

Républiques Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abbes LAGHROUR Khenchela
Institut de science de la nature et de la vie
Département de l'Ecologie et de l'Environnement

Mémoire

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Gestion intégrée des ressources en eau et développement durable

Par

OSMANI Soumia

Sujet :

*Etude biogéochimique et isotopique de quelques sources du versant Nord du
massif des Aurès (W.de Khenchela).*

Soutenue en 2012

Devant le jury composé de :

Pr. HOUHAMEDI Moussa

Président

Dr. HOUHA Belgacem

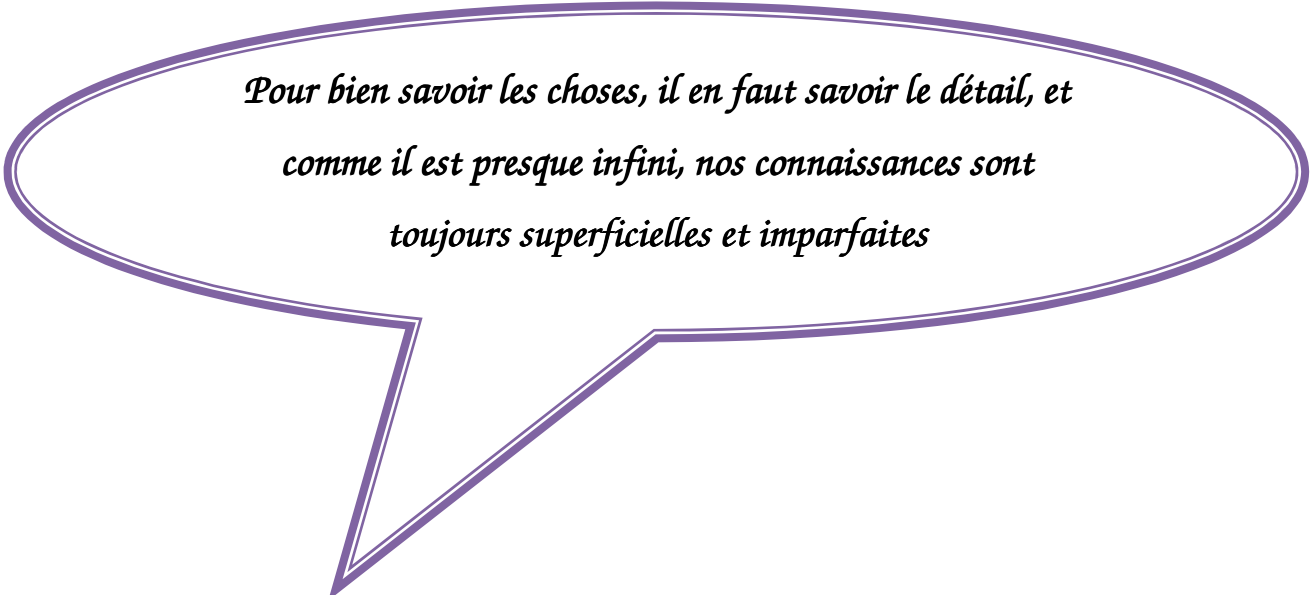
Rapporteur

Pr. DARBOUCHE Abdelhak

Examineur

Dr. BENOUNIS Messaoud

Examineur



*Pour bien savoir les choses, il en faut savoir le détail, et
comme il est presque infini, nos connaissances sont
toujours superficielles et imparfaites*

LA ROCHEFOUCAULD, Maximes, 106

Remerciements

✚ Ce travail représente le fruit de deux années de missions de terrain, d'analyses et d'interprétations des résultats obtenus. Il a été mené au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger en association avec l'Université LAGHROUR Abbas de la Wilaya de Khenchela.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux différents responsables de ces deux organismes, Messieurs les Directeurs du CRNA et de l'Uni. A.L. de Khenchela, qui ont eu l'amabilité de nous accorder toutes les facilités matérielles et administratives afin que notre travail soit mené à son terme.

Mr. Le Docteur Houha Belgacem ; Directeur de thèse qui a accepté de diriger ce travail, je lui exprime ici toute ma gratitude pour ses conseils, ses remarques et le temps qu'il m'a consacré.

Je tiens exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur Houhamedi Moussa qui a bien voulu accepter la présidence de ce jury de thèse.

Je voudrais également remercier Monsieur le Professeur Darbouche Abdelhak et Monsieur le Docteur Benounis Messaoud pour ses participations à ce jury.

✚ La recherche est un travail de groupe. De ce fait, je ne saurais jamais oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire, en particulier :

Je ne saurais trouver les mots pour exprimer toute ma sincère reconnaissance au Dr. Guittoum Abderahim, mon beau frère ; Maitre de Recherche/HDR au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, qui ma ouvert toutes les portes et grâce a lui j'ai eu la chance de faire un stage au niveau CRNA.

Je tiens également à remercier profondément Monsieur Cherchali Mohamed El-Hocine, Chargé de Recherche au niveau de CRNA, qui m'a beaucoup orienté pour faire les analyses isotopique au niveau du département Datation et Traçage Isotopique, et m'a aidé à interpréter les résultats et pour ses conseils et sa patience durant le stage ainsi que son soutien par la documentation qui étais d'un grand apport dans la réalisation du présent travail. Je le remercie encore une fois.

Je voudrais également remercier Monsieur **Ouarezki Sid Ali**, Ingénieur de laboratoire de chimie du département Datation et Traçage Isotopique au CRNA, pour son aide précieuse dans la réalisation des analyses chimiques (éléments majeurs et mineurs) et sa patience durant deux semaines de travail successives.

Je ne pourrais pas oublier **Mme Amarouche Samia**, Attachée de recherche, au niveau de la Division des Applications Nucléaires du CRNA, qui m'a effectuée les analyses microbiologiques et son aide à interpréter les résultats et pour son soutien moral, son accueil chaleureux ainsi que ses précieuses orientations.

Que **Mme Arabi Malika**, Attaché de Recherche à la Division des Applications Nucléaires du CRNA, trouve l'expression de mes vifs remerciements pour m'avoir effectué les expériences de Spectroscopie d'Absorption (SAA).

Je remercie les agents de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Khenchela pour leur aide, en particulier, Monsieur **Glloul**.

Je tiens vivement remercier pour leur aide Monsieur **Chnaker Hichem** étudiant en deuxième année doctorat, surtout sur le terrain, en compagnie avec Melle **Berkani Cherifa**, que je remercie également pour ses conseils et ses documentations.

Sur le terrain, les aides ont été nombreuses. En ce qui concerne la disponibilité un merci spécial à Monsieur **Ballaa Hakim** pour toutes les journées de terrain qu'il m'a consacrées et pour sa connaissance de la région.

Je remercie aussi Monsieur **Rachachi Hichem** pour leur aide matériel.

Que soient remerciés tout mes proches **amis (es)** et tout ceux qui à des degrés divers, m'ont soutenue, conseillée et encouragée de manière indéfectible. Ils sont nombreux, je ne saurais pas les citer tous.

✚ Un grand merci, empreint d'une infinie reconnaissance, pour toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'achèvement de ce formidable et grand parcours « mon mémoire ».

Enfin, je termine par ces mots, d'une citation, qui s'imposent à nous comme une vérité incontournable: « *Cherchons comme cherchent ceux qui doivent trouver, et trouvons comme trouvent ceux qui doivent chercher encore, car il est écrit : «celui qui arrive au but ne fait que commencer.»* **Paul Valéry**.

