



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique



UNIVERSITE ABBES LAGHROUR - KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences de la Nature et de la Vie**

Filière : **ECOLOGIE ET ENVIRONNEMENT**

Option : **FONDAMENTALE ET APPLIQUEE**

Thème :

***CARACTERISATION PHYSICO CHIMIQUE DES
EAUX DU VERSANT NORD DU MASSIF DES
AURES***

Présenté par :

- Agaba Maroua
- Merad Ferdousse

Directeur de Mémoire :

HOUHA Belgacem

Jury de soutenance :

Président : Dr. SEDRATI A.

(MAA) Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

Encadreur : Pr. HOUHA Belgacem

Professeur, Université Abbès Laghrou Khenchela

Examinatrice : Dr. Ouanes miada

(MAA) Univ. Abbès Laghrou- Khenchela

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace

À L'absent présent mon père

À ma mère Agaba Karima Pour leur

*Compréhension, leurs nombreux sacrifices consentis,
Pour leur patience, leur grand amour et leur confiance
en moi.*

À ma sœur Meriem que de succès

À mes frères Lazhar et Taki Eddine

À mon nièce Asmass

Agaba Maroua





Dédicace

*À ma mère Bourouba Nora Pour leur
Compréhension, leurs nombreux sacrifices consentis,
Pour leur patience, leur grand amour et leur confiance
en moi.*

À mon frère Mohammed Zakaria

À L'absent présent mon père



Merad Ferdousse



REMERCIEMENTS

*En premier lieu je remercie notre Dieu **Allah** le tout Puissant, de m'avoir donné le savoir, et le courage pour réaliser ce travail.*

*Ce travail a été réalisé à l'université **ABBES LAGHROUR** Khenchela*

*Je tien à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur de mémoire **LE PROFESSEUR, HOUHA BELGACEME** pour ces précieuses remarques et conseils et de sa disponibilité.*

*Je remercie vivement les membres de jury monsieur **SEDRATI NOOR** et madame **OUANASSE MIADA** d'avoir accepté d'évaluer ce travail malgré leurs nombreuses autres obligations*

*Mes remerciements à toute les Enseignants du département de l'Ecologie et l'Environnement à l'université d'**ABBAS LAGHROUR KHENCHELA**, qui de près ou de loin ont contribué à ma formation.*

Que mes amis et mes camarades de promotion trouvent ici, l'expression de mes remerciements pour leur soutien moral.

Enfin, j'adresse mes plus chaleureux sentiments à mes parents, et à ma famille pour leur soutien constant. Et je remercie toute personne ayant participé de près ou loin à la réalisation de ce travail

Marcua et Ferdousse



Chapitre I

I. INTRODUCTION

L'eau, dans notre terre devient des précipitations (par répartition annuelle et mensuelle, et leurs totaux journaliers), donc les eaux souterraines et les eaux superficielles sont liées à la composition hydrique du climat.

Dans les pays aride et semi-aride les nappes et les réserves d'eaux se recharges par l'infiltration direct des écoulements des eaux pluviales et ce d'décharge par l'évaporation sous l'effet de la chaleur.

Ces différents aspects des précipitations modifient plus ou moins les effets combinés des autres paramètres physiques (altitude et exposition) et climatiques (températures et évapotranspiration), permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique et pour bien comprendre le fonctionnement d'un système hydraulique on établit un bilan hydrique.

I.1. Aperçu générale sur le climat de l'Algérie et de la région d'étude

Le climat est une synthèse des variations quotidiennes observées en un lieu précis. Le climat d'un endroit donné est obtenu par la collecte des données statistiques sur les conditions météorologiques d'une période donnée. Il inclut généralement les éléments météorologiques suivants : la température, les précipitations, l'humidité, l'ensoleillement et la vitesse des vents. (1)

L'Algérie est un pays soumis à l'influence conjuguée de la mer, du relief et de l'altitude, présente un climat de type méditerranéen extra tropical tempéré. Il est caractérisé par une longue période de sécheresse estivale variant de 3 à 4 mois sur le littoral, de 5 à 6 mois au niveau des Hautes Plaines et supérieure à 6 mois au niveau de l'Atlas Saharien (2). L'Est Algérien présent différents climats du Nord au Sud, (selon les données de l'ONM 1976-2005), les températures des stations sont jugées représentatives des sous-ensembles naturels (Littoral, Atlas Tellien, Hauts Plateaux, Steppe et Sahara). (3)

La partie nord-est de l'Algérie est la région où les niveaux climatiques (mebarki2005) varient le plus au niveau national, une vaste étendue marquée par de forts contrastes climatiques. (Fig.1).

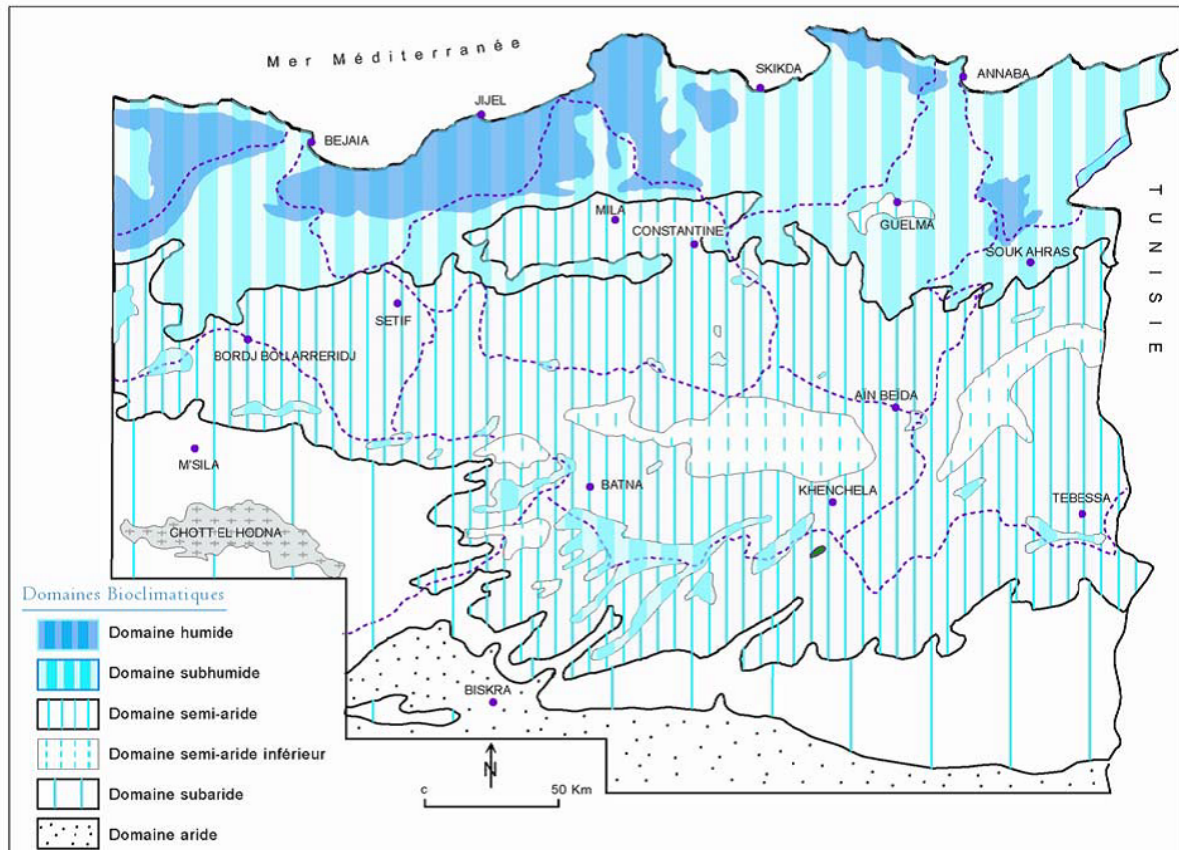


Figure 1 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Établie d'après Côte M., 1998a)

En hiver, les Hauts plateaux et Steppe sont plus froids que l'Atlas Tellien, le Littoral et le Sahara. Le mois de janvier est le plus froid de l'année. En été, Les mois de juillet et août enregistrent les températures les plus élevées et c'est au mois de janvier que la moyenne des températures est la plus basse (A. Demdoun, 2010).

I.2. Paramètres climatique

Pour l'étude climatique de notre région nous avons basé sur les données d'observations d'une période de 26 ans (1994-2020) de la station météorologique de khenchela située selon les coordonnées suivantes. (4)

Tableau.1 : Coordonnées géologiques de la station météorologique khenchela

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Khenchela	35°27',852 N	7°5',022 E	1200 m

récipitation

La neige, de la pluie, du verglas ou de la grêle connue sous le nom de précipitation, constitué le facteur fondamental dans la détermination du régime car il est le principal intrant des systèmes hydrologiques.

Le tableau ci-dessous présente la variation des quantités annuelles de pluie.

Tableau.2 : Répartition annuelle des précipitations (mm), (1993-2018)

Années	P(mm)
1994	315,7
1995	520,4
1996	500
1997	515
1998	405,2
1999	432,3
2000	302
2001	330
2002	406,6
2003	500
2004	610,2
2005	308,6
2006	500,6
2007	700
2008	505
2009	505,5
2010	750
2011	602
2012	400
2013	510
2014	410
2015	490
2016	305,9
2017	290,7
2018	450
2019	761
2020	571

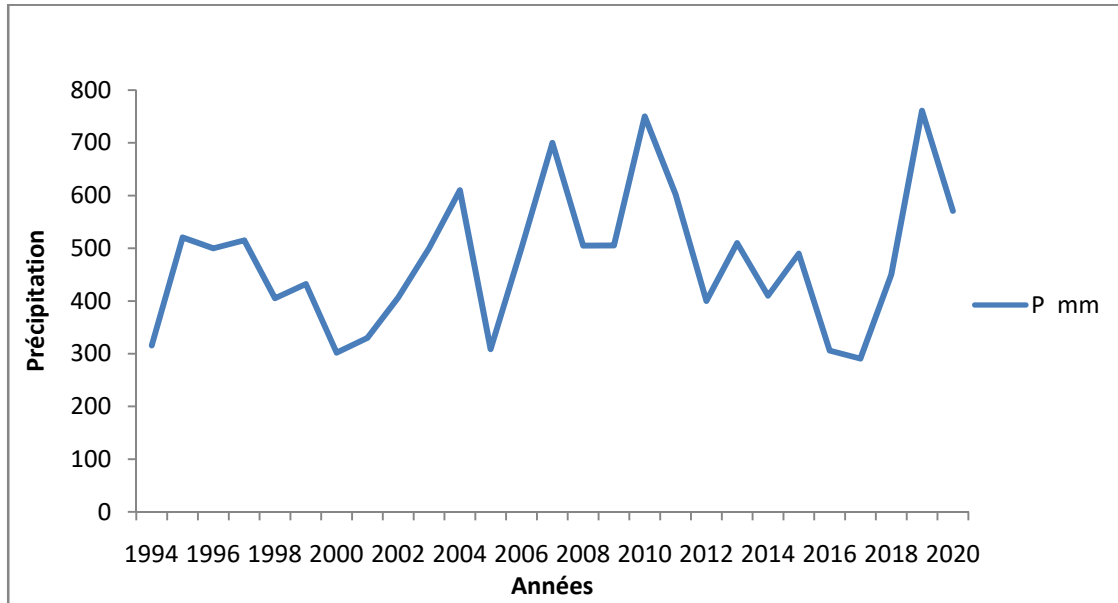


Figure2 : Variation des précipitations annuelles

L’analyse des données pluviométriques (Fig.2), montrent que les pluies atteignent son maximum 791 mm en 2019 avec une année de sécheresse 290,7 mm en 2017.

Tableau 3 : Moyenne mensuelle des précipitations (mm) (1994-2020)

Mois	Jan	Fév.	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
P_{moy}	50,9	40,66	64,81	71,58	42,4	19,58	55,63	66,13	47,46	44,4	47,06

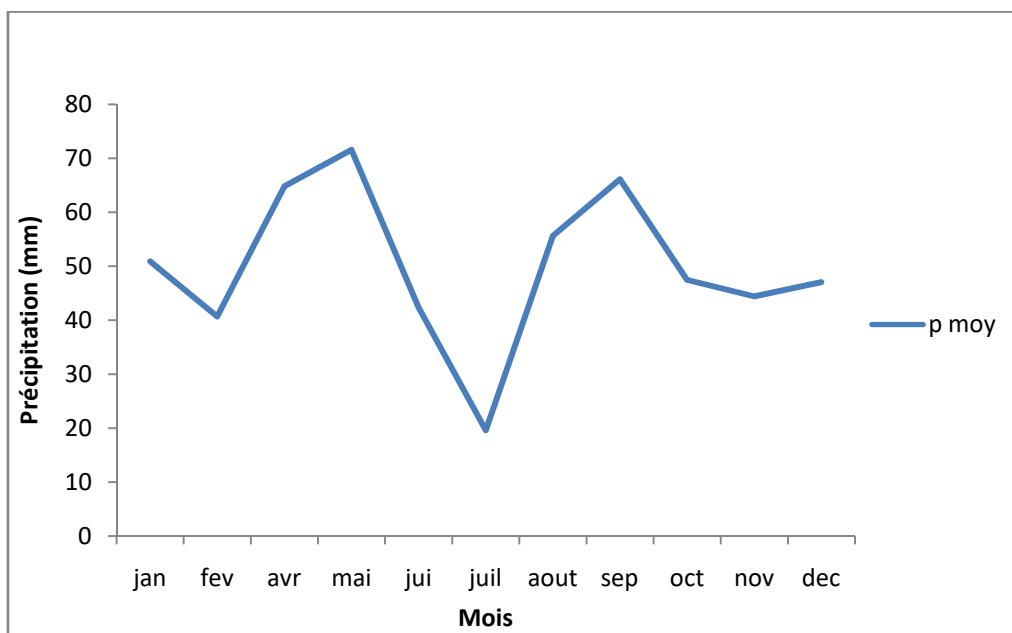


Figure. 3 : Variation mensuelle des précipitations

Les précipitations de la région de El-hamma-khenchela présente une certaine variabilité, la moyenne la plus basse enregistré durant les mois de Juillet avec 19.58 mm, alors que les mois les plus arrosés sont mai, septembre avec des moyennes mensuelles de 71.58 mm, 66.13 mm (Fig 3).

I.2.2. Température

La température représente un facteur limitant car elle conditionne la répartition de la totalité des êtres vivants.

Les données des températures durant la période (1994-2020) sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau. 4 : Moyennes mensuelles des températures en °C (1994-2020)

	jan	fév	avr	mai	juin	juil	Aout	sep	oct	nov	Déc	moyenne
Tmin	3,43	4,04	9,77	14,4	19,75	23,24	22,89	18,81	13,94	8,21	5,31	13,07
Tmax	12,95	14,53	23,12	28,95	35,8	40,42	39,26	32,08	25,79	18,58	13,91	25,94
Tmoy	8,19	9,29	16,45	21,68	27,78	31,83	31,08	25,45	19,87	13,40	9,61	19,51

T_{min} : Températures moyennes minimales mensuelles et annuelles

T_{max} : Températures moyennes maximales mensuelles et annuelles

T_{moy} : Températures moyennes mensuelles et annuelles

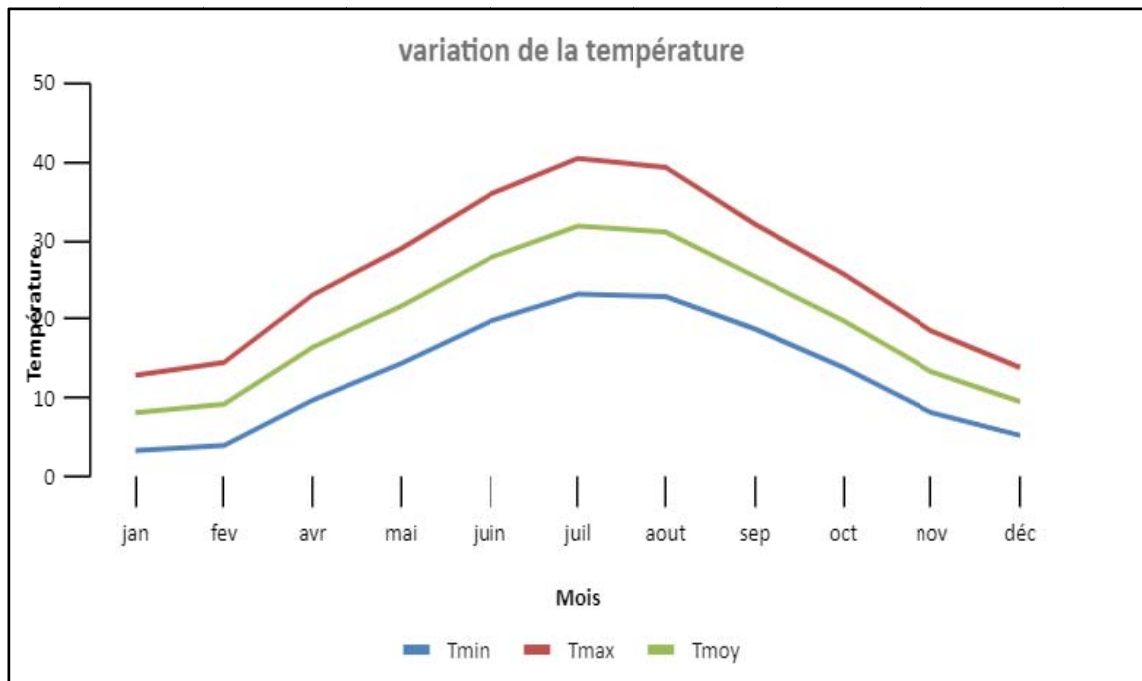


Figure. 4 : Variation des Températures mensuelles

Janvier est le mois le plus froid avec 8.19 °C, Juillet est le mois le plus chaud avec 31.83°C. L'amplitude de température entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est de 23.64°C ce qui laisse supposer l'existence de deux saisons, l'une sèche et l'autre humide.

I.3. Synthèse Climatique

Le quotient pluviométrique d'EMBERGER et le diagramme ombrothermique de GAUSSEN et BAGNOULS sont les indices les plus utilisés pour la caractérisation des climats et bioclimats dans la région méditerranéenne.

La courbe ombrothermique de GAUSSEN et BAGNOULS une méthode graphique qui permet de définir le période sèche et humide de l'année (5) par la combinaison entre les facteurs pluviométriques (P) et les facteurs thermiques (T).

I.3.1. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN et BAGNOULS

Le Diagramme ombrothermique de Gausсен et BAGNOULS met en évidence la notion des saisons humides et sèches, comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T^\circ$).

Avec :

P : précipitations moyenne mensuelle en mm.

T : température moyenne mensuelle en °C.

Le diagramme ombrothermique de la station étudiée est illustré dans la figure.5.

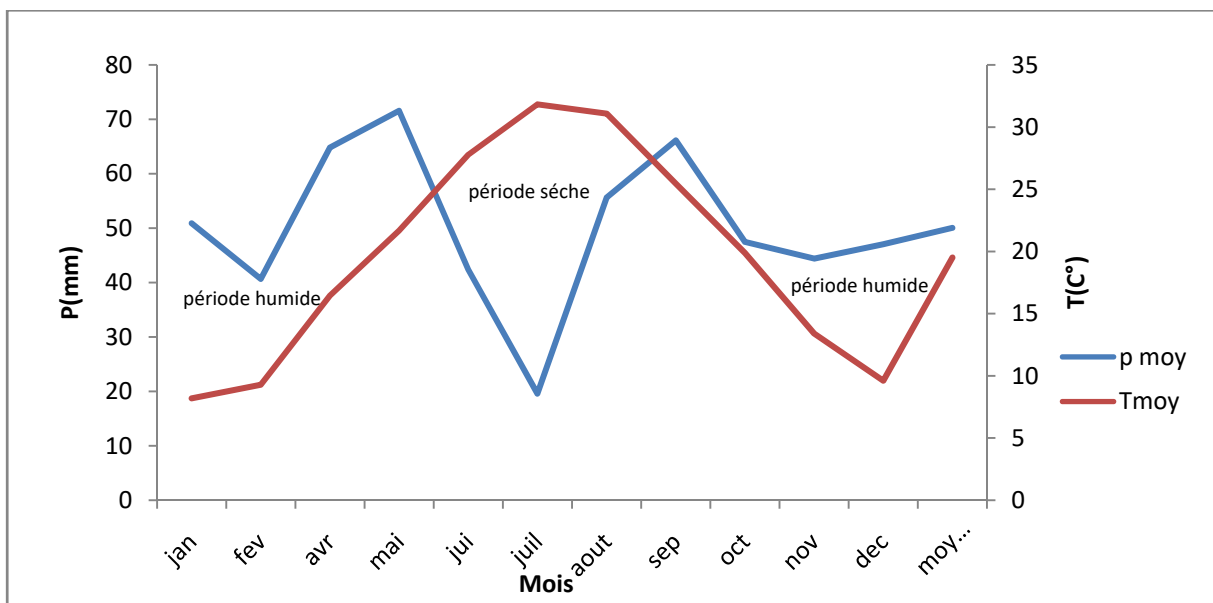


Figure. 5 : Diagramme ombrothermique de la station d'El-hamma

On constate que la région d'étude présente une période sèche qui s'étend de début de mois de mai à la fin de mois d'aout, le reste de l'année représente la période humide.

I.3.2. Indice d'aridité de De Martonne

En 1925 Emmanuel De Martonne a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité (I a). Cet indice est fonction de la température (T en °C) et des précipitations (P en mm) et permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude. (ANRH, 2002) Cet indice est calculé par la relation suivante :

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

Où :

I : indice d'aridité annuel de De. Martonne.

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

Tableau.05 : Indice d'aridité de De. Martonne

Station	P (mm)	T (°C)	I
Khenchela	607.06	19.51	20.57

Les valeurs de l'indice permettent déterminer le climat selon le classement dans le tableau suivant :

Tableau.06 : Classement en fonction de l'indice d'aridité de De. Martonne

Classement d'indice d'aridité	Type de climat
$I < 5$	Climat hyperbolique
$5 < I < 7.5$	Climat désertique
$7.5 < I < 10$	Climat steppique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré
$I > 30$	Climat humide

La zone d'étude bénéficie d'un climat semi-aride.

