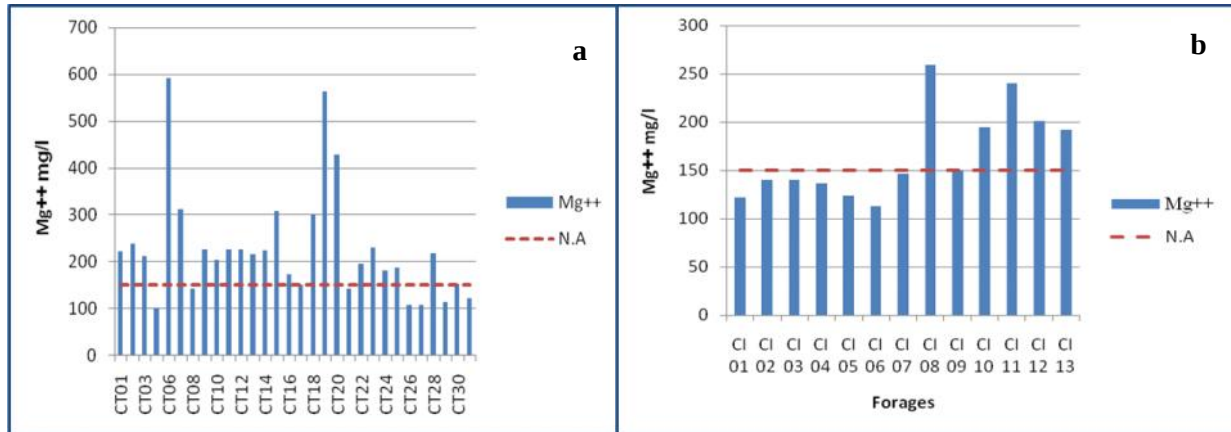


Fig. 35 : Histogramme de la variation de Magnésium (Mg^{++}) dans les forages dans la région d'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI).

➤ Sodium Na^{+}

Les valeurs du sodium (Na^{+}) varient entre 234 et 1173 mg/l pour le Complexe Terminal (Fig. 36-a). La valeur maximale du sodium (Na^{+}) est localisée au niveau du forage (CT28). La valeur minimale a été enregistrée au niveau du forage (CT7). Nous constatons que les concentrations de sodium (Na^{+}) ont largement dépassé les normes algériennes fixées à 200 mg/l pour le sodium (Na^{+}) (annexe 1). Par contre le Continental Intercalaire reste sous les normes pour la majorité des valeurs qui varient entre 145 et 500 mg/l à l'exception de quelques forages (Fig. 36-b).

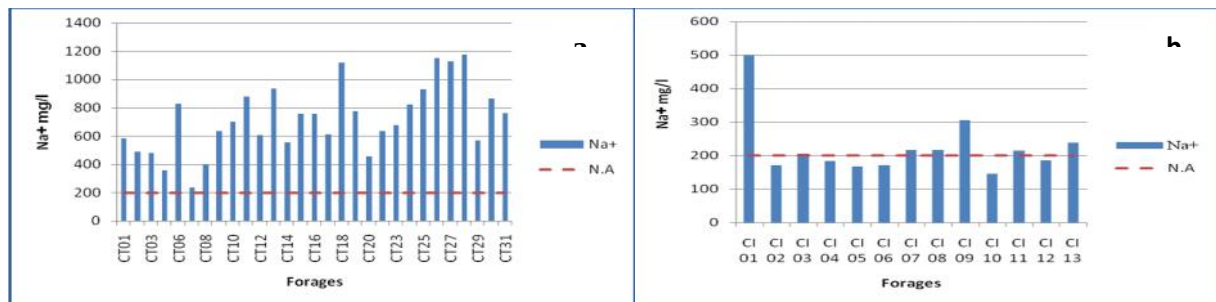


Fig. 36 : Histogramme de la variation du sodium (Na^{+}) dans les forages dans la région de l'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI).

➤ Potassium (K⁺)

La concentration du potassium (K⁺) au niveau des forages varie entre 12 et 45 mg/l (Fig.38-a). La valeur maximale est observée au niveau des forages (CT13) et (CT31 du Complexe Terminal (Annexe. 1). Pour le continental intercalaire les valeurs varient entre 28 et 52.51 Mg/l. La concentration du Potassium (K⁺) dépasse largement la valeur tolérée par les normes algériennes et qui est fixée à 20 mg/l (Fig.38-b).

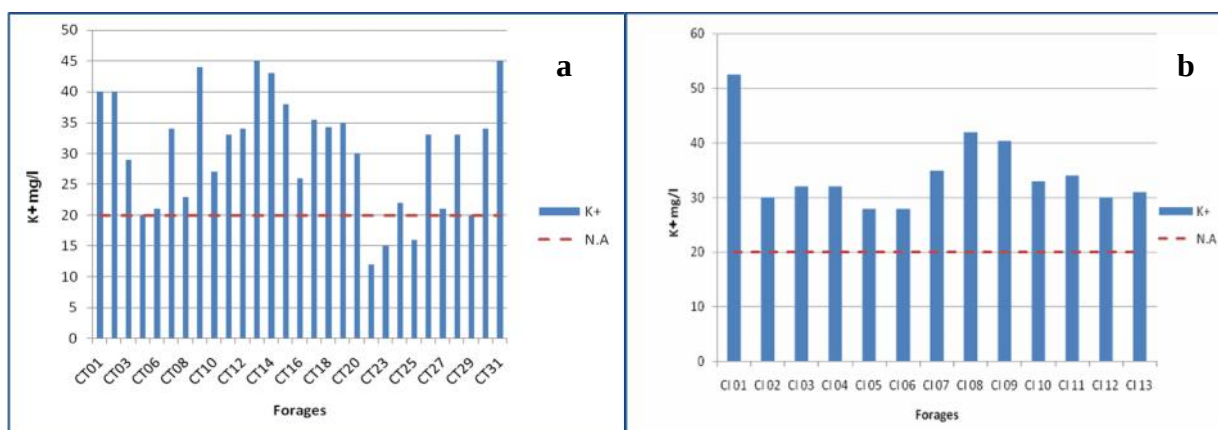


Fig. 37: Histogramme de la variation de la teneur en potassium (K⁺) dans les forages dans la région de l'Oued Righ (a) : Complexe Terminal (CT) et (b) : Continental Intercalaire (CI).

2.4. Les anions (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄⁻)

➤ Les chlorures (Cl⁻)

Les teneurs en chlorures (Cl⁻) de Complexe Terminal varient entre 499.9 et 2100 mg/l dont la valeur maximale a été enregistrée au niveau du forage (CT 28). La valeur minimale a été observée au niveau du forage (CT08) (Fig. 39-a). Les eaux du Continental Intercalaire montrent que la valeur maximale est enregistrée au niveau du forage (CI01) avec une concentration de 787.4 mg/l. La quasi-totalité des forages ont leur eau avec des concentrations qui répondent aux normes algériennes (Fig. 39-b).

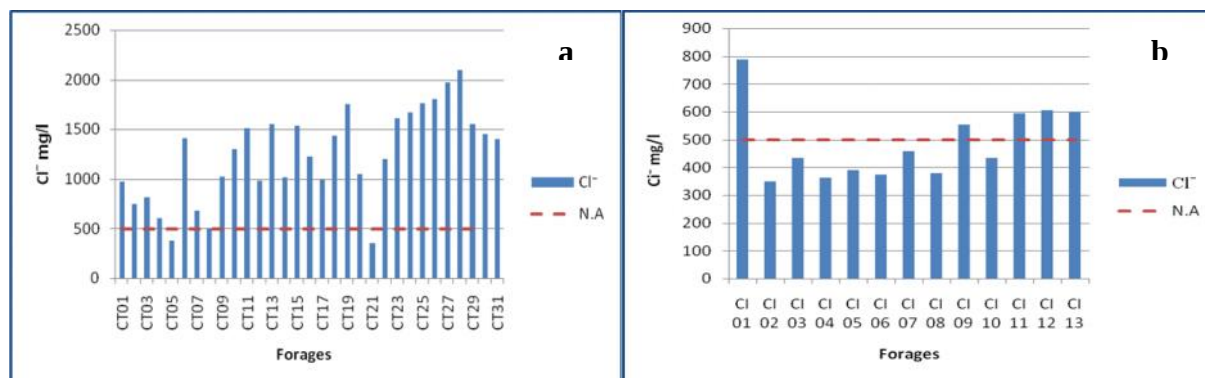


Fig. 38 : Histogramme de la variation des teneurs en chlorures (Cl⁻) des eaux souterraines: (a) Complexe Terminal (CT) et (b) Continental Intercalaire.

➤ Les bicarbonates (HCO_3^-)

Dans la région de l'Oued Righ la teneur des bicarbonates (HCO_3^-) des eaux souterraine de la nappe du Complexe Terminal présente des valeurs variant entre 15 et 192 mg/l. Le maximum est enregistré au niveau du forage CT06 (Fig.40-a). Les eaux du Continental Intercalaire présentent des concentrations variant entre 168 et 59.48 mg/l (Fig.40-b).

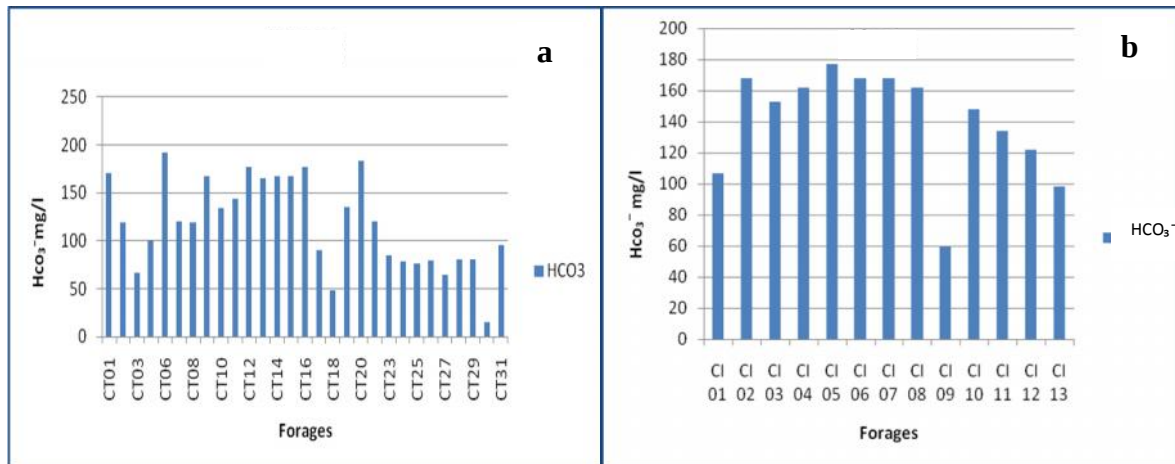


Fig. 39: Histogramme de la variation de la teneur des bicarbonates (HCO_3^-) des eaux souterraines : (a) Complexe Terminal (CT) et (b) Continental Intercalaire.

Les sulfates (SO_4^{--})

Les concentrations des sulfates (SO_4^{--}) de la nappe du Complexe Terminal varient entre 639.8 à 2450 mg/l (Fig. 41-a). La valeur maximale est observée au niveau du forage CT06, alors que la valeur minimale est enregistrée au niveau du forage CT04. Les eaux du Continental Intercalaire ont une teneur en sulfates qui varie entre 1175 au forage CI08 et 475) mg/l au forage CI10 (Fig.41-b). La concentration de sulfates (SO_4^{--}) des eaux souterraines des deux nappes, CT et CI, dépassent les normes algériennes (Annexe 1).

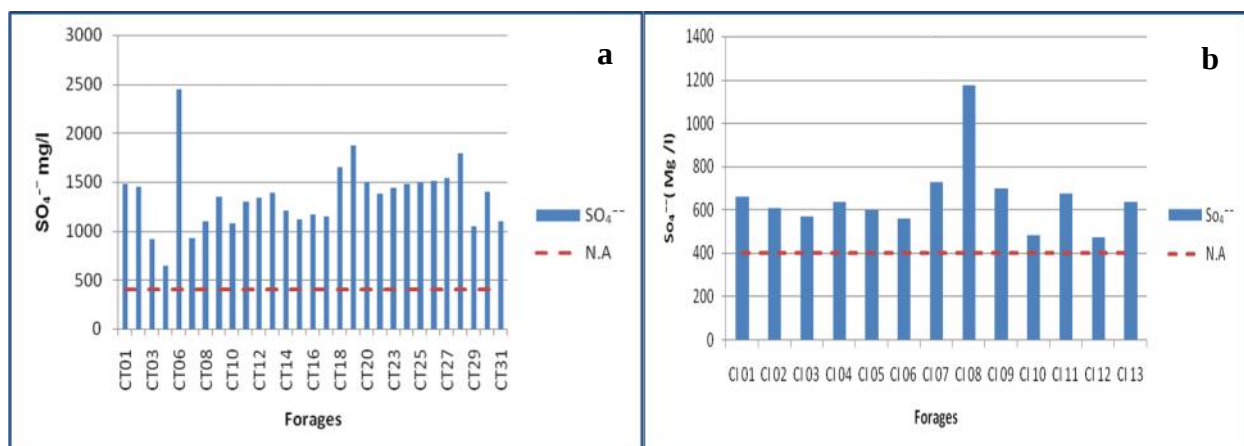


Fig. 40: Histogramme de la variation du sulfates (SO_4^{--}) des eaux souterraines : (a) Complexe Terminal (CT) et (b) Continental Intercalaire.

➤ Le résidu sec (TDS)

Le résidu sec des eaux souterraines du complexe terminal varie entre de 1400 à 4400 mg/l (Fig. 42-a). La valeur maximale est enregistrée au niveau du forge CT28 et la minimale au niveau du forage CT04.

On remarque que les concentrations dans la plupart des forages dépassent les normes algériennes. Les valeurs du résidu sec des eaux du continental intercalaire varient entre 1400 pour le forage CI10 et 2400 dans le forage CI01 (Fig. 41-b).

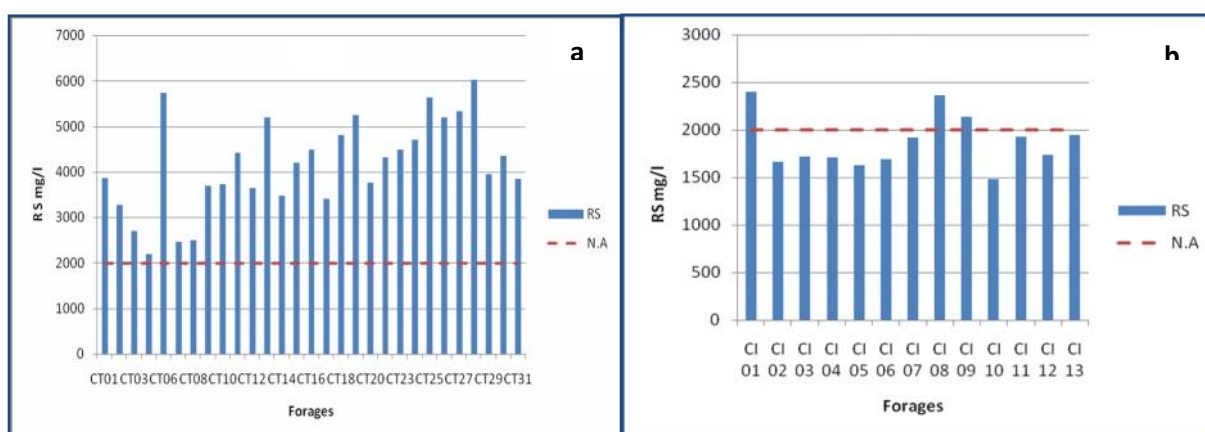


Fig. 41 : Histogramme de la variation du résidu sec (TDS) des eaux souterraines : (a) Complexe Terminal (CT) et (b) Continental Intercalaire.

➤ Teneur des ions majeurs

Les tableaux 7 et 8 récapitulent les valeurs et leur variation de la concentration des anions et des cations des eaux des nappes du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire.