Dédicaces

A mes chers parents et mes frères ; et mes sœurs

A mes amis(es) et à tous ceux qui me sont chers ;

A se qui m'aime, et qui je l'aime

A moi

Je dédie ce travail

La table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation de la wilaya de Khenchela	
1. Situation géographique.....	3
2. Cadre administratif.....	5
3. Le milieu physique.....	5
4. Cadre géologique.....	7
4.1. Litho stratigraphie.....	8
4.1.1. Le Mésozoïque.....	9
a) Le Trias.....	9
b) Le Crétacé.....	10
b.1. Crétacé inférieur.....	10
b.1.1. Barrémien- Aptien.....	10
b.1.2. Albien.....	11
b.2. Crétacé supérieur.....	11
b.2.1. Cénomaniens.....	11
b.2.2. Turonien.....	12
b.2.3. Sénonien.....	12
4.1.2. Le Cénozoïques.....	12
a) Le Néogène.....	12
b) Quaternaire.....	12
5. Aperçu lithologique.....	13
6. Hydrographie.....	16
7. Hydrogéologie.....	18
8. le cadre socio-économique.....	19

8.1.	La population.....	19
8.2.	L'agriculture.....	20
8.3.	La végétation naturelle.....	21
	Conclusion.....	21

Chapitre II : Hydrogéologie et géométrie des aquifères

	Introduction.....	24
1.	Lithologie de l'aquifère.....	24
1.1.	Substratum : structure profonde.....	24
1.2.	Le Plio-Quaternaire.....	25
2.	Les principaux aquifères.....	26
3.	Identification de la typologie des nappes aquifères du bassin de Rémila.....	26
3.1.	Lithologie et âge des formations aquifères.....	26
3.2.	Présentation et nature des nappes aquifères.....	27
a.	Nappe phréatique.....	27
a.1.	Profondeur de la nappe.....	27
b.	Nappes profondes.....	27
c.	Les eaux des calcaires et des grès miocènes de la bordure Sud.....	27
	Conclusion.....	28

Chapitre III : Le cadre hydroclimatique

	Introduction.....	29
1.	Les données climatiques.....	30
1.1.	La pluviométrie.....	30
1.2.	Température.....	32
1.3.	Le régime pluviométrique saisonnier.....	34
2.	Synthèses climatiques.....	34
2.1.	Diagramme Ombrothermique.....	34
2.2.	Indice de Martonne.....	35
2.3.	Indice d'aridité mensuel.....	36

3.	Etablissement du bilan hydrique.....	38
3.1.	L'évaporation/l'évapotranspiration.....	38
3.1.1.	L'évapotranspiration de référence (évapotranspiration potentielle ETP).....	39
a.	La formule de Thornthwaite.....	40
3.1.2.	L'évapotranspiration réelle (ETR).....	41
a.	Formule de TURC.....	41
3.2.	Le bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite.....	42
3.2.1.	Interprétation du bilan hydrologique moyen ($RFU_{\max}=98$).....	45
3.2.2.	Interprétation du bilan hydrologique moyen ($RFU_{\max}=28$).....	45
3.3.	Ruissellement superficiel et l'infiltration.....	46
	Conclusion.....	47

Chapitre IV : les sources thermales en Algérie

	Introduction.....	48
1.	Historique.....	48
2.	Etymologie.....	49
3.	Définitions.....	49
4.	Spécificités des aquifères hydrothermaux.....	50
5.	La classification des eaux thermales.....	53
5.1.	Selon l'origine.....	53
5.2.	Selon leur température.....	53
5.3.	Selon l'origine géologique.....	54
5.4.	Selon la composition chimique.....	54
5.5.	Selon la composition dans des minéraux.....	54
a.	Eaux bicarbonatées.....	54
b.	Eaux Ferrugineuses.....	55
c.	Eaux Sulfureuses.....	56
d.	Eaux Sulfatées.....	56
e.	Eaux Radioactives.....	56

f.	Eaux Sulfurées.....	57
6.	Les eaux thermales en Algérie.....	57
6.1.	La classification des stations thermales algériennes.....	59
7.	Le thermalisme.....	60
7.1.	Définitions.....	60
7.2.	Thermalisme en Algérie.....	61
	Conclusion.....	62

Chapitre V : Matériels et méthodes

1.	Techniques de mesures et d'analyses in situ.....	63
1.1.	Analyseur Paramètre physique avec un multi-paramètre portable Consort C931.....	63
a.	Description.....	63
b.	Les Modes Opérateur.....	64
b.1.	Mesure de pH.....	64
b.2.	Mesure de température.....	64
b.3.	Mesure de conductivité.....	64
2	Techniques de mesures et d'analyses au laboratoire.....	65
a.	Flaconnage et échantillonnage.....	66
b.	Prétraitement.....	67
c.	Dilution.....	67
2.1.	Analyse les éléments majeurs par La chromatographie ionique.....	68
2.1.1	Historique.....	68
2.1.2	Repères historique de la chromatographie ionique.....	68
2.1.3	Définition de la chromatographie ionique.....	68
2.1.4	Mise en fonctionnement.....	69
a.	Démarrage du système.....	69
b.	Injection de l'échantillon.....	70
c.	Fonctionnement sous le contrôle de Peak Net	71

d.	Optimiser la température de compensation.....	71
2.2.	Analyse les éléments mineurs par Spectrophotométrie D’Absorption Atomique.....	71
2.2.1.	Définition.....	71
2.2.2.	Méthodes de préparation des échantillons.....	72
2.2.3.	Cellules de mesure.....	73
2.2.4.	La procédure d’analyse.....	73
2.3.	Le dosage de l’élément mineur de SiO ₂ par un colorimètre de terrain DR890 de HACH).....	74
2.3.1.	Les réactifs.....	74
2.3.2.	La procédure.....	74
2.4.	La représentation simplifiée des caractéristiques chimiques des eaux.....	75
2.4.1.	Diagramme de Piper.....	75
2.4.2.	Diagramme de Schoëller et Berkloff.....	76
2.5.	Mesure isotopique de l’oxygène ¹⁸ O et le deutérium ² H.....	78
2.5.1.	La méthode de la mesure.....	78
2.5.2.	Calibration.....	81

Chapitre VI : Résultats et interprétations

	Introduction.....	83
1.	Les points d’eau concernés par le présent travail.....	83
1.1.	La source thermale de Hammam El Salihine (kh1, khb).....	84
1.1.1.	Appellations.....	85
1.1.2.	Principales structure.....	85
1.2.	Station à vapeur de Hammam El knif (kh2).....	86
1.3.	Ain Silène (kh3).....	86
1.4.	Hammam Djaarir (kh4).....	86
1.5.	Ain Zarif (kh5).....	87

1.6.	Ain El Karma (kh6).....	87
1.7.	Ain El Manchar (kh7).....	87
1.8.	Ain Djimente (kh8).....	87
2.	Etude analytique des paramètres physico-chimiques.....	88
2.1.	La température (T°).....	88
2.1.1.	La classification des eaux thermales en fonction de la température d'émergence.....	88
2.2.	La conductivité électrique (CE).....	89
2.3.	Le pH.....	91
3.	Hydrochimie des éléments majeurs.....	91
3.1.	L'analyse statistique.....	92
3.2.	Les éléments chimiques.....	94
3.2.1.	Éléments majeurs.....	94
3.3.	Les faciès chimiques.....	96
3.3.1.	Diagramme de Piper.....	96
3.3.2.	Diagramme de Schoëller- Berkaloff.....	98
4.	L'origine de la minéralisation : évolution des différents ions.....	99
4.1.	Les indices de saturation.....	99
4.2.	Les alcalino-terreux Ca ²⁺ et Mg ²⁺ , les hydrogénocarbonates et sulfates.....	100
4.3.	Le sodium, Na ⁺ et les chlorures, Cl ⁻	103
4.4.	Le potassium, K ⁺	106
4.5.	Les nitrates NO ₃ ²⁻	106
4.6.	La Silice, SiO ₂	107
5.	Éléments mineurs en traces.....	108
5.1.	Le Strontium et le Lithium.....	109
5.1.1.	Le Strontium, Sr ²⁺	110
5.1.2.	Le Lithium, Li ⁺	112
5.2.	Le brome, Br ⁻ et le fluor, F ⁻	113
5.2.1.	Le Brome, Br ⁻	114
5.2.2.	Le Fluor, F ⁻	115