I.3.3. Climogramme d'EMBERGER

Le Q_2 (le quotient pluviométrique d'EMBERGER) est une expression synthétique du climat méditerranéen

Q_2 est calculé par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{2000 P}{M^2 - m^2}$$

Avec :

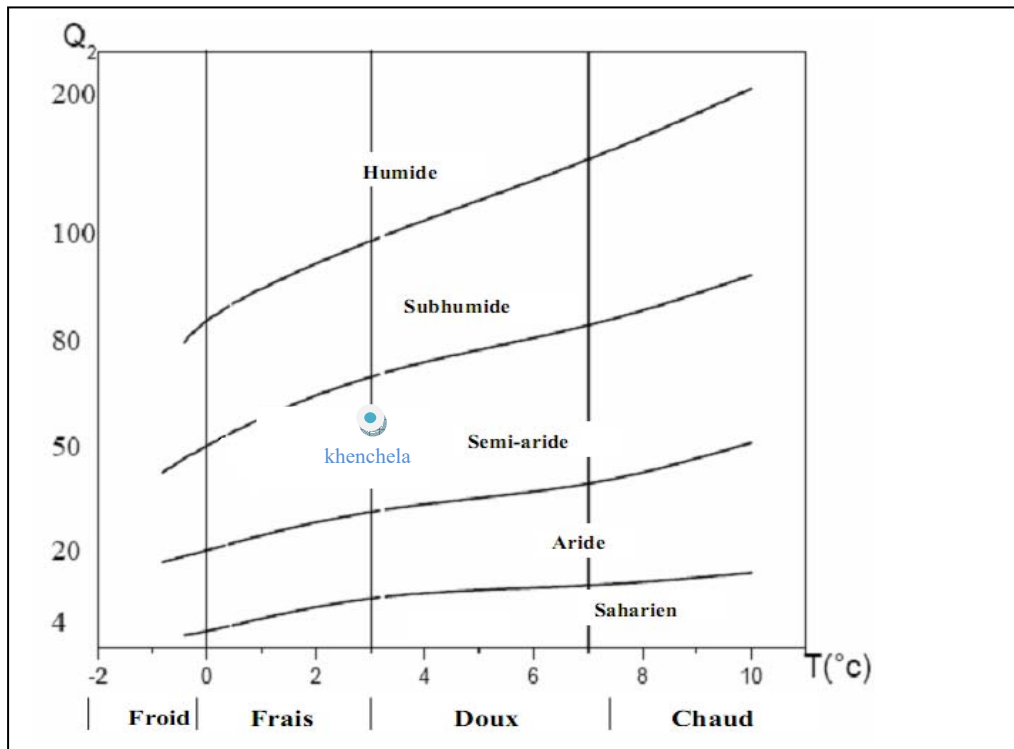
P : Précipitations annuelles en mm.

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en degré absolu (0k).

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid en degré absolu (0k).

($T^0k = T^{\circ}C + 273$,2)

Le résultat de calcul quotient pluviométrique est : $Q_2 = 55.60$, la valeur Q_2 est portée sur le Climagramme d'EMBERGER. Donc le Climagramme d'EMBERGER indique que notre zone d'étude est située dans l'étage bioclimatique Semi-aride frais, (Fig.06).



I.4. Bilan hydrologique

L'établissement d'un bilan hydrique nécessaire pour appréhender le fonctionnement d'un système hydraulique de surface ou de subsurface, passe impérativement par la connaissance des éléments qui constituent le cycle de l'eau. Pour déterminer le bilan hydrologique de la zone d'étude les principaux paramètres à calculer sont : l'infiltration, ruissèlement et l'évapotranspiration.

Le bilan hydrologique sera établi pour les données de la station de khenchela.

I.4.1. L'évaporation

Se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau, D'où il est un facteur très important pour établir le bilan hydrique et dépend de plusieurs paramètres : La température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal. On distingue : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

I.4.2. Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration est la somme de la transpiration du couvert végétal (à travers les stomates des plantes) et de l'évaporation des sols. Lorsque la disponibilité en eau n'est pas limitative ce flux tend vers une limite appelée **évapotranspiration potentielle (ETP)**.

I.4.2.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales. Pour estimer ETP on utilise les formules de : THORNTHWAIT et ANRH₂₀₀₂.

I.4.2.2. La formule de THORNTHWAIT

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

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * K, \text{ (en mm).}$$

$$i = (T/5)^{1.514} \quad I = \sum_{12} i \quad , \quad a = (1.6/100) I + 0.5$$

Où :

ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm.

T: température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

I : Indice thermique annuel.

i : indice thermique mensuel.

a: Coefficient en fonction de l'indice I.

K : Coefficient de correction, qui dépend du temps et de l'altitude.

I.4.3. Calcul de l'évapotranspiration réel (ETR)

L'évapotranspiration réelle s'identifie au déficit d'écoulement et peut se calculer à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie et la température. L'évapotranspiration réelle est liée à la quantité de pluie tombée dans le bassin et de la réserve maximale en eau du sol. Pour la détermination de ce paramètre à l'échelle annuelle, on utilise les formules empiriques de TURC et de COUTAGNE.

I.4.3.1. Méthode de TURC :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L} \right)^2}}$$

Où :

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle, en mm.

$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$: pouvoir évaporant de l'atmosphère

T : Température moyenne annuelle, (en °C).

I.4.3.2. Méthode de THORNTHWAIT :

La détermination de l'ETR est fonction de l'ETP et de la quantité d'eau disponible (Pluie + RFU). La RFU est la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique qui est facilement utilisable par les plantes, pour son bon fonctionnement physiologique.

La réserve facilement utilisable RFU est calculée par la formule de Hallaire (1960) donnée ci-dessous :

$$RFU = \frac{1}{3} Da * He * Pr$$

Où :

RFU: la réserve facilement utilisable (m).

Da : densité apparente du sol prise égale à 1,4.

He : capacité de rétention prise égale à 0,3.

Pr : profondeur des racines prise égale à 0,4 m.

- Si ETP = P, il y a existence d'une évapotranspiration réelle ETR, la réserve RFU ne se modifie pas et aucune infiltration ne se produit en direction de la nappe.
- Si ETP > P, on a ETR = P + RFU. Un déficit apparaît, une partie de la RFU sera sollicitée jusqu'à la compensation de l'ETP. L'évapotranspiration agit donc sur le sol. Aucune infiltration ne se produit en direction de la nappe.
- Si ETP < P, on a ETR = ETP. La RFU pourra atteindre son maximum au-delà duquel, il y aura infiltration vers la nappe.

Le bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la station de Khenchela est porté dans le tableau suivant :

Tableau.7 : Bilan Hydrique de Thornthwaite de la station de Khenchela El Hamma

	sep	oct	nov	déc	jan	Fév	mars	avr	mai	juin	juil	Aout	Année
P(mm)	66,13	47,46	44,4	47,06	50,9	40,66	56,45	64,81	71,58	42,4	19,58	55,63	607,06
T(°C)	25,45	19,87	13,40	9,61	8,19	9,29	12,57	16,45	21,68	27,78	31,83	31,08	227,2
I	11,74	8,07	4,44	2,68	2,11	2,55	4,03	6,06	9,21	13,41	16,48	15,89	96,67
K	1,03	0,97	0,85	0,83	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	12,33
ETP(mm)	118,73	67,48	26,47	13,12	9,92	12,53	28,15	51,58	100,57	166,77	223,77	201,02	1020,11
P-ETP	-52,6	-20,02	17,93	33,94	40,98	28,13	28,3	13,23	-28,99	-124,37	-204,19	-145,39	-413,05
ETR (mm)	66,13	47,46	26,47	13,12	9,92	12,53	28,15	51,58	100,57	113,41	19,58	55,63	544,55
RFU_{100mm}	0	0	17,93	51,87	92,85	100	100	100	71,01	0	0	0	533,66
EX (mm)	0	0	0	0	0	20,98	28,3	13,23	0	0	0	0	62,51
DA(mm)	52,6	20,02	0	0	0	0	0	0	0	53,36	204,19	145,39	475,56

I.4.4. Interprétation du bilan hydrique

Les réserves en eau commencent à se reconstituer dès le mois de novembre, les précipitations l'emportent sur l'évapotranspiration, le mois de novembre annonce le début de saison agricole. Les réserves en eaux arrivent à saturation au mois de février. L'excédent en eau ressentie en ce mois de février s'infiltré progressivement pour alimenter les réserves en eau souterraines. La recharge des nappes se prolonge tout au long du printemps, le niveau piézométrique commence par remonter les puits et les forages se replisseraient ; la coïncidence du niveau piézométrique avec le niveau topographique du sol, générerait une résurgence de l'eau sous forme de chotts marécage et lac. La réponse des nappes à cette recharge se voit à travers l'écoulement des sources, des ruisseaux et des oueds. Cet écoulement de surface va alimenter les plans d'eau libre (lac, barrage, sebkha...).

Le déficit agricole est ressenti au mois de juin et se poursuit jusqu'au mois d'octobre, sur une période continue de six mois. Au début de cette période commence l'épuisement des réserves et la lente mort des plantes s'en suivrait.

Comme le bilan hydrologique est déficitaire nous proposons une politique de gestion rationnelle des ressources en eau qui reposerait sur de nouvelles techniques d'irrigation (encourager la goutte à gouttes) le recyclage des eaux usées comme ressources pérenne et inépuisable imposer des périmètres de protection des ressources actuelles, capter les eaux de surfaces par la construction de petites retenues d'eau qui seraient destinées à l'irrigation et à l'abreuvement des bestiaux.

I.4.5. Calcul du ruissellement

Le ruissellement de surface peut être dû à un dépassement de la capacité d'infiltration du sol (génération de ruissellement hortonien), (in Houha, 2007) ou à un dépassement du seuil de saturation du sol (génération de ruissellement de Dunne). Les fortes intensités des évènements conjugués à la faible capacité d'infiltration des sols (due à des sols souvent compactés et recouvert d'une croûte et une végétation peu abondante) expliquent la prépondérance du ruissellement hortonien dans les zones semi arides. Les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration nous ont déjà permis d'avoir une idée sur l'écoulement. La méthode de TIXERONT-BERKALOFF permet le calcul du ruissellement

$$R = \left[\frac{P^3}{3[ETP]^2} \right]$$

Avec :

R : ruissèlement en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).

L'application numérique de la formule à donner le résultat suivant : R = 72 mm.

I.4.6. Estimation de l'infiltration

Puisque nous disposons des différents facteurs régissant l'équation du bilan hydrogéologique

$$P = ETR + R + I$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

ETR : Évapotranspiration réelle annuelle en mm.

R : Ruissellement annuel en mm.

I : Infiltration efficace moyenne annuelle en mm.

L'infiltration : I = P – (R+ETR) est égale à 9.49 mm.

Conclusion

Le climat de la région est de type semi-aride, les précipitations mensuelles moyennes sont de 50.06mm et la température moyenne mensuelle est de 19.51°C.

La répartition des précipitations mensuelles montre que la région d'étude présente deux grandes saisons bien distinctes, une saison sèche qui s'étend de début de mois de mai à la fin de mois d'aout, le reste de l'année représente la période humide.

Les températures moyennes mensuelles et annuelle varient entre 13.07°C et 25.94°C, Les mois les plus froid sont Jan et fév et les plus chaud sont juil et aout.

Le ruissellement est de l'ordre de 72 mm par contre lame d'eau infiltrée est de 9.49 mm, l'ETR calculé par la méthode de Thornthwait est de 544.55 mm.

Le calcul quotient pluviométrique est : $Q_2 = 50.43$, ainsi que le Climagramme d'EMBERGER indique que la zone d'étude est située dans l'étage bioclimatique Semi-aride frais.

Chapitre II

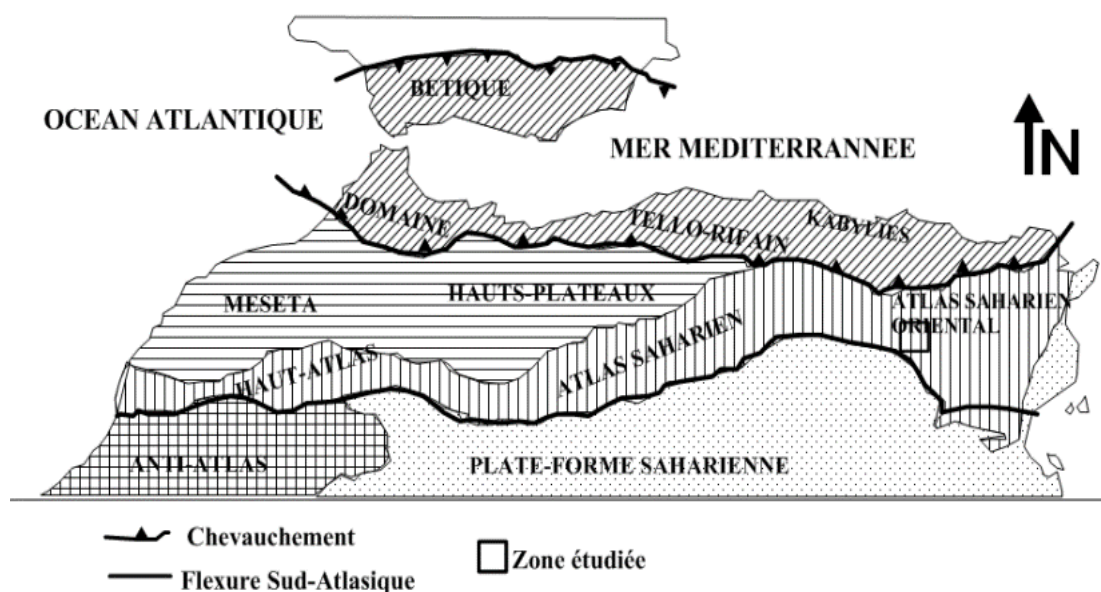
I. Présentation de la structure et contexte géologique régional :

CADRE DE L'ETUDE

Ce deuxième chapitre présente le contexte géographique, géologique et hydrogéologique du bassin de Khenchela.

I.1. Présentation du secteur étudié

La wilaya de Khenchela est située au Nord-est algérien dans la région des Aurès (Fig 07). Khenchela est bâtie sur le bord de la face libre du plateau, une sorte de belvédère d'où l'on domine la vaste plaine de Rémila qui s'étend immédiatement au Nord du massif des Aurès à la latitude $35^{\circ} 26' 9'' N$ et à la longitude $7^{\circ} 8' 36'' E$, sur une superficie de près de 1800 km^2 . Le bassin de Rémila est situé dans les hautes plaines steppiques, entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas Saharien au Sud, c'est un bassin hydrologique endoréique centré sur une dépression fermée de 200 km^2 , Sebkhha de Garâatet-Tarf.



Les limites de la région étudiée correspondent : Les sources sont situées sur au Sud, les reliefs crétacés des Aurès : • les Djebels Aidel (1300 m), Aurès (1600m) et Chélia (2308 m).

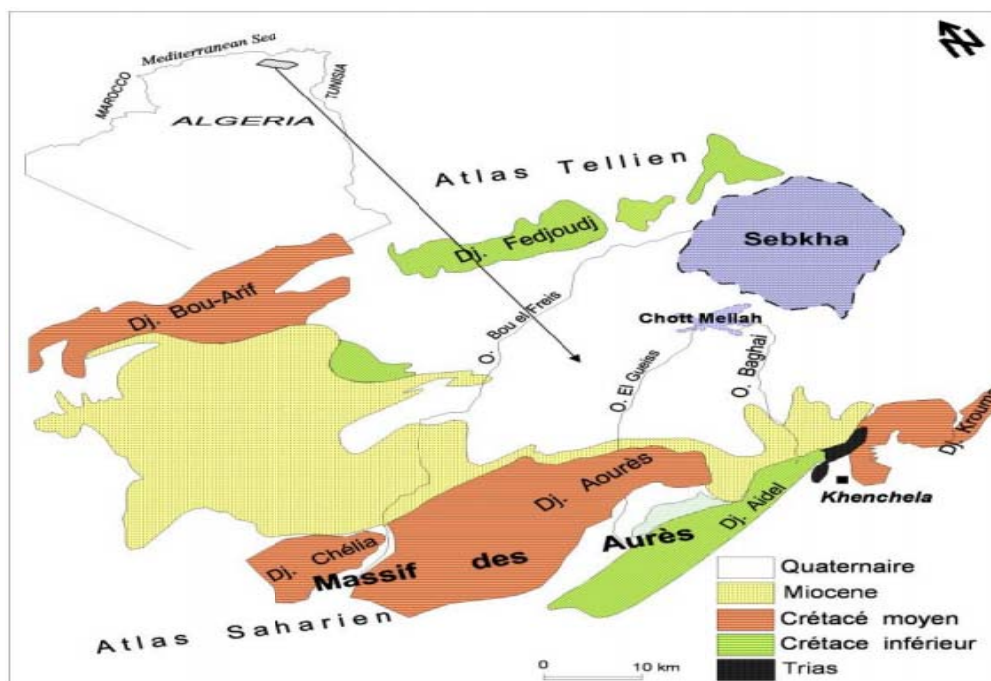


Figure.08 : Carte géographique et géologique du bassin de De Rémila (houha 2007)

Par ailleurs, cette vaste région est divisée par les oueds, El-Gueiss et Boulfreis, en deux sous bassins aux mêmes reliefs (fig. 08). En effet, on distingue le sous bassin de Boulfreis 600 Km² située à l'Ouest du bassin, occupé au Sud par Djebel Chéla, et le Nord est une vaste plaine ; du sous bassin d'El-Gueiss de 500 Km², limité au sud par Djebel Aïdel et Aurès et au Nord s'étend sur une pénéplaine

II. Cadre géomorphologique et structural

II. 1. Cadre géomorphologique :

Carte géographique et géologique du bassin de De Rémila (houha 2007) d'une longueur voisine de 60 km du NO au SE, sur une largeur de 30 km, le bassin de Rémila constitue une dépression endoréique très étendue et relativement élevée, environ 900 m, qui a reçu tous les apports d'érosion des reliefs environnants. Les massifs qui l'encadrent dépassent 1200 m et culminent à 2300 m au sommet de l'Aurès (Djebel Chéla). La zone basse a une altitude de 830 m et présente dans sa partie orientale, une zone de saumures de près de 200 km², la Sebkhah de Garaât-et-Tarf. Les périmètres de ce lac salé sont caractérisés par un niveau plat et une végétation clairsemée éliminée par la forte concentration de sel (65 g/l) et, tout autour, la présence d'une nappe phréatique inégalement salée. Cet état de fait a causé non seulement l'absence de toute végétation, mais aussi, une baisse importante de la productivité des terres agricoles limitrophes, notamment au Nord de Rémila et Baghaji. Cette dépression peut être divisée en trois parties (fig.09) : Une partie centrale plus large, peu profonde qui se déploie autour du village de Rémila

et va jusqu'à l'Ouest du village de Baghai Une partie méridionale plus étendue, en bordure des reliefs sud et qui va sur 40 km, de Khenchela à Boulfreïs. Une partie orientale qui va du village de Baghai jusqu'à sebkha.

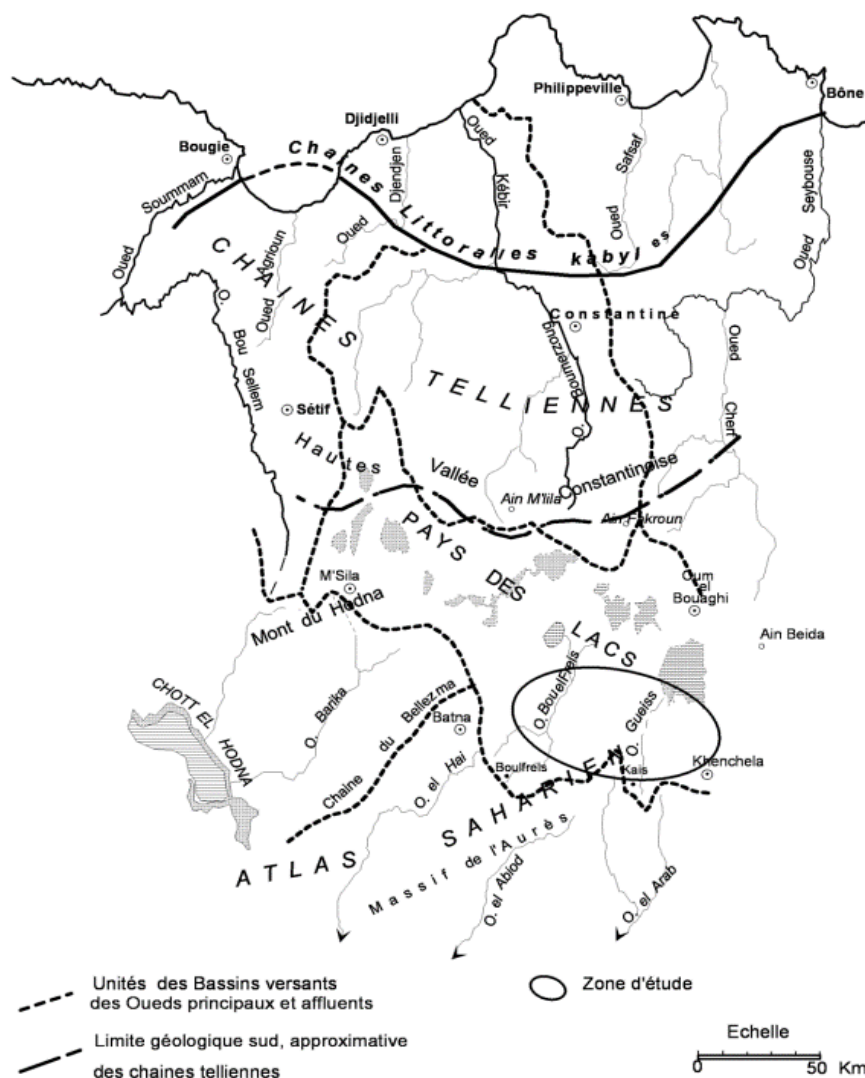


Figure 09 : Cadre géographique et géologique (R. Jaseix-Bellon)

Bien que le relief soit moins marqué au Nord, des buttes molassiques grésifiées s'individualisent au sein de la plaine, à l'Est et à l'Ouest de Kais, des glacis et quelques encroûtements calcaires sont signalé au nord de Khenchela et au Sud de Baghai La géomorphologie du site est caractérisée par une topographie au sol plane sur l'ensemble de la plaine. Les bordures Sud et Nord du bassin sont marquées par des inclinaisons relativement importantes, conséquence d'une activité tectonique ayant affectée ces régions, permettant un écoulement superficiel plus important (Guiraud 73).

Le massif des Aurès, est la barrière montagneuse qui, prolongeant les hauts plateaux de l'Atlas marque brutalement sur la face Sud, la zone saharienne.