Tableau 7: Variation de la teneur des éléments majeurs des eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) dans la région de l'Oued Righ.

Eléments chimiques	Plage des valeurs de la teneur en mg/l
HCO_3^-	15 - 192
Cl^-	499.9 - 2100
SO_4^{--}	639.8 - 2450
Ca^{++}	56.01 - 621.2
Mg^{++}	101 - 591
Na^+	234 - 1173
K^+	12 - 45
pH	6.62 - 8.71

Tableau 8: Variation de la teneur des éléments majeurs des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ.

Eléments chimiques	Plage des valeurs de la teneur en mg/l
HCO ₃ ⁻	59.48 - 168
Cl ⁻	350 - 787.4
SO ₄ ⁻⁻	475 - 1175
Ca ⁺⁺	30 - 146
Mg ⁺⁺	113 - 259
Na ⁺	145 - 500
K ⁺	28 - 52.51
pH	7.25 - 8.46

2.5. Classification chimique des eaux des nappes du CT et du CI

➤ Représentation graphique des eaux sur le diagramme de PIPER

Le diagramme de Piper est une représentation graphique de la chimie d'un ou plusieurs échantillons d'eau. Les anions et les cations sont représentés dans deux diagrammes ternaires distincts. Les sommets du diagramme ternaire des anions sont le sulfate, le chlorure et le carbonate plus l'hydrogénocarbonate. Les sommets du diagramme ternaire des cations sont le magnésium, le calcium et sodium plus le potassium. Les deux diagrammes ternaires sont projetés dans un losange qui représente est une matrice de passage du graphique des anions (sulfate + chlorure/total des anions) et des cations (sodium + potassium/total des cations). La projection des cations et des anions en % de meq/l sur le losange détermine le faciès chimique.

La projection sur le diagramme de piper des cations et des anions des eaux souterraine des forages du Complexe Terminal (CT) montre que les eaux sont un faciès chimique à dominance chlorurée-sodique. Ce faciès est engendré par le contact de l'eau avec les formations géologiques constituées en partie de roches évaporitiques (fig. 43-a).

Le faciès dominant des eaux souterraines du Continental Intercalaire (CI) est sulfaté magnésien (Fig. 43-b).

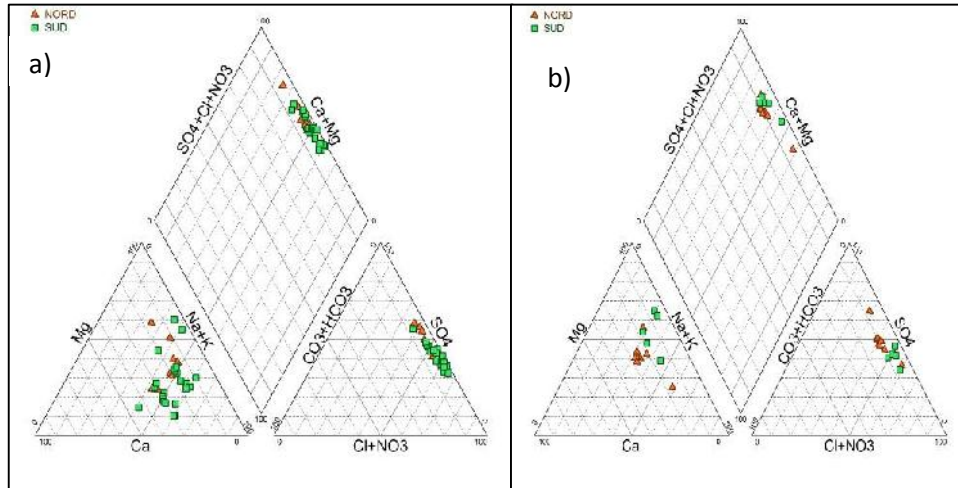


Fig. 42 : diagramme de piper des eaux : a) du Complexe Terminal (CT) et b) du Continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ.

2.6. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'aptitude des eaux à l'irrigation est évaluée par le SAR (Taux d'Adsorption du Sodium) qui représente la teneur du sodium par rapport à celles du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+}) des eaux. Il est calculé selon la formule suivante:

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

Les concentrations sont exprimées en **még/l**

Richards 1954 (Laboratoire de Salinité du Département de l'Agriculture aux USA) a établi un diagramme représentant cinq (05) classes, définies en fonction de la minéralisation totale et du SAR.

➤ Diagramme de RIVERSIDE :

Sur le même principe et avec les mêmes éléments, Riverside a proposé un diagramme qui considère le rapport du sodium absorbé par le sol (**SAR**) et la minéralisation totale.

Le diagramme de **Riverside** montre quatre classes d'eau d'irrigation :

- 1) Eau à très forte salinité et à faible teneur en sodium, risque de sodicité faible (**C₅ S₁**).
- 2) Eau à très forte salinité et à teneur moyenne en sodium, risque de moyen sodicité (**C₅ S₂**).
- 3) Eau à très forte salinité et à forte teneur en sodium, risque de sodicité forte (**C₅ S₃**).
- 4) Eau à très forte salinité et à teneur en sodium exagérée, risque de sodicité très forte (**C₅ S₄**).

D'après le diagramme de **Riverside**, ces eaux pourraient ne pas convenir à l'irrigation, car elles ont une salinité élevée, mais elles peuvent être utilisées sous certaines conditions : certaines cultures (palmiers), sol très perméable.

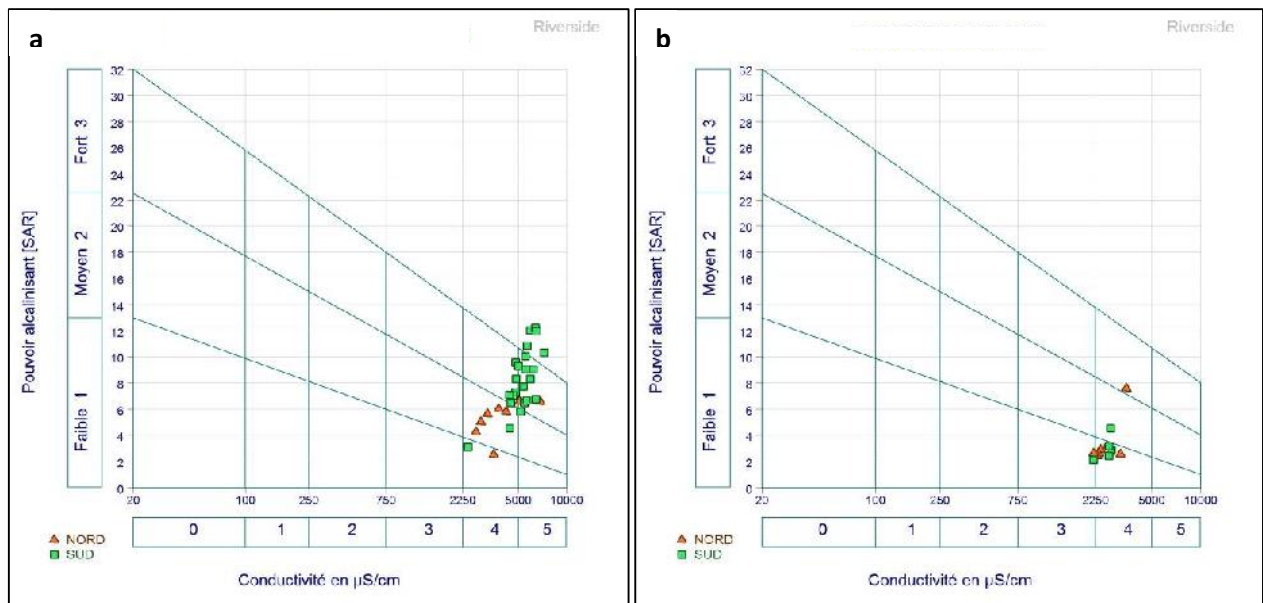


Fig. 43 :Diagramme de Riverside des eaux du Complexe Terminal (a) et du Continental Intercalaire (b) dans la région de l'Oued Righ.

2.7. Traitement et analyse statistique des données hydrochimiques des eaux des nappes du CT et du CI :

Afin de caractériser la typologie hydrochimique des eaux dans les nappes du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ, nous avons utilisé l'approche statistique pour le traitement des données (mono-variée, bivariable et multivariable) en utilisant le logiciel XLStat sous Excel (<https://www.xlstat.com/en/>). La préparation des données se fait en présentant les variables en colonnes et les individus en lignes. Un aperçu sur les méthodes d'analyse statistique est présenté en (Annexe 2).

Traitement des données

Les résultats de l'analyse chimique ont concerné les échantillons d'eau prélevés dans 41 forages des nappes du Complexe terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) implantés dans la région de l'Oued Righ durant la période de 2013.

Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de la Société Algériennes des eaux d'Ouargla pour les éléments suivants : conductivité (Ce) ($\mu\text{S/cm}$), pH, Résidu sec, sulfates (SO_4^{2-}), chlorures (Cl^-), bicarbonates (HCO_3^-), sodium (Na^+), potassium (K^+), magnésium (Mg^{++}), Calcium (Ca^{++}) (Fig. 45).

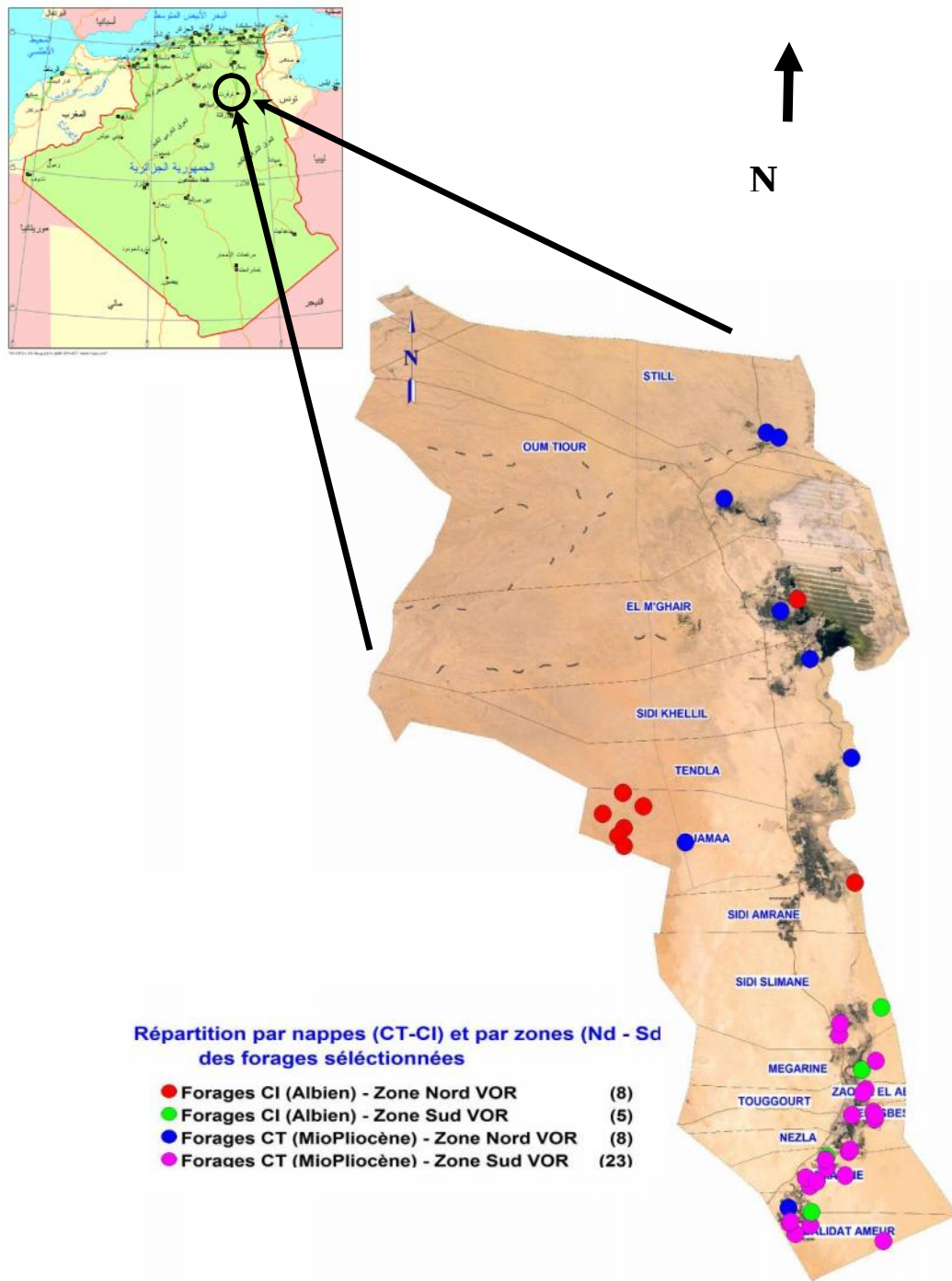


Fig. 44 : Carte d'implantation des forages utilisées pour l'étude hydrochimique.

2.7.1. Complexe Terminal (CT)

➤ Statistiques élémentaires

Le tableau statistique est établi sur la base des données issues des analyses physico-chimiques des eaux du Complexe Terminal. Les données des zones Nord et Sud ont été interprétées

séparément (Tableaux 9 et 10). La comparaison entre les deux zones a montré que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de 4207,14 $\mu\text{s/cm}$ au Nord et 5492,33 $\mu\text{s/cm}$ au Sud, Ces valeurs dépassent les normes algériennes de la potabilité des eaux. Les concentrations moyennes de Sodium (Na^+), Sulfates (SO_4^{--}), Calcium (Ca^{++}) sont aussi plus élevées au Sud qu'au Nord, mais dépassent les normes algériennes dans les deux cas.

Tableau 9: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Complexe Terminal (CT) – région Nord de l'Oued Righ.

Elément chimique	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance (Unité) ²	Ecart-type (Unité)	Coefficient de variation
Ca^{++}	7	127	230	150	175,86	1579,55	39,74	0,23
Mg^{++}	7	101	591	220,5	259,11	22310,64	149,37	0,58
K^+	7	20	40	29	29,57	63,67	7,98	0,27
Na^+	7	234	825	478	480,86	30354,41	174,23	0,36
Cl^-	7	500	1413	750	818,43	78795,67	280,71	0,34
SO_4^{--}	7	640	2450	1100	1278,71	305707,35	552,91	0,43
HCO_3^-	7	67	192	119	126,83	1521,32	39,00	0,31
Ce	7	2910	6800	3760	4207,14	1554534,69	1246,81	0,30
pH	6	7,5	8,17	7,59	7,71	0,05	0,23	0,03

Tableau 10: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Complexe Terminal (CT)– région Sud de l'Oued Righ.

Elément chimique	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance (Unité) ²	Ecart-type (Unité)	Coefficient de variation
Ca^{++} (mg/l)	21	56	621,2	308,6	317,50	25518,24	159,74	0,50
Mg^{++} (mg/l)	21	106,6	562	202,3	219,47	11287,61	106,24	0,48
K^+ (mg/l)	21	12	45	33	30,56	95,43	9,77	0,32
Na^+ (mg/l)	21	455	1173	760	803,81	41436,82	203,56	0,25
Cl^- (mg/l)	21	987,5	2100	1513	1471,79	94349,39	307,16	0,21
SO_4^{--} (mg/l)	21	1052	1875	1388	1379,00	50365,33	224,42	0,16
HCO_3^- (mg/l)	20	15	183	107,5	113,06	2285,87	47,81	0,42
Ce ($\mu\text{s/cm}$)	21	4370	7200	5510	5492,33	558865,27	747,57	0,14
pH	20	6,62	8,71	7,79	7,75	0,25	0,50	0,06

Analyse en composantes principales (ACP)

Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation a été calculée pour les éléments physico-chimiques de 28 échantillons collectés dans les forages de la nappe du Complexe terminal au Nord et au Sud de l'Oued Righ (Tableau 11).

Tableau. 11 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de la région d'Oued Righ.