6.	Traçage isotopique.....	117
	Introduction.....	117
6.1.	Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène.....	118
6.1.1.	Approche méthodologique.....	118
6.2.	L'apport des isotopes de l'environnement en hydrogéologie.....	120
6.2.1.	Les isotopes stables (^{18}O et ^2H) et la notation delta (δ).....	120
6.2.2.	Les isotopes stables de la molécule d'eau.....	121
6.3.	Corrélation des isotopes stables deutérium (^2H) et Oxygène (^{18}O).....	122
6.4.	Relation ^2H vs ^{18}O dans les eaux souterraines.....	123
7.	Etude microbiologique.....	127
7.1.	Procédure d'échantillonnage.....	127
7.2.	La procédure d'analyse.....	127
7.3.	L'interprétation des résultats.....	130
7.4.	L'observation macroscopique d'Ain Silène (Kh3).....	131
	Conclusion.....	132
	Conclusion générale.....	135
	Références bibliographiques.....	139
	Annexe.....	144

Résumé

Abstract

المخلص

La liste des tableaux

Tableau n°	Pages
Tableau 1 : Répartition de la population par strate.....	20
Tableau 2 : Résume les caractéristiques des cinq stations hydrométriques.....	30
Tableau 3 : Précipitation moyenne mensuelle interannuelle de la station de Khenchela (1994-2010) en mm.....	31
Tableau 4 : Température moyenne mensuelle interannuelle à la station de khenchela (1994-2010) en (°C).....	32
Tableau 5 : Le régime pluviométrique saisonnier pour une période de 17ans (1994-2010).....	34
Tableau 6 : Indices d'aridité mensuels (I) à la station d'Hamma.....	37
Tableau 7 : Coefficient de correction K dépend du site considéré (climat semi aride)...	41
Tableau 8 : Bilan hydrologique moyen (1994-2010) de la station de Khenchela, par la méthode de Thornthwaite (RFU=98).....	43
Tableau 9 : Bilan hydrologique moyen (1994-2010) de la station de Khenchela, par la méthode de Thornthwaite (RFU=28).....	44
Tableau 10 : Répartition de précipitation en (mm, %) ; RFU _{max} =28 à la station de Khenchela.....	46
Tableau 11 : Répartition de précipitation en (mm, %) ; RFU _{max} =28 à la station de Khenchela.....	47
Tableau 12 : La précision de l'appareil Consort C931.....	64
Tableau 13 : Travaux de laboratoire et appareillage.....	65
Tableau 14 : Le laboratoire qui a concouru le présent travail.....	66
Tableau 15 : Classification des eaux selon la température mesurée.....	89
Tableau 16 : Classification des eaux des sources minérales et thermales Algériennes selon la conductivité.....	90
Tableau 17 : Classification des eaux selon la conductivité mesurée.....	90
Tableau 18 : L'état des eaux selon les valeurs du pH mesurées.....	91
Tableau 19 : Analyses chimiques en élément majeurs (mg/l).....	94
Tableau 20 : Indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux des eaux souterraines de Khenchela.....	99
Tableau 21 : Analyses chimiques en élément mineurs (mg/l).....	108
Tableau 22 : Rapport Sr ⁺⁺ /Ca ⁺⁺ des eaux analysées.....	111

Tableau 23:	Les valeurs comparatives de Li^+ entre les sources d'eau en (mg/l).....	112
Tableau 24:	Isotopes du milieu de l'oxygène et de l'hydrogène : traceurs intimes de la molécule de l'eau.....	121
Tableau 25:	Résultats d'analyses isotopiques des eaux de Khenchela.....	124
Tableau 26:	Les résultats d'analyse des Coliformes et des Entérocoques intestinaux.....	128
Tableau 27:	Les résultats d'analyse des Germes Totaux et Staphylocoques.....	129

La liste des figures

Fig. n°	pages
Fig.1 : La carte de la position géographique de la wilaya de Khenchela.....	4
Fig.2 : La carte de relief de la wilaya de Khenchela.....	6
Fig.3 : Carte géologique de la Wilaya de Khenchela.....	7
Fig.4 : Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de L'Aurès...	8
Fig.5 : Coupe interprétative dans le bassin de Rémila	9
Fig.6 : La carte lithologique de la wilaya de Khenchela.....	15
Fig.7 : La carte hydrographique de la wilaya de Khenchela.....	18
Fig.8 : Unités hydrogéologiques dans le bassin de Garâat Tarf.....	25
Fig.9 : Précipitation moyenne mensuelle pour une période de 17ans (1994-2010).....	31
Fig.10 : Précipitation moyenne annuelle pour une période de 17ans (1994-2010).....	32
Fig.11 : Température mensuelle moyenne pour une période de 17ans (1994-2010).....	33
Fig.12 : Température moyenne annuelle pour une période de 17ans (1994-2010).....	33
Fig.13 : Le régime pluviométrique saisonnier pour une période de 17ans (1994-2010).....	34
Fig.14 : Diagramme ombrothermique.....	35
Fig.15 : L'indice d'aridité annuel de Martonne.....	37
Fig.16 : Le complexe hydrique (sol-plante-climat).....	38
Fig.17 : Evaporation et Evapotranspiration potentielle et réelle.....	39
Fig.18 : Utilisation de l'eau du sol par les végétaux lors du cycle de l'eau.....	42
Fig.19 : Bilan hydrologique moyen ($RFU_{max}= 98$) par la méthode de Thornthwaite.....	44
Fig.20 : Bilan hydrologique moyen ($RFU_{max}= 28$) par la méthode de Thornthwaite.....	45
Fig.21 : Schéma de la circulation des eaux thermales ; Thermosiphon.....	52
Fig.22 : Coupe longitudinale de la circulation des eaux thermales.....	53
Fig.23 : Les stations thermales en Algérie du Nord	59
Fig.24 : Le multi-paramètre portable Consort C931.....	63
Fig.25 : Echantillonnage Dans les sources moins chaudes.....	66
Fig.26 : Échantillonnage Lorsque la température élevée.....	67
Fig.27 : Le dispositif de la filtration à $0.45\mu m$	67
Fig.28 : La chromatographie ionique Dionex 120.....	69
Fig.29 : La spectrophotométrie d'absorption atomique SAA.....	71
Fig.30 : Schéma de principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique.....	72
Fig.31 : Le colorimètre de terrain DR890 de HACH).....	74

Fig.32 : Diagramme de Piper.....	76
Fig.33 : Diagramme de Schoëller et Berkaloff.....	77
Fig.34 : Spectromètre de masse Delta-V et leur équipement.....	78
Fig.35 : Schéma de principe du GasBench.....	78
Fig.36 : GasBench (auto échantillonneur) en mise en marche.....	79
Fig.37 : Schéma de la fiole et du transfert du gaz.....	80
Fig.38 : Schéma de principe du piège à eau.....	81
Fig.39 : Chromatogramme type du Delta-V Visualisation du bruit de fond avant analyse	82
Fig.40 : La représentation des points d'eau à échantillonnées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).....	84
Fig.41 : Les deux piscines Romaines.....	85
Fig.42 : La classification hiérarchique ascendante ou HCA des eaux de Khenchela.....	93
Fig.43 : L'analyse en composantes principales ou ACP des eaux de Khenchela.....	93
Fig.44 : Représentation comparative des éléments majeurs dans les quatre sources thermales.....	95
Fig.45 : Représentation comparative des éléments majeurs dans les cinq sources d'eau froides.....	95
Fig.46 : Représentation sur diagramme de Piper des compositions en éléments majeurs des eaux de notre zone d'étude.....	97
Fig.47 : Représentation sur diagramme de Schoeller-Berkaloff des compositions en éléments majeurs des eaux de notre zone d'étude.....	98
Fig.48 : Evolution des indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux.....	100
Fig.49 : Evolution de Ca, Mg et SO ₄ en fonction de la conductivité.....	101
Fig.50 : Evolution de Ca en fonction des cations.....	102
Fig.51 : (A) Evolution de Na et Cl en fonction de la conductivité.....	104
Fig.52 : (B) relation NaCl.....	105
Fig.53: Relation SiO ₂ -Température.....	107
Fig.54 : Représentations comparative entre les quatre sources thermales (les éléments mineurs).....	109
Fig.55 : Représentation comparative entre les cinq sources d'eau froides (les éléments mineurs).....	109
Fig.56 : Relation SO ₄ -Sr.....	111