En partant d'une altitude moyenne de mille mètres, la plaine saharienne de 100 m au moins est atteinte en 20 km à vol d'oiseaux. Grâce à sa haute position par rapport aux autres régions de l'Atlas saharien, l'Aurès présente des conditions climatiques favorables à l'accumulation des eaux superficielles et souterraines. Il s'élève au milieu de deux bassins de l'Algérie orientale, le bassin des hauts plateaux constantinois et le bassin de Chott Melghir. Il constitue leur ligne de partage des eaux (figure).

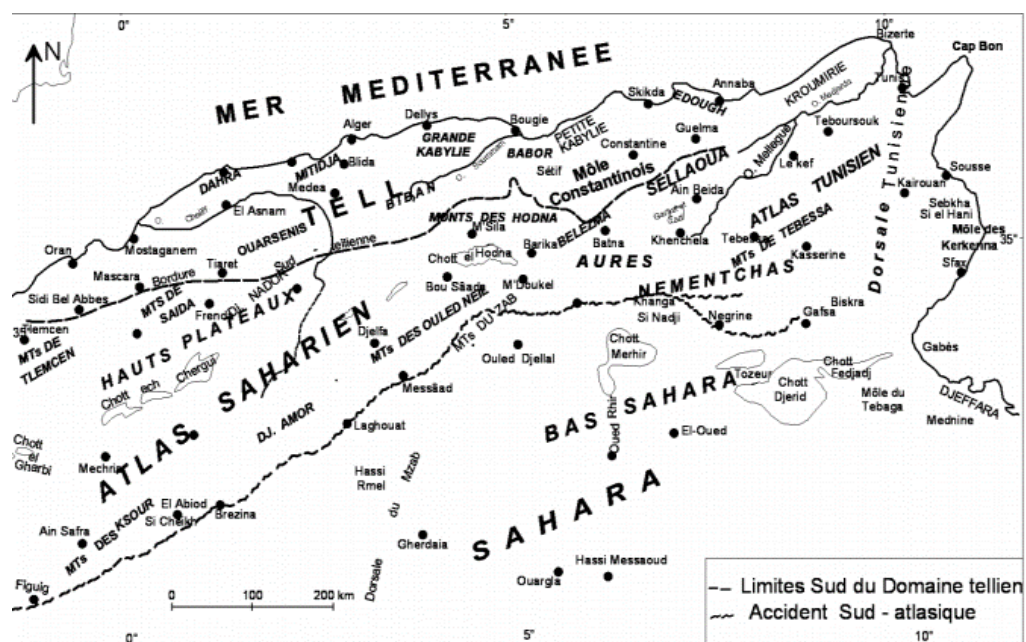


Figure 10 : Localisation des principaux ensembles géomorphologique du Nord de L'Algérie et de la Tunisie (Guiraud 1973)

II. 2. Cadre structural

L'Algérie du Nord, tronçon de la chaîne alpine, peut être subdivisé en plusieurs domaines présentant des styles tectoniques différents. Au Sud du domaine tellien, constitué pour l'essentiel par des unités allochtones, et correspondant par conséquent à la chaîne alpine proprement dite, nous distinguons le domaine atlasique caractérisé par des diapirs et plis coffrés.

Cependant on remarque plus particulièrement la position des Aurès, au niveau duquel la chaîne alpine présente en Algérie sa largeur minimale (Guiraud 1973). A cet effet nous décrivons de façon plus ou moins détaillée, le domaine atlasique comme une ligne structurale.

II -2-1. Le Domaine Atlasique

Le domaine atlasique correspond essentiellement en Algérie à deux grands ensembles morphologiques bien individualisés, Atlas saharien à l'Ouest, Aurès-Nementcha à l'Est, dont l'histoire géologique montre qu'ils appartiennent à une même chaîne. Ces deux ensembles, qui ne se placent pas exactement dans le prolongement l'un de l'autre mais sont légèrement décalés selon

un mouvement dextre, se raccordent par l'intermédiaire d'une zone charnière topographiquement moins élevée et un peu plus complexe sur le plan géologique : la région de M'Doukel-Biskra.

A la lumière des résultats acquis dans les domaines de la chaîne atlasique, principalement par (R. Laffitte 1939, R. Guiraud 1973, Vila 1977), et que l'on peut résumer ainsi pour l'essentiel :

- Le relief de l'Aurès a subi des nombreux dépôts et ses formes actuelles sont dues aux élévations post-pliocènes. La phase de plissements maximum dans l'Aurès débute à la fin du Lutétien ; ils correspondent aux mouvements de l'orogénèse pyrénéenne (Villa 1977).
- Le massif de l'Aurès serait affecté par une forte subsidence lors du Mésozoïque puis énergiquement plissés à la fin de l'Eocène moyen ; Certaines parties du massif s'élèvent, d'autres s'affaissent. C'est dans celles-ci que se déposent les couches rouges, jusqu'à la fin du Pontien.
- Surrection vers la fin de l'Oligocène de l'ensemble de la chaîne quelques plis et flexures de direction E-W se produisent alors dans les Aurès marquée par un substratum sédimentaire hérité des transgressions marines du secondaire et du tertiaire.
- Les mouvements post-burdigaliens ont modifié notablement les formations Miocènes marines et continentales. Ainsi les grès burdigaliens en bordure Sud de la plaine sont relevés à 60 – 80m entre Timgad et Kais et à 20-50 m à l'Est de Kais. Ils présentent au Sud – Ouest de la plaine une allure synclinale entre le flanc Sud et le Djebel Amrane. La direction générale Est-ouest est d'autre part coupée par des accidents orthogonaux.
- A la fin du Tertiaire, une phase d'érosion aboutit au façonnement des formes Crétacé et au comblement des dépressions par des dépôts continentaux. Le relief de l'Aurès a subi des nombreux dépôts et ses formes actuelles sont dues aux élévations post-pliocènes.
- Possibilité de rencontrer des accidents obliques ou perpendiculaires aux structures, quelques grandes cassures d'orientation NW-SE ayant notamment été reconnues par R. Laffitte (1939) et par G. Dubourdieu (1956).
- Mise en place d'injection triasique, « diapirs ou dôme de sel », à différentes époque, Turonien supérieur, post-Lutétien (Lessard L. 1957).
- L'anticlinal crétacé du Djebel Amrane, qui divise la plaine en deux synclinaux, présente des pendages assez élevés, atteignant 50°. Sa prolongation vers l'Est, sous le recouvrement récent, est très vraisemblable, puisque les forages qui se situent au centre du bassin, à 10 km au minimum à l'Est de la terminaison du Djebel Amrane, ont rencontré le Crétacé à des profondeurs très faibles :
- Ce sont des dépôts quaternaires continentales constitués d'alluvions regs, terrasses occupant la plus grande superficie du territoire du synclinal de Khenchela qui représente

une vaste structure régulière wilaya, Ils sont répartis dans la zone nord (plaine alluviale de Rémila)

- Le synclinal de Khenchela qui représente une vaste structure régulière est constitué par les successions géologiques suivantes : le Crétacé inférieur, épaisses séries en grande partie continentale, formées par des dépôts calcaires, marnocalcaires et marno-calcaire-argileux. Toute cette région marquée par un substratum sédimentaire hérité des transgressions marines du secondaire et du tertiaire, aurait connu vers la fin de l'Oligocène une phase d'orogénèse extrêmement active qui a entraîné la surrection de l'Atlas saharien.

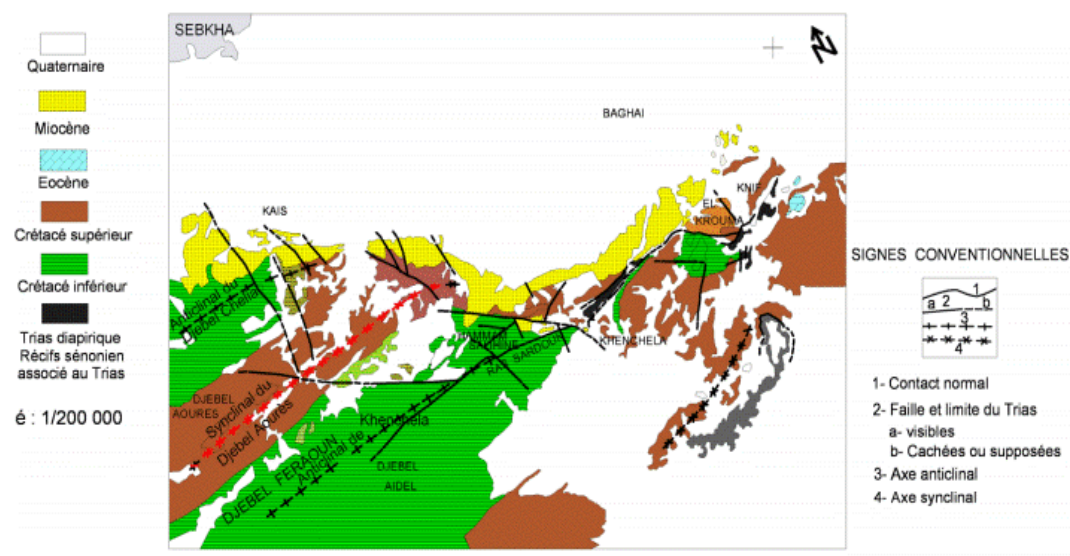


Figure 11 : Cadre structural simplifié du bassin de Rémila (J.M Vila 1977)

II -2-2. Cassures et flexures

Les divers documents publiés par R. Laffitte ne font état que d'un très petit nombre de failles, les une directement directionnelle (dans les anticlinaux de Khenchela, Djebel Aidel et Chélia), les autres obliques et orientés presque exclusivement au NW.

En fait les cassures sont nombreuses dans le massif de l'Aurès et elles se répartissent très généralement suivant des directions voisines de NW-SE (les plus fréquents), E-W ou N 60°

Cassure E-W

Des accidents présentant une orientation E-W ou très voisine se rencontrent assez régulièrement dans l'Aurès tandis que de grandes flexures montrant également cette direction limitent le massif aussi bien au Nord, entre Tingad et Khenchela, que, de façon plus nette, au Sud

Du nord vers le sud les principales cassures de ce type se situent :

- Au sud du Djebel Chélia
- Dans la chaîne Aidel

Les anticlinaux les plus dégagés par l'érosion (Chélia et Khenchela) sont parcourus dans leur zone axiale par des failles parallèles à la structure, qui tantôt en effondrent la voûte ou l'un des flancs (Djebel Aidel, Djebel Chélia) tantôt accompagnent au contraire la percée d'horizons résistants plus profonds (Albien de djebel Aidel).

Ces failles ont une orientation voisine de N 60° E, et longe djebel Aidel et provoque localement la remontée de calcaires Albien contre la série de marnes cénomaniennes (fig. 11)

II -2-3. Localisation et âge de mise en place des pointements triasiques

Des affleurements de roches triasiques, de taille et de constitution variable, perçant leur couverture mésozoïque et cénozoïque de façon normale, en une dizaine de points dans l'Aurès. Ou sur ses bordures (fig. 11)

Un affleurement isolé situé au NW du Djebel Aidel, perçant l'Aptien et probablement en relation avec l'une des failles directionnelles qui parcourent l'anticlinal de Khenchela ;

Plusieurs extrusions de dimensions importantes morcelant le Crétacé supérieur au voisinage de Khenchela ; l'une d'elles a joué dès le Turonien supérieur ou le Sénonien inférieur, près des djebels Krouma et Knif, les autres sont antérieurs au Miocène qui peut les recouvrir en discordance ; outre les grands accidents d'orientations N 30 à N 60° E que l'on observe sur le terrain, je pense qu'aucune cassure profonde, oblique sur l'Ouest et responsable de la disparition brusque vers l'Est des assises du Crétacé inférieur au niveau de Khenchela, est également à l'origine de ces remontées triasiques. Ce qui montre que les extrusions se sont toujours faites à la faveur d'accidents importants et peu après le jeu de ces derniers (R. Guiraud 1973).

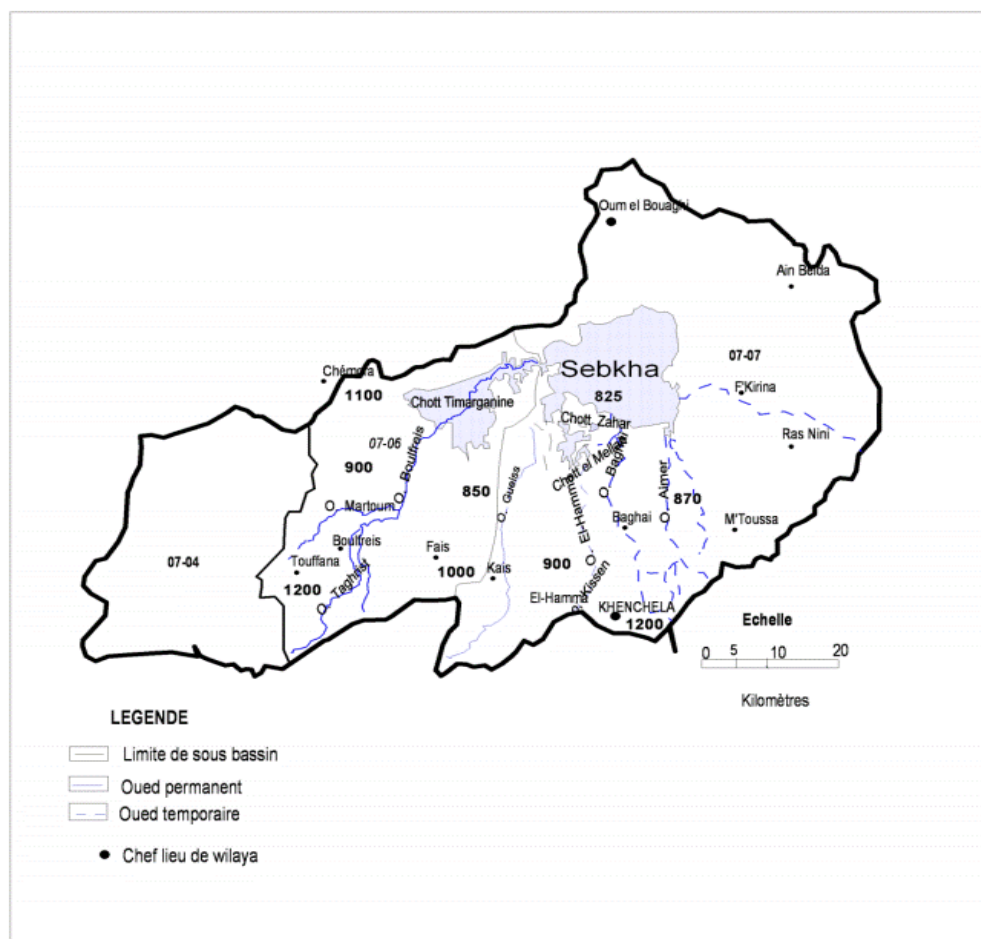


Fig. 12 : Réseau hydrographique et distribution des agglomérations urbaines (Houha 2007)

III- Réseau hydrographique

Oued Boulfreis et quelques affluents mineurs drainent l'essentiel de notre région d'étude. Il prend sa source au pied du massif de Chélia, puis suit son trajet SW-NE en traversant les glacis calcaires de Taberdga. Son cours s'infléchit en direction de l'Est à la hauteur de Argoub Roknia pour emprunter le centre de la dépression alluviale jusqu'à Sebkhah (fig. 11). Boulfreis collecte principalement les eaux en provenance des reliefs s'étendant au sud de la région considérée ainsi que celle de la plaine alluviale. L'écoulement est quasi-pérenne avec un débit moyen à l'aval de 22 Hm^3 . Les crues importantes sont généralement observées à la fin de l'automne et à la fin du printemps. Oued Gueiss, prend sa source au pied de Djebel Aourès et draine le sous bassin d'El-Gueiss selon un axe d'écoulement SW-NE, et termine son parcours dans les chotts (fig. 11). L'écoulement est intermittent avec un apport de 12 Hm^3 /an dont 8 Hm^3 sont stockés par le barrage en amont de la plaine.

- **Les hauts plateaux :** elles dessinent une bande ENE - WSW, d'une longueur de 700 Km et une largeur de 250 Km, délimitée : vers le Nord par le front de chevauchement tellien et vers le Sud par l'accident nord atlasique, elle disparaît vers l'Est au niveau du Hodna. Cette zone

correspond aux domaines des grands chotts d'Ouest en Est. On rencontre chotts Ech-Chergui, Zahrez Rharbi, Zahrez Chergui et El Hodna. Ces hauts plateaux forment une vaste dépression comblée par l'épaisse couche de sédiments accumulés depuis le Miocène supérieur jusqu'au Quaternaire.

IV·GEOLOGIE

L'Atlas saharien : c'est une chaîne intercratonique d'Afrique du Nord qui s'étend sur plus de 1000Km, depuis le Maroc (haut et moyen Atlas) jusqu'au Tunisie (Atlas tunisien) d'une largeur qui avoisine les 100Km. Elle est limitée par l'accident sud-Atlasique qui met en contact avec la plate-forme Saharienne au Sud et accident Nord Atlasique au Nord. Cette chaîne est orientée suivant une direction générale NE – SW représentée d'ouest en Est par les monts des Ksors, Dj Amor, les monts des Ouleds Nail, les Aurès et les Nemamchas. Elle est formée dès l'Eocène moyen (Lutétien). Ce domaine est caractérisé par des plis plurikilométriques et régit par des failles sédimentaires dont l'orientation est NE-SO, avec des manifestations diapiriques.

IV.1. Cadre litho stratigraphique :

IV.1.1. Cadre géologique

Nos connaissances géologiques sur la région d'étude sont largement inspirées des travaux et études régionaux et de synthèses sur le massif des aurès, sur les hautes plaines steppiques et sur les zones humides. La plupart de ces études ont été axées sur les caractères stratigraphiques, géomorphologiques, sédimentologiques et structurales (R. Laffitte 1939, R. Guiraud 1973, CGG 1969, J.M.Vila 1977, M.T. Benazouz 1984, F. G asmi 1989, B. Houha 1996). Les travaux sur l'hydrogéologie sont rares, hormis les travaux de CGG (1969-1970) F. Gasmi (1989) B. Houha (1996) et ANRH (2002) et quelques travaux sur le sud des Aurès.

IV – 1.1.1. LIITHOSTRATIGRAPHIE (Fig. 08, 11 et 13)

La puissante série stratigraphique du bassin étudié est composée à sa base par un socle mésozoïque sur lequel repose, en discordance, une couverture sédimentaire allant du Trias supérieur jusqu'au Quaternaire (Fig. 13).

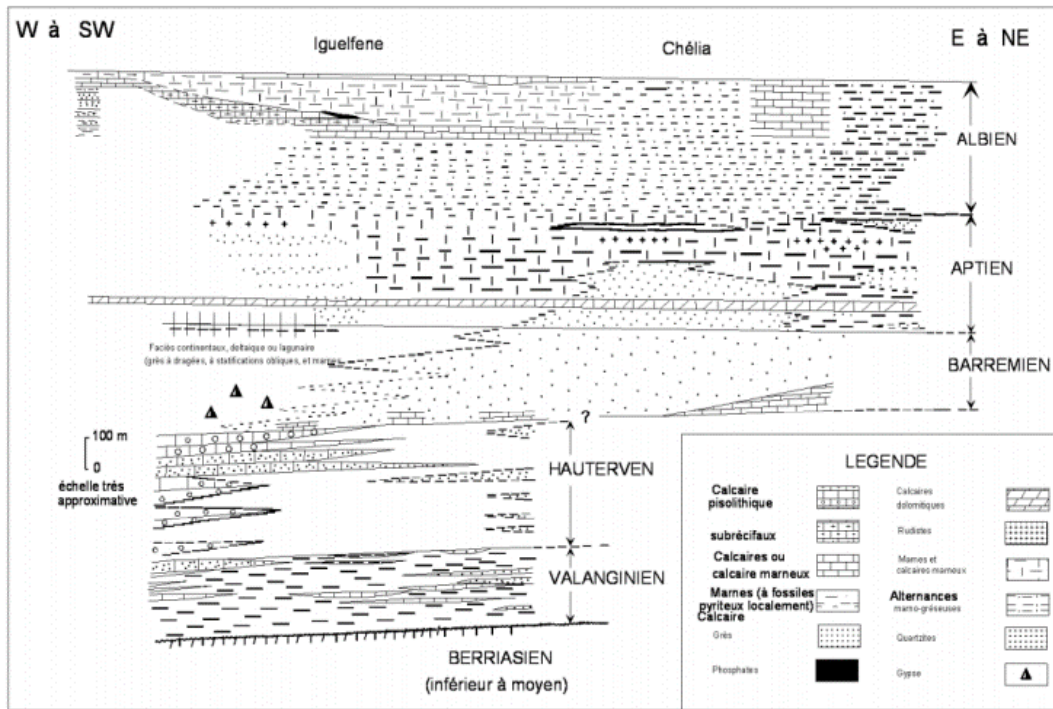


Fig. 13. Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de L'Aurès d'après R. Laffitte (1939) et modifié par R. Guiraud (1973).

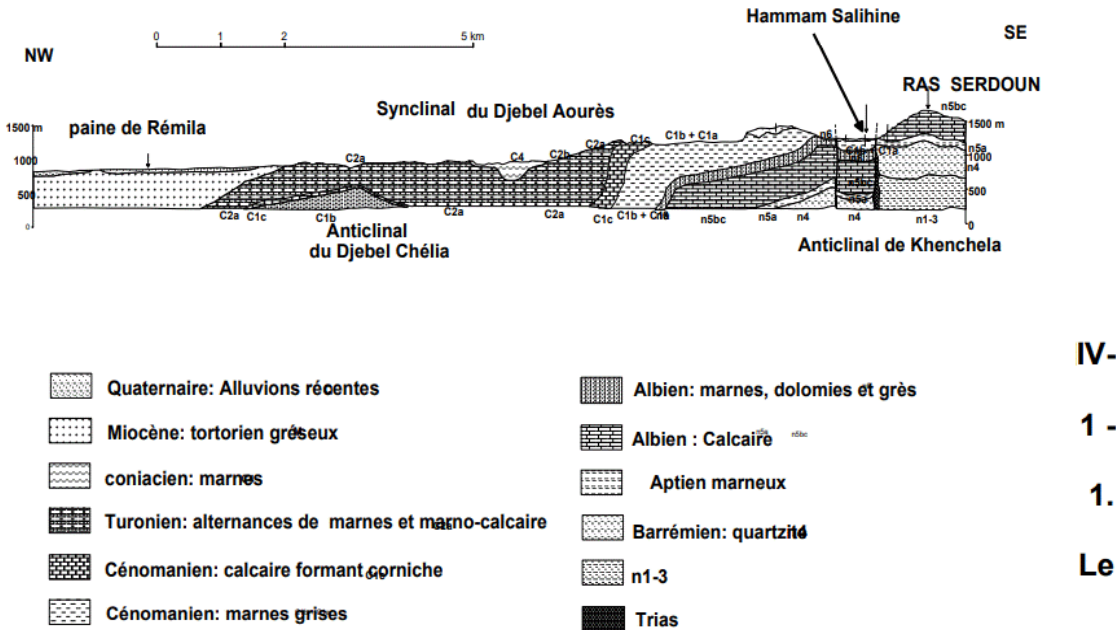


Fig.14 : Coupe interprétative dans le bassin de Rémila d'après Vila (1977)

IV – 1.1.2. Trias

Dans les régions qui entourent la dépression de Rémila les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisé à proximité de Khenchela (fig. 08), où il isole le Miocène du Crétacé,

suivant une bande de 4 à 5 km de long et de 300 à 400 m de large et sur Djebels El Krouma et Knif en contact anormal avec l'albien, le Cénomaniens et le Sénonien

La série triasique comportait probablement à l'origine, de la base vers le sommet : une formation évaporitique épaisse, en particulier sous la forme d'amalgames intensément replissés, représentent les indices les plus sûrs de la présence du Trias.

Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux.

L'abondance du sel caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela et Krouma, mais cela tient, non pas à un caractère original particulier au Trias de cette région, mais au fait que ce pointement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être dissous, tandis que dans les autres pointements, qui sont anté-miocènes, il a disparu depuis longtemps (R. Laffitte 1939).

Les argiles et marnes bariolées, de couleur verdâtre, rougeâtre à violacée, constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement,

Des passées calcaro-dolomitiques, de couleur gris bleuté à noirâtre, généralement bien stratifiés et présentant parfois quelques passées marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques

IV – 1.1.3. Le Crétacé

1. Crétacé inférieur

Dans le vaste massif de l'Aurès, le Crétacé inférieur constitue l'essentiel des reliefs les plus élevés : Azreg-Ichmoul, Chelia, Aidel

R. Laffitte (1939) a soigneusement décrit la plupart des faciès et c'est à partir de ses descriptions, modifiés ou complétés en quelques points, que R. Guiraud (1973) a établi (fig. 13) qui résume de façon schématique les principales variations observables.

On notera dans l'Aurès le développement important des dépôts gréseux aux dépens des dépôts carbonatés. Je me bornerai donc ici à souligner les quelques éléments qui constituent le paysage géologique du bassin de Rémila.

1.1. Barrémien- Aptien

Dans le sud-ouest du massif de l'Aurès, le Barrémien est représenté par un faciès continental net : grès à dragées, marnes rouges, montant jusque dans l'aptien. Lorsque l'on se déplace vers le Nord-ouest, les couches passent à des quartzites sans fossiles à la base (Barrémien) et à des marnes fossilifères (Aptien inférieur) au sommet. Dans le Nord, ces quartzites sans fossiles présentent, surtout à la base de l'étage, des intercalations de calcaires marins (Djebel Aidel aux environs de Khenchela et Bou Arif), l'épaisseur de l'étage varie de 400 m environ (Sud) à 250 m (Nord).

Cette région a alors été le siège d'une sédimentation puissante (plus de 2000 m de dépôts parfois), principalement grés-argileux (R. Laffitte 1939). Les intercalations carbonatées sont peu épaisses ; elles se cantonnent dans l'Aptien moyen à supérieur et l'Albien supérieur (R. Laffitte 1939).

Les couches précédentes sont surmontées par des marnes puis par des masses calcaires avec rares intercalations marneuses (Laffitte). Une barre de calcaire dolomitique roux, reconnus à ce niveau dans le massif de Khenchela (Guiraud). Viennent ensuite des calcaires à Orbitolines, pouvant alterner avec des marnes et surtout des grès.

Enfin R. Laffitte a remarqué la présence assez constante, au-dessus des calcaires à Orbitolines d'un niveau peu épais (quelques dizaines mètres au maximum) de marnes ou calcaire marneux

1.2. Albien

2. Crétacé supérieur

L'Albien débute dans l'Aurès, selon la description de R. Laffitte, par des alternances de grès et de marnes atteignant le plus souvent 150 à 200 m d'épaisseur.

Puis les calcaires, assez rares jusque-là, tendent à se substituer aux grès, sur une cinquantaine de mètres environ. Au-dessus de ces assises viennent des alternances de calcaires et de marnes (40 m environ)

L'Albien affleure dans les anticlinaux de l'Aurès, en bordure Sud du bassin de Rémila au cœur de Djebel Aidel dans l'anticlinal de Khenchela où l'on distingue un ensemble à dominante marneuse surmonté par des grès fins. Le passage aux marnes cénomaniennes étant assez progressif. Le Crétacé supérieur forme l'essentiel des affleurements mésozoïques dans les confins de l'Aurès.

2.1. CénoManien

Le CénoManien comporte une série de marnes grises dans lesquelles s'intercalent des calcaires fins argileux, une partie médiane formée de marnes grises, vertes ou ocre, contenant parfois du gypse diffus ainsi que des passées argileuses ;

Une série terminale constituée de marnes et de calcaires formant une corniche (proportion de ces derniers augmente vers le sommet)

Le CénoManien est présent dans tous les anticlinaux de l'Aurès. Il est essentiellement calcaire-marneux. La partie inférieure est surtout marneuse. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massifs mais peu épais. L'épaisseur de cette formation est très variable. Elle peut atteindre 500 à 600 mètres au cœur de l'Aurès.

2.2. Turonien

Le Turonien comporte, en effet, au-dessus des marno-calcaires de base, un ensemble de marnes beige et calcaires. Dans le Djebel Amrane, le Turonien est schisteux à la base, calcaire dans la partie moyenne, et Marno-calcaire au sommet. L'épaisseur du Turonien peut atteindre 800 mètres dans les faciès Marno-calcaires du cœur de l'Aurès, mais varie de 1000 à 300 mètres dans les calcaires.

IV- 1.1.2. Les formations Cénozoïques (fig.08, 11 et 14)

Le Néogène Le Néogène est assez bien conservé au Nord de l'Aurès dans un bassin qui s'étend approximativement de Batna à Khenchela. Reposant en discordance sur le Crétacé on observe généralement à la base de la série des conglomérats et calcaires à Algues, dont la puissance dépasse rarement une vingtaine de mètres. Au-dessus viennent des alternances de marnes gréseuses gris-brun et de grès calcaireux qui, d'après R. Laffitte (1939), peuvent se poursuivre aux environs 250 m entre Lambèse et Timgad et 300 m entre Khenchela et Kais sur la bordure Sud du bassin de Rémila, où elles sont surmontées par 150 m de marnes gréseuses grises. Il convient de préciser que ces formations Miocènes marines, classées fréquemment sous le terme de « grès », ne comportent en réalité que quelques bancs de grès noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses Ce qui fait que ces marnes gréseuses, paraissant très friables à l'affleurement, constituent en réalité une roche assez dure et probablement peu perméable.

La série comporte ensuite des marnes argileuses rouges gypseuses continentales qui sont discordante sur le Crétacé (300 à 400 m) admettant encore à leur base quelques récurrences grises ou vertes.

Les affleurements ne sont connus qu'au Sud du bassin, jusqu'au Djebel Amrane. Il est probable qu'en profondeur, l'extension de ces dépôts soit limitée au prolongement de cet anticlinal sous la plaine. Ceci serait corroboré par les forages de Kais 1, Bir Boussaha, Sonda qui ont atteint le substratum Crétacé sans traverser le Miocène marin

Reposant en concordance sur les niveaux précédents, R. Guiraud (1973) a noté à Sidi Mançar (ex Lavéran) (entre Batna et Khenchela), la succession suivante :

Des alternances de grès blancs, friables, et de marnes grises à mauves (120 à 150 m) qui forment les premiers reliefs du Djebel Tagratine ; une cinquantaine de mètres de marnes grises ; environ 80 m de grès gris à brun admettant quelques passées de marnes gréseuses

IV- 1.1.3. Quaternaire

Les formations Quaternaires du bassin de Rémila n'avaient fait objet d'aucune étude détaillée systématique lorsque j'ai commencé une recherche dans cette région.

CGG (1970), Laffitte (1939), Lessard (1951), Gasmi (1989) et Durozoy (1948) ont eu le mérite de présenter successivement de courtes synthèses dans lesquelles les principaux problèmes étaient abordés. Mais la seule analyse stratigraphique, Tectonique et morphologique assez poussée publiée est celle de R. Laffitte (1939) qui malheureusement limitée au voisinage de l'Aurès et ses confins.

Le Quaternaire ne comporte, dans le bassin de Rémila, que des formations continentales généralement épaisses par endroits, souvent en présence de croûtes calcaires.

Dans la plaine de Rémila on n'observe plus que du Quaternaire récent qui est entaillé par quelques oueds mais qui est recoupé par de très nombreux puits et forages. L'étude des coupes fournies par ces derniers comme par les divers profils de sondages électriques menés par CGG (1970) m'a permis d'établir l'évolution de la puissance et des faciès de recouvrement alluvial.

Dans le bassin de Rémila, les terrains Quaternaires présentent des faciès et des dispositifs assez variables qui résultent de la diversité de la lithologie et de la structure antérieures.

Les formations quaternaires sont particulièrement bien développées dans les régions comprises entre les reliefs crétacés des monts des Aurès au sud et la dépression centrale du bassin de Rémila, établie principalement sur le Néogène (Fig. 08 et 13).

Les piémonts sont ici généralement modelés en glacis à couverture détritique peu épaisse, dont le plus visible sont situés au sud de Baghai et Kais, à matériel grossier. Ces glacis sont constitués au voisinage immédiat des reliefs par des alternances de couches de cailloutis et blocailles et de colluvions avec un enrichissement en calcaires dans les horizons superficiels.

Lorsqu'on s'éloigne du piémont l'épaisseur des couvertures de glacis diminue rapidement.

Les formations anciennes sont constituées par des alternances de conglomérats et de sables surmontés par des sédiments fins argilo sableux, rouge au sommet desquels apparaît une croûte calcaire blanche.

Des alluvions récentes constituent la plaine de Rémila ainsi que les bas-fonds des principales vallées provenant des reliefs environnants.

L'examen de quelques coupes de forages montre que la sédimentation est en majeure partie argileuse et marneuse, avec une proportion importante de gypse et présente un maximum d'épaisseur au centre de la plaine et au voisinage du Chott.

Elles débutent par un conglomérat de base assez grossier, dont la puissance est irrégulière, de quelques mètres au Sud (Kais, Menzer) elle dépasse par exemple une vingtaine de mètres au centre (Bir Boussaha, ZK16, ZK10). Au-dessus, des lentilles de galets et gravier roulés à éléments gréseux peuvent s'interstratifier au sein d'argiles sableuses qui forment l'essentiel du dépôt.

Superposé à cet ensemble vient une nouvelle formation qui comporte des passées de poudingues peu épais et plus fins, à sa base et qui surmontent des sables et sables argileux.

Au Sud du bassin, dans la région de Kais, le Plio-Quaternaire est constitué d'alluvions récentes formé de graviers et galets roulés à éléments gréseux sur une épaisseur de 3m 50. En dessous on trouve des alluvions marneuses d'épaisseur inconnue d'une épaisseur de 7m50. Les éboulis sont constitués par des blocs de grès toutes tailles. Un cône de déjection torrentiel qui occupe la partie Sud-Est et est formé de cailloux gréseux et d'argile sableuse d'une épaisseur de 3m (Laffitte 1939 et Vila 1977).

IV.1.2. Cadre Hydrogéologique

IV.1.2.1. Lithologie de l'aquifère

Les nappes avoisinant les affleurements du massif des Aures se développent dans des terrains de nature et de texture sont variables (Fig. 15). Il s'agit de formations détritiques du plio quaternaire, des formations gréseuses du Néogène et des marno-calcaires du Turonien.

2.1. Substratum : structure profonde

Les grandes lignes structurales du substratum anté-quaternaires sont de marnes cénomaniennes. Ce sont ces marnes qui constituent le substratum au voisinage du massif de l'Aures. Le substratum calcaire se trouve limité à la zone Ouest, au voisinage de Djebel Amrane, et à la partie Sud.

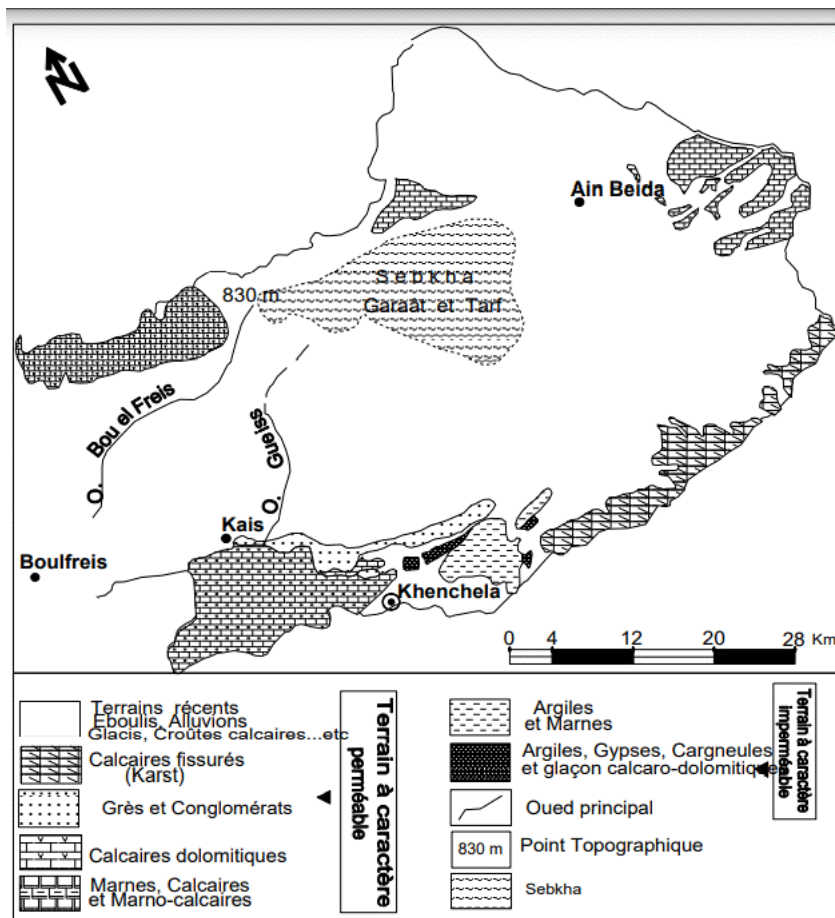


Fig. 15 : Unités hydrogéologiques dans les Aurès (in houhaa 2007)

IV.1.2.3. Terrains Néogène

Les formations miocènes s'allongent le long de la bordure sud du bassin avec une allure synclinale délimitée sous le recouvrement quaternaire. Il s'agit de grès marin noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses verdâtre ou gris-bleu et constituent en réalité une roche assez dur et peu perméable. Cette formation n'est pas suffisante pour qu'une nappe continue puisse s'y développer (CGG 1970).

Ces grès présentent une limite au Nord et se terminent en biseau ou réduits en épaisseur par l'érosion.

IV.1.2.4. Le Plio-Quaternaire

Les terrains quaternaires sont le lieu de bonnes circulations d'eau, l'épaisseur saturée de cette formation est suffisante. Il est formé de plusieurs niveaux grossier, sables, graviers, conglomérats bien développé, dans la partie Ouest et centre de la plaine. Ces niveaux grossiers se présentent sous la forme de vastes lentilles parfois sans liaison entre elles, en prolongement du djebel Amrane et du massif miocène de Boulfreis. Il est moins important et moins profond dans la partie Sud-Est de la plaine. Il constitue donc la couverture perméable qui permet l'infiltration des eaux météoriques, cet ensemble joue un rôle hydrogéologique important du fait de sa perméabilité en général excellente. C'est dans cette formation du remplissage plio quaternaire que la nappe de Rémila est contenue.

IV.1.3 Auifères du pourtour Auresien

L'aquifère Auresien est un de sédiments détritiques du PlioQuaternaire (CGG.). L'alternance des dépôts d'argile, marnes, sables et graviers plus ou moins grossiers sur une épaisseur de plus de 250 m (ANRH) due à des écoulements souvent torrentiels et violents, a donné lieu à des structures lenticulaires, surtout en profondeur, l'aquifère superficiel étant plus continu. Au niveau de la plaine de Rémila, deux horizons productifs séparés par des couches semi-perméables ont été dénombrés sur 19 forage (ANRH 2000) de 70 à 279 mètres de profondeur, témoignant de l'existence de deux nappes profondes contenues dans les différents niveaux grossiers du remplissage est mise en évidence par la prospection géophysique, l'existence d'une zone artésienne centrée sur le forage ZK16, au centre de la plaine témoignent de la mise en charge des niveaux profonds carbonatés qui alimentent probablement, par drainances ascendante les niveaux conglomératiques.

L'analyse des coupes lithologiques et des corrélations des forages, ainsi que la piézométrie montrent en revanche une nette séparation d'Ouest à l'Est du bassin entre un "niveau superficiel" et un "niveau profond", par une couche semi-perméable (CGG1970).

Officiellement les forages sont censés ne capter que les niveaux grossiers profonds du remplissage plio quaternaires et les puits ne captent que le niveau superficiel qui est la nappe phréatique.

IV.1.4. Les principaux aquifères

Par suite de la grande complexité structurale et de la diversité lithologique de la zone étudiée, on dénombre, en fonction de leur importance, deux types d'aquifères

- **Les aquifères alluviaux** : deux types d'alluvions peuvent être distingués : les alluvions anciennes et les alluvions récentes qui reposent sur les premières. Les alluvions anciennes sont constituées de galets, graviers et sables bien roulés ou très émoussés. Les alluvions récentes présentent d'importantes variations de faciès mais sont toujours composées de dépôts fins. Ainsi l'aquifère des alluvions anciennes est localement captif ou semi captif sous les limons (DUROZOY, 1970). Ces aquifères représentent la plus importante ressource régionale en eau souterraine occupent le bassin de Rémila et tout autour du massif des Aurès. Ils sont constitués d'éléments détritiques grossiers, sable, gravier et conglomérats, emballés dans une matrice argilo limoneuse et sont le lieu de bonnes circulations d'eau, l'épaisseur saturée de cette formation est suffisante. Ils correspondent à un réservoir multicouche à cause de la présence de lentilles argileuses parfaitement interconnectée d'un point de vue hydrogéologique. La nappe est presque en charge et peut même être artésienne. Les nappes alluviales dans l'ensemble libres et continues, sont quelques fois captives.

- **L'aquifère miocène** : s'allongent le long de la bordure sud du bassin avec une allure synclinale délimitée sous le recouvrement quaternaire, ne présente qu'un intérêt local et est, de ce fait, peu exploités. Il s'agit de grès marin noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses verdâtre ou grisbleu et constituent en réalité une roche assez dur et peu perméable. Cette formation n'est pas suffisante pour qu'une nappe continue puisse s'y développer (CGG 1970). Ces grès présentent une limite au Nord et se terminent en biseau ou réduits en épaisseur par l'érosion (CGG 1970). L'aquifère des calcaires Maastrichtien se prolongent sur le pourtour sud du massif des Aures le long des djebels Aidel, Djebel Faraaoun. Ce sont des calcaires fissurés et karstifiées sur de grandes épaisseur très profonds qui sont recouverts par une large bande de Marnes du Turonien et tous repose sur les marnes cénomaniennes qui constituent le substratum de cet aquifère

V- Identification de la typologie des nappes aquifères du bassin de Remila

V- 1. Lithologie et âge des formations aquifères

L'aquifère le plus important est d'âge Mio-Plio-Quaternaire, il est constitué de dépôts tels que

- Les conglomérats.
- Les graviers plus ou moins hétérogènes.
- Les graviers sableux.

V- 1.1. Aquifère superficiel

L'alternance des dépôts de graviers hétérogènes, argile rouge, conglomérats, marnes gréseuses plus ou moins grossiers sur une épaisseur de plus de 150m, due à des écoulements souvent torrentiels et violents, a donné lieu à des structures lenticulaires, surtout en profondeur.

L'aquifère superficiel est contenu dans le remplissage quaternaire dans des intercalations argilo sableuses et dans des sable et graviers. C'est un aquifère multicouches séparés par des argiles et des marnes

V- 1.2. Aquifère profond

Sous la nappe phréatique existent plusieurs nappes reconnues profondes contenues dans les différents niveaux grossiers du remplissage est mise en évidence par la prospection géophysique et par les forages traversant entièrement les alluvions jusqu'au substratum. Les nappes sont superposées et séparées par des couches plus ou moins imperméables intermédiaires et ont caractéristiques hydrodynamiques différentes (ANRH 2002).

L'existence d'une zone artésienne au centre de la plaine ou le niveau statique atteint plus de 8 m, qui témoignent de la mise en charge des niveaux profonds calcaires Crétacés et qui alimentent par drainances ascendante les conglomérats profonds qui doivent reposer directement sur les calcaires turoniens au Sud-Ouest et sur les grès du Miocène au Sud (ANRH 2002).

L'épaisseur, la profondeur et la transmissivité des nappes profondes varient dans les différentes régions de la plaine. En général la transmissivité, $10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$, est grande dans la région ouest et centre de la plaine dans les formations des conglomérats et graviers hétérogènes. La transmissivité dans ces zones augmente avec la profondeur car les couches peu profondes sont plus argileuses que les couches profondes qui sont grossières. L'exploitation de la nappe est très grande dans ces régions et petite dans la zone Est.

V- 2. Présentation et nature des nappes aquifères

V- 2.1. Nappe phréatique

La nappe aquifère est contenue dans le remplissage quaternaire dans des intercalations argilo sableuses et dans des sable et graviers. C'est un aquifère multicouches séparés par des argiles et des marnes Les zones d'alimentation se situent : Principalement au Sud, à partir du versant Nord du Massif de l'Aurès et à l'Ouest, à partir du Djebel Amrane.

L'alimentation par le Djebel Fedjoudj au Nord est considérablement plus réduite. Il faut noter que le rôle joué par les Oueds est conséquent sur l'alimentation de la nappe phréatique. Il

semblerait que certaines eaux s'échappent des oueds, Gueiss, Boulfreis et Baghai, pour alimenter la nappe (Houha, 1997).

V – 2.1.1. Profondeur de la nappe

La nappe est dans l'ensemble de la plaine peu profonde et se situe vers 5 m dans toute la partie centrale et Ouest de la plaine. On remarquera une anomalie importante dans la région de Kais, où la nappe est profonde et atteint jusqu'à 30 m pour se trouver très rapidement à 5 m de profondeur à quelques kilomètres au Nord (CGG, 1970 et ANRH, 2002).