Variables	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Ce
Ca ⁺⁺								
Mg ⁺⁺	-0,50*							
K ⁺	-0,39*	0,10						
Na ⁺	0,54*	-0,06	0,03					
Cl ⁻	0,66*	0,03	-0,11	0,87*				
SO ₄ ⁻⁻	0,15	0,63*	-0,04	0,56*	0,53*			
HCO ₃ ⁻	-0,58*	0,48*	0,29	-0,32	-0,30	0,12		
Ce	0,56*	0,25	-0,07	0,87*	0,92*	0,79*	-0,16	

La matrice de corrélation montre que la conductivité (Ce) est corrélée positivement avec le Sodium (Na⁺), les chlorures (Cl⁻) et les sulfates (SO₄⁻⁻). La signification du coefficient de corrélation linéaire simple est liée étroitement avec le nombre des échantillons selon la formule de Student $R = 2/\sqrt{n-1}$. Le coefficient de corrélation r reporté dans le tableau est significative lorsque r égale ou supérieur à R il est marqué en gras si non il est sans signification. Ce n'est pas une question de dépendance ou indépendance. C-à-dire je peux avoir un $r = 0.8$ calculé sur la base de 4 échantillons !! (C'est fortement dépendant mais sans signification) par contre $r = 0.4$ calculé sur 200 échantillons (c'est faiblement dépendant mais il a plus de signification que celui calculé sur 4 échantillons). Avec le logiciel on calcul la corrélation et sa signification liée au nombre de données utilisées en non pas aux degrés (nulle, faible ou forte). Il est clair dans les tableaux que les faibles corrélations (inférieures 0.4 sont faible et insignificatives)

➤ Diagonalisation de la matrice de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis de calculer les facteurs de charges, Les deux premiers axes, qui ont été pris en considération pour décrire les corrélations entre les variables, détiennent à eux seuls 75.65 % de l'information totale avec respectivement 47,47 % pour l'axe F1 et 28,18 % pour l'axe F2 (Tableau.12) et (Fig. 46).

Tableau 12: Poids factoriel des paramètres physicochimiques des eaux des forages dans la nappe du complexe terminal dans la région d'Oued Righ.

Axe	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Ce	Valeurs propres	Variabilité (%)	% cumulé
F1	0,38	0,01	-0,10	0,47	0,48	0,34	-0,20	0,49	3,80	47,47	47,47
F2	-0,38	0,60	0,25	0,03	0,02	0,43	0,47	0,18	2,25	28,18	75,65
F3	-0,07	-0,30	0,88	0,28	0,10	-0,20	0,02	0,02	1,01	12,58	88,24
F4	0,29	-0,32	-0,16	-0,01	0,16	-0,18	0,85	0,08	0,48	5,99	94,22

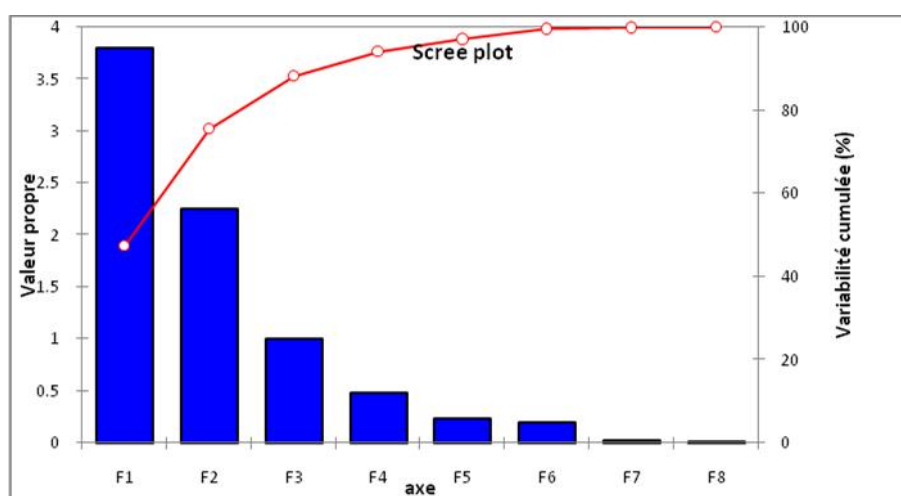


Fig. 45 : Valeurs Propres des facteurs de Charge.

➤ Cercle des corrélations et projection des individus

Les cercles de corrélation ont été tracés sur le plan des facteurs F1-F2 (Fig. 47). Elles montrent l'existence de deux associations physico-chimiques à savoir :

- La première association, corrélée positivement avec le facteur F1, regroupe les paramètres suivants : Ce, Chlorures (Cl⁻), Sulfates (SO₄⁻⁻) et Sodium (Na⁺). Ce sont les éléments qui représentent l'axe de la minéralisation. Cette association montre globalement une origine évaporitique, dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl).
- La deuxième association est constituée des éléments Calcium (Ca⁺⁺), Magnésium (Mg⁺⁺), Bicarbonates (HCO₃⁻) et Potassium (K⁺). Le Calcium (Ca⁺⁺) est corrélé positivement avec F1 et négativement avec F2. Les Bicarbonates (HCO₃⁻) et le Potassium (K⁺) sont corrélés négativement avec F1. Le Magnésium (Mg⁺⁺) est positivement corrélé avec F2. Cette association représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques. Cependant son influence sur la minéralisation est limitée par rapport à l'influence de Na⁺ et du Cl⁻ qui sont proches de l'association incluant la

conductivité (Ce). Ceci est caractéristique aux eaux de la nappe des sables mio-pliocènes.

Le facteur de charge F2 qui représente 28% de la variance totale montre l'axe de la dissolution des formations carbonatées.

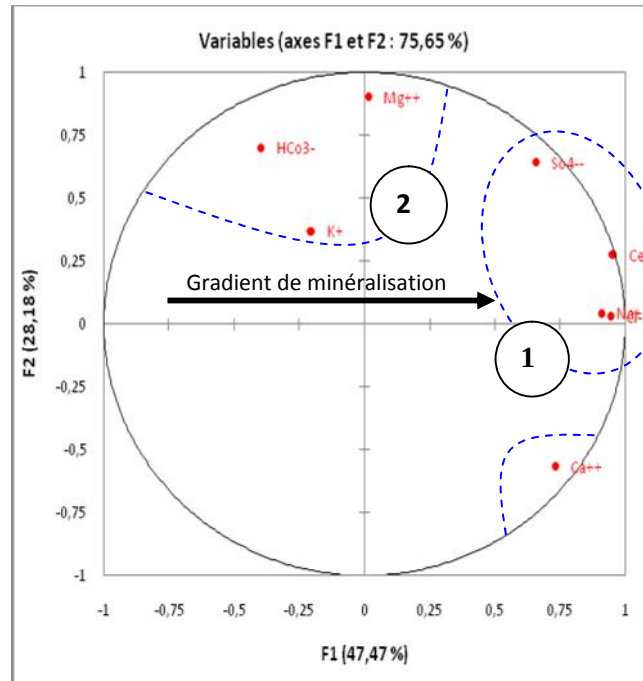


Fig. 46: Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1- F2 des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région de l'Oued Righ.

La projection des individus (Forages d'eaux) sur le plan factoriel F1 F2 a permis leur classification en fonction de l'axe F1 qui est l'axe de minéralisation. Ceci montre un gradient de la minéralisation Sud-Nord. Au total deux (2) classes de forages sont individualisées à savoir (Fig. 48):

- La classe 1 regroupe les forages (Ex : D46F84 ; D29F91 ; D40F32, ...) qui sont positivement corrélés avec le facteur F1 et représentent les eaux à forte minéralisation.
- La classe 2 regroupe les forages (Ex : D44F22 ; D1F11 ; D6F25 ; D8F...) qui négativement corrélés avec le facteur F1 et représentent les eaux à minéralisation moins forte que la première classe.

L'ACP a permis de mettre en évidence la discrétisation de la population des individus (Forages) au Nord et au Sud dans le Complexe Terminal (CT). En effet, les forages

localisés au Nord présentent une eau à minéralisation plus élevée par rapport à celle des forages localisés au Sud.

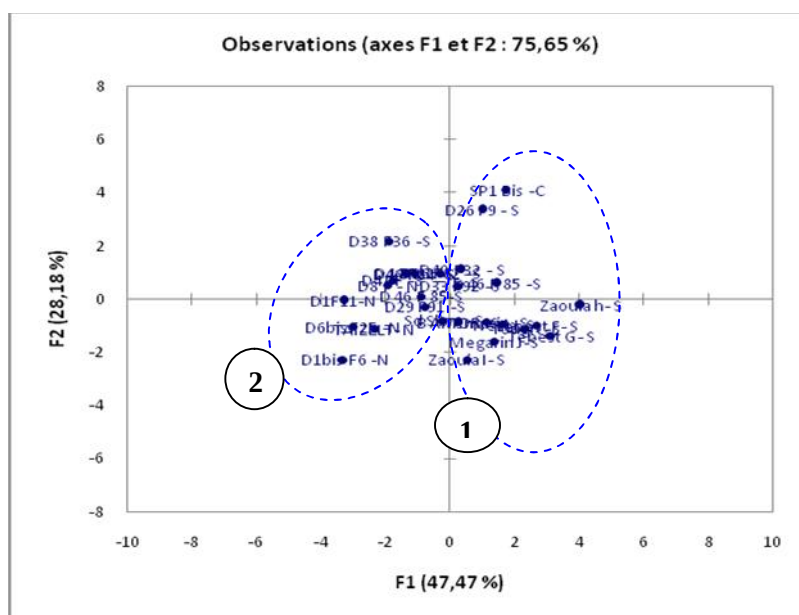


Fig. 47: Projection des individus (forage) dans le plan F1- F2 de la nappe du Complexe Terminal (CT) dans la région de l'Oued Righ.

2.7.2. Nappe du Continental Intercalaire (CI) :

➤ Statistiques élémentaires

Les tableaux statistiques ont été faits sur les données issues des analyses physico-chimiques des eaux de Continental Intercalaire (CI) pour le Nord et le Sud de l'Oued Righ séparément (Tableau 14 et 15). Il montre que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de 2530 au Nord et 2638 $\mu\text{s}/\text{cm}$ au Sud, ce qui indique une faible variation spatiale. Mis à part le Calcium (Ca^{++}), la concentration moyenne des autres éléments chimiques dépassent légèrement les normes algériennes en particulier les Sulfates (SO_4^{--}).

Tableau 13: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI) – région Nord de l'Oued Righ.

Elément chimique	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance (Unité) ²	Ecart-type (Unité)	Coefficient de variation
Ca ⁺⁺	7	120	146	136	136,29	70,20	8,38	0,06
Mg ⁺⁺	7	113	146	136	131,51	124,50	11,16	0,08
K ⁺	7	28	52,5	32	33,93	62,74	7,92	0,23
Na ⁺	7	167	500	183	230,29	12438,78	111,53	0,48
Cl ⁻	7	350	787,5	389	450,64	20188,91	142,09	0,32
SO ₄ ⁻⁻	7	560	730	610	623,93	2965,03	54,45	0,09
HCO ₃ ⁻	7	106,8	177	168	157,54	474,57	21,78	0,14
pH	7	7,4	8,2	7,8	7,81	0,06	0,24	0,03
Ce (µs/cm)	7	2200	3489	2355	2530,00	169371,71	411,55	0,16

Tableau.14: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI) – région Sud de l'Oued Righ.

Elément chimique	Nb. d'observations	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance (Unité) ²	Ecart-type (Unité)	Coefficient de variation
Ca ⁺⁺	5	30	121	100	78,80	1447,76	38,05	0,48
Mg ⁺⁺	5	149,6	240	195	195,52	825,96	28,74	0,15
K ⁺	5	30	40,3	33	33,66	13,02	3,61	0,11
Na ⁺	5	145	305	215	217,60	2879,04	53,66	0,25
Cl ⁻	5	435	605	595	558,00	4096,00	64,00	0,11
SO ₄ ⁻⁻	5	475	700	638	594,60	9154,64	95,68	0,16
HCO ₃ ⁻	5	59,48	148	122	112,30	966,78	31,09	0,28
pH	4	8	8,46	8,22	8,23	0,03	0,18	0,02
Ce (µs/cm)	5	2200	2810	2700	2638,00	49856,00	223,28	0,08

➤ **Analyse en composantes principales (ACP)**

➤ **Calcul de la matrice de corrélation**

La matrice de corrélation a été calculée pour les éléments chimiques analysés. Au total, 13 échantillons ont été utilisé (Tableau 16). Elle montre que la conductivité est corrélée positivement avec le potassium (K⁺) , le sodium (Na⁺) et les chlorures (Cl⁻).

➤ **Diagonalisation de la matrice de corrélation**

Après la diagonalisation de la matrice de corrélation. Les facteurs de charges ont été calculés. Les deux axes pris en considération pour décrire les corrélations entre les variables ont une

variance de dispersion 79.23% de l'information totale avec respectivement 53,37 % pour l'axe F1 et 25.86 % pour l'axe F2 (Tableau16) et (Fig.49).

Tableau.15 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Continental Intercalaire de la région d'Oued Righ.

Variables	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Ce
Ca ⁺⁺ (mg/l)								
Mg ⁺⁺ (mg/l)	-0,78*							
K ⁺ (mg/l)	-0,01	-0,24						
Na ⁺ (mg/l)	0,17	-0,28	0,95*					
Cl ⁻ (mg/l)	-0,19	0,29	0,73*	0,80*				
SO ₄ ⁻⁻ (mg/l)	0,16	-0,18	0,45	0,46	0,21			
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	0,17	-0,23	-0,51	-0,58	-0,70*	-0,24		
Ce (µs/cm)	0,00	0,05	0,85*	0,91*	0,93*	0,46	-0,61	

Tableau 16: Poids factoriel sur les paramètres physicochimiques à partir des données des forages de la nappe du Continental Intercalaire de la région de l'Oued Righ.

	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Ce mg/l	Valeurs propre	Variabilité (%)	% cumulé
F1	0,00	-0,02	0,44	0,46	0,43	0,25	-0,35	0,47	4,27	53,37	53,37
F2	-0,62	0,66	-0,10	-0,16	0,22	-0,22	-0,21	0,03	2,07	25,86	79,23
F3	-0,22	0,18	-0,03	-0,12	-0,23	0,92	0,11	-0,03	0,75	9,41	88,64
F4	-0,42	-0,09	0,41	0,16	-0,01	-0,14	0,77	0,10	0,51	6,38	95,02

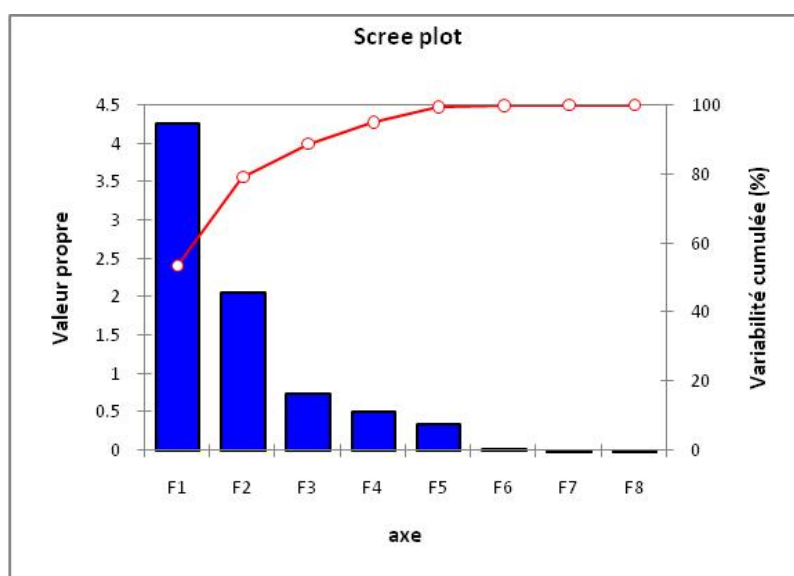


Fig. 48 : Valeurs propres des facteurs de charges

➤ Cercle des corrélations et projection des individus

Un cercle de corrélation a été tracé sur le plan des facteurs F1 F2 (Fig. 50), montrant l'existence d'une association essentielle corrélée positivement avec le facteur F1 et regroupe les paramètres suivants : Conductivité (Ce), Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Sodium (Na^+). Ce sont les éléments qui représentent l'axe de la minéralisation. Cette dernière montre globalement une origine évaporitique dont la présence dominante de l'Halite (NaCl), les grès et les argiles de substratum sont aussi présente (K^+).