Fig.57 :	Représentation graphique du rapport ionique en concentration molaire Sr^{++}/Ca^{++} des sources d'eau.....	
Fig.58 :	Représentation comparative du lithium dans les neuf sources.....	113
Fig.59 :	Evolution du rapport Br/Cl et du Brome en fonction de la TDS et des chlorures.....	114
Fig.60 :	Evolution du Fluor pour les différentes sources analysées.....	115
Fig.61 :	Evolution du F en fonction de Cl et Ca.....	116
Fig.62 :	Définition des différents domaines d'application des isotopes stables.....	119
Fig.63 :	Relation δ^2H vs $\delta^{18}O$ de nos sources par rapport à la droite météorique mondiale de Craig(1961).....	125
Fig.64 :	l'Altitude d'Ain Djimente par rapport à l'altitude de Garaet El Tarf.....	125
Fig.65 :	Carte de situation des sources.....	126
Fig.66 :	Représentation comparative des résultats du dénombrement des Coliformes et des Entérocoques intestinaux.....	128
Fig.67 :	Représentation comparative des résultats Germes Totaux et Staphylocoques	129
Fig.68:	Colonies de Staphylococcus aureus isolées sur gélose de Chapman (au mannitol) après 48h.....	132

Introduction générale

A la fois fascinantes et précieuses, discrètes et rafraîchissantes, les eaux souterraines jouent un rôle majeur dans les équilibres des espaces naturels et urbains. Indispensable à la vie, l'eau issue du sous-sol a déterminé l'implantation des premiers lieux de vie sociale des hommes. Pour les terriens que nous sommes, les puits, forages, sources, ...sont des "fenêtres" ouvertes sur ce monde souterrain qui recèle bien des trésors aquatiques.

Les recherches scientifiques menées sur l'hydrochimie des eaux souterraines sont d'un grand intérêt. Notre zone d'étude c'est La région de Khenchela est située au Nord de l'Algérie, au Sud-est du constantinois ; et au contrefort du mont des Aurès entre $34^{\circ} 06' 36''$ et $35^{\circ} 41' 21''$ latitudes Nord ; et entre $06^{\circ} 34' 12''$ et $07^{\circ} 35' 56''$ de longitudes Est. La région d'étude est semi-aride endoréique est marquée par les phénomènes de concentration des solutions et de salinisation sous l'influence de l'évaporation. la prodigieuse richesse de la région en sources d'eaux souterraines thermales et froides est connue depuis bien longtemps, quatre sources d'eau thermales, et cinq sources d'eau froides ont fait l'objet de notre travail, des mesures physico-chimiques ont été effectués sur terrain, ainsi que des prélèvements destinés aux analyses chimiques en éléments majeurs, mineurs, isotopiques et microbiologiques.

Il est nécessaire l'identification de la concentration de chaque élément chimique par rapport à la minéralité globale des eaux pour apprécier la diversité des mécanismes responsables des variations hydrochimique d'une région.

Cette étude a pour objectif d'apporter des informations sur le mode de fonctionnement des systèmes aquifères des altitudes, l'origine de leur alimentation et enfin leurs composition chimique, isotopique et microbiologique et de voir si on pourra utiliser ces eaux à des fins sanitaires dans la cure de certaines maladies ou comme eau minérale de large consommation.

Afin de répondre à ces préoccupations, Notre démarche a été fondée sur deux principaux axes : axe théorique et axe pratique.

Dans la partie théorique ; est réservée à l'étude bibliographique comprenant quatre chapitres :

- le premier chapitre sera consacré à cerner, la présentation générale de la wilaya de kenchela notre zone d'étude.
- Le deuxième chapitre traitera l'Hydrogéologie et géométrie des types des aquifères de la région.
- Le troisième traitera la partie climatique ;
- Et le quatrième sera consacré sur des généralités sur les sources thermales.

Dans la partie pratique ; est réservée à l'étude expérimentale comprenant deux chapitres :

- La première partie traitera la méthodologie de travail, présentation de matériels utilisé soit in situ ou au laboratoire d'une part, et techniques de mesures et d'analyses d'autre part.
- La deuxième partie ; sera réservée en premier lieu à la description des sites étudiées. Et présentera enfin les résultats d'analyses et la discussion.

Cette étude a été réalisée grâce à la collaboration du laboratoire du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger.

Chapitre I

Présentation de la wilaya de Khenchela

I. Présentation de la wilaya de Khenchela

1. Situation géographique

La région de Khenchela est située au Nord de l'Algérie, au Sud-Est du constantinois ; et au contrefort du mont des Aurès entre 34° 06' 36'' et 35° 41' 21'' latitudes Nord ; et entre 06° 34' 12'' et 07° 35' 56 '' de longitudes Est (Fig.1). Sa superficie est de 9715,6 km². Elle est limitée géographiquement au :

- **Nord** : par la Wilaya d'Oum El Bouaghi ;
- **Sud** : par la wilaya d'El Oued ;
- **Est**: par la wilaya de Tébessa ;
- **Ouest**: par la wilaya de Batna ;
- **Sud- Ouest** : par la wilaya de Biskra.

De par, sa position géographique ; la wilaya de Khenchela qui non seulement est limitée ; par cinq (05) Wilayat ; dont les liens demeurent très étroits dans tous les domaines de l'activité économique et sociale ; elle constitue également ; un trait d'union ; non moins appréciable entre le Nord/ Est et le Sud du pays. Elle se trouve ainsi, située aux portes des grandes villes du sud ; et non éloignée des villes métropoles du nord.