V – 2.2. Nappes profondes

Les nappes profondes sont reconnues par quelques forages qui ont permis de tester les formations Quaternaires et récentes. Aucune autre formation antérieure (Grès miocène ou calcaires crétacés) n'a été testée dans les limites de la plaine (d'après les données de ANRH).

Les forages captent tous des niveaux grossiers ou des conglomérats dans le remplissage Quaternaire.

V – 2.3. Les eaux des calcaires et des grès miocènes de la bordure Sud

Le versant nord du massif des Aurès, constitué par les calcaires crétacé et les grès miocènes ont un pendage dirigé vers la plaine (direction des couches SE) assurent une réalimentation par vidange latérale et profonde sur la bordure Sud de la plaine, avec un débit de 1.11 m³/s (A.N.R.H. 2002). L'écoulement alimente, dans ces couches, les nappes des alluvions de la plaine. Comme les formations, crétacé et miocène, plongent sous le recouvrement plio quaternaires ; ces dernières constituent un grand front d'alimentation.

Conclusion

Dans le secteur étudié, le Crétacé inférieur s'est déposé sous forme de calcaires marneux, de marne, de calcaire gréseux et des calcaires compacts. Sur le secteur étudié, l'Aptien affleure au Djebel Fedjoudj, au Nord du bassin. Dans l'ensemble du massif du Fedjoudj, les faciès gréseux sont donc très réduits et il y a prédominance de calcaires néritiques à Orbitolines et de dolomies.

L'Albien existe dans les anticlinaux des Aurès, mais n'affleure pas au Nord dans la chaîne du Djebel Fedjoudj. Dans l'Aurès, il présente souvent un faciès gréseux, marneux et dolomitique il devient franchement marneux.

Au Sud du bassin, l'Albien est représenté sur la bordure de l'Anticlinal de Khenchela (Djebel Aidel).

Le tertiaire est constitué d'argiles rouges gypseuses et repose directement, en discordance, sur le Crétacé. Cette formation est composée de marnes gréseuses et grès reposent directement sur le conglomérat de base. Il convient de préciser que ces formations Miocènes marines, classées fréquemment sous le terme de « grès », ne comportent en réalité que quelques bancs de grès noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses. Ce qui fait que ces marnes gréseuses, paraissant très friables à l'affleurement, constituent en réalité une roche assez dure et probablement peu perméable. L'épaisseur de cette série marine semble varier de 200 à 400 m sur la bordure Sud de la plaine.

Les affleurements ne sont connus qu'au Sud du bassin, jusqu'au Djebel Amrane. Il est probable qu'en profondeur, l'extension de ces dépôts soit limitée au prolongement de cet anticlinal sous la plaine. Les formations quaternaires sont particulièrement bien développées dans les régions comprises entre les reliefs crétacés des monts des Aurès au sud et la dépression centrale du bassin de Rémila, établie principalement sur le Néogène.

Les formations anciennes sont constituées par des alternances de conglomérats et de sables surmontés par des sédiments fins argilo sableux, rouge au sommet desquels apparaît une croûte calcaire blanche.

La corrélation des coupes géo électriques avec des logs stratigraphiques de 19 forages de reconnaissance a permis d'identifier les aquifères, de déterminer leur extension et leur profondeur.

- L'existence de plusieurs nappes profondes contenues dans les différents niveaux grossiers du remplissage est mise en évidence par la prospection géophysique.
- Les aquifères sont constitués de conglomérats de graviers et graviers sableux.
- Mise en évidence d'une zone de bonne transmissivité de : $T = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ Correspondant aux conglomérats profonds qui doivent reposer directement sur le Les principaux aquifères prolongements de Djebel Amrane au Sud - Ouest et sur les grès du Miocène au Sud.

Chapitre III

I. Hydrochimie

Dans cette étude nous nous sommes contentés de reprendre les résultats de travaux antérieurs de nos aînés (masterants, doctorants et enseignants chercheurs), car il était difficile pour nous, dans les conditions actuelles de la pandémie du Covid-19, de réaliser des campagnes de mesures de terrain et de prélèvement d'échantillons pour analyses physico-chimiques et d'apprécier les caractéristiques organoleptiques et réaliser des levées géologiques.

Les données obtenues des mesures et des analyses des échantillons de ces différentes campagnes sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau et les ions majeurs sont consignés dans un tableau regroupant les différents paramètres.

I.1. Etude analytique des paramètres physico-chimiques

Les résultats d'analyses chimiques en éléments majeurs et mineurs et isotopiques effectuées sur les échantillons prélevés des 18 points d'eau de la zone d'étude sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau.8 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du

Echantillons	T°C	pH	c25° C	HCO 3-	Cl-	NO3 -	SO4- -	Ca+ +	Mg+ +	Na+ +	K+ +	Li	Sr
AS Spring	20	9	437	230	20	9	32	46	22	7	1	0,008	0,31
SB Spring	18	7	2300	309	530	16	195	75	32	293	11	0,254	1,55
AY Spring	15	7	467	123	23	19	96	26	28	13	1	0,008	1,02
AK Spring	18		594	225	34	6	71	76	14	18	1	0,018	0,76
AM Spring	16	7	758	317	26	19	143	89	31	17	1	0,018	1,55
AMZGT Spring	20	7	1815	241	125	69	437	166	71	92	2	0,037	3,27
ZAGHAD KADA	19	8	1324	179	109	48	349	86	54	89	1	0,048	1,97
F8	20	7	2340	224	463	63	300	117	44	280	4	0,118	2,37
Bir Boussaha (Art)	23	8	1244	168	132	59	134	27	27	55	1	0,03	2,3
ZK9	20	8	1338	198	128	62	714	103	124	305	4	0,031	2,37
Guelloul Mohamed	20	8	3100	350	257	79	2710	366	478	1756	2	0,157	4,48
F4	19	8	993	203	70	56	272	113	49	73	2	0,029	2,68
F5	19	7	1286	225	199	90	342	150	53	226	4	0,06	2,96
Station Mazgatou	20	7	1810	223	179	108	628	199	72	86	2	0,026	5,51
Fais 2	19	8	1603	227	177	121	483	138	52	100	2	0,041	2,65
Ch forage		8	2200	262	170	4	620	182	104	102	8		
BH1 Forage		7	1500	238	245	21	220	160	120	17	1		
Chelia Forage		7	2200	262	170	4	620	182	104	102	8		

I.2. Paramètres physiques

a. La température

La température, paramètre important du comportement et de la qualité des eaux souterraines. Elle constitue non seulement un indicateur des conditions de recharge et du flux thermique dans l'aquifère, mais elle contrôle aussi l'activité bactérienne et les équilibres hydro -chimiques dans le

sous -sol. De ce fait, une augmentation de la température de l'eau peut, par exemple, entraîner une diminution de la concentration en oxygène dissous, favorisant la présence de bactéries pathogènes et provoquant ainsi la diminution des microorganismes indicateurs de la bonne qualité de la ressource. Enfin, la température représente un critère de qualité intrinsèque, notamment pour ce qui est de la ressource en eau potable.

La température est un paramètre intéressant dans l'étude des eaux elle joue un rôle très important dans la solubilité des minéraux.

Les températures des eaux de sources varient entre 15 et 20°C et varie autour d'une moyenne de 18°C, alors que les eaux de forage présentent une température moyenne de 20°C.

Comme il s'agit des eaux souterraines nous pouvons dire que la température moyenne des eaux du versant nord des Aurès varie autour d'une température de 19°C et qui sont légèrement influencées par la température de l'air car il s'agit d'eau peu profondes qui sont alimentées par les eaux de pluie.

b. Le Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates. Dans notre secteur d'étude le pH des eaux de sources qui émergent dans les formations carbonatées sont quasi neutres alors que les eaux de forage du remplissage Plio-Quaternaire sont alcalines

c. la conductivité électrique des eaux

L'activité ionique d'une solution varie en fonction de la température. Il convient donc, pour effectuer des mesures précises, de tenir compte de la température dans les mesures de conductivité. Les températures standards sont généralement prises à 25 °c.

La conductivité électrique est la conductance électrique d'une colonne d'eau de 1cm² de surface, comprise entre deux électrodes de platines parallèles séparées l'une de l'autre de 1cm. Les molécules de sels se dissocient en paires d'ions lorsqu'elles entrent en solution dans l'eau. Ces paires d'ions sont porteuses de charges électriques et, de ce fait, autorisent le passage du courant électrique dans l'eau.

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à celle de résistivité électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en micro siemens/cm (µs/cm) ou millisiemens (mS/cm).

La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissout sera importante, plus la conductivité sera élevée.

Dans la zone d'étude les valeurs de la conductivité électrique varient entre 437 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ dans la source de Ain Silen dans les formations calcaires magnésiennes et 3100 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ dans le forage ZK qui capte l'aquifère Plio-Quaternaire, le tout varie autour d'une moyenne de 1517 $\mu\text{S}/\text{Cm}$

Pour les eaux de source il s'agit d'eau de montagne de bonne qualité chimique alors que les eaux de forage qui captent le remplissage Plio-quaternaire ; il s'agit d'eau de mauvaise qualité chimique

I.3. Etude analytique des paramètres chimiques majeur

I.1.3.1. Les cations

a- le calcium

Le calcium est élément de la dureté, il est généralement l'élément dominant dans les eaux naturelles.

Sa dissolution résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations carbonatées et même lors de leur séjour à l'intérieur de ces formations. Cette dissolution est due à la présence du gaz carbonique dans l'eau, le gaz provient de l'atmosphère, et des couches superficielles du sol, en raison de l'activité bactérienne selon la réaction :



Le calcium peut provenir aussi des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), il est aussi prédominant dans les eaux thermominérales circulant en milieu calcaire. Il peut exceptionnellement atteindre des teneurs élevées dans des eaux thermominérales carbogazeuses au contact des roches cristallines basiques.

Une teneur faible en calcium fait penser à un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables. Par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite.

Les teneurs en calciums des eaux étudiées varient entre 26 mg/l comme valeur minimale au niveau de AY Spring et 366 mg/l comme valeur maximale enregistrés au niveau de F11. Ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et les formations gypseuses. (Athamena, 2006). Nous constatons les faibles valeurs résultent de la dissolution des roches calcaires alors que les fortes valeurs sont le résultat de la dissolution conjointe des roches calcaires et du gypse.

b. Le magnésium Mg^{2+}

C'est un élément aussi de la dureté totale, résultant principalement de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des marnes dolomitiques soit des roches cristallines ou métamorphique par hydrolyse des minéraux silicatés ferromagnésiens (olivines, micas...) toujours exacerbée dans les eaux carbogazeuses. Quand la dolomie est attaquée, il n'ya pas de solubilité sélective, il ya autant de calcium que de magnésium. Si toutefois la quantité du calcium dépasse

celle du magnésium, l'eau aurait obtenu sa minéralisation du calcaire. Par contre une teneur élevée en magnésium peut faire penser à une contamination par l'eau de mer ou du lessivage des minéraux magnésiens. La variation du magnésium dans les eaux souterraines est due à l'influence des formations carbonatées telles que les calcaires, d'une part, et les formations salifères d'autre part comme les argiles et les marnes qui sont riches en Mg^{++} (Dib, 2009). Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, magnésite et dolomite. Les teneurs en magnésium varient entre 14 mg/l et 478 mg/l, ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et les formations tels que la dolomite et la magnésite

c- Le sodium Na^+

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité des saumures (senkha et chott). La plus importante source de sodium se trouve dans les évaporites.

Caractéristiques hydrogéochimiques des eaux des aquifères du versant nord de l'Aurès L'existence d'inclusion évaporitiques sous forme de roches salines riches en $NaCl$ et Na_2SO_4 (Halite, mirabilite peut être aussi à l'origine de cet élément.) (Rodier, 2005)

Nous avons trouvé que la valeur min de Na est de 7 mg /l et la valeur max est de 1756 mg/l, donc une amplitude importante, et une moyenne de 202 mg/l.

Ces concentrations témoignent d'un apport salifère à partir des formations évaporitiques liées aux Sebkhass qui se trouvent près de la région de Khenchela, d'ailleurs ces points présentent les valeurs les plus élevées à l'est de l'Aurès.

d- Le potassium K^+

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées, des argiles potassiques. (Rodier, 2005). En général le potassium dépasse rarement les 10 ou 20 mg/l dans les eaux souterraines et c'est le cas de Ain Bouslah en plein pied.

I.1.3.2. Les anions

a- le chlorure Cl

L'origine de cet élément est comme pour le cas du sodium, liée principalement à la dissolution des formations salifères. Les évaporites constituent la source principale de cet élément. L'effet de la salinité marine, les bassins endoréiques (Chotts, Sebkhass), les eaux fossiles ou cannées, le salage des routes et l'adoucissement des eaux par les résines peuvent aussi être à l'origine de cet élément. Généralement les eaux riches en Chlore sont riches en sodium parfois le calcium remplace le sodium.

Les teneurs de Cl^- présentent des valeurs importantes par rapport à celle du sodium, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de

précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile. (Rodier, 2005).

Dans cette analyse, il se présente par une grande amplitude de 20 mg/l à 530 mg/l, moyenne de 275 mg/l. Ces concentrations indiquent l'existence d'apports salifères à partir des formations évaporitiques en place par la dissolution de l'Halite.

b- Les sulfates SO_4^{2-}

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses (gypse, anhydrite) et à la dégradation de la matière organique dans le sol. De nombreuses activités humaines peuvent générer des apports de sulfates dans l'eau souterraine : application d'engrais sulfatés, précipitations chargées en dioxyde de soufre, eaux usées industrielles, eaux de percolation de décharges de déchets, gravats (déchet inerte), etc. Caractéristiques hydrogéochimiques des eaux des aquifères du versant nord de l'Aurès 70 (Vieville, 1983) ainsi qu'à l'apport anthropique (origine agricole). En conditions réductrices, des bactéries spécifiques peuvent transformer les sulfates dissous dans l'eau souterraine, en hydrogène sulfuré gazeux (H_2S).

Les valeurs du SO_4 sont comprises entre 32 et 2710 mg/l, avec une moyenne de 465 mg/l. Donc la présence des sulfates est beaucoup plus liée aux formations gypseuses.

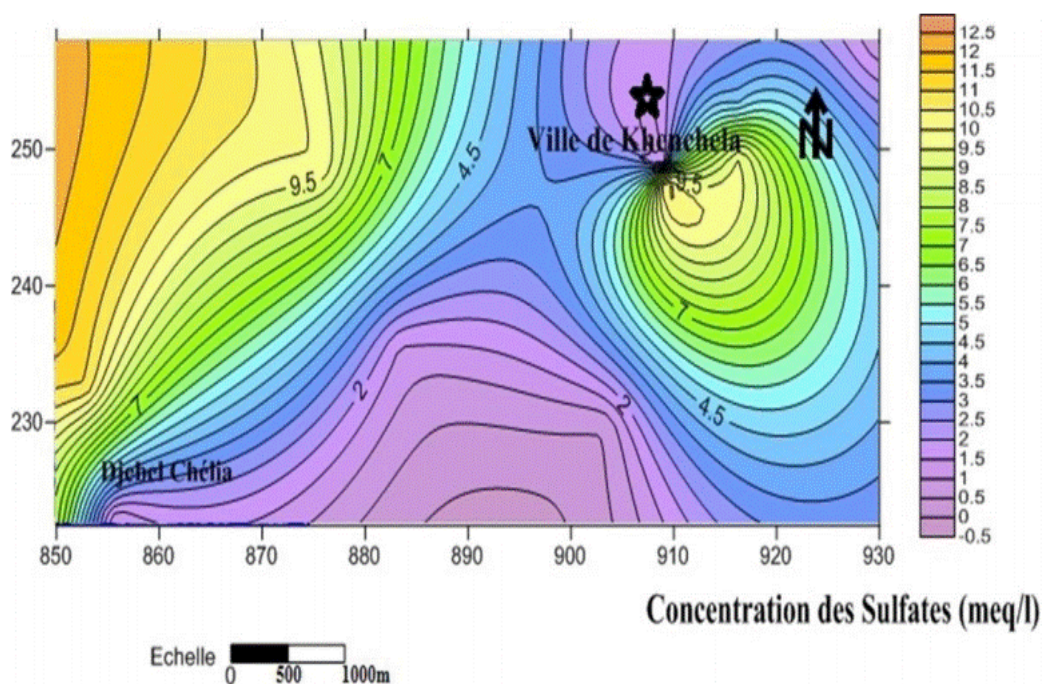


Figure 16 : Distribution spatiale de la concentration des sulfates dans le massif nord de l'Aurès, (Mai, 2014)

c- les bicarbonates HCO_3^-

Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches calcaires ou d'émanation du magma profond, l'apport atmosphérique de cet élément est négligeable.

Elles sont présentes en abondance et Les valeurs des HCO_3^- sont comprises entre 123 et 350 mg/l, et une moyenne de 236.5 mg/l.

d- les nitrates NO_3^-

La présence des nitrates est généralement associée aux signes de pollution d'origine anthropique (agricole, égouts, fosses septiques,). Les nitrates sont extrêmement mobiles dans les sols et s'accumulent, après infiltration dans les nappes phréatiques. Les nitrates sont nuisibles à la santé et sont réglementés de point de vue des concentrations maximales admissibles.

Les valeurs du NO_3^- sont comprises entre 4 et 121 mg/l, et une moyenne de 47mg/l.

Toutes les eaux du remplissage Plio-quaternaires présente une pollution anyhropiues, alors en les eaux de sources carbonatées sont de bonne qualité.

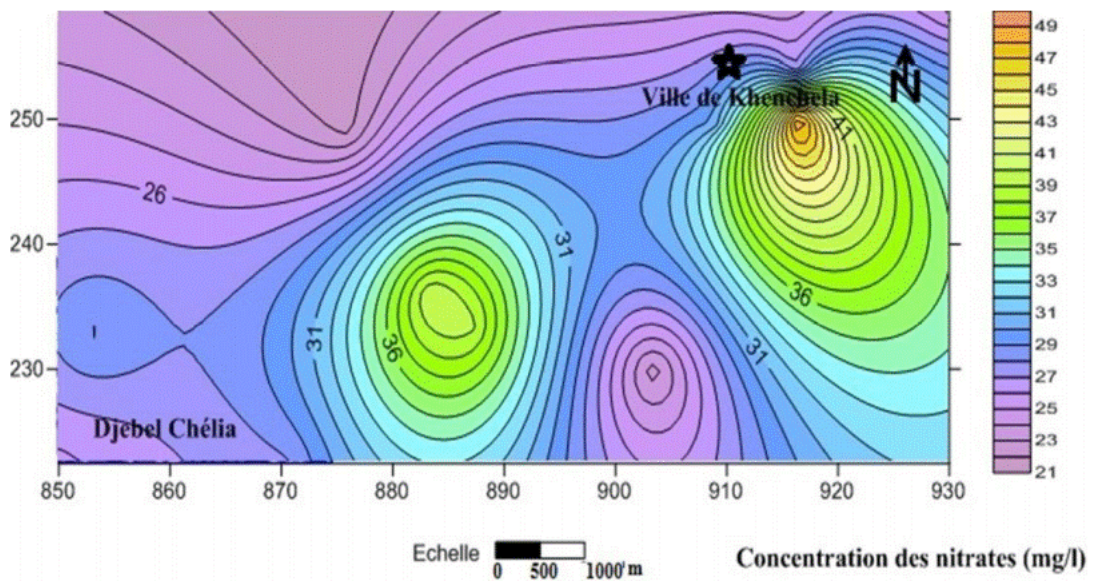


Figure 17 : Distribution spatiale de la concentration des nitrates dans le massif nord de l'Aurès (Mai ; 2014)

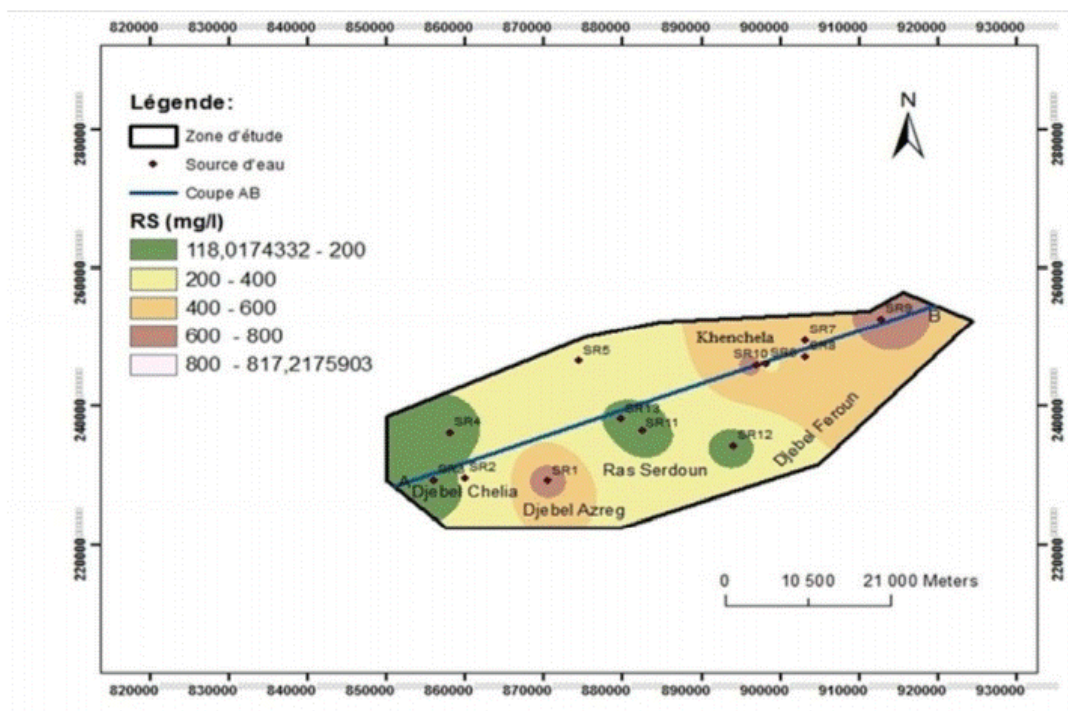


Figure 18 : Répartition spatiale de la minéralisation totale des eaux des sources dans le massif nord de l'Aurès (Mai, 2014)

La figure 18 montre l'évolution spatiale de la minéralisation. Les plus faibles valeurs du résidu sec caractérisent les eaux des gisements froids, et semblent être en relation avec une infiltration rapide des eaux pluviales au niveau des formations calcaires, sulfatées et bicarbonatées, et aussi à la faible température. Les plus grandes valeurs du résidu sec caractérisent les eaux des gisements chauds (station Mazgatou SR 5.5, Guelloul Mohamed SR 4.48, et AMZGT Spring SR3.27). L'augmentation de la température des eaux implique une dissolution des sels minéraux, dépassent 800mg/l, est en parfait accord avec la température de la profondeur de la terre.