L'éloignement des Mg^{++} et Ca^{++} et HCO_3^- indiquant la faible contribution dans le chimisme des eaux et la nature de la formation encaissante.

La projection des individus (Forages d'eaux) sur le plan factoriel F1 F2 ne montre pas une classification préférentielle des individus selon leur situation géographique.

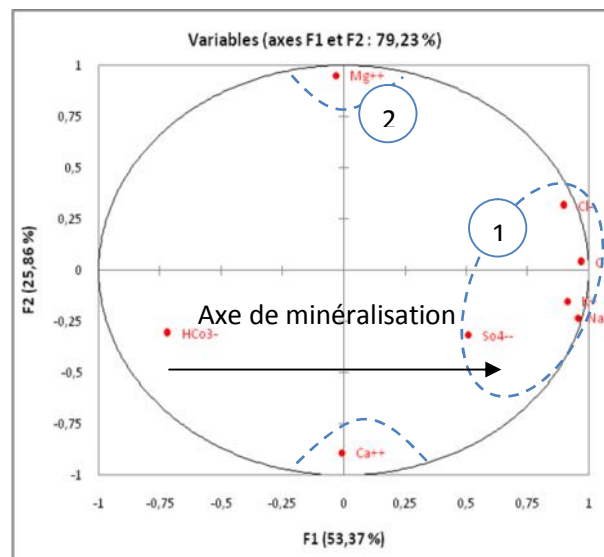


Fig. 49: Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1 F2 des eaux du Continental Intercalaire (CI) de la région d'Oued Righ.

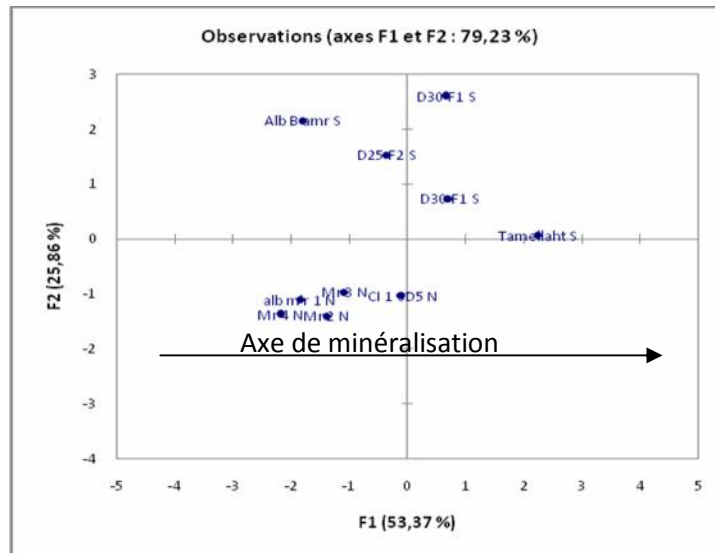


Fig. 50: Projection des individus (forages) dans le plan F1 F2 de la nappe du Continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ.

3. Nappes Libre

3.1. Échantillonnage

Pour réaliser cette étude, nous avons effectué une campagne de prélèvement en Octobre 2015, dans les puits de la nappe phréatique. Les paramètres physiques (pH, température et conductivité) ont été déterminés in situ, grâce à un appareil multi paramètre portatif. Les échantillons, devant être analysés au laboratoire de l'ANRH Ouargla, ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène après être filtrés et acidifiés pour les cations. Le calcium, magnésium et les chlorures ont été dosés par titrimétrie. Les sulfates par photolorimétrie, le sodium et potassium au moyen d'une spectrométrie d'absorption atomique à flamme.

Tableau 17 : Nomenclature des puits dans la zone d'étude de l'Oued Righ.

Symbole de puits	Nom de Puits	Symbole de puits	Nom de Puits
P1	Oum Tiour	P12	Blidet Amor
P2	Barkadjia	P13	Temacine
P3	El-Meghaier	P14	Sidi mahdi
P4	Sidi Khlil	P15	Hay Rimel
P5	El-Bared	P16	Tebesbest
P6	Djamaa	P17	Touggourt
P8	Sidi Amrane	P18	Megarine
P9	Choucha	P19	Harhira
P10	Elhamraia	P20	El Annet
P11	Blidet Amor bis		

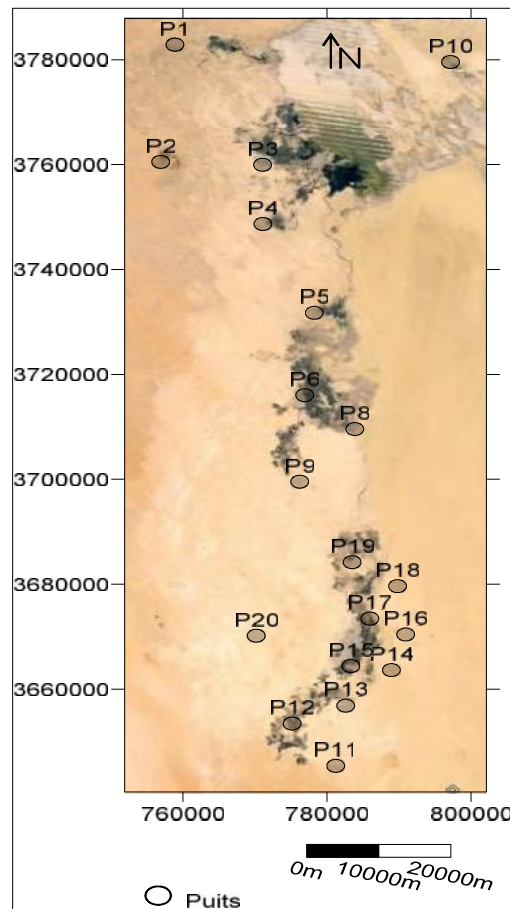


Fig. 51: Carte d'inventaire des puits de prélèvement dans la nappe superficielle.

3.2. Interprétation des Résultats

L'interprétation des résultats des analyses chimiques, représentées dans les figures 53 (cations) et 54 (anions), montre que :

- la teneur en calcium dans les eaux de la nappe libre dépasse la norme algérienne de l'eau potable (200 mg/l) ;
- la concentration du magnésium est élevée et dépasse dans la majorité des points d'eau la norme algérienne de l'eau potable (150 mg/l) ;
- la teneur de sodium est très élevée dépassant la norme algérienne de l'eau potable (200mg/l) dans tous les puits et
- la concentration du potassium dépassant la norme algérienne de l'eau potable (20mg/l); dans la majorité des puits (Fig.6) ;
- la concentration des chlorures présente des teneurs variables et très fortes dépassant également la norme algérienne de l'eau potable (500 mg/l) ;
- les sulfates dépassent aussi la norme algérienne de l'eau potable (400) mg/l ;

- la concentration des bicarbonates varie entre 160 à 200 mg/l.

Mis à part les bicarbonates tous les autres éléments chimiques (Cations et Anions) ont des teneurs supérieures aux normes algériennes maximales admissibles.

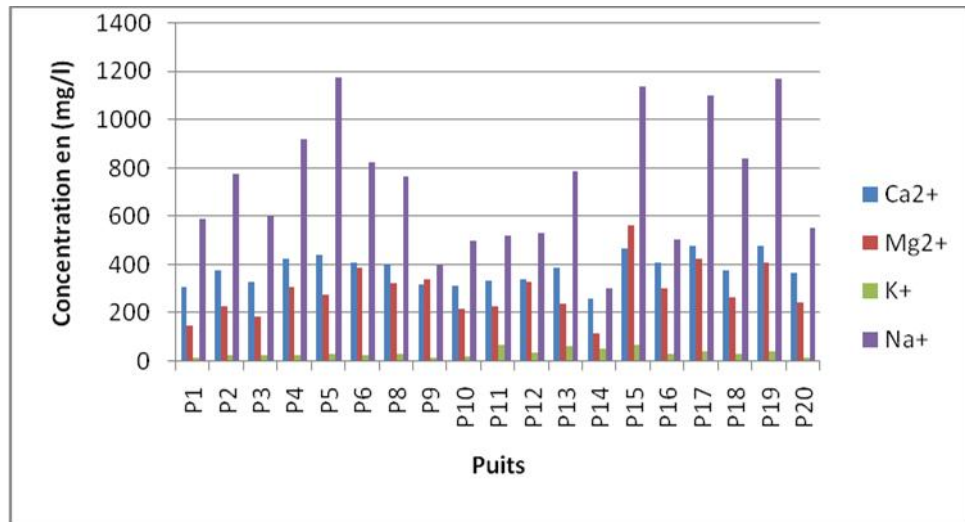


Fig. 52: Histogramme des Teneurs des Cations des eaux de la nappe libre (Octobre 2015)

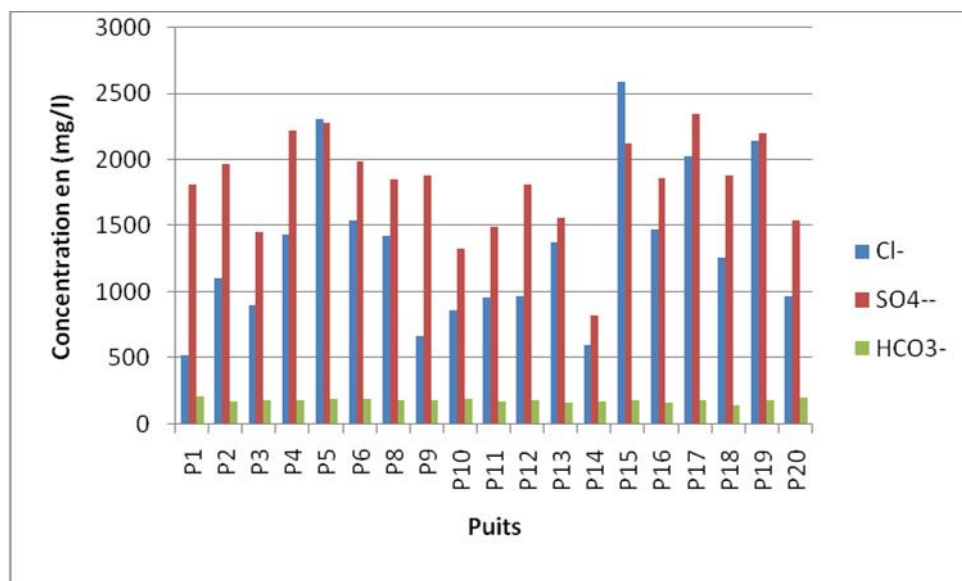


Fig. 53: Histogramme des Teneurs des Anions des eaux de la nappe libre (Octobre 2015)

D'après la classification de PIPER, les eaux de la nappe phréatique, pour la majorité des puits, ont deux faciès dominants sulfaté sodique et chloruré sodique (Fig.55). Ces faciès indiquent une dissolution évaporitique riche en sels et en gypse [16].

La répartition des faciès chimiques pour les 19 échantillons d'Octobre 2015, se présente comme suit:

- 47,36% des échantillons ont un faciès chimique sulfaté sodique.
- 36,84% des échantillons ont un faciès chimique chloruré sodique.
- 15,78% des échantillons ont un faciès chimique sulfaté magnésien.

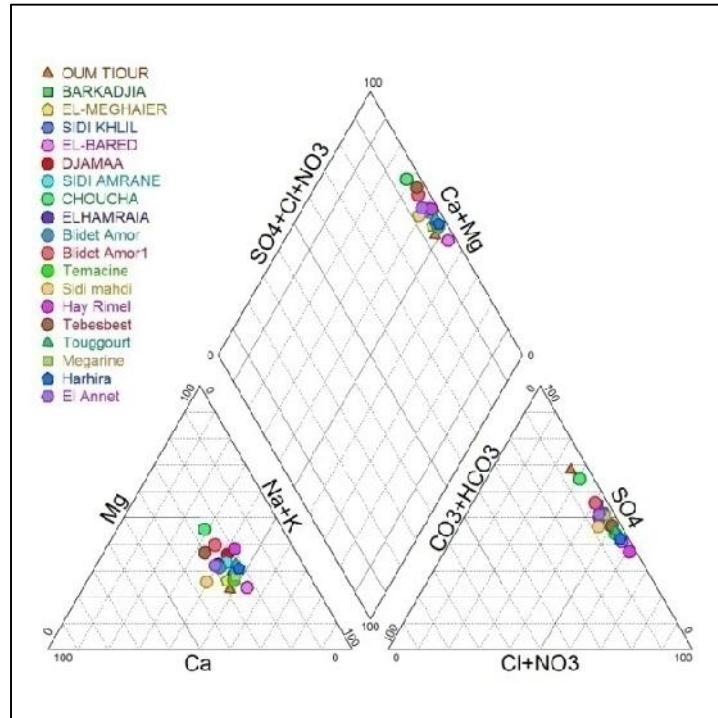


Fig. 54 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de la nappe libre (Octobre 2015).

Origine de la minéralisation de la nappe superficielle

➤ Statistiques élémentaires

L'étude statistique, réalisée sur les données issues des analyses physico-chimiques de 19 échantillons des eaux de la nappe phréatique, montre que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de 5130,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$, qui dépasse les normes algériennes de la potabilité des eaux. Les concentrations moyennes du Sodium (Na^+), des Sulfates (SO_4^{2-}) et du Calcium (Ca^{2+}) sont aussi élevées et dépassent également les normes algériennes.

Tableau 18: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe superficielle – région de l'Oued Righ (Octobre 2015).

Elément (mg/l)	Nb. d'observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca ²⁺ (mg/l)	19	258,80	480,00	375,75	59,69
Mg ²⁺ (mg/l)	19	115,20	563,20	285,77	100,43
K ⁺ (mg/l)	19	13,50	71,30	33,54	17,10
Na ⁺ (mg/l)	19	305,00	1177,50	705,34	277,45
Cl ⁻ (mg/l)	19	513,00	2588,00	1240,95	589,09
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	19	815,00	2350,00	1788,63	357,26
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	19	140,30	201,30	174,96	14,98
Ce 25°C (µs/cm)	19	2440,00	7560,00	5130,90	1430,74
Résidu Sec (mg/l)	19	2188,00	8002,00	5166,18	1563,63

➤ Analyse en composantes principales (ACP)

- Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation a été calculée pour les éléments physico-chimiques de la nappe phréatique dans l'Oued Righ. Cette ACP a été effectuée sur l'ensemble des données pour assurer l'obtention des coefficients de corrélation significatifs. Au total, 19 échantillons ont été utilisés. La matrice de corrélation montre que la conductivité (Ce) est corrélée positivement avec tous les éléments chimiques à l'exception des bicarbonates où r Ce/HCO₃ est de -0.06 (très faible corrélation négative) (Tableau 19).

Tableau. 19 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe superficielle de la région d'Oued Righ (October 2015).

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ce 25°C	Résidu_Sec
Ca ²⁺ (mg/l)	1								
Mg ²⁺ (mg/l)	0,776	1							
K ⁺ (mg/l)	0,270	0,243	1						
Na ⁺ (mg/l)	0,870	0,568	0,316	1					
Cl ⁻ (mg/l)	0,925	0,736	0,449	0,902	1				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	0,837	0,694	-0,067	0,772	0,710	1			
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	-0,120	0,011	-0,523	-0,142	-0,183	0,030	1		
Ce 25°C (µs/cm)	0,971	0,748	0,233	0,916	0,943	0,871	-0,060	1	
Résidu_Sec (mg/l)	0,924	0,745	0,108	0,827	0,864	0,883	0,066	0,965	1

➤ Diagonalisation de la matrice de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis de calculer les facteurs de charges, Les deux premiers axes, pris en considération pour décrire la corrélation des variables, détiennent à eux seuls 85.41 % de l'information totale avec, respectivement 67,62 % pour l'axe F1 et 17.79 % pour l'axe F2 (Tableau 20, Fig. 55).