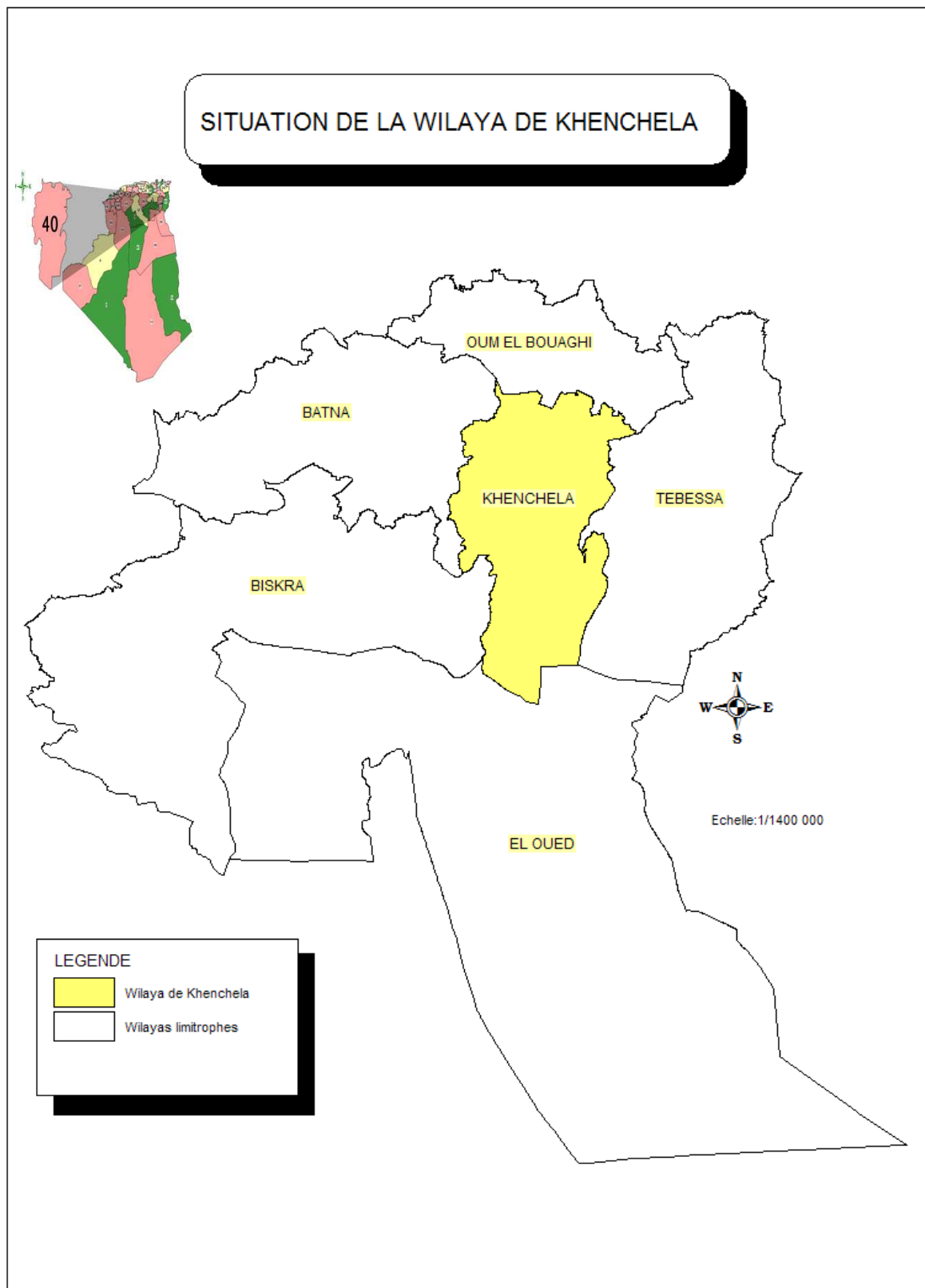


Fig.1 : la carte de la position géographique de la wilaya de Khenchela. [17]

2. Cadre administratif

La Wilaya de Khenchela est issue de la refonte territoriale de 1984. Elle était rattachée entre 1977 et 1984 à trois Wilayats différentes :

- Oum El Bouaghi pour l'EX Daïra de Khenchela ;
- Tebessa pour la Daïra de Chechar ;
- Batna pour la Daïra de Kais.

Sur le plan administratif et structurel, la wilaya de Khenchela, regroupe 21 communes, rattachées administrativement à 8 daïras (dont 05 Daïras créent en 1990). [17]

3. Le milieu physique

- le relief

Le relief de la wilaya de Khenchela, est composé de quatre (04) grands ensembles géographiques (Fig.2).

○ **Les montagnes**

On les rencontre essentiellement dans la zone Ouest de la wilaya (les Aurès) ; dans la zone centrale (les monts des Nememchas) et au Nord - Est (Ain -Touila)

○ **Les plateaux**

Ils sont situés au Nord /Est (plateau de O.Rechache) et s'étendent sur les communes de Mahmel et de Ouled Rechache.

○ **Les plaines**

Situées au Nord et Nord /Ouest de la wilaya, elles comprennent Remila, Bouhmama et M'toussa

Il est à noter que ces deux derniers ensembles sont parfois appelés les hautes plaines.

○ **les parcours steppiques et les dépressions**

Ils sont situés dans la partie méridionale de la wilaya. Ils se caractérisent par des terres sablonneuses et par la présence de chotts. Ces derniers constituent ainsi le point de convergence exutoire des oueds drainant le Sud de la wilaya.

*Elle est caractérisée par sa vocation agrosylvopastorale ou la superficie agricole représente 22%, les forêts, 12% et la steppe représente 49% de la superficie totale. [16, 38]

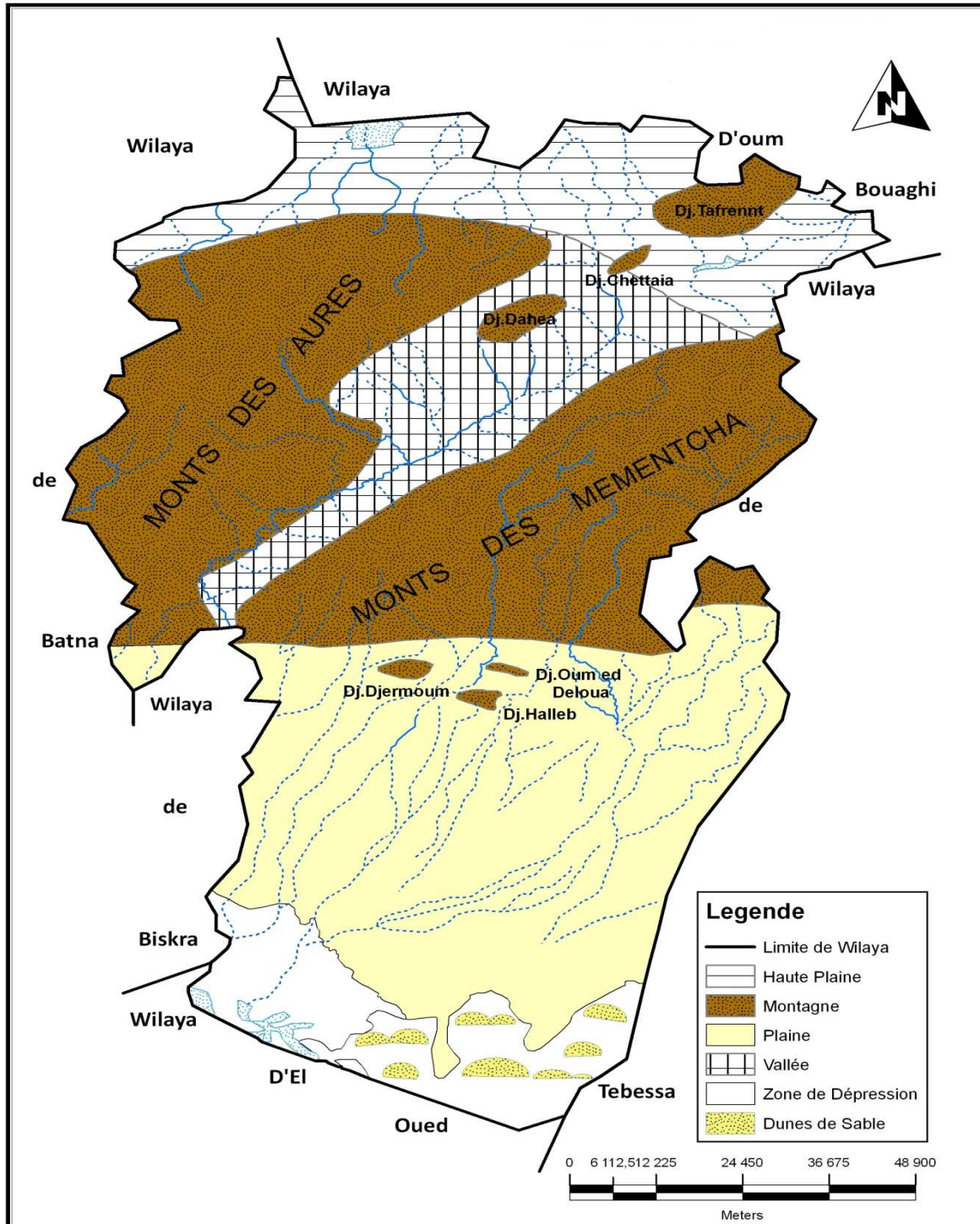


Fig.2 : la carte de relief de la wilaya de Khenchela. [17]