I.1.4. Faciès chimique des eaux

I.1.4.1 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper présente les minéraux (Anions et Cations) les plus abondants dans l'eau. Donc il renseigne sur la tendance minéralogique. Le diagramme de Piper est composé de deux triangles équilatéraux à la base (un pour les anions et l'autre est destiné aux cations), avec un losange au milieu. Les côtés des triangles sont divisés en 100 parties égales. Chaque élément est représenté sur le triangle par rapport à ses paires de même nature. La projection des points sur le losange par deux droites menées depuis les triangles correspond au faciès chimique. Cette représentation graphique est utilisée pour déterminer le faciès chimique des eaux et suivre ses variations dans l'espace et dans le temps. Il permet également de voir l'évolution d'une eau, passant d'un faciès à un autre, grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses

d'échantillons pris à des endroits différents. Le diagramme de Piper est très utile pour représenter toutes autres sortes de groupes d'analyses. Le faciès chimique des eaux a été déterminé classiquement à l'aide du diagramme de Piper, en ayant recours au logiciel Diagramme du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2007).

Les données des ions majeurs, reportées sur le diagramme de Piper ont permis de mettre en évidence l'évolution du faciès chimique des eaux, ainsi les eaux des formations carbonatées présentent un faciès bicarbonaté calcique, une fois ils sortent à la plaine et dans le remplissage ils deviennent sulfatées calciques pour finir vers un faciès chlorurés sodique,

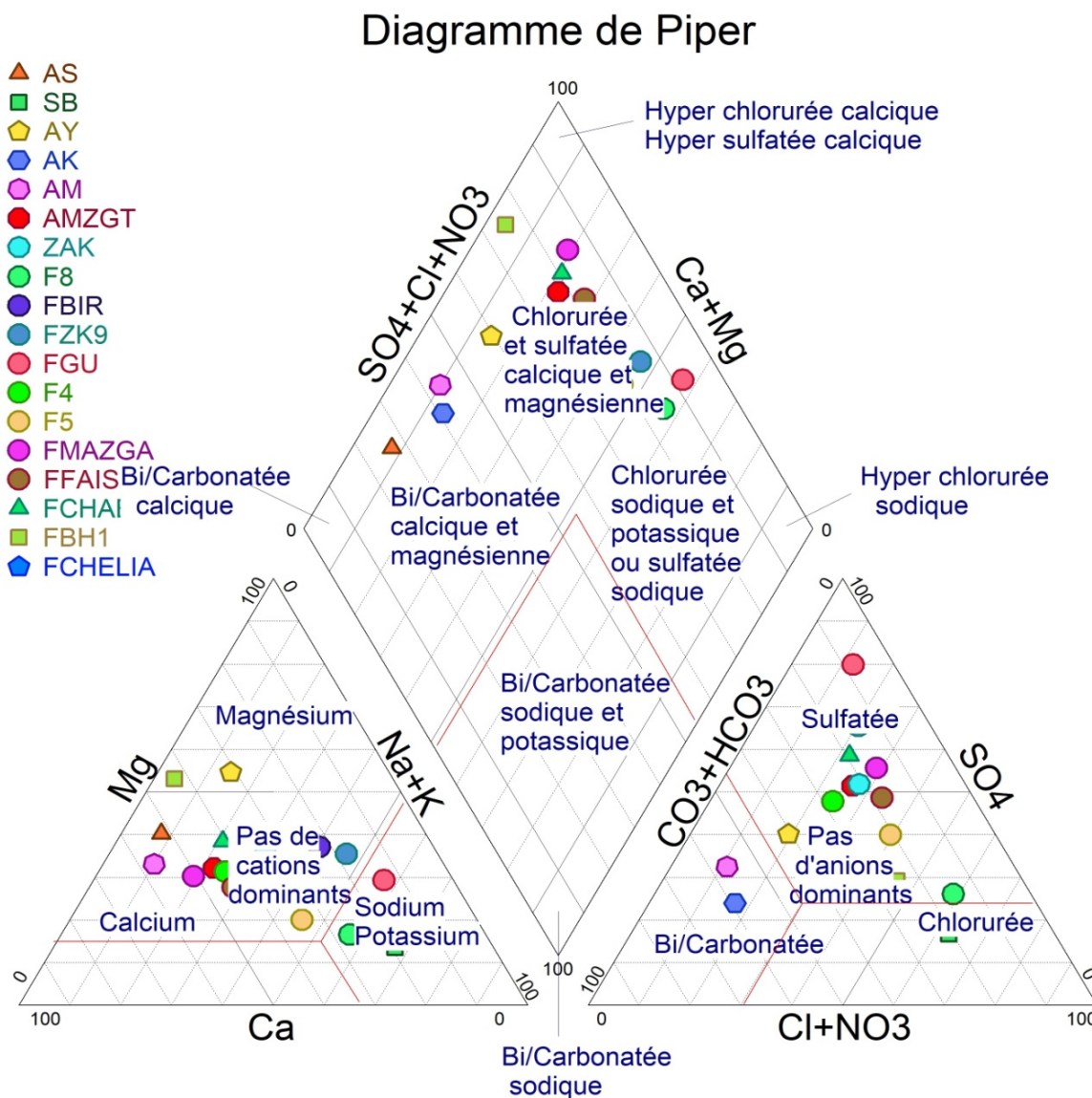


Figure19 : Classification des eaux selon diagramme de Piper

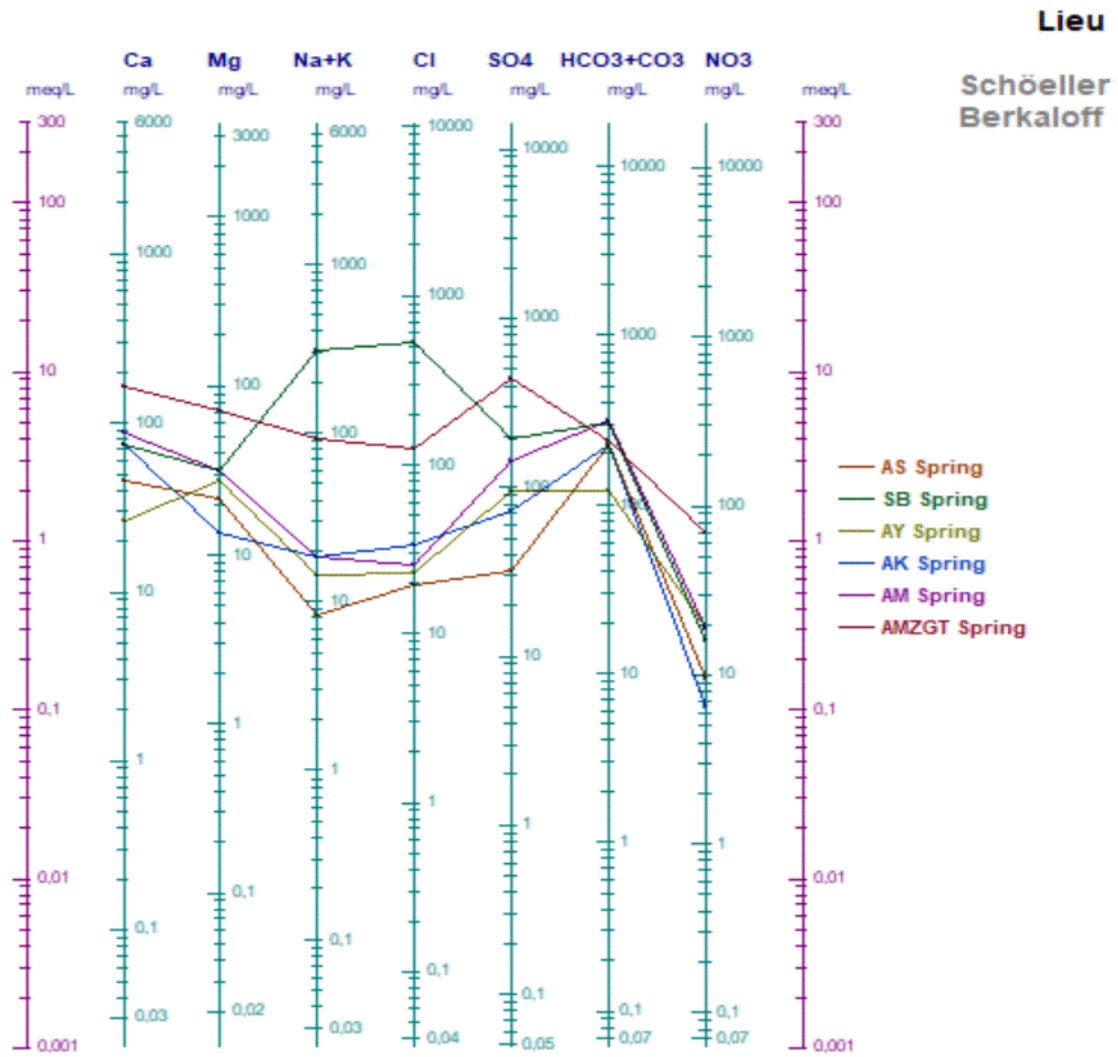
I.1.4.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

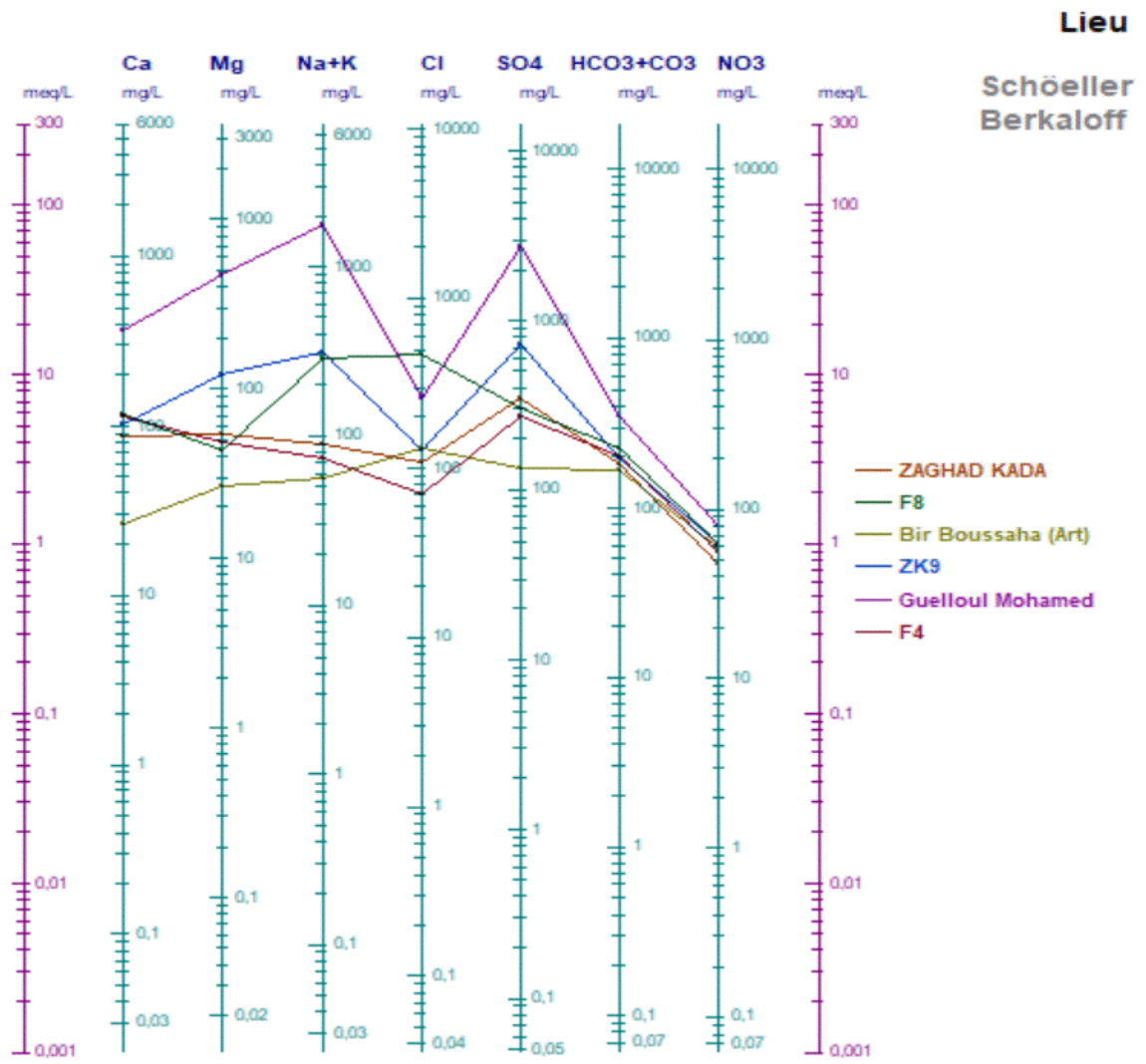
Le diagramme de Schoëller Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. (Gouiadia, 2008)

Il est ainsi possible de visualiser le faciès chimique, comme pour le diagramme de Piper, mais aussi la minéralisation de l'eau (sa charge dissoute), ce qui est appréciable. Toutefois, la visualisation du faciès est moins aisée qu'avec le diagramme de Piper.

La représentation graphique des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (**fig.20 a ; b ; c**), montre que certaines eaux sont issues d'un même aquifère à savoir le réservoir calcaire.





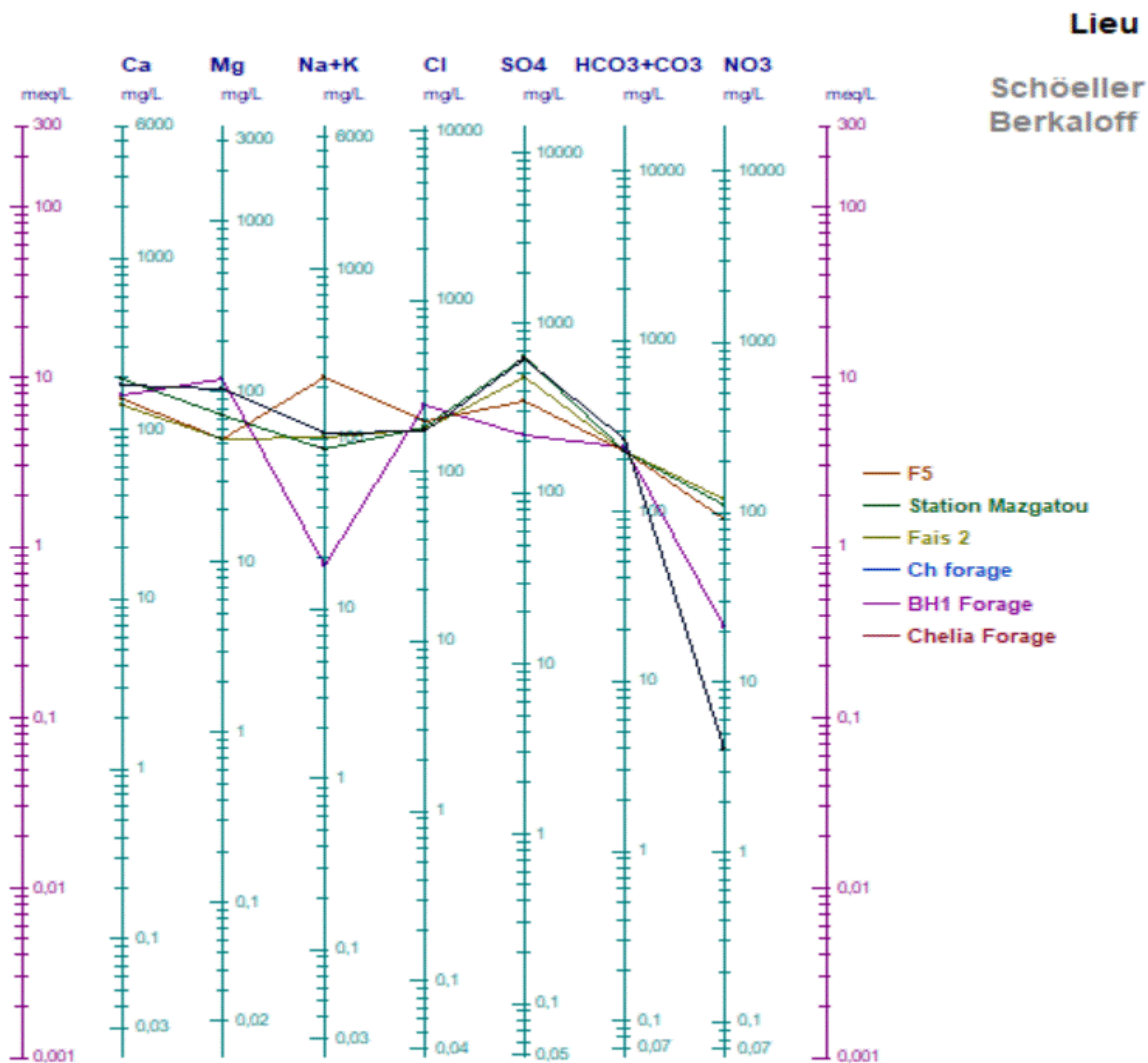


Figure.20 (a ; b ; c) : Représentation graphique des faciès chimiques sur diagramme de Schoeller Berkaloff

I.1.5. Origine des éléments chimiques et Mécanismes de l’acquisition de la charge saline

Afin de discriminer l’origine de la minéralisation des éléments chimique ; une première approximation consiste à croiser les principaux éléments majeurs (Ca^{+2} , Na^{+} , Mg^{+2} , K^{+} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-}) entre eux afin de déceler d’éventuelle corrélation et une certaine linéarité entre ces éléments chimiques afin d’identifier les minéraux qui sont à l’origine de la minéralisation des eaux.

I.1.5.1. Rapports caractéristiques des éléments majeurs

Pour comprendre les processus hydrochimique des eaux, nous avons utilisé les diagrammes de corrélation ionique réalisés en concentrations molaires des principaux éléments majeurs (Fig 22).

$$Rapport Mg^{2+}/Ca^{2+}$$

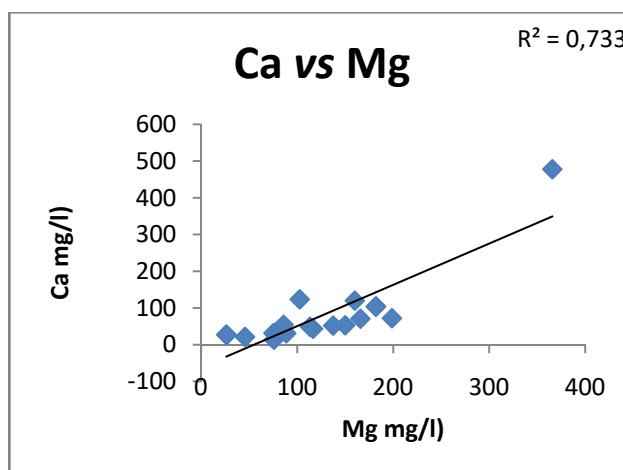
C'est le rapport des concentrations du Mg^{2+} et du Ca^{2+} . Il permet d'apprécier la part de Magnésium (provenant de roches dolomitiques) par rapport au Calcium. Une valeur élevée serait liée à la présence de dolomies et/ou à un temps de séjour long (Barbieri et *al.*, 2005).

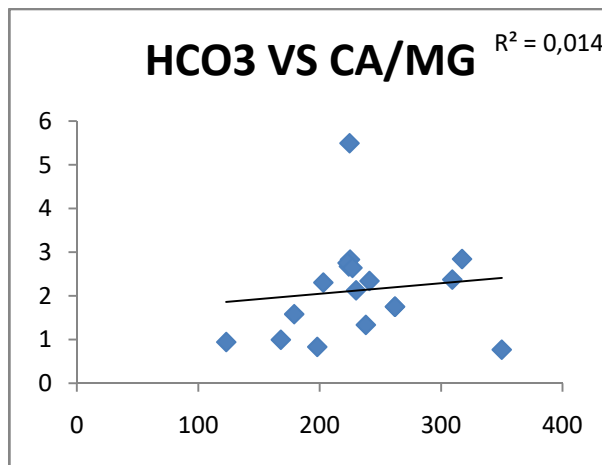
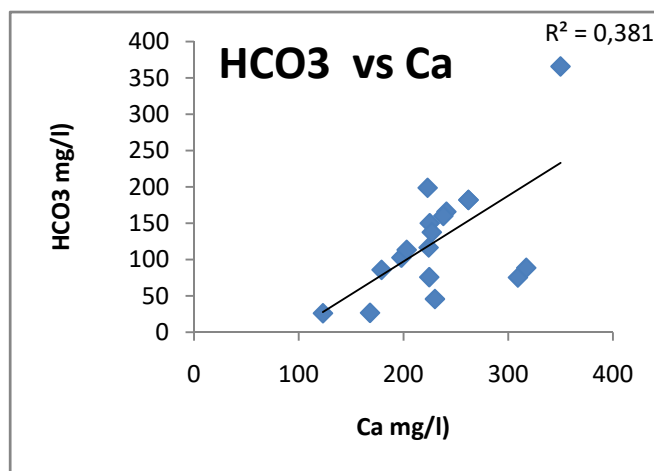
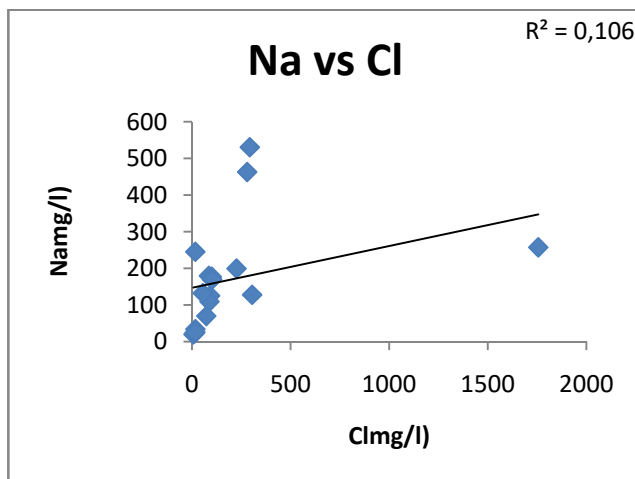
Le rapport Ca vs Mg montre un fort coefficient de corrélation, qui indique que ces deux éléments chimiques ont la même origine et qu'ils sont issus de la dissolution de roches carbonatées à savoir la calcite ($CaCO_3$), la magnésite ($MgCO_3$) et la dolomite ($CaMgCO_3$).