Tableau 20: Poids factoriel sur les paramètres physico-chimiques à partir des données des puits de la nappe libre dans la région de l'Oued Righ (Octobre 2015).

	F1	F2	F3
Valeur propre	6,08	1,60	0,56
Variabilité (%)	67,62	17,79	6,31
% cumulé	67,62	85,41	91,72

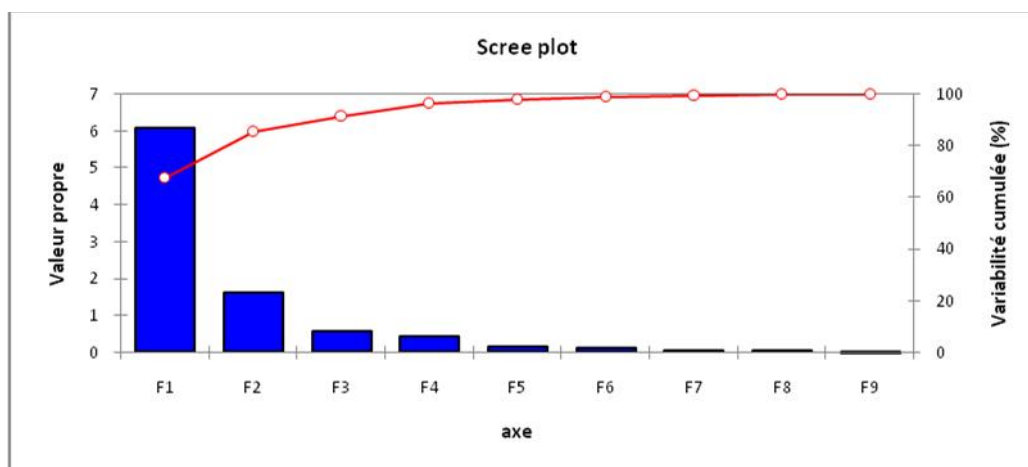


Fig. 55 : Valeurs propres des facteurs de charges

➤ Cercle des corrélations et projection des individus

Le cercle de corrélation a été tracé sur le plan des facteurs F1-F2 (Fig. 56) et montre l'existence d'une association corrélée positivement avec le facteur F1. Elle regroupe les paramètres suivants : Ce, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Magnésium (Mg^{++}), Calcium (Ca^{++}), Sodium (Na^+) et Résidu sec. Ces éléments représentent l'axe de la minéralisation. Cette analyse a été faite sur deux facteurs et 85.41% de la variance ont pu être exprimés. La projection des variables sur le plan I-II montre trois pôles :

Le facteur –F1- représente 67.62 % de la variance, deux ensembles se distinguent : le premier est formé par (Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{+2} , RS et CE) liés aux évaporites (NaCl , CaCl_2 , KCl , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MgSO_4 et Na_2SO_4) et le seconde est formée par le K^+ , liés à l'apport des amendements utilisés en agriculture.

La projection des individus sur les deux plans factoriels (F1, F2) ne montre pas une discrimination en populations d'individus. La distribution est plus où moins aléatoire sur ces deux facteurs de charge, caractérisant les nappes superficielles où plusieurs facteurs peuvent rentrer dans le comportement chimique des eaux tels que les facteurs anthropiques.

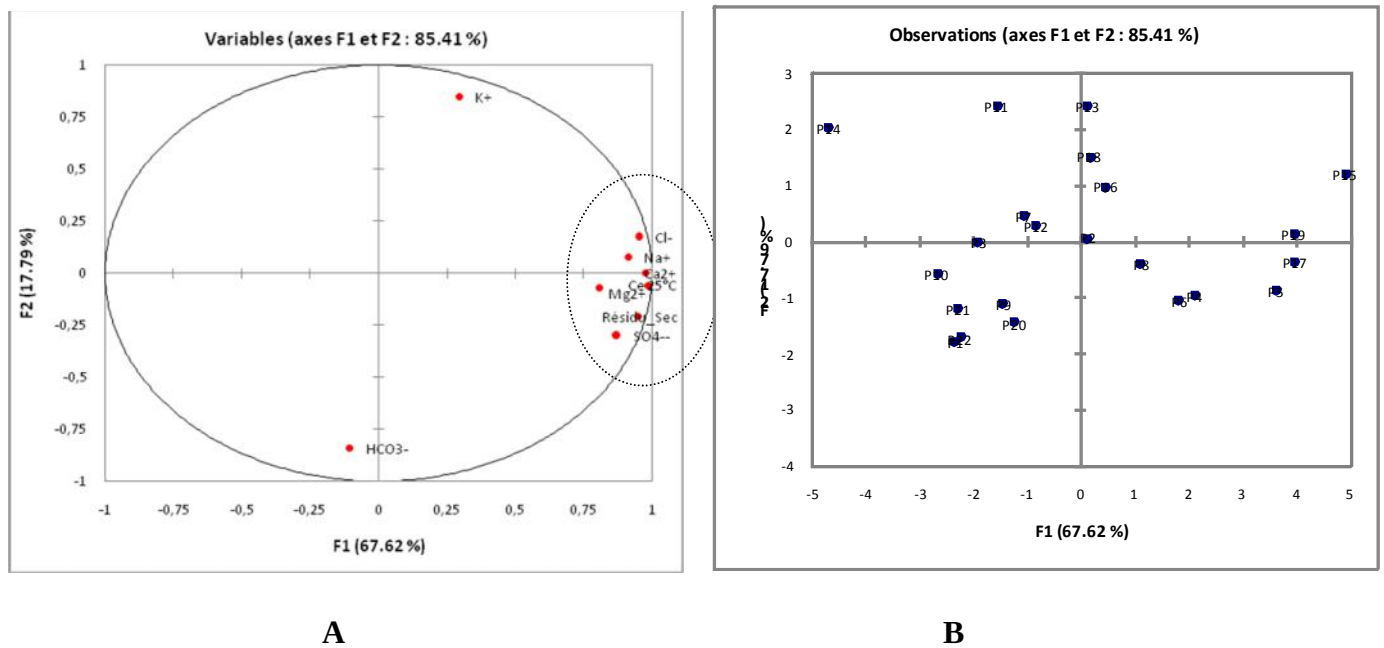


Fig. 56 : A : Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ ; B : la projection des individus (forages sur le plan factoriel F1 F2.

3.3. Etude des rapports caractéristiques.

L'étude des rapports caractéristiques a permis de déterminer l'origine géologique des éléments chimiques et de la liaison qui existe entre eux.

3.3.1 Le couple Na⁺/ Cl⁻.

Ces deux éléments chimiques sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution du sodium est étudiée en fonction des teneurs en chlorure. La figure 57 montre un alignement des points sur la droite de dissolution de l'halite, ce qui est caractéristique de la dissolution de l'halite dans les eaux de la nappe et confirme l'existence du faciès chloruré sodique. Cependant quelques points présentent un excès en sodium, par contre d'autres en chlorures.

3.3.2 Le Couple $\text{Na}^+ / \text{SO}_4^{2-}$.

L'interprétation de la figure 58 montre une évolution proportionnelle des sulfates et du sodium. Cette relation confirme également l'existence du faciès sulfaté sodique de 36,84% des eaux de la nappe libre.

3.3.3 Le Couple $\text{Mg}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$.

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des sulfates et du Magnésium (Fig. 59) et confirme l'existence du faciès sulfaté magnésien. Le Magnésium est le résultat du mélange des eaux de l'aquifère libre avec les aquifères profonds (Complexe Terminal et Continental Intercalaire).

3.3.4 Le Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$

Les figures 59 et 60 montrent dans un premier cas la prédominance du calcium avec un rapport inférieur à 1, ceci est dû à la dissolution des formations gypseuses et un deuxième cas où le magnésium prédomine avec un rapport supérieur à 1. Ce faciès magnésien indique la présence d'argiles riches en magnésium.

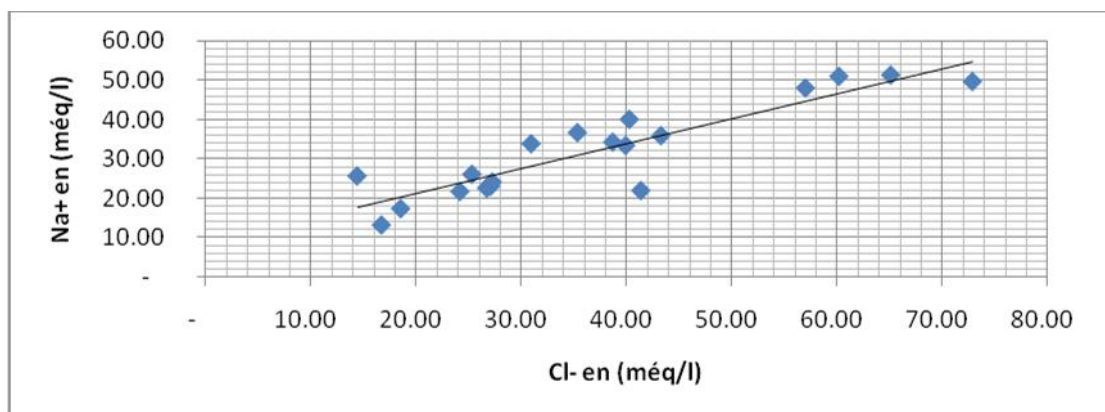


Fig. 57 : Relation $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

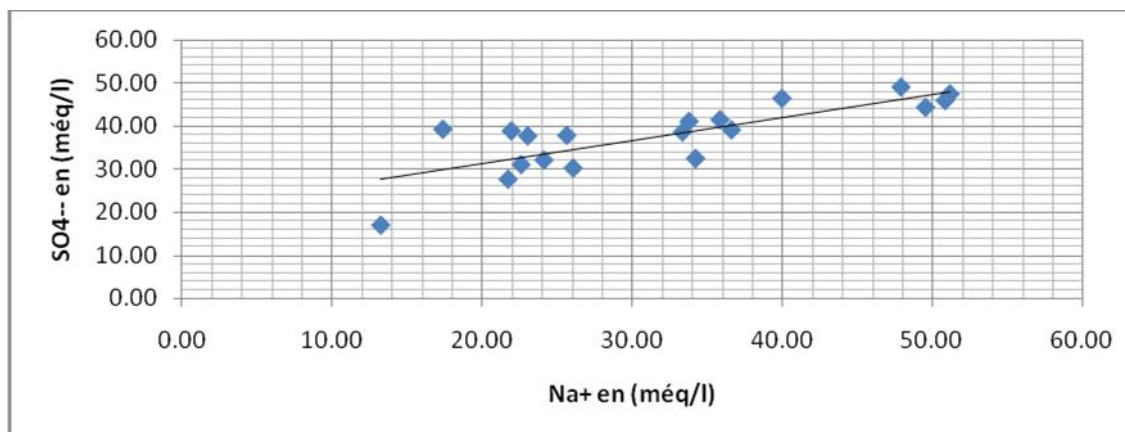


Fig. 58 : Relation $\text{Na}^+ / \text{SO}_4^{2-}$

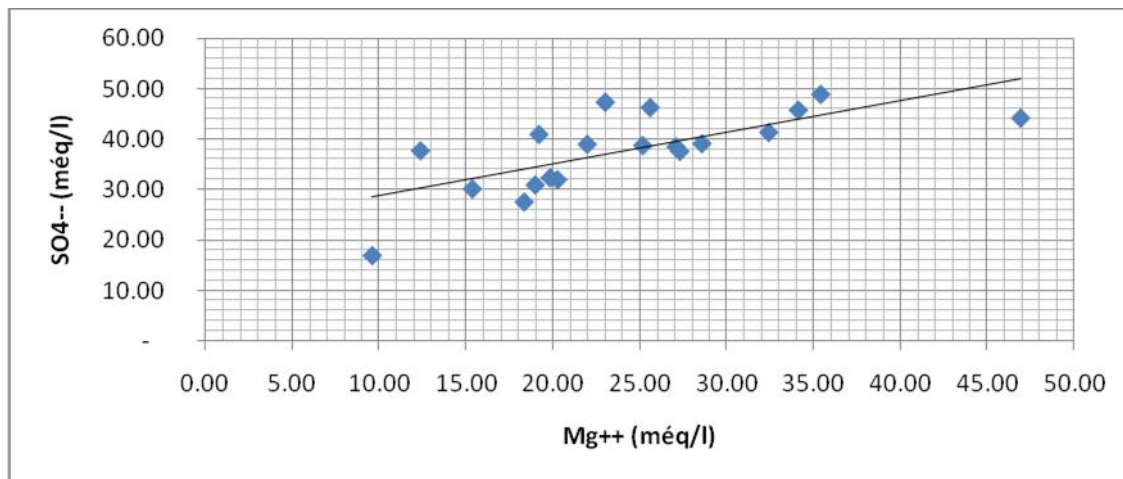


Fig. 59 : Relation Mg^{++}/SO_4^{-2}

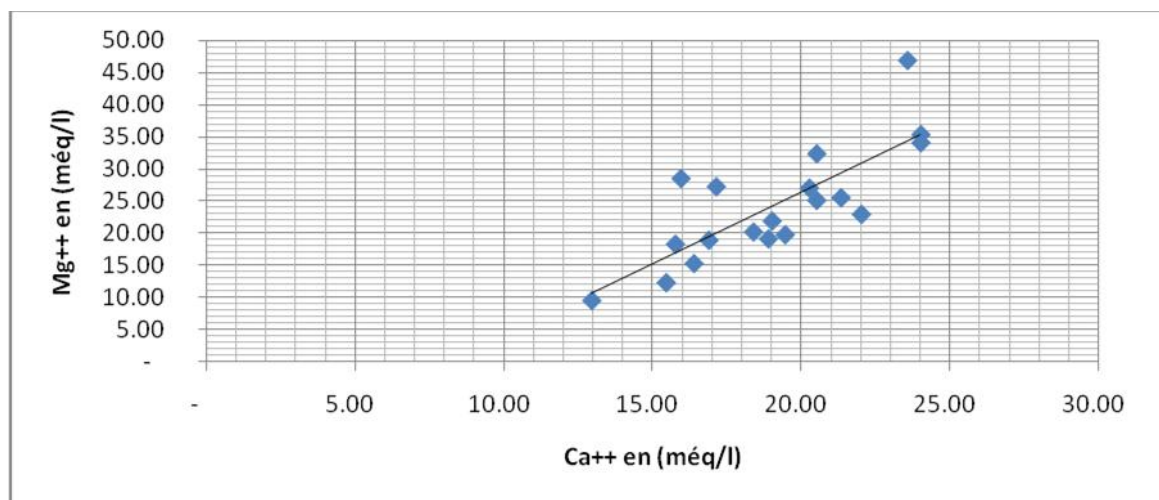


Fig. 60 : Relation Mg^{++}/Ca^{2+}

3.4. Indice d'échange de base (i.e.b.) :

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants. L'eau au cours de son séjour souterrain entre en relation avec différentes roches ayant la propriété d'échanger des ions avec ceux contenus dans les eaux.

D'après Schoeller (1943), l'indice d'échange de base est exprimé par la formule suivante :

$$i.e.b. = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si $i.e.b. > 0 \Rightarrow$ les eaux échangent des ions de $Na^+ + K^+$ contre les ions de Ca^{++} et Mg^{++} du terrain encaissant.

$i.e.b. = 0$ donc il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et l'encaissant.

$i.e.b. < 0 \Rightarrow$ l'encaissant libère les ions de $Na^+ + K^+$ et fixe les ions de Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau.