4. Cadre géologique

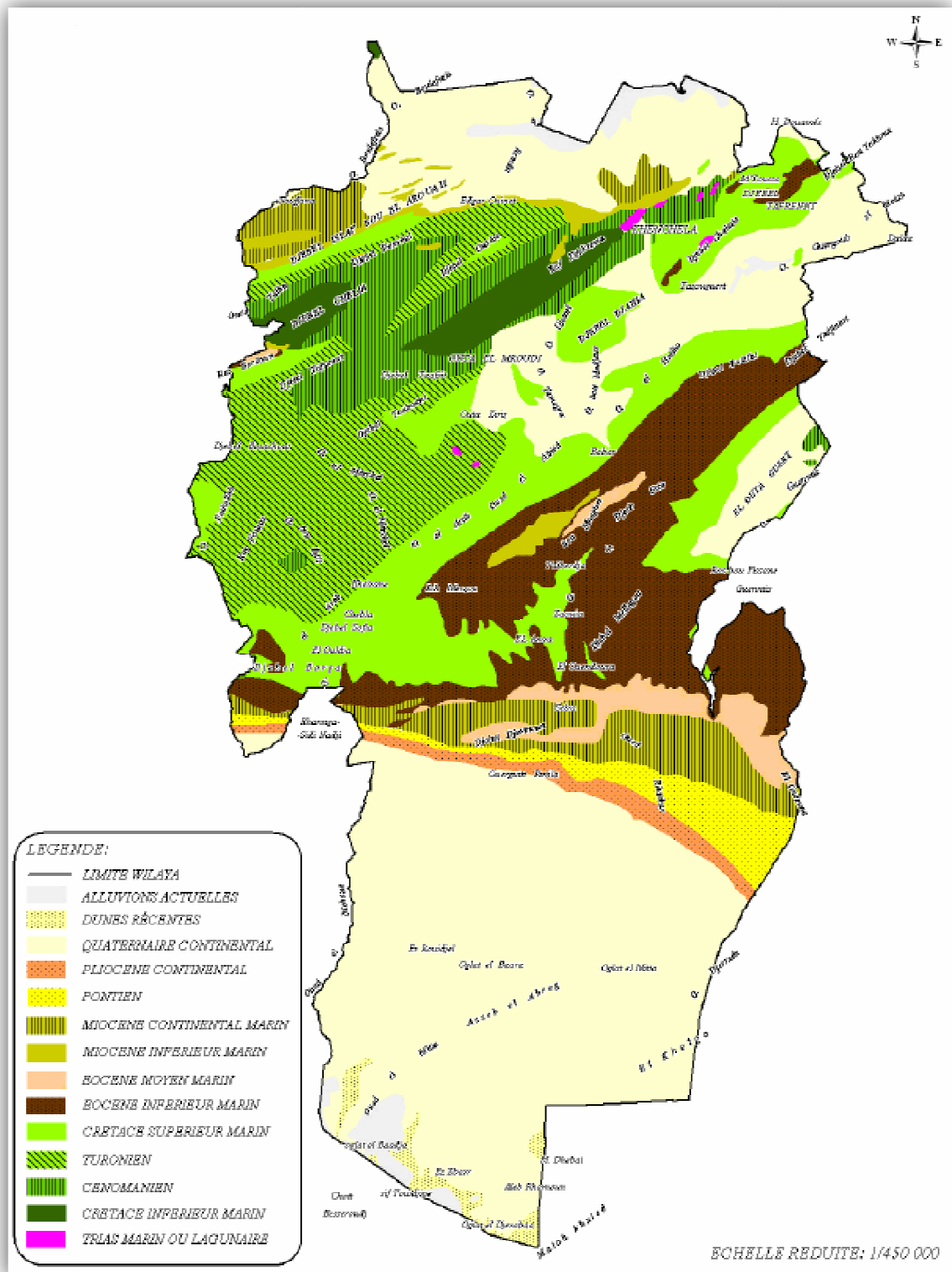


Fig.3 : Carte géologique de la Wilaya de Khenchela [38]

4.1. Litho stratigraphie

La puissante série stratigraphique de la zone étudiée 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.4).

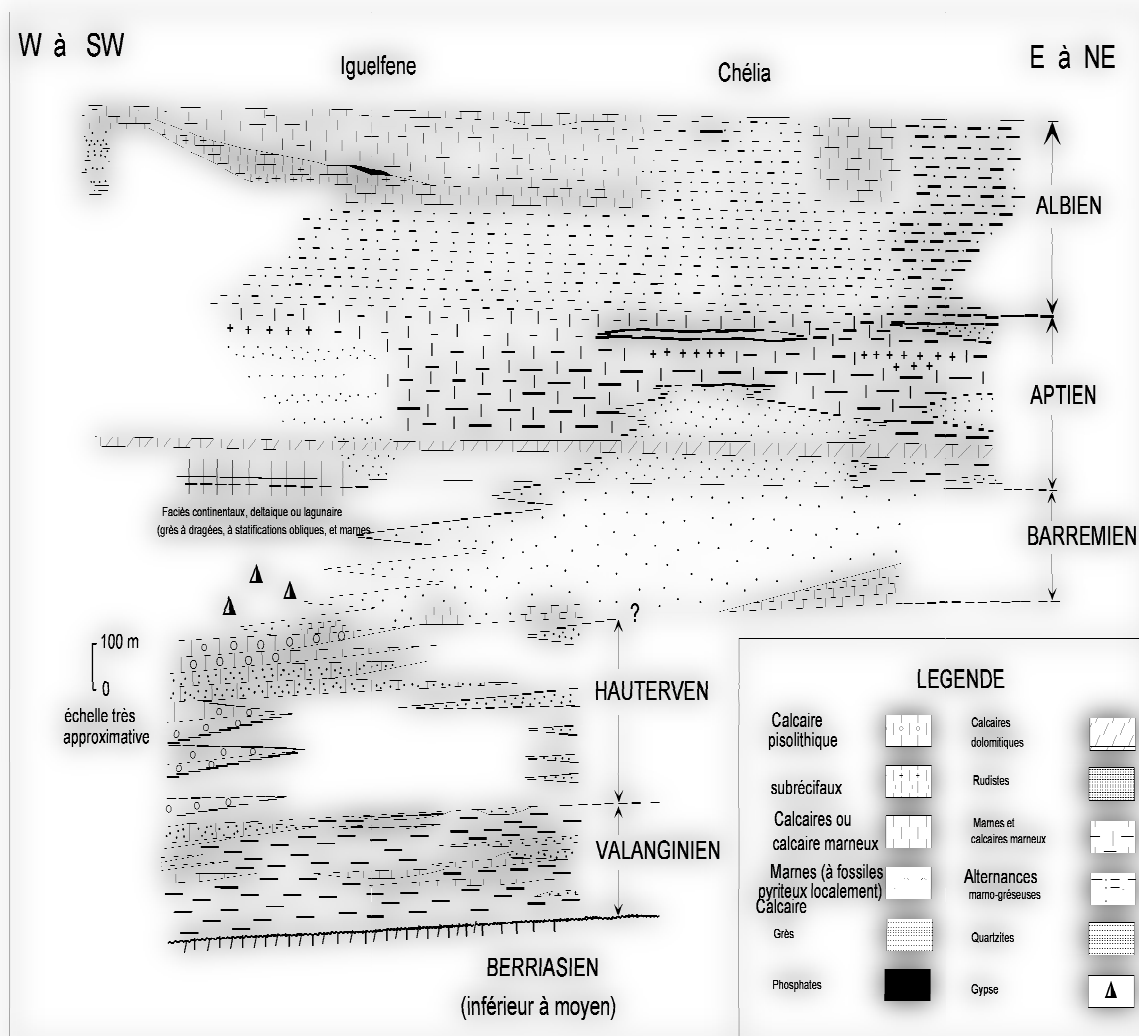


Fig. 4: Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur des L'Aurès [39]