Le diagramme HCO_3^- / Ca montre un nuage de dispersion aléatoire marqué par un faible coefficient de corrélation marquant une origine diverse non carbonatée seulement. Le diagramme Ca / HCO_3^- montre un excès des ions Ca par rapport aux HCO_3^- ceci peut s'expliquer par un apport des ions Ca^{2+} à partir de la dissolution des évaporites (gypse), (origine évaporitiques).

Le diagramme Na/Cl est marqué par un nuage de point non linéaire qui est traduit par un faible coefficient de corrélation. Dans les eaux naturelles, le sodium et les chlorures sont souvent liés à la dissolution de l'halite ($NaCl$), alors ce n'est pas le cas pour cet exemple qui montre que ces deux éléments chimiques sont le résultat d'un apport divers et non à la dissolution de l'halite. Le diagramme SO_4 / Ca montre une bonne corrélation entre ces deux éléments ce qui indique un apport en calcium par la dissolution des évaporites (Gypse et Anhydrite).

Le diagramme Mg/ SO_4 montre une distribution linéaire du nuage de point, cette distribution est marquée par un très fort coefficient de corrélation qui tend vers l'unité. Cette tendance laisse supposer que ces deux éléments chimiques sont de la même origine à savoir la dissolution du sulfate de magnésium rencontrés dans la région de Ain Mimoun.





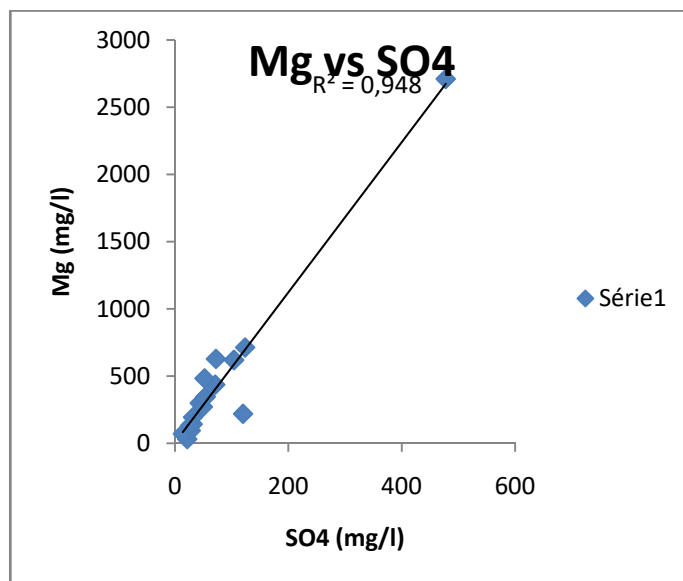
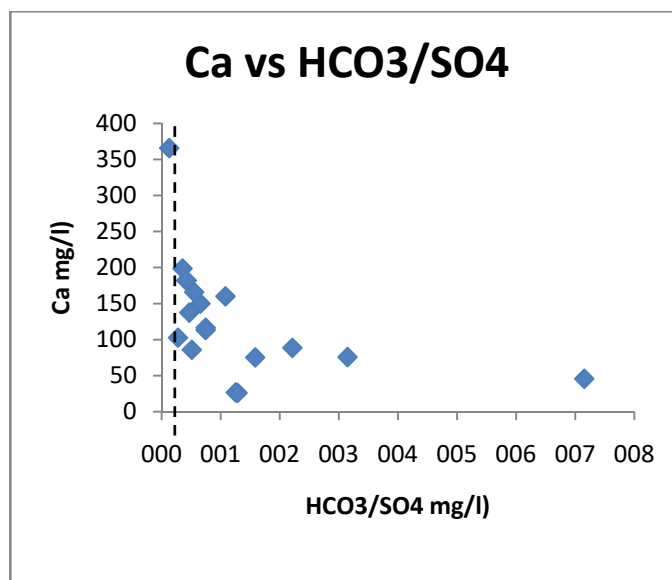
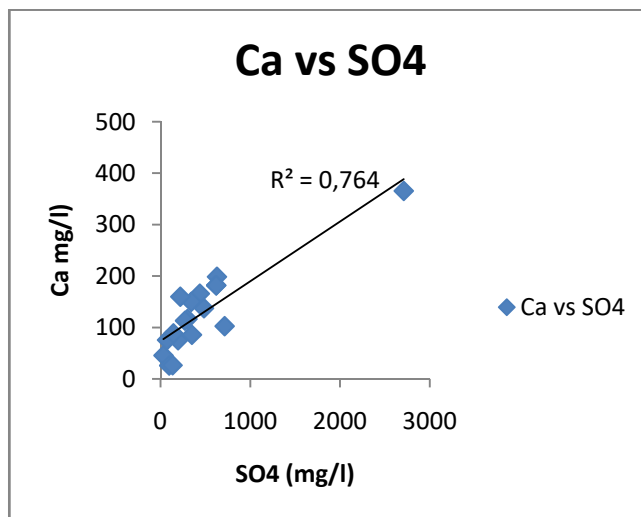


Figure.21 : Rapports Caractéristique entre les éléments majeurs

I.1.5.2. Indice de Saturation

Equilibre solution-minéraux

ETAT DE SATURATION

Pour déterminer l'influence des éléments chimiques, nous avons utilisé l'outil thermodynamique par le calcul de l'indice de saturation. D'après la loi d'action de masse, pour une solution aqueuse en équilibre avec un minéral, le produit d'activité ionique (IAP) du minéral est égal à la constante d'équilibre (KSP) thermodynamique. Le degré de saturation d'une eau peut être représenté par ;

$$IS = \text{Log} (\text{PAI}/\text{KSP})$$

Cette constante K caractérise l'équilibre établi dans un système réversible qui cesse d'évoluer (pour une température donnée).

Variation de l'indice de saturation : les résultats obtenus après calcul sont dans le tableau ci-dessous :

Notons qu'un indice de saturation 'IS nul correspond à la saturation ; il s'agit d'un état de la saturation qui correspond à l'état d'équilibre entre le minéral et la solution, dépendant de la température et surtout du pH. La sous-saturation ($IS < 0$) indique la dissolution spontanée du minéral ; Alors que la sursaturation ($IS > 0$) indique la précipitation spontanée du minéral.

L'observation du tableau 1 montre que les indices de saturation sont en majorité positifs pour les minéraux carbonatés suivants : la calcite, l'aragonite et la dolomite indiquant un état de saturation à sursaturation. La figure 23 confirme bien cette évolution de la tendance de la solution à la sursaturation des minéraux carbonatés ce qui indique un état de saturation vers une tendance de précipitation minérale.

Les minéraux évaporitiques qui sont représentés par le gypse, l'anhydrite et l'halite présente des valeurs d'indices de saturation négatives voire très faibles pour l'halite, qui indique un état de sous saturation, en effet une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.

Le calcul de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à précipiter. Par contre, les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous saturation, donc en état de dissolution.

Tableau 9 : Evolution des indices de saturation des minéraux

	MINERAUX CARBONATES			MINERAUX EVAPORITQUES		
	Calcite	Aragonite	Dolomite	Anhydrite	Gypse	Halite
AS	1,02	0,87	2,01	-2,48	-2,25	-8,39
SB	-0,01	-0,16	-0,15	-1,72	-1,48	-5,42
AY	-0,85	-1,01	-1,47	-2,25	-2	-8,07
AK	-0,35	-0,5	-1,18	-1,95	-1,71	-7,79
AM	-0,15	-0,3	-0,54	-1,67	-1,42	-7,92
AMZGT	0	-0,15	-0,08	-1,11	-0,87	-6,56
Ain Zahgad	0,28	0,13	0,64	-1,4	-1,16	-6,61
F8	-0,1	-0,25	-0,35	-1,39	-1,16	-5,51
BIR	0,09	-0,06	-0,49	-2,15	-1,92	-6,72
ZK9	0,3	0,16	0,97	-1,19	-0,95	-6,04
GUELLEOUL	0,83	0,69	2,07	-0,5	-0,26	-5,07
F4	0,27	0,12	0,45	-1,37	-1,13	-6,89
F5	0,14	-0,01	-0,09	-1,24	-1	-5,96
MEZGATOU	0	-0,15	-0,15	-0,92	-0,69	-6,44
FAIS 2	0,44	0,3	0,74	-1,13	-0,89	-6,37
CH FORAGE	0,76	0,62	1,62	-0,98	-0,76	-6,4
BH1	0,15	0,01	0,53	-1,42	-1,2	-7,01
CHELIA	0,06	-0,09	0,21	-0,98	-0,76	-6,4

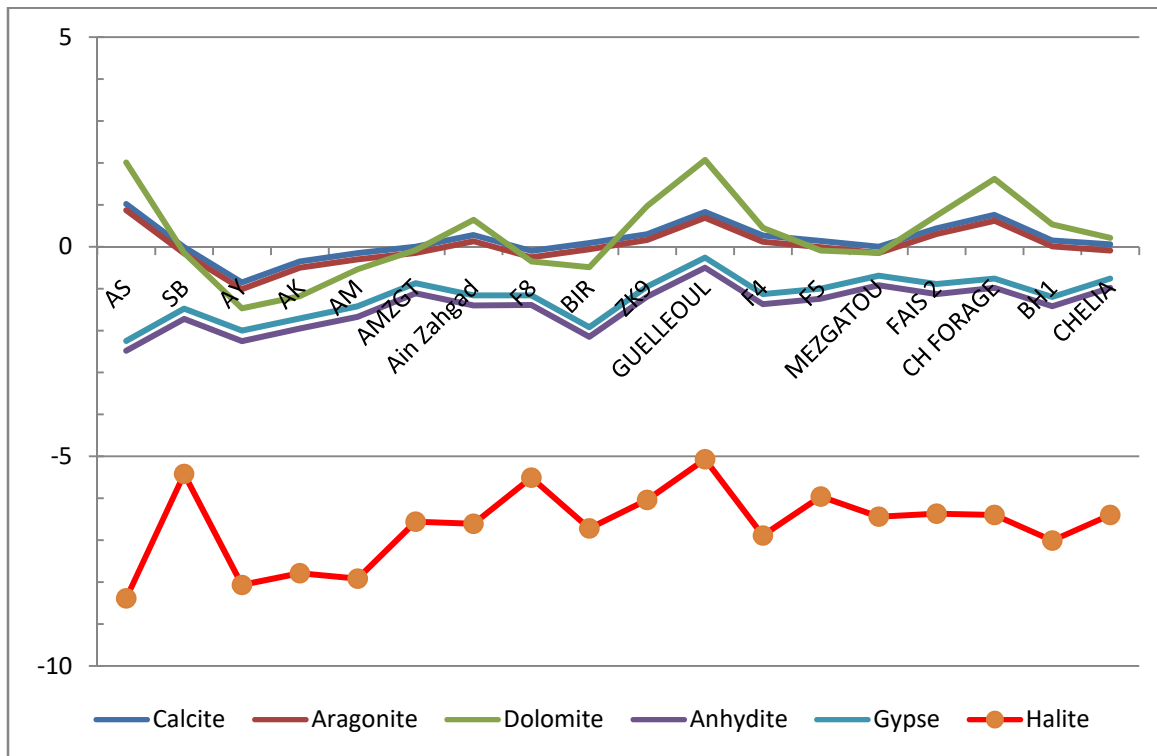


Figure 22 : Variation de l'indice de saturation des minéraux

1.1.5.3. Analyse en composantes principale (ACP)

Etude statistique

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle. Il s'agit d'une méthode factorielle linéaire qui traite des caractères numériques jouant tous le même rôle.

L'ACP est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des « individus » (forages, sources) sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » (les éléments majeurs et les éléments traces) disposées en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs (CLOUTIER et al., 2008 ; YIDANA et al., 2008). Il s'agit donc d'un outil puissant d'aide à l'interprétation des données puisqu'il permet de prendre en considération simultanément tous les échantillons et toutes les variables, et leur inter-relation (Bakalowiez.1994).

Nous avons appliqué une analyse en composante principale (ACP) sur les données de 12 forages dans un espace de 13 variables quantitatives constituées de la température, du pH, CE Calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures et nitrates. Par cette méthode nous cherchons à synthétiser l'information contenue dans un tableau croisant des individus et des variables quantitatives afin de déterminer les paramètres géochimiques expliquant

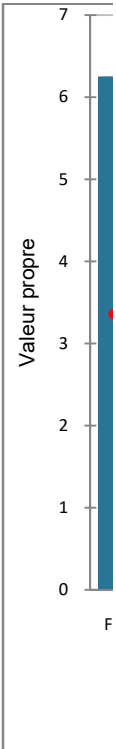
la variation spatiale de la minéralisation par la dissolution minérale et l'apport de la pollution anthropique majorité des variations dans la série de données.

L'étude du spectre des valeurs propres montre qu'il y a trois axes à retenir pour l'interprétation des résultats puisqu'ils détiennent 82,4 % de la variabilité cumulée. Dans l'espace des variables,

Dans l'espace factoriel F1-F2, nous retenons 69% de l'information sur les relations entre les axes et les variables. Sur l'axe F1 sont corrélés positivement les variables suivantes autour de la conductivité électrique : Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} et SO_4^{2-} - et, dans une moindre mesure, par la teneur en K^+ . Cet axe traduit la part de l'acquisition de la minéralisation par la dissolution de tous les minéraux des roches, carbonatés et évaporitique.

En revanche, l'axe F2 est représenté par les Chlorures, le potassium est à un degré moindre par les nitrates, il s'agit d'une dissolution secondaire de roches salines auquel s'ajoute une pollution anthropique. L'axe F3 est marqué par la présence des nitrates qi traduit la part de la pollution anthropique dans l'acquisition de la minéralisation

Tableau.10 : Analyse en composantes principale (ACP)



Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
T°C	14	15,200	22,500	19,000	1,924
pH	14	7,070	8,570	7,540	0,423
c25°C	14	437,000	3100,000	1414,714	784,129
HCO3-	14	123,000	350,000	229,652	60,893
Cl-	14	19,697	530,425	163,864	158,443
NO3-	14	6,428	108,492	50,192	31,871
SO4--	14	32,147	2710,263	458,825	678,666
Ca++	14	26,090	365,700	116,909	87,240
Mg++	14	13,790	477,800	78,388	118,320
Na+	14	7,480	1756,000	236,392	450,843
K+	14	0,920	10,550	2,565	2,581
Li	14	0,008	0,254	0,060	0,070
Sr	14	0,310	5,510	2,364	1,407

Figure24. : Valeurs propres

	F1	F2	F3
Valeur propre	6,242	2,746	1,724
Variabilité (%)	48,019	21,121	13,259
% cumulé	48,019	69,139	82,398

Tableau.11 : Corrélations entre les variables et les facteurs :

	F1	F2	F3
T°C	0,255	-0,333	0,374
pH	-0,132	-0,318	-0,481
c25°C	0,934	0,211	0,170
HCO3-	0,651	0,275	-0,380
Cl-	0,591	0,704	0,259
NO3-	0,584	-0,412	0,661
SO4--	0,886	-0,328	-0,290
Ca++	0,906	-0,309	-0,035
Mg++	0,853	-0,324	-0,374
Na+	0,889	-0,135	-0,393
K+	0,288	0,882	0,126
Li	0,658	0,714	-0,102
Sr	0,730	-0,364	0,519

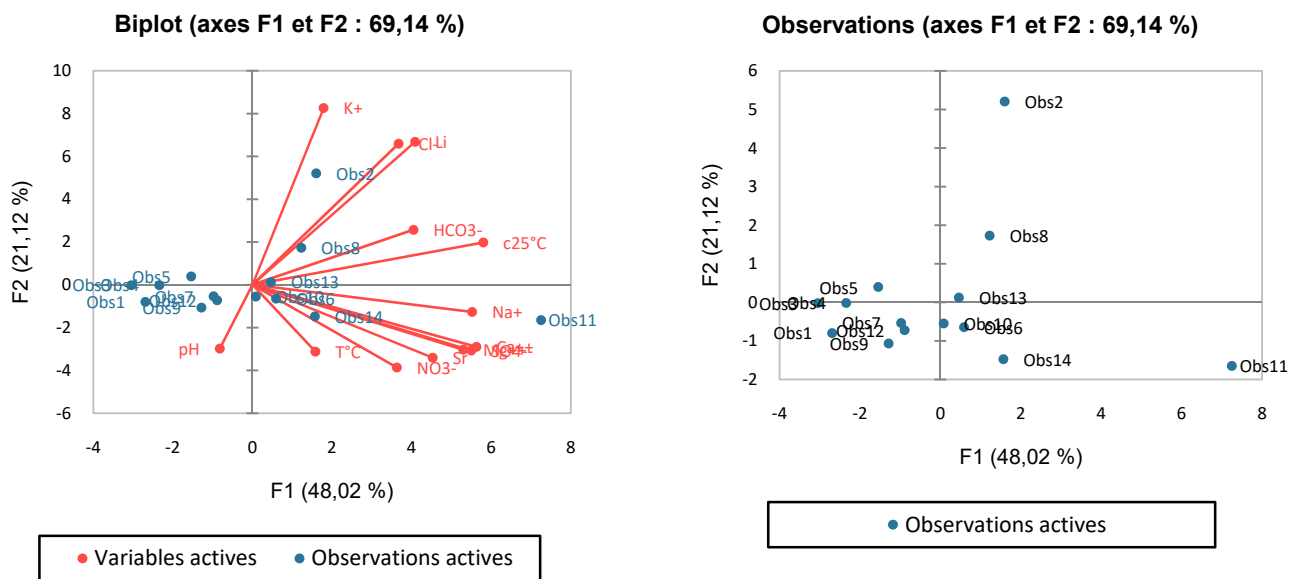


Figure.25 : ACP. Espace des variables et espace des individus F1-F2

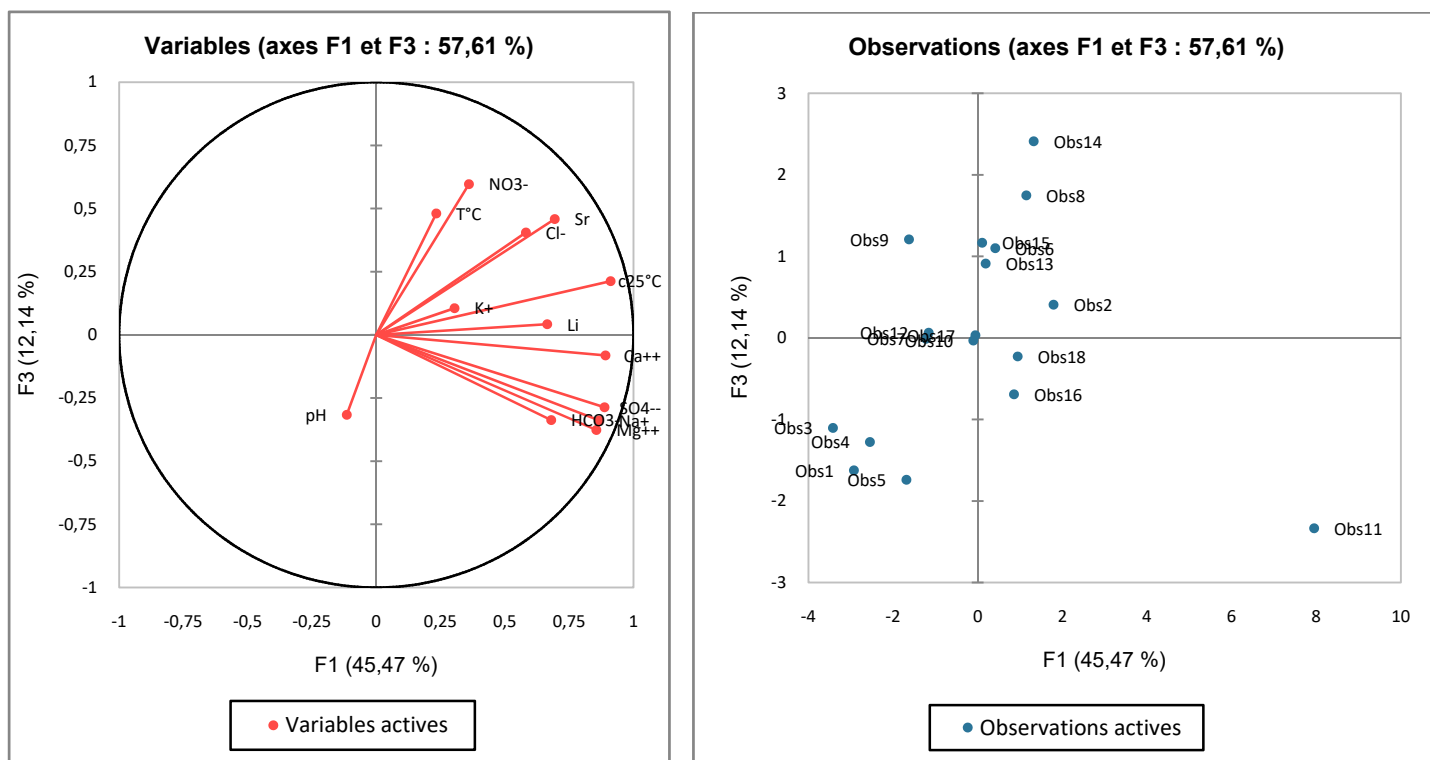


Figure.26 : ACP. Espace des variables et espace des individus F1-F3

II. Qualité des eaux d'irrigation

Introduction :

Sous l'effet du climat de type semi-aride, voire aride, l'agriculture rencontre des problèmes tels que le risque de **salinisation qui peut entraîner, à long terme, la stérilité du sol**, et celui de **l'alcalinisation des sols qui entraîne la destruction de la structure du sol**.

Le développement de l'irrigation s'accompagne, dans la majorité des situations, par l'apparition de processus de salinisation, de sodisation ou d'alcalinisation des sols à des degrés divers. Ces situations sont en relation étroite avec les caractéristiques naturelles du milieu (sol et climat) et la modalité de gestion des eaux destinées à l'irrigation dont la qualité est déterminante.

Risque de salinité (salinisation des sols)

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation.

Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau. Une concentration élevée en sel de sodium dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

SAR :

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (RAS). Le RAS décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés en relativement grande quantité dans l'eau d'irrigation.

L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation dépendra de plusieurs facteurs :

- La tolérance en sel de la culture
- Les caractéristiques du sol sous l'irrigation
- Les conditions climatiques, la qualité de l'eau d'irrigation joue un rôle essentiel dans les secteurs arides affectés par des taux d'évaporation élevés entraînant une accumulation importante de sel dans les sols.
- Les procédures de gestion des sols et de l'eau.