Pour la région de l'Oued Righ les eaux de la nappe phréatique ont un indice d'échange de base positif dans la majorité des puits, indiquant un échange de $Na^+ + K^+$, de l'eau contre Ca^{++}

et Mg^{++} de l'encaissant. En revanche, au niveau des puits P1, P2, P3, P4 et P8, nous constatons un indice de base négatif, ce qui indique que l'encaissant libère $Na^+ + K^+$ et fixe les ions de Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau.

Tableau 21: indice d'échange de base dans la nappe libre (Octobre 2015)

Puits	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P8	P9	P10
i e b	- 0,81	- 0,11	- 0,06	- 0,01	0,20	0,16	0,14	0,05	0,08
P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
0,09	0,12	0,07	0,13	0,30	0,45	0,14	-0,06	0,14	0,10

4. Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux à permis de mettre en évidence la forte concentration des anions et des cations des eaux souterraines du Complexe Terminal (CT) par rapport à celle des eaux du Continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ. Le diagramme de Piper a permis la détermination des types de faciès chimiques des eaux dans les deux nappes. Les faciès dominants sont:

- Le faciès chloruré sodique pour le Complexe Terminal (CT)
- Et le faciès sulfaté magnésien pour le Continental Intercalaire (CI)

La classification de Riverside montre sur le diagramme que la qualité des eaux est médiocre à mauvaise dans les deux nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT).

La typologie des eaux a été faite à l'aide de l'application de l'analyse statistique des données monovariée et multivariées avec l'ACP sur les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ. En effet, les eaux du Complexe (CT) sont caractérisées par une forte minéralisation. Cette dernière diffère au Nord par rapport au Sud, car les forages d'eaux du Sud sont fortement minéralisées par rapport à ceux du Nord et dépassent les normes algériennes de potabilité. Par contre les eaux du Continental Intercalaire (CI) sont moins minéralisées et leur concentration en éléments chimiques est aux normes algériennes.

L'Analyse en Composante Principale (ACP) a été effectuée sur les eaux des deux nappes. Elle a permis d'identifier les associations physico-chimiques.

L'ACP de la nappe du Complexe Terminal (CT) a montré l'existence de deux associations :

- La première est constituée de : Ce, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Sodium (Na^+). Elle représente l'axe de minéralisation et montre globalement une origine évaporitique dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl). Ceci caractérise généralement la nappe du Mio Pliocène.
- La deuxième association, constituée des Calcium (Ca^{++}) et Magnésium (Mg^{++}), représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques.
- La projection des individus (Forages) a permis de faire une classification par rapport à l'axe de la minéralisation, représenté par le facteur de charge F1. Un gradient de minéralisation a été mis en évidence entre les eaux du Sud et celles du Nord.

L'ACP de la nappe du Continental Intercalaire (CI) a montré l'existence de deux associations :

- La première inclut: Ce, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}) et Sodium (Na^+) et montre globalement une origine évaporitique telle que l'Halite (NaCl) qui est dominante, les grès et les argiles du substratum.
- La deuxième association constituée de Calcium (Ca^{++}) et de Magnésium (Mg^{++}) et représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques.

L'étude statistique, réalisée sur les données issues des analyses physico-chimiques des 19 échantillons des eaux de la nappe phréatique, montre que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de $5130,90 \mu\text{S/cm}$, qui dépasse les normes algériennes de potabilité des eaux. Les concentrations moyennes du Sodium (Na^+), des Sulfates (SO_4^{2-}) et du Calcium (Ca^{2+}) sont aussi élevées et dépassent également les normes algériennes.

Les eaux de la nappe libre superficielle de la région de l'Oued Righ sont caractérisées par des valeurs élevées de la conductivité électrique, indiquant qu'elles sont chargées et sont vivement déconseillées pour l'AEP. Cependant pour les besoins en irrigation, elles peuvent être utilisées pour certaines cultures.

L'interprétation des résultats d'analyses a permis de constater, d'une manière générale, une augmentation de la salinité dans le temps.

Dans cette région, il n'y a pas un problème de quantité mais plutôt de qualité, le traitement (dessalement) des eaux pourrait améliorer la qualité chimique des eaux de la nappe libre superficielle pour améliorer la qualité de l'eau pour un plus large usage.

**CHAPITRE VI : EVALAUTION DE LA
VULNERABILITE DES EAUX DE LA NAPPE
SUPERFICIELLE A LA POLLUTION**

1. Introduction :

Les cartes de vulnérabilité à la pollution constituent une base d'information essentielle pour la gestion des ressources en eau, pour l'évaluation des risques de pollution des nappes et la mise en place de mesures destinées à la prévention des pollutions accidentelles.

Les caractéristiques à prendre en compte pour l'évaluation de la vulnérabilité sont de deux sortes : données principales et données secondaires.

Une étude bibliographique montre qu'actuellement, il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines. Les méthodes qui sont développées peuvent être classées en trois groupes :

2. Méthodes des systèmes paramétriques : il se compose de trois sous systèmes qui sont :

2.1. Le système matriciel : ce système qui est adapté pour une utilisation locale, se base sur un nombre limité de paramètres, judicieusement choisis. On procède à une combinaison de classes pour définir de façon descriptive le degré de vulnérabilité des aquifères.

2.2. Le système de classe: pour ce groupe on définit un intervalle pour chaque paramètre jugé nécessaire pour l'évaluation de la vulnérabilité, ensuite on subdivise chacun des intervalles retenus en fonction de la variabilité du paramètre en question. Le score final qui résulte de la sommation (ou multiplication) de chaque note, attribuée pour les différents paramètres, devrait être subdivisé par le nombre de classes retenues.

2.3. Le système de classes pondérées: ce groupe de méthodes est basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus, jugés nécessaires pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, en définissant des intervalles comme c'est le cas pour les autres méthodes citées précédemment. Par la suite une pondération est attribuée pour chaque paramètre selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité.

2.4. Méthodes de comparaison : utilisées essentiellement pour des aires d'étude très étendues et prend en considération 2 à 3 paramètres.

2.5. Méthodes des relations analogiques et modèles numériques : basées sur des lois mathématiques simples ou complexes. Conseillées pour l'évaluation de la vulnérabilité des sites radioactifs.

3. Application de la méthode GOD (Foster 1987) :

3.1. Présentation de la méthode :

Ce système a été développé par Foster et présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Fig. 61).

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class);
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

L'indice de vulnérabilité est obtenu selon l'équation suivante : $I = CG \times CO \times CD$, où CG = cote du type d'aquifère, CO = cote de la lithologie, CD = cote de la profondeur à la nappe.

La vulnérabilité augmente avec l'indice et la classification, et peut être divisée en cinq classes allant de 0 à 1.

3.2. Préparation des données :

Les cartes des différents paramètres pris en compte pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité verticale à la pollution de la nappe.

3.3. Digitalisation :

Chaque paramètre a été digitalisé (SURFER 11) et sauvegarder, l'ensemble des données digitalisées constitue la base de données nécessaire pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité.

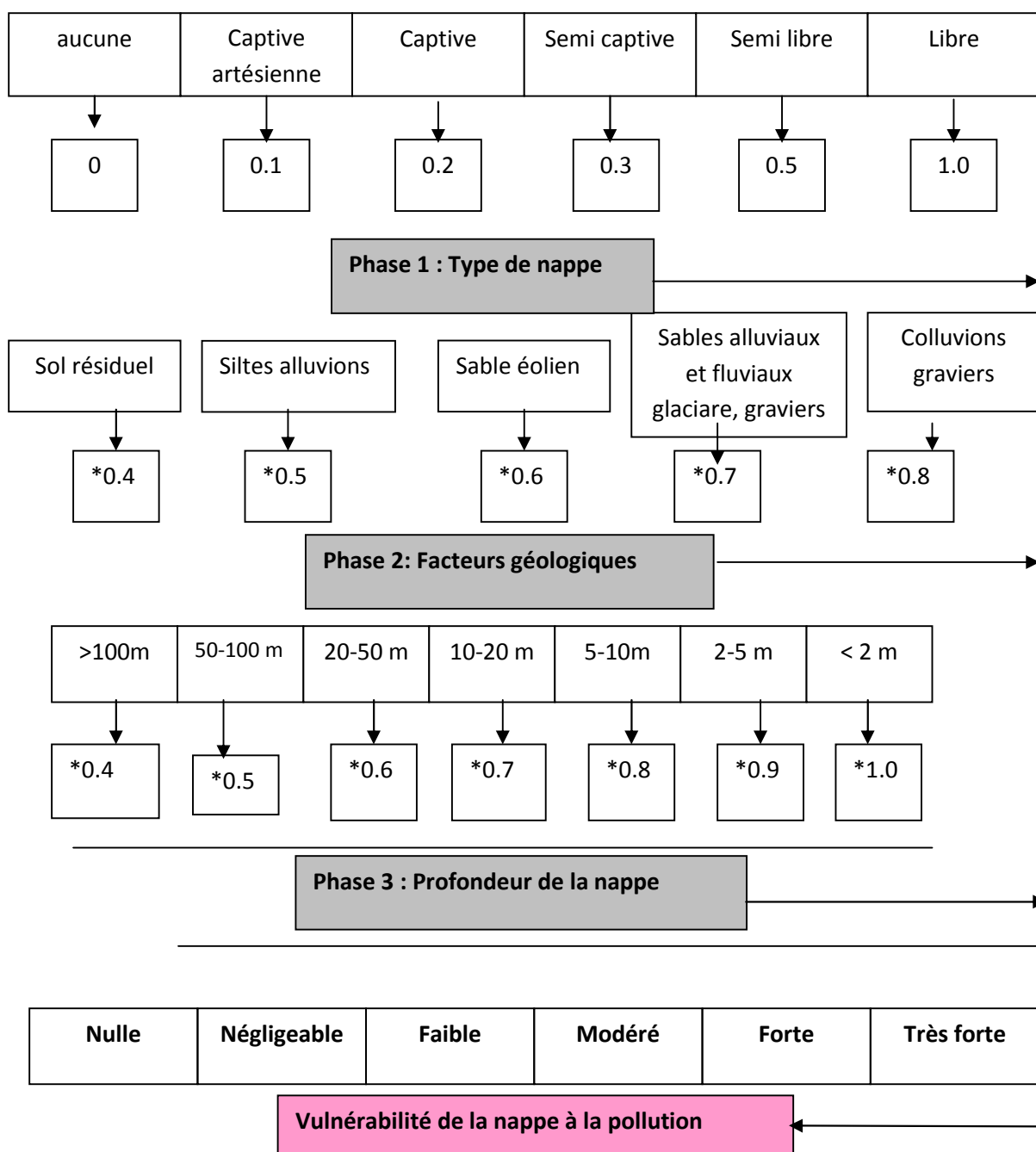


Fig. 61 : Système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987)

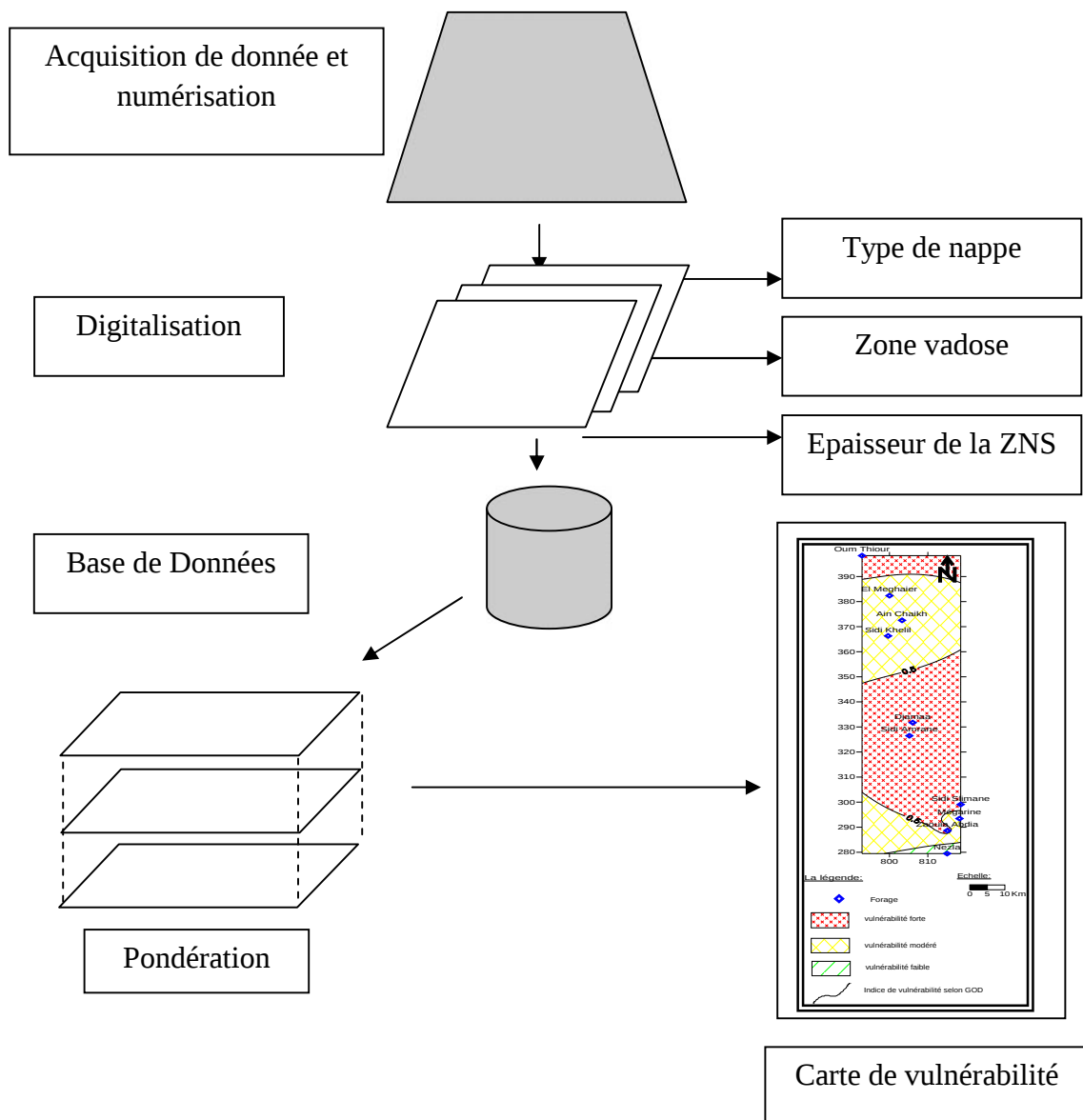


Fig. 62: méthode utilisée pour la réalisation de la carte de vulnérabilité.

3.4. Description des paramètres GOD:

3.4.1. Type de nappe:

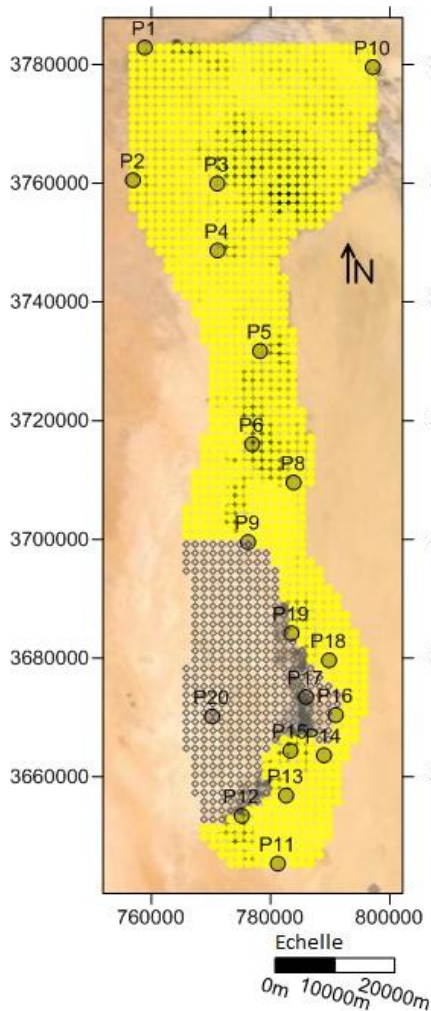
Dans la région de l'Oued Righ la nappe est superficielle et de type semi libre; cependant dans la partie Centrale Ouest elle devient libre (fig. 63).