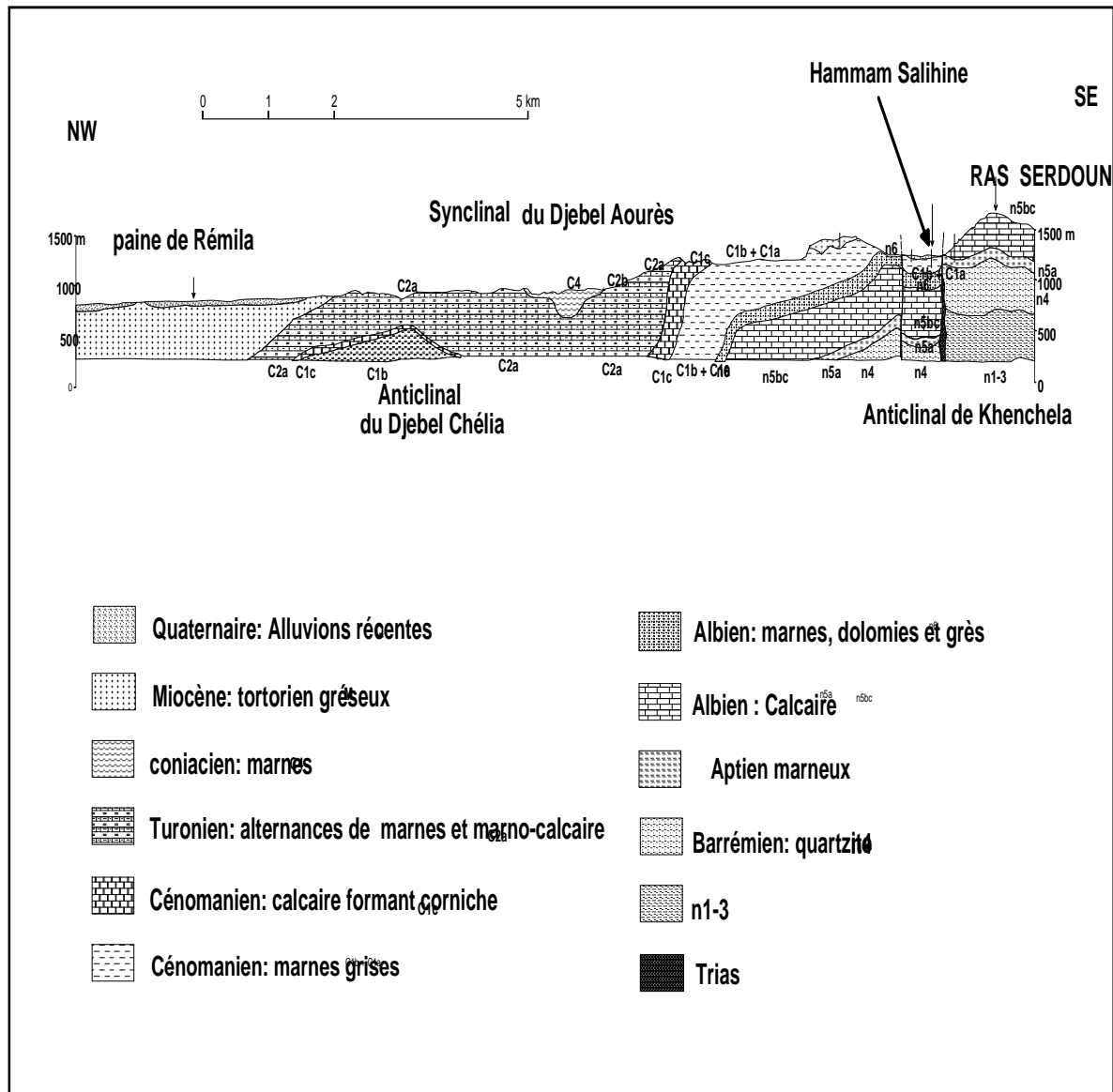


Fig.5: Coupe interprétative dans le bassin de Rémila [53]

4.1.1. Le Mésozoïque

a) Le Trias

Dans les régions qui entourent la dépression de Hammam El Salihine les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisés à proximité de Khenchela (fig. 5), 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, du côté de Ain Silène en contact anormal avec l'Albien,

La série triasique comportait probablement à l'origine, de la base vers le sommet : une formation évaporitiques 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 Ain Silène, mais cela tient, non pas à un caractère original particulier au Trias de cette région, mais au fait que cet époinement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être dissous, tandis que dans les autres époinements, qui sont anté-miocènes, il a disparu depuis longtemps.

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 passée marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques

b) Le Crétacé

b.1. Crétacé inférieur

Dans le vaste massif de l'Aurès, le Crétacé inférieur constitue l'essentiel des reliefs les plus élevés : Dj. Chelia et Dj. Aidel (fig.5).

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 la figure. (3) 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

b.1.1. Barrémien- Aptien (Fig.5)

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 marnes fossilifères (Aptien inférieur) au sommet.

Dans le S.E présentent, surtout à la base de l'étage, des intercalations de calcaires marins (Djebel Aidel), l'épaisseur de l'étage varie de **400** m environ (Sud) à **250** m (Nord).

Les couches précédentes sont surmontées par des marnes puis par des masses calcaires avec rares intercalations marneuses. Une barre de calcaire dolomitique roux, reconnus à ce niveau dans le massif de Khenchela. Viennent ensuite des calcaires à Orbitolines, pouvant alterner avec des marnes et surtout des grès. [36]

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.

b.1.2. Albien (Fig4 et Fig.5)

L'Albien débute dans l'Aurès (fig.4), 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 (fig.5), 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.

b.2. Crétacé supérieur (Fig.4)

Le Crétacé supérieur forme l'essentiel des affleurements mésozoïques dans les confins de l'Aurès.

b.2.1. Cénomaniens

Le Cénomaniens 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 (Fig.4).

Le Cénomaniens est présent dans tous les anticlinaux de l'Aurès (fig.4). Il est essentiellement calcaro-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.

b.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.

b.2.3. Sénonien

Le sénonien est présent au Sud de la plaine de Rémila, sur le flanc Nord de l'Anticlinal du Djebel Chélia avec un faciès principalement marneux. Son épaisseur peut être très importante et atteindre **1000** à **2000** m.

4.1.2. Le Cénozoïques (Fig. 4 et Fig. 5)**a) Le Néogène**

Le Néogène est assez bien conservé au Nord de l'Aurès dans un bassin qui s'étend approximativement de Batna à Khenchela (Fig.4 et 5).

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 Nord du massif de l'Aurès, 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.

b) Quaternaire

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

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 est, malheureusement, limitée au voisinage de l'Aurès et ses confins.

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. 4).

Les piémonts sont ici généralement modelés en glacis à couverture détritique peu épaisse, dont le plus visible sont situés au sud de El Hamma 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. [36]

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 forges, 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 Chot.

Au Sud du bassin, dans la région de Kais à El Hamma, le Plio-Quaternaire est constitué d'alluvions récentes formé de graviers et galets roulés à éléments gréseux sur une épaisseur de **3m 50cm**. En dessous on trouve des alluvions marneuses d'épaisseur inconnue d'une épaisseur de **7m 50cm**.

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, [35].

5. Aperçu lithologique

La lithologie (nature géologique des roches de surface) donne une indication sur la résistance des sols à l'érosion. Croisée avec d'autres facteurs des milieux physique et naturel (pente, intensité des pluies et occupation du sol), elle permet d'apporter une appréciation sur

la sensibilité des sols à l'érosion et par conséquent elle constitue un critère déterminant quant à la définition de (ou des) l'option à prendre au titre d'une utilisation (affectation) rationnelle et durable du sol. (Fig.6)

Sur le plan lithologique, la wilaya de Khenchela présente une multitude de faciès, dont les plus représentés sont énumérés ci-après :

- **Les alluvions et sables** : Ces faciès, moyennement stables, sont rencontrés principalement sur les hautes plaines du nord, sur les terrasses alluviales d'El Meroudj et Oued Guergoub, ainsi qu'au niveau du glacis situé sur les piémonts des Aurès-Némenchas et les basses plaines du sud. Ils correspondent à des terres à fort potentiel agricole, mais dont l'intensification reste tributaire de la ressource en eau pour l'irrigation.
- **Les marnes** : Formations très sensibles à l'érosion et souvent sujettes aux glissements de terrains, les marnes sont présentes tout le long de la vallée de l'Oued El Arab et sur la partie est de la wilaya, correspondant aux monts des Némenchas, Au niveau de ces derniers, qui sont dépourvus de végétation forestière, ces formations sont soumises à une érosion intense et se présentent souvent sous forme de « badlands ».
- **Les calcaires et dolomies dures** : Formations à bonne résistance à l'érosion, les calcaires et dolomies dures sont présent sur la presque totalité du massif des Aurès et sur les reliefs du nord-est de la wilaya. En général, ces formations de montagne sont relativement bien arrosées et couverte d'une végétation forestière assez dense qui les protège de l'érosion.
- **Les calcaires friables** : Peu répandus dans la wilaya, ces faciès sensibles à l'érosion sont localisés principalement sur la bande médiane séparant le nord du sud de la wilaya, et localement au nord, dans la zone des Garaet. Ces roches donnent naissance à des sols calcaires, de profondeur variable suivant leur position topographique, et riches en humus quand ils sont couverts de végétation forestière ;
- **Le trias (gypse)** : Formation saline, le trias est essentiellement répandu sur les basses plaines sahariennes au sud de la wilaya. Par ailleurs, on le trouve localement au nord

de Khenchela, à l'est de Babar et au sud de Ouled Rechache. La végétation au niveau de ces espaces est de type halophile. [14]