La concentration en sel est donnée par le TDS (qualité totale de matière dissoute : minéralisation) exprimé en mg de sel par litre d'eau (mg/l) ou en gramme de sel par mètre cube d'eau (g/m³).

Elle peut être aussi mesurée grâce à la conductivité électrique de l'eau d'irrigation, qui est exprimée en millimhos par centimètre (mmhos/cm) ou decisiemens par mètre (ds/m) ou microsiemens par mètre (ds/m) ou microsiemens par centimètre, sachant que $1\text{ds/m}=1000\mu\text{s/cm}$.

L'alcalinisation des sols (excès en sodium) est le processus par lequel la teneur en Na^+ échangeable d'un sol augmente par la fixation sur le complexe adsorbant.

Une grande quantité d'ions de sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le sodium présente dans le sol en forme échangeable remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les argiles et cause la dispersion des particules dans le sol.

Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure. Ce problème est également relié avec plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type de sol.

II.1. Aptitude des eaux du versant Nord des Aurès à l'irrigation

Pour tester l'aptitude des eaux vis-à-vis à l'irrigation, on utilise la classification de L'USSLS (United States Salinity Laboratory Staff). Cette classification distingue différents types d'eaux en tenant compte de la conductivité électrique ($\mu\text{s/cm}$) à $25\text{ }^\circ\text{C}$ et le rapport d'adsorption du sodium « S.A.R ». Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca^{+2} (échange de base) dans le complexe adsorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est défini par la relation suivante :

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

Avec :

Na : concentration de l'eau en ions sodium en méq/l

Ca : concentration de l'eau en ions calcium en méq/l

Mg : concentration de l'eau en ions magnésium en méq/l

Trois classes de risque alcalin ont été définies en relation avec le risque salin.

$SAR \leq 10$ Risque faible

$10 \leq SAR \leq 18$ Risque moyen

$SAR \geq 18$ Risque élevé

Tableau.13 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R.

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

II.1.1. Diagramme de Riverside :

La salinisation est sans doute le principal risque encouru par les terrains irrigués, principalement en climat aride. Il peut être apprécié par la conductivité électrique des eaux d'irrigation. Un autre risque majeur est celui de l'alcalinisation des sols par suite d'échanges ioniques, concernant surtout le sodium, le calcium et le magnésium, entre l'eau et les argiles du sol. De fortes teneurs en sodium modifient la structure des sols et leur perméabilité.

Ce risque peut être apprécié par le coefficient d'absorption du sodium, les risques de salinisation et d'alcalinisation ne sont pas indépendants. Ce dernier est d'autant plus grand que la salinité est importante.

Le diagramme de Riverside permet de faire une première classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation. Si les eaux de la catégorie 1 peuvent être utilisées sur presque n'importe

quel sol et pour n'importe quelle culture, celles des catégories 2 et 3 doivent être utilisées avec précaution, et celles de la catégorie 4 doivent pratiquement toujours être rejetées.

Degré Qualité Classe Etat d'utilisation

-1 Excellente

C1 -S2 Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol.

-2 Bonne

C2-S1 En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation.

C2-S2 l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité.

-3 Admissible

C3-S1 En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel.

L'examen du diagramme du SAR (Fig. 27) permet de dire que les eaux de la classe C2-S1, c'est-à-dire les eaux de sources sont très convenables à l'irrigation de toutes les cultures et sans distinction aucune, alors que les de forage du remplissage Plio-Quaternaire présentent un risque de sodisation et de salinisation des sols à l'irrigation. Les eaux de la nappe superficielle du Plio-Quaternaire de la classe C3-S1 conviendraient à l'irrigation des cultures dans des conditions normales et peuvent être utilisées si les espèces ont une bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé. Les eaux de la classe C4-S2 sont à proscrire de l'irrigation des cultures sous climat semi-aride car l'évolution de la salinité est rapide et doit être contrôlée.

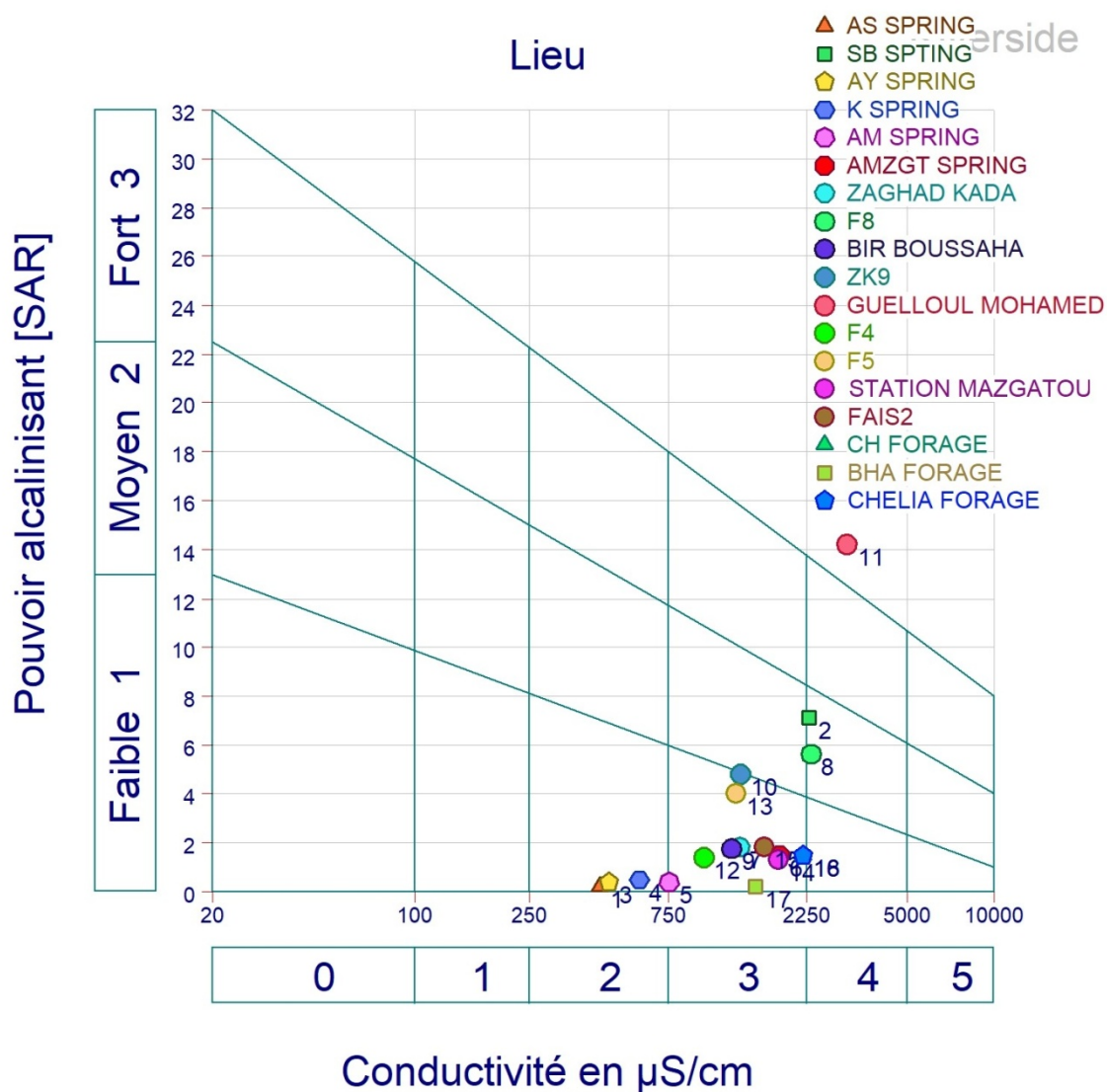


Figure 27 : Diagrammes de RIVERSIDE

Conclusion

Les résultats des analyses physico-chimique montrent que :

- Les fortes concentrations de sodium et des chlorures sont dues à la dissolution de l'halite (NaCl), présente dans les formations salifères du Trias et à l'utilisation des engrais chimique et aux échanges de base qui enrichies les eaux en alcalins (Na et K) au détriment des alcalino-terreux (Ca et Mg)
- Les fortes teneurs en sulfates sont dues à la dissolution du gypse et de l'anhydrite fréquente dans les formations gypsifères et à la pollution par les intrants organiques et inorganiques
- L'usage des diagrammes binaires des ions majeurs contre un élément conservé caractérisant la salinité de l'analyse statistique multi variée en composantes principales (ACP) qui a montré que la majorité des éléments sont corrélés positivement à la conductivité électrique ont conduit à l'identification de l'origine de la salinité des eaux. En effet, les chlorures, le sodium, les sulfates, et le calcium et à degré moindre, magnésium et nitrates seraient la source de minéralisation des eaux souterraines par dissolutions des sels suivants : halite, calcite, gypse, dolomite et sans oublier l'apport de la pollution par les nitrates.

Bibliographie

Bibliographie

- (1) : Environnement Canada http://www.ec.gc.ca/water/fr/nature/clim/f_makecl.htm] [24]
Environnement canada ; Température et Précipitation, des indicateurs de changements :
http://www.ecoinfo.org/env_ind/region/climate/climate-data_f.cfinterendanalysis
- (2) : **NEDJRAOUI. D, 2000**, profil fourrager « Algérie » Rapport pp35.
<http://vwww.fao.org/Ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Algeria/Algerie.htm>
- (3) : **MATE, 2003**, Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement, pp 465.
- (4) : <https://www.meteoconsult.fr/previsions-meteo/bulletin-detaille/ville-59073/previsions-meteo-el-hamma-aujourd'hui>
- (5) : https://www.memoireonline.com/10/08/1569/m_contribution-etude-etat-nutritionnel-diagnostic-foliaire-abricotier26.html
- (6) : **Ould Ammar H, Choïouarfia M , 2011-2012**, Activité agricole et qualité des Eaux du périmètre de Bouzouamel-Plaine de Mellagou-Bouhmama-khenchela, Mémoire,khenchela
- (7) : **Houha .B,2007** , thèse de doctorat ,Annaba
- (8) : **Bouballi S, 2009** , identification et mise en évidence des formation hydrogéologiques a la wilaya de Khenchela (nord-west) Analyse et synthèse de données , magistère ,Annaba
- (9) : **Debièche,2002** , thèse de doctorat
- (10) : **Gouaidia L,2008** , identification de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physique chimique des eaux d'une nappe en zone semi-aride , cas de la nappe de Meskiana nord-Est algerien, Thèse ,Annaba

Résumé

De nos jours, l'environnement est menacé par la salinité des eaux et des sols, qui se présentent comme une forme de pollution naturelle accentuées beaucoup plus par l'activité anthropiques, à savoir l'utilisation des engrais chimique, l'irrigation et l'infiltration des eaux usées.

L'aquifère principal est contenu dans le remplissage Moi-Plio-quaternaire en système de nappes multicouches superficielles et profondes. L'approche hydrochimique a mis en évidence un faciès mixte ; à savoir, bicarbonaté calcique dans les affleurements qui à évolué vers des eaux chlorurées sodiques. L'analyse statique multivariée a pu définir l'origine de la salinité des eaux par dissolution des roches évaporitique, gypsifères et salifères ainsi que, à la pollution des eaux.

Les mots clés : Aurès, Khenchela, Eau de source, Minéralisation, Salinité, Evaporites.

Abstract

Nowadays the environment is threatened by the salinity of the water and the soil, which presents itself as a form of natural pollution much more accentuated by anthropogenic activity, namely the use of chemical fertilizers, irrigation and sewage infiltration.

The main aquifer is contained in the Mio-Pliocene-Quaternary filing multilayer system of superficial and deep layers. The hydrochemical approach revealed a mixed facies; namely, calcium bicarbonate in outcrops that evolved into the chlorinated sodic waters. Multivariate statistical analysis was able to identify the origin of the salinity of the water by dissolution of evaporate rocks gypsiferous and licks as well as water pollution.

Key words : Aurès, Khenchela, Spring Water, Mineralization, Salinity, Evaporates .

الملخص

البيئة مهددة اليوم من قبل ملوحة المياه و التربة و التي تمثل شكل من أشكال التلوث الطبيعي و تكون أكثر حدة من طرف النشاط البشري و هي استخدام الأسمدة الكيميائية و الري و تسرب مياه الصرف.

طبقة المياه الجوفية الرئيسية في نظام تعبئة العصر الحديث الرباعي من متعددة الطبقات السطحية و الطبقات العميقة . و النهج الهيدروكيميائي يبرز سحنة كيميائية مختلطة و هي بربونات الكالسيوم في النتوءات التي تطورت في المياه السودية المكلورة . كان التحليل الإحصائي متعدد التغيرات قادر على تحديد منشأ ملوحة المياه من خلال حل الصخور المتبخرة الجبسية و الصخور الحاملة للملح فضلا عن التلوث

الكلمات المفتاحية :

خنشلة, الاوراس مياه المنابع , التمعدن, الملوحة المبحرات

Table des matières

STRUCTURE DU MEMOIRE	01
Introduction générale.....	01
Approche méthodologique.....	02

Chapitre I : Cadre climatique

I. INTRODUCTION	04
I.1. Aperçu générale sur le climat de l'Algérie et de la région d'étude	04
I.2. Paramètres climatique.....	05
I.2.1. Précipitation	06
I.2.2. Température	08
I.3. Synthèse Climatique	09
I.3.1. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN et BAGNOULS	09
I.3.2. Indice d'aridité de De Martonne	10
I.3.3. Climagramme d'EMBERGER.....	10
I.4. Bilan hydrologique.....	11
I.4.1. L'évaporation	11
I.4.2. Evapotranspiration potentielle (ETP) :	12
I.4.2.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	12
I.4.2.2. La formule de THORNTHWAIT	12
I. Présentation du structure et contexte géologique régional :	12
I.1.Présentation du secteur étudié.....	12
I.4.3. Calcul de l'évapotranspiration réel (ETR).....	13
I.4.3.1. Méthode de TURC :.....	13
I.4.3.2. Méthode de THORNTHWAIT :.....	15
I.4.4. Interprétation du bilan hydrique	15
I.4.5. Calcul du ruissellement.....	15
I.4.6. Estimation de l'infiltration	16

Conclusion.....	16
-----------------	----

Chapitre II : Cadre géologique

I. Présentation du structure et contexte géologique régional	18
CADRE DE L'ETUDE	18
I.1. Présentation du secteur étudié	18
II. Cadre géomorphologique et structural	19
II. 1. Cadre géomorphologique :	19
II. 2. Cadre structural	21
II -2-1. Le Domaine Atlasique	21
II -2-2. Cassures et flexures	23
II -2-3. Localisation et âge de mise en place des pointements triasiques.....	24
III- Réseau hydrographique.....	25
IV· GEOLOGIE	26
IV.1.Cadre litho stratigraphique :.....	26
IV.1.1. Cadre géologique	26
IV – 1.1.1. LIITHOSTRATIGRAPHIE	26
IV – 1.1.2 .Trias	27
IV – 1.1.3. Le Crétacé	28
1. Crétacé inférieur.....	28
1.1. Barrémien- Aptien	28
1.2. Albien.....	29
2. Crétacé supérieur.....	29
2.1. Cénomanién.....	29
2.2. Turonien	30
IV- 1.1.2. Les formations Cénozoïques (fig.08, 11 et 14).....	30
IV- 1.1.3. Quaternaire	30
IV.1.2 .Cadre Hydrogéologique	32

IV.1.2.1. Lithologie de l'aquifère.....	32
2.1 .Substratum : structure profonde	33
IV.1.2.3.Terrains Néogène	33
IV.1.2.4 .Le Plio-Quaternaire.....	33
IV.1 .3 Auifères du pourtour Auresien.....	33
IV.1.4. Les principaux aquifères	34
V- Identification de la typologie des nappes aquifères du bassin de Remila.....	34
V- 1. Lithologie et âge des formations aquifère.....	34
V- 1.1. Aquifère superficiel.....	35
V- 1.2. Aquifère profond	35
V- 2. Présentation et nature des nappes aquifères	35
V- 2.1. Nappe phréatique.....	35
V - 2.1.1. Profondeur de la nappe.....	36
V- 2.2. Nappes profondes	36
V- 2.3. Les eaux des calcaires et des grès miocènes de la bordure Sud	36
Conclusion.....	37

Chapitre III : Hydrochimie

I. Hydrochimie	39
I.1. Etude analytique des paramètres physico-chimiques	39
I.2. Paramètres physiques	40
a. La température	40
b. Le Potentiel d'Hydrogène (pH)	41
c. la conductivité électrique des eaux	42
I.3. Etude analytique des paramètres chimiques majeur	42
I.1.3.1. Les cations	42
a- le calcium	42
b. Le magnésium Mg ²⁺	42

c- Le sodium Na ⁺	43
d- Le potassium K ⁺	43
I.1.3.2. Les anions	43
a- le chlorure Cl.....	43
b- Les sulfates SO ₄ ⁻²	44
c- les bicarbonates HCO ₃ ⁻	44
d- les nitrates NO ₃ ⁻	44
I.1.4. Faciès chimique des eaux.....	47
I.1.4.1 Diagramme de Piper	47
I.1.4.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	48
I.1.5. Origine des éléments chimiques et Mécanismes de l'acquisition de la charge saline	51
I.1.5.1. Rapports caractéristiques des éléments majeurs	51
I.1.5.2. Indice de Saturation	55
I.1.5.3. Analyse en composantes principale (ACP).....	60
II. Qualité des eaux d'irrigation	61
II.1. Aptitude des eaux du versant Nord des Aurès à l'irrigation.....	62
II.1.1. Diagramme de Riverside :	63
Conclusion	66

LISTE DES FIGURES:

Fig. 1: Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Établie d'après Côte M., 1998a)	05
Fig.2 : Variation des précipitations annuelles.....	07
Fig.03: Variation mensuelle des précipitations.....	07
Fig..4: Variation des Températures mensuelles	08
Fig.05 : Diagramme ombrothermique de la station d'El-hamma.....	09
Fig.06 : Climagramme d'EMBERGER.....	11
Fig.08 : Carte géographique et géologique du bassin de De Rémila (houha 2007)	19
Fig. 09 : Cadre géographique et géologique (R. Jaseix-Bellon)	19
Fig. 10 : Localisation des principaux ensembles géomorphologique du Nord de L'Algérie et de la Tunisie (Guiraud 1973)	21
Fig.11 : Cadre structural simplifié du bassin de Rémila (J.M Vila 1977)	23
Fig. 12 : Réseau hydrographique et distribution des agglomérations urbaines (Houha 2007)	25
Fig. 13. Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de L'Aurès d'après R. Laffitte (1939) et modifié par R.Guiraud (1973).	27
Fig.14 : Coupe interprétative dans le bassin de Rémila d'après Vila (1977)	27
Fig. 15 : Unités hydrogéologiques dans les Aurès (in houhaa 2007)	32
Fig .16: Distribution spatiale de la concentration des sulfates dans le massif nord de l'Aurès, (Mai, 2014)	44
Fig .17: Distribution spatiale de la concentration des nitrates dans le massif nord de l'Aurès (Mai ; 2014)	45
Fig .18: Répartition spatiale de la minéralisation totale des eaux des sources dans le massif nord de l'Aurès (Mai, 2014)	45
Fig.19 : Classification des eaux selon diagramme de Piper	47
Fig.20 (a ; b ; c) : Représentation graphique des faciès chimiques sur diagramme de Schoeller Berkaloff	50
Fig.21 : Rapports Caractéristique entre les éléments majeurs	53
Fig .22 : Variation de l'indice de saturation des minéraux	56
Figure.25 : ACP. Espace des variables et espace des individus F1-F2.....	59
Figure.26 : ACP. Espace des variables et espace des individus F1-F3.....	59
Figure 27 : Diagrammes de RIVERSIDE.....	64

LISTE DES TABLAEUX:

Tableau.01: Coordonnées géologiques de la station météorologique kenchela	06
Tableau.02 : Répartition annuelle des précipitations (mm), (1993-2018)	06
Tableau.03 : Moyenne mensuelle des précipitations (mm) (1994-2020)	07
Tableau.04: Moyennes mensuelles des températures en °C (1994-2020)	08
Tableau.05 : Indice d'aridité de De. Martonne	10
Tableau.06 : Classement en fonction de l'indice d'aridité de De. Martonne.....	10
Tableau.07 : Bilan Hydrique de Thornthwaite de la station de Kenchela El Hamma	14
Tableau.08 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du.....	40
Tableau09 : Evolution des indices de saturation des minéraux.....	55
Tableau.10 : Analyse en composantes principale (ACP)	57
Tableau.11 : Corrélations entre les variables et les facteurs	58

Introduction générale

STRUCTURE DU MEMOIRE

Le manuscrit est structuré en quatre principaux chapitres qui sont précédées par une introduction qui décrit la problématique du sujet, les objectifs visés dans cette étude et les proches méthodologiques utilisées pour mener à bon port cette étude.

- le chapitre I présente la situation géographique de la zone d'étude et les conditions naturelles du milieu,
- Chapitre II, traces les grandes lignes du climat qui sévit dans le sous bassin vers des Aurès par l'étude et les paramètres climatiques à savoir les précipitations et la température
- Le chapitre III, expose les caractéristiques des différentes formations géologiques rencontrées dans la zone en s'appuyant principalement sur la synthèse des études géologiques et caractéristiques hydrogéologiques
- Chapitre IV, est réservé à l'étude de la chimie des eaux souterraines par les outils chimiques et statistique afin de mettre en relief les différents mécanismes hydrogéochimiques qui sont responsables de l'acquisition de la minéralisation des eaux assorties des différents faciès

Introduction

Le présent travail est une initiation à la recherche scientifique en matière d'hydrogéochimie et de pollution naturelle et/ou anthropique des eaux; il s'agit de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux du versant nord des Aurès et ses prolongements naturelles dans la plaine de Rémila par la mise en exergue de la composition chimique des eaux et la qualité des eaux, du faciès chimiques, et de leur potabilité et l'aptitude de ces eaux à l'irrigation d'une part et d'autre part de hiérarchiser les processus qui affectent la qualité chimique des eaux souterraines

Approche méthodologique

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie couplant des approches hydrogéologique, climatique et hydrogéochimique a été développée pour :

- Définir les grandes formations géologiques susceptibles de jouer un rôle hydrogéologique en aquifère, par l'identification de la typologie des nappes, profondes et superficielle conformément à leurs structure et texture, homogène et /ou hétérogène.
- Etudier les paramètres du climat afin de statuer sur le bilan hydrologique à savoir, excédentaire ou déficitaire
- Caractériser les faciès chimiques des eaux souterraines du système aquifère, comprendre les processus de minéralisation des eaux, établir les interactions eau-roche et aussi l'origine de la salinité des eaux;