3.4.2. Profondeur de la nappe (D) :

Ce paramètre est important car le transport des polluants et leur évolution dans le sol et sous-sol. L'analyse de la carte de la profondeur à l'eau de la nappe permet de constater qu'elle varie entre 0 m et 30 m dans la majorité des puits (fig. 64).

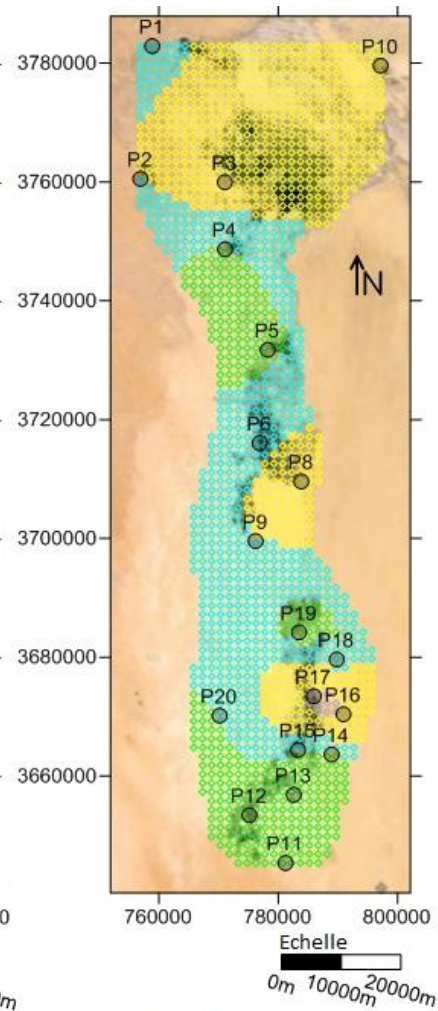
3.4.3. Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques :

La nappe phréatique de l'Oued Righ est constituée en grande partie de sables et de sables argileux (fig. 65).



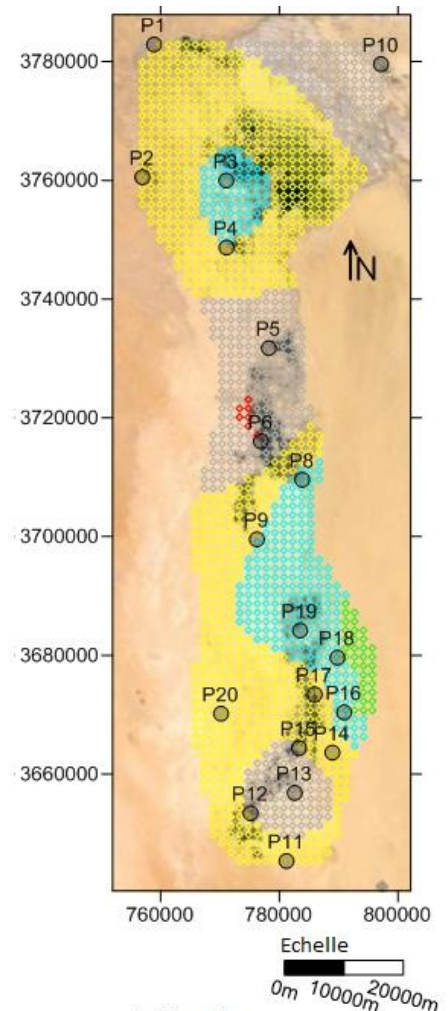
La légende
 ● Nappe Semi-Libre
 ◇ Nappe Libre

Fig. 63: carte représentant le type de nappe aquifère.



La légende
 ◆ 2 à 5 m
 ◆ 5 à 10 m
 ◆ 10 à 20 m
 ◆ 20 à 50 m

Fig. 64: carte de la profondeur du niveau piézométrique de la nappe.



La légende
 ◆ Argile
 ◆ Sable éolien
 ◆ Sable
 ◆ Gravier
 ◆ Calcaire fissuré

Fig. 65: carte de la lithologie de l'aquifère.

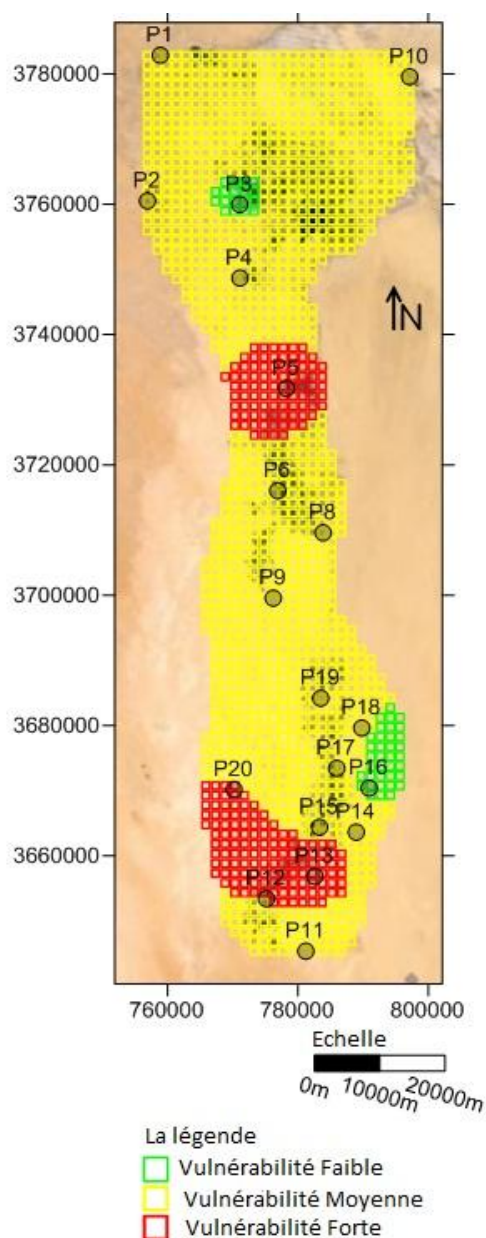


Fig. 66: carte de la vulnérabilité de la nappe libre d'Oued Righ selon la méthode de GOD.

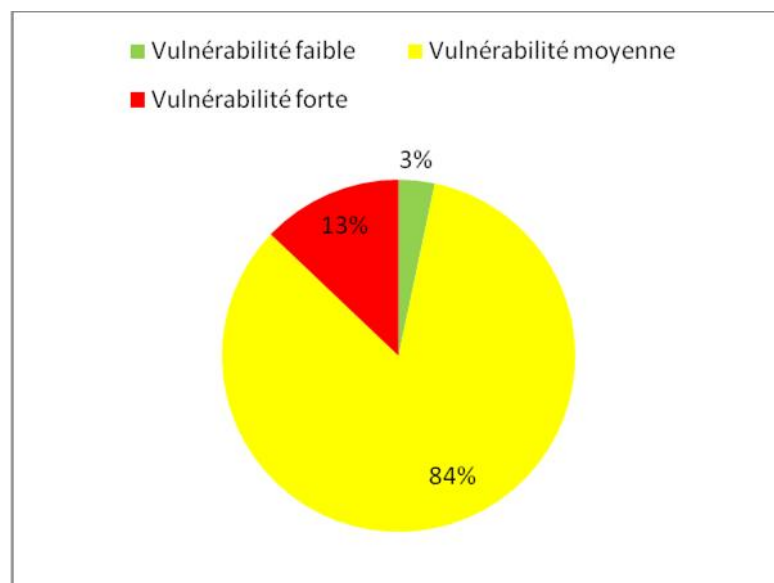


Fig. 67: Répartition spatiale du degré de vulnérabilité de la nappe aquifère libre de l'Oued Righ en (%).

4. Interprétation de la carte de vulnérabilité de la nappe libre de l'Oued Righ :

Le traitement des données s'est effectué à l'aide de logiciels SURFER 11 qui a permis de construire la base de données physique de la zone d'étude. La réalisation des cartes en courbes d'isovaleurs ont été déterminées par krigeage linéaire.

Les nappes libres sont les plus vulnérables, les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et dans la zone non saturée.

L'examen de la carte de vulnérabilité (fig . 66) montre que la nappe libre de l'Oued Righ a une vulnérabilité forte à moyenne. Cette vulnérabilité à la pollution est constatée par la migration ou l'infiltration des polluants dans les eaux du canal traversant la région.

Les zones urbaines, les Chotts et les zones agricoles peuvent présenter des sources de pollution et augmenter les risques de pollution de la nappe.

5. Conclusion:

Les calculs des indices globaux de vulnérabilité, montrent que les valeurs des indices obtenus varient entre 0.25 et 0.65. La carte de vulnérabilité des eaux de l'aquifère libre montre trois zones de vulnérabilité : la première zone a une vulnérabilité moyenne où l'indice global est inférieur à 0.5 et représente 84% de la superficie totale ; cette zone se localise dans les parties où la nappe est de type semi libre ; la deuxième zone présente une vulnérabilité forte avec un indice global de vulnérabilité inférieur à 0.65 ; ce sont surtout les zones agricoles touchées par la remontée des eaux et dans les endroits où le niveau piézométrique de la nappe superficielle se situe à une faible profondeur, elle représente 13% de la superficie totale. Et enfin, la troisième zone représente une faible vulnérabilité (3% de superficie totale) et se localise dans la partie centrale Est.

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère libre de Oued Righ, réalisée par la méthode GOD révèle une tendance de vulnérabilité à la pollution moyenne à forte. La classe la plus dominante est la classe moyenne (84 %).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La région de l'Oued Righ se situe au Sud-est du pays, plus précisément au Nord-Est du Sahara. La vallée de l'Oued Righ s'étend du Sud, au voisinage du village d'El Gouge (Touggourt), et se prolonge plus au Nord, sur une distance de 150 km, vers le village d'Oum Thiour [100 km de la wilaya de Biskra].

L'étude géologique montre que la région de l'Oued Righ se présente comme une cuvette synclinale du Bas Sahara qui fait partie d'une large fosse de direction N-S.

La série géologique permet de distinguer deux ensembles hydrogéologiques, Post Paléozoïques importants : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal.

Cette zone est caractérisée par l'irrégularité et la faiblesse des précipitations ; dont les moyennes annuelles pour la période 1975 –2014 sont de 5.14 mm.

Sur le plan hydrogéologique, la région de l'Oued Righ renferme deux systèmes aquifères profonds séparés par d'épaisses séries argileuses et évaporitiques, représentés par le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI), et surmontés par une nappe libre superficielle. La carte piézométrique du Complexe Terminal (CT) montre un sens d'écoulement général du Sud vers le Nord, épousant la topographie de la région. Les endroits de convergences des écoulements sont caractérisés par les zones de pompage intensif, dans les ghouts et au niveau des villes. La carte piézométrique de Continental intercalaire (CI) montre indique que le sens d'écoulement va du Sud vers le Nord

D'après la carte piézométrique de la nappe superficielle établie le sens d'écoulement tend vers l'exutoire naturel Chott et sebkha (Chott Melghigh).

L'étude hydrochimique des eaux a permis de mettre en évidence la forte concentration des éléments chimiques du Complexe Terminal (CT) par rapport à celle du continental Intercalaire (CI) dans la région de l'Oued Righ. Le report des résultats d'analyses hydrochimiques sur le diagramme de Piper des eaux des deux aquifères profonds montre que le faciès Chloruré sodique est dominant pour les eaux du Complexe Terminal (CT), par contre le faciès sulfaté magnésien caractérise les eaux du Continental intercalaire (CI).

L'interprétation des résultats hydrochimiques à l'aide du diagramme de Riverside montre que les deux aquifères profonds, selon les endroits, ont la qualité de leurs eaux qui peut être médiocre ou mauvaise

L'ACP de la nappe du Complexe Terminal (CT) a montré l'existence de deux associations :

- La première est constituée de : Ce, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Sodium (Na^+). Elle représente l'axe de minéralisation et montre globalement une origine évaporitique,

dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl). Ceci caractérise généralement la nappe du Mio-Pliocène.

- La deuxième association, constituée du calcium (Ca^{++}) et du magnésium (Mg^{++}), représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques.
- La projection des individus (Forages) a permis de faire une classification par rapport à l'axe de minéralisation qui représente le facteur de charge F1. Un gradient de minéralisation a été mis en évidence entre les eaux du Sud et du Nord.

L'ACP de la nappe du Continental Intercalaire (CI) a montré l'existence de deux associations :

- La première est constituée de la Ce, Chlorures (Cl^-), des Sulfates (SO_4^{--}) et du Sodium (Na^+). Cette dernière indique globalement une origine évaporitique avec la présence de l'Halite (NaCl) qui reste dominante.
- La deuxième association, constituée du Calcium (Ca^{++}) et du Magnésium (Mg^{++}), représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques.

L'étude statistique, réalisée sur les données issues des analyses physico-chimiques de 19 échantillons des eaux de la nappe superficielle libre, montre que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de 5130,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui dépasse les normes algériennes de la potabilité des eaux. Les concentrations moyennes du Sodium (Na^+), des Sulfates (SO_4^{2-}) et du Calcium (Ca^{2+}) sont aussi élevées et dépassent également les normes algériennes.

Les eaux de la nappe libre superficielle de la région de l'Oued Righ sont caractérisées par des valeurs élevées de la conductivité électrique, indiquant qu'elles sont chargées et sont vivement déconseillées pour l'AEP. Cependant pour les besoins en irrigation, elles peuvent être utilisées pour certaines cultures.

L'interprétation des résultats d'analyses a permis de constater, d'une manière générale, une augmentation de la salinité dans le temps.

Dans cette région, il n'y a pas un problème de quantité mais plutôt de qualité, le traitement (dessalement) des eaux pourrait améliorer la qualité chimique des eaux de la nappe libre superficielle pour une plus large utilisation.

Selon la méthode de GOD la vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère.

La nappe libre est la plus vulnérable, car les polluants venant de la surface peuvent atteindre les eaux de la nappe en passant par la zone non saturée. Comme c'est le cas pour les polluants véhiculés par les eaux du canal au niveau des bouchons, ou malheureusement par les déversements accidentels de contaminants sur le sol.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. A.Gartet ; J. Gartet C. C. Garcia ; 2001, Hydrochimie des eaux, dissolution spécifique et salinité des cours d'eau dans le bassin de l'oued lebène (Prérif Central, Maroc septentrional), Papeles Geografia Universidad de Murcia España
2. ANONYME (2002) : Nouvelle nomenclature du programme FNDRA .Rapport technique MADR.42 p
3. ANRH. (2006). Données sur les Logs stratigraphiques des forages de la Wilaya de Ouargla. Algérie. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Direction régionale Sud, Ouargla.
4. BALLAIS J.L (2010) : Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara Algérien. Physio-géo .vol 4 .2010.p107-127
5. Bouselsal, B (2016) : Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie), Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba- 126-156 p.
6. Bouselsal, B., et Kherici, N. 2014. Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie). Afrique Science, Vol.10, N°3, 1 septembre 2014.
7. Belksier Mohamed Salah., Chaab Salah., Abour Fella., Zeddouri Aziez., Bouselsal Boualem., Kechiched Rabeh: l'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux de la nappe libre dans la région de Touggourt, International Journal for Environment & Global Climate Change, Volume 2, Issue 3 (2014) Pages: 32-
8. Belksier Mohamed Salah 2010 : Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évolution de sa vulnérabilité Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba- 87-90 p.
9. BEL .F., & CUCHE. D. (1969) : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal ; ERESS ; Ouargla. Algérie, 20p.
10. BEL. F., & DEMARGNE F., 1966. Etude géologique du Continental Terminal ; DEC, ANRH, Alger, Algérie, 24 planches, 22p.
11. BELKACEM B., RABAH B., ALAIN M., 2014; Paysages et sols dans la vallée d'Oued Righ, sahara nord oriental, Algérie, Courrier du Savoir – N°18, Mars 2014, pp.103-110
12. BOURHAN A; 2010 - Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eau souterraine: contexte hydrogéologique et méthodes d'étude, Géosciences Réunion, BRGM, Univ. Avignon; 108p.

13. BOUSSAADA N., 2007. Evaluation des ressources en eau et modes de gestion dans la vallée d'Oued Righ. Mémoire de Magister, option: hydrogéologie. Univ. Annaba, 24p.
14. BOUZNAD IMAD EDDINE, 2009; Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla) (Sahara septentrional algérien), Thèse de magistère, option hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba ; 128p.
15. Busson G. (1969) : Sédimentation, transgression et paléogéographie sur les grandes plate-formes du Mésozoïque : l'exemple du Cénomanién- Turonien du NE de la plate forme saharienne et de Berberie. Bull. Soc géol, pp. 701.
16. BUSSON. G., 1970. Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages Algéro-Tunisiens. Edit., Paris, Centre Rech. Zones Arides, Géol., 11, 811p. Ed. C.N.R.S.
17. Brinis, N. (2011). Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en pays aride : cas de l'aquifère D'El-Outaya, région nord-ouest de Biskra (Algérie), Thèse de doctorat.
18. GASTAGNY G., 1967. Traité pratique des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris. France 661p.
19. CASTAGNY G., 1980. L'eau propre. Hachette édit. Paris, 192 p.
20. CORNET, A (1961): Initiation à l'hydrogéologie Saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires Sahariennes. service des études scientifiques. Birmandreis, Alger, 1961,
21. CORNET. A et ROGNON. Ph : estimation de la valeur des débits circulant dans la nappe du continental intercalaire au Sahara sud –algérien.
22. Djidel Mohamed 2008 : Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie) Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba- 51-53 p.
23. Derradji, F., Kherici, N., Romeo, M. et Caruba, R. 2004. Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien). Sécheresse 2004 ; 15 (4) : 353-60.
24. DUBIEF.J, (1952) DUBOSTE .D (2002): Ecologies, aménagements et développements agricole des oasis algériennes. Ed du : Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides. CRSTRA 423 p.
25. DUTIL.P, (1971) : Contribution à l'étude des sols et des paléosols de Sahara. Thèse doc. D'état, Faculté des sciences de l'université de Strasbourg. 346p

26. Fabre, J. (1976) : Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger, 421p.
27. FEKRACHE F., 2014, Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac fetzara-annaba (Algérie), thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba. pp10-13.
28. Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. & Van Waegeningh, H.(eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, 69–86.
29. FLAMMAND.G.B.M, 1911 : Recherches géologique et géographique sur le haut pays de l'Oranie et sur le Sahara 1001p, Ed A Rey et Cie ,152 fig ,15 carte.
30. Gabriel Etienne Ake, Kouassi Dongo, Boyossoro Hélène Kouadio, Brou Dibi, Mahaman Bachir Saley et Jean Biemi (2009) : Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171
31. GUETTICHE S., et BENABDASADOK D., 2005, Contribution à l'étude de la possibilité de réutilisation des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation dans la région de l'Oued Righ, Mémoire d'Ingéniorat, Université de Mentouri-Constantine. pp 110-115
32. Guendouz A ., Moulla A.S., Remini., B., Michelot J.L. 2006. Hydrochemical and isotopic behaviour of a Saharan phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (case of Oued- Souf region, Algeria). Hydrogeol J 14:955–968.
33. GUYOT.J , DURAND.J.H, (1955) :L'irrigation des cultures dans l'Oued Righ . Trav.de l'I.R.S Univ d'Alger, T.XIII,pp75-130.
34. Imed Eddine NEZLI., Samia ACHOUR., Baelhadj HAMDI-AÏSSA (2009) : Hydrogeochemical approach to study the water fluoridation of the Terminal Complex aquifer in the low algerianValley of M'ya (Ouargla), Courrier du Savoir – N°09, Mars 2009, pp.57-62.
35. Layachi Gouaidia., Abderahmane Boudoukha., Larbi Djabri., Omar Guefaifia1. (2010) : Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). Sécheresse 22 : 35-42. doi:10.1684/sec.2011.0296.
36. MTIMET.A, (1998) : Gestion durable de l'eau et du sol dans les oasis Tunisiennes.16emcongré mondial de science du sol .symposium n° 29,n°enregistrement :1462

37. M. Mohamed Sinan: Ecole Hassania des Travaux Publics (Casablanca), Mlle. Najoua Bouibrine: Direction Générale de l'Hydraulique (Rabat). Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le développement durable. (Rabat, 25-27 avril 2007).
38. Mina AMHARREF., Abdes Samed BERNOUSSI (2007) : Vulnérabilité et risque pollution des eaux souterraines. Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 Novembre 2007
39. Maoui Ammar. 2007. Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise .Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Th. Doctorat, Univ. d'Annaba, 298 p.
40. N. BOUCHAHM, W.CHAIB, A.DROUCHE, F. ZAH, W. HAMZAOU, N. SALEMKOUR, F. FEKRAOU, et L.DJABRI, 2013, Caractérisation et cartographie des sites de remontée dans la région de l'Oued Righ (bas Sahara Algérien), Journal Algérien des régions arides, 13p.
41. NESSON.C, SARI.D., PEILLON..P, (1975): Recherches sur l'Algérie, Mémoires et documents, Service de documentation et de cartographie géographiques, Paris, éditions du CNRS,242 p
42. NICOD, J. (1973): Relation débit —teneur et débit— érosion dans les karsts méditerranéens. VIème Congrès International de Spéléologie, Oloumouc.
43. PETIT, E. & ERPICUM, M. (1987): Variations de la température des eaux de sources et de leurs débits en fonction de leur mode d'alimentation. Bull. Soc. Géo. de Liège, n° XXII, 22-23ème années, 1986-1987, pp. 161-172.
44. Rahima BEN HAMIDA et Elalmi TALBI, 2006, Essai de calcul de bilan hydrique de la vallée de l'Oued Righ, Mémoire de D'Ingénieur, Université Kasdi Merbah-Ouargla 120p ;
45. Rouabhia A.E.K., Djabri L. (2010) : L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'el ma el abiod Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 55-67.
46. BELKACEM B., 2013, Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara Nord oriental, Algérie, thèse de doctorat, option : Pédologie, Université de Reims Champagne-Ardenne en France.
47. CORNET. A (1964) : introduction à l'hydrogéologie du sahara.
48. HALILLET.M.T, (1998) : Etude expérimentale de sable additionnée d'argile .Comportement physique et organisation en condition saline et sodique. Thèse doctorat.I.N.A.P.G Paris.250p

49. KLOPMANN W., BOURHANE A., ASFIRANE F.; 2011 - Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau « emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques », BRGM, France; 38 p.
50. LAMINI A., 2012, Etude géochimique et minéralogique des chotts de la région d'el hadjira , mémoire de magistères, option géochimie de surface, Université Kasdi Merbah Ouargla
51. O.N.M (Ouargla) : données climatiques sur la région de Touggourt.
52. SOGREAH, (1971): Participation à la mise en valeur de l'Oued Righ. Etude agropédologique ,Doc.Poly MTPC.Alger pp7-36.
53. Salim Khechana., El-Fadel Derradji : Qualité des eaux destinées à la consommation humaine et à l'utilisation agricole (Cas des eaux souterraines d'Oued-Souf, SE algérien), Rev. Sci. Technol., Synthèse 28 : 58-68 (2014)
54. Youssef H., Jacques M., Jacky M., Lhoussaine B. & Pierre C.,1999. Use of the Bd/Cl ratio to determine the origin of the salinity of groundwater an example from the Souss plain (Morocco), Académie des sciences / Elsevier.

ANNEXE

Annexe N° 1: Normes algérienne des paramètres physico-chimiques pour l'eau minérale naturelle et l'eau de source. (D'après l'Arrêté du 26 juillet 2000 (JO n° 51/00))

Paramètre	Teneur	Unité
Température	25	°C
pH	6,5-8,5	-
Conductivité électrique	2800	mg/l
Résidu Sec (110 °C)	2000	mg/l
Calcium	75-200	mg/l
Magnésium	150	mg/l
Sodium	200	mg/l
Potassium	20	mg/l
Chlorures	200-500	mg/l
Sulfates	200-400	mg/l
Bicarbonates	-	-

Annexe N° 2: Méthodes statistiques utilisées

Trois types d'approches statistiques (monovariée, bivariée et multivariée) ont été utilisés pour le traitement statistique de données.

Analyse de données mono variée

Ce traitement permet de déterminer les paramètres statistiques de la distribution des variables étudiées (paramètres de position centrale et de dispersion), et de résumer graphiquement les caractéristiques essentielles de la distribution de chaque variable. Cette analyse permet déjà, d'évoquer l'homogénéité ou l'hétérogénéité des données.

Analyse de données bi variée

Le traitement statistique bivarié consiste à étudier deux variables aléatoires simultanément et de déterminer la relation qui existe entre eux. Il existe plusieurs paramètres quantifiant cette relation. Le coefficient de corrélation linéaire simple est le paramètre le plus utilisé. Il est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$r = \text{COV}(x, y) / S_x S_y$$

Ou ρ : coefficient de corrélation simple de la population ;

x et y : variables ; σ_x et σ_y : écart type des variables x et y ;

$\text{Cov}(x, y)$: covariance de variables x et y ;

Rappelons que $\text{cov}(x, y) = E(xy) - E(x).E(y)$, il est estimé par:

$$R_{x/y} = \frac{\overline{XY} - \overline{X}\overline{Y}}{S_x \cdot S_y}$$

Avec $\overline{X}$ et $\overline{Y}$: teneurs moyennes des variables X et Y ;

S_X et S_Y : écarts types de l'échantillon statistique des variables X et Y .

Les coefficients de corrélation linéaires simples peuvent être regroupés dans un tableau récapitulatif appelé "**matrice de corrélation**". Notons que la valeur d'un coefficient de corrélation varie entre -1 et +1.

La signification de ce dernier dépend du nombre d'individus utilisés pour son calcul. Une façon empirique de calculer la signification c'est de calculer la valeur de :

$$R_{signif} = \frac{2}{\sqrt{n-1}}$$

Où n est le nombre des données utilisées.

Analyse de donnée multi variée (Analyse en Composantes Principales ACP)

L'analyse des données multivariée désigne l'ensemble des méthodes, qui permettent de collecter, d'organiser, d'analyser et de présenter les données. Ces méthodes utilisent des techniques géométriques permettant de mettre en évidence des groupes d'individus homogènes, des liens entre individus et variables, des ressemblances ou des différences entre variables et surtout de représenter les données initiales d'un Tableau R(n,p) par un nombre plus petit sans perdre l'information.

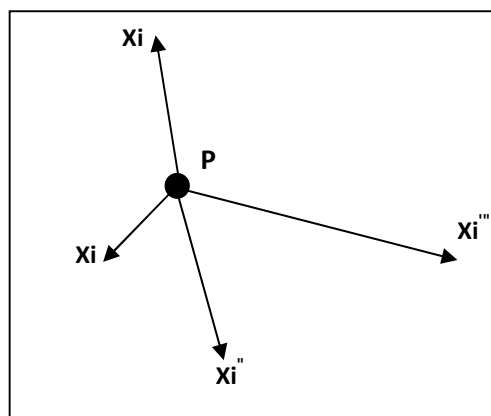
En ACP, ce qui importe c'est la forme du nuage des points par rapport aux axes (droites) qui passent par le centre de gravité du nuage. Il s'agit donc de rechercher les droites qui respectent au mieux l'ensemble des carrés des distances entre couples : C'est celles qui passent par le centre de gravité. D'où la nécessité de procéder à un changement de repère en centrant les variables de la matrice de données initiales. Si de plus les unités des variables sont différentes alors il est préférables de les réduire pour supprimer l'effet unité c'est-à-dire échelle

$$x_{ij} = \frac{r_{ij} - \bar{r}_j}{\sqrt{n \cdot S_j}}$$

Ainsi après cette transformation (changement), la matrice d'inertie ne serait autre que la matrice de corrélation linéaire simple: $C = X^T X$.

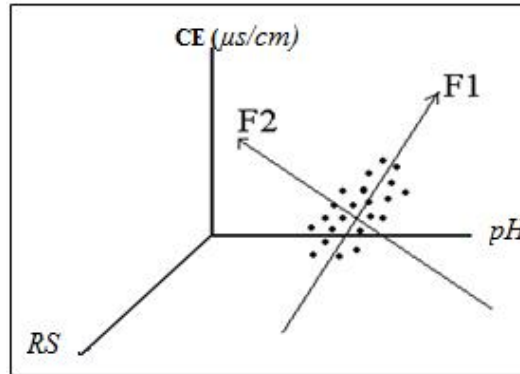
On appelle inertie du point N(I) par rapport au point P ou l'expression suivant:

$$InP(I) = \sum_{i=1}^n m_i \|X_i - P\|^2$$



Représentation géométrique d'inertie des points X_i ($i=1$ à n) par rapport au point P.

Après le calcul de C, il est nécessaire de calculer l'inertie du nuage de point dans les principaux axes d'allongement désignés par F_i ($i=1$ à N) en diagonalisant – c'est à dire en recherchant les premières valeurs propres (variances) et les vecteurs propres correspondants.



Représentation d'un nuage de points et les principaux axes d'allongement (Axes factoriels).

La diagonalisation de la matrice C (matrice d'inertie) permet d'obtenir les p vecteurs propres U_α et les p valeurs propres λ_α . Le vecteur U_α est connu par ces coordonnées dans l'espace R^p . Les coordonnées des points X^i sur les axes factorielles qui sont obtenus par:

$$F_\alpha(i) = X^i U_\alpha$$

$$F_a(i) = \sum_{j=1}^k U_{aj} X_{ij}$$

$F_\alpha(i)$ est le facteur de rang α associé à l'individu i : $F_a(i)$ est la coordonnée de l'individu (échantillon) i sur l'axe factoriel U_α . Ce dernier a autant de composantes que de variables j . Dans la pratique l'inertie expliquée par l'axe factoriel :

$$T_a = \frac{I_a}{\ln(I)} = \frac{I_a}{\sum_{a=1}^p I_a}$$

Où $\ln(I)$ est l'inertie totale du nuage de points.

Généralement les résultats d'une ACP sont représentés sous forme graphique.

Tableau : Exemple de facteurs de charge

	Fact. 1	Fact. 2
PH	0,36	0,79
RS mg/l	0,42	0,04
Ce μs/cm	0,89	0,09
Sal ‰	0,8	0,02
Ca ⁺⁺ mg/l	0,85	-0,1

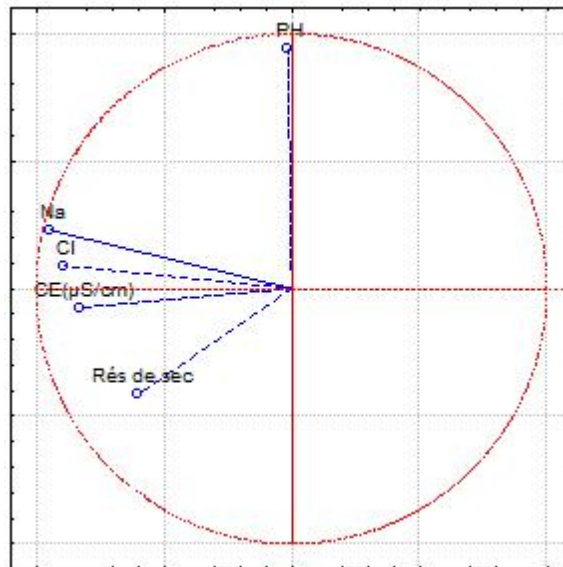


Fig : Exemple d'une représentation des variables sur le plan des facteurs de charge d'une ACP normée.

Les facteurs des individus (facteur score) sont les coordonnées des individus sur les axes factoriels représentation dans R^p – Leur calcul est effectué à l'aide de la formule suivante : $[F_{sc}] = [X] \times [F]$: $F_{sc1} = a_{F1}CE + b_{F1}pH + c_{F1}Rs.....$