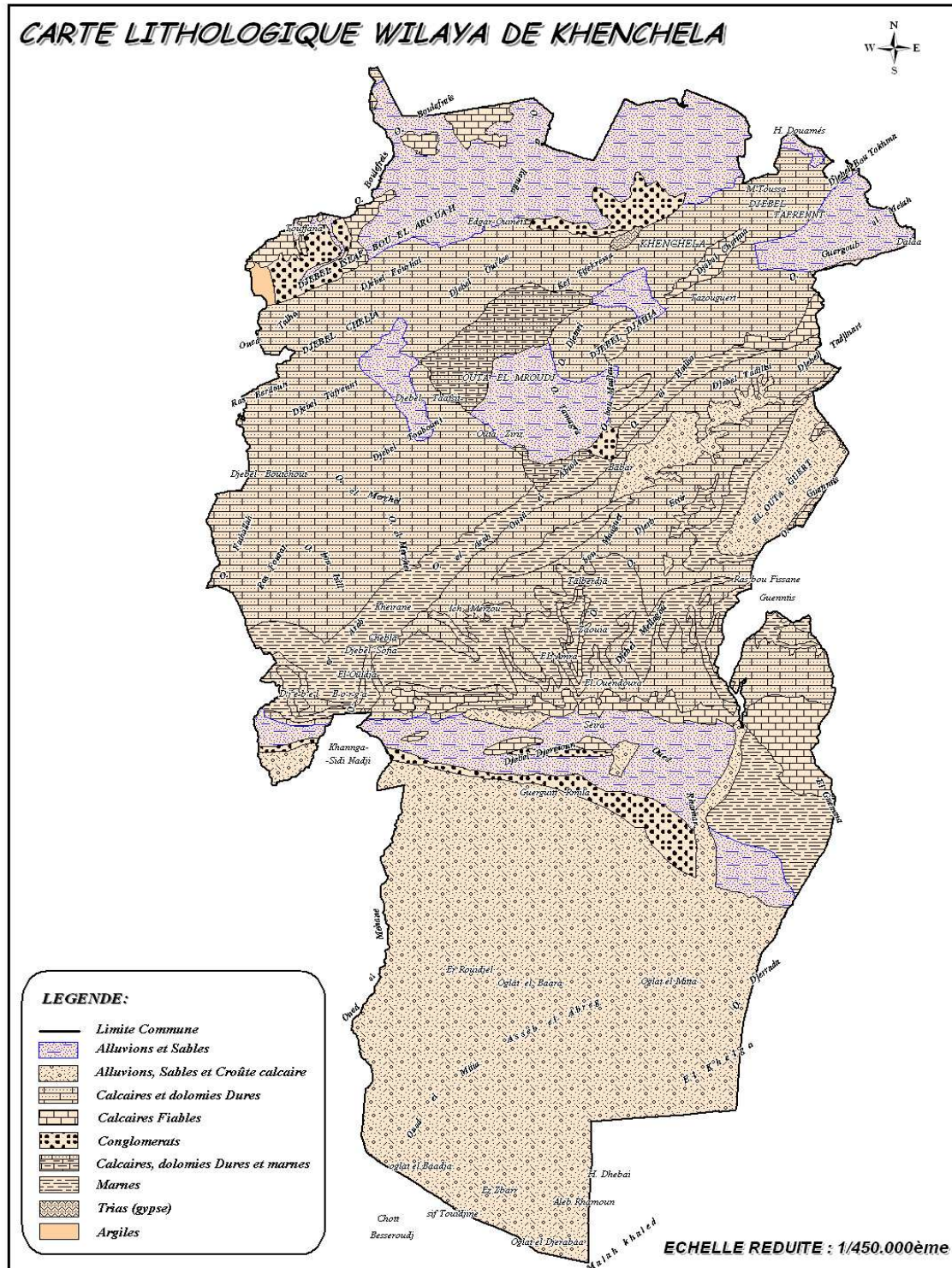


Fig.6 : la carte lithologique de la wilaya de Khenchela. [17]

6. Hydrographie

La wilaya de Khenchela s'inscrit dans les limites géographiques de trois bassins versants (Fig.6) :

- Le bassin versant des Hautes Plaines constantinoises, qui correspond à la partie nord de la wilaya (piémonts nord des Aurès et zone des dépressions) ;
- Le bassin versant de la Médjerdah, pour la partie nord-est correspondant aux versants sud des djebels: Chettaia, Tafrennt et Bou Tokhma, et, aux versants nord des Djebels : Tadilist et Tadjinnart ;
- Le bassin versant du Chott Melghir, pour les parties médiane et sud de la wilaya, correspondant au massif des Aurès, aux monts des Nemenchas, aux vallées des oueds El Arab et Mellagou, ainsi qu'aux plaines steppiques et présaharienne du sud. Contrairement aux deux premiers bassins précités, qui ne touchent qu'une petite partie de la wilaya, ce bassin couvre plus des trois quarts du territoire.

Concernant le réseau hydrographique, la wilaya est drainée par quelques oueds d'une importance relative et à caractère endoréique, alimentés par un chevelu très dense. Les cours les plus importants sont présentés ci-après par bassin versant :

- **Le bassin versant des Hautes Plaines constantinoises.** Ce bassin est drainé principalement par les oueds Boulefreis, Er Remila et Gueis. Ces oueds, alimentés par un chevelu très dense de petits cours d'eau, se jettent tous au niveau des dépressions (petites sebkhas) situées au nord de la wilaya. Au vu des apports pluviométriques limités dans cette zone et de la présence de formations triasiques, on déduit que le volume des écoulements est faible et que la qualité des eaux est saline.
- **Le bassin versant de l'oued Medjerdah.** Ce bassin, qui correspond à la zone de montagne et de vallée du nord-est de la wilaya, est drainé principalement par l'oued Guergoub.
- **Le bassin versant de chott Melghir :** Ce bassin couvre les parties médiane et sud de la wilaya, correspondant au massif des Aurès, aux monts des Nemenchas, aux vallées des oueds El Arab et Mellagou, ainsi qu'aux plaines steppiques et présahariennes du sud ; il est drainé par :
 - Oued El Arab, qui est le résultat de la confluence des oueds Mellagou et El Abiod. Cet oued, qui se jette dans le chott Melghir, traverse les communes de Kheirane et El Ouldja, où il creuse de véritables canyons.

- Oued El Abiod, qui prend naissance dans les Aurès avant de confluer avec l’oued Mellagou ;
- Oued Mellagou, qui prend sa source dans les Aurès avant de confluer avec l’oued El Abiod ;
- Oued Zaouia, qui prend sa source dans les Nemenchas et qui se jette au sud dans le chott. Cet oued creuse lui aussi un véritable canyon ;
- Oued Rharhar, qui prend naissance dans les piémonts des Nemenchas à l’est, pour donner naissance plus au sud à l’oued El Mita, avant de rejoindre le chott. Les oueds de la wilaya sont essentiellement de type endoréique et se déversent ainsi dans les dépressions de la région : au nord, dans la dépression d’El Tarf et au sud dans le Chott Melghir. Compte tenu du climat et du relief de la wilaya, les écoulements les importants sont enregistrés au niveau de la vallée de l’oued El Arab, tandis que la zone des parcours steppiques et saharienne est généralement à sec, sauf en période de crues. [16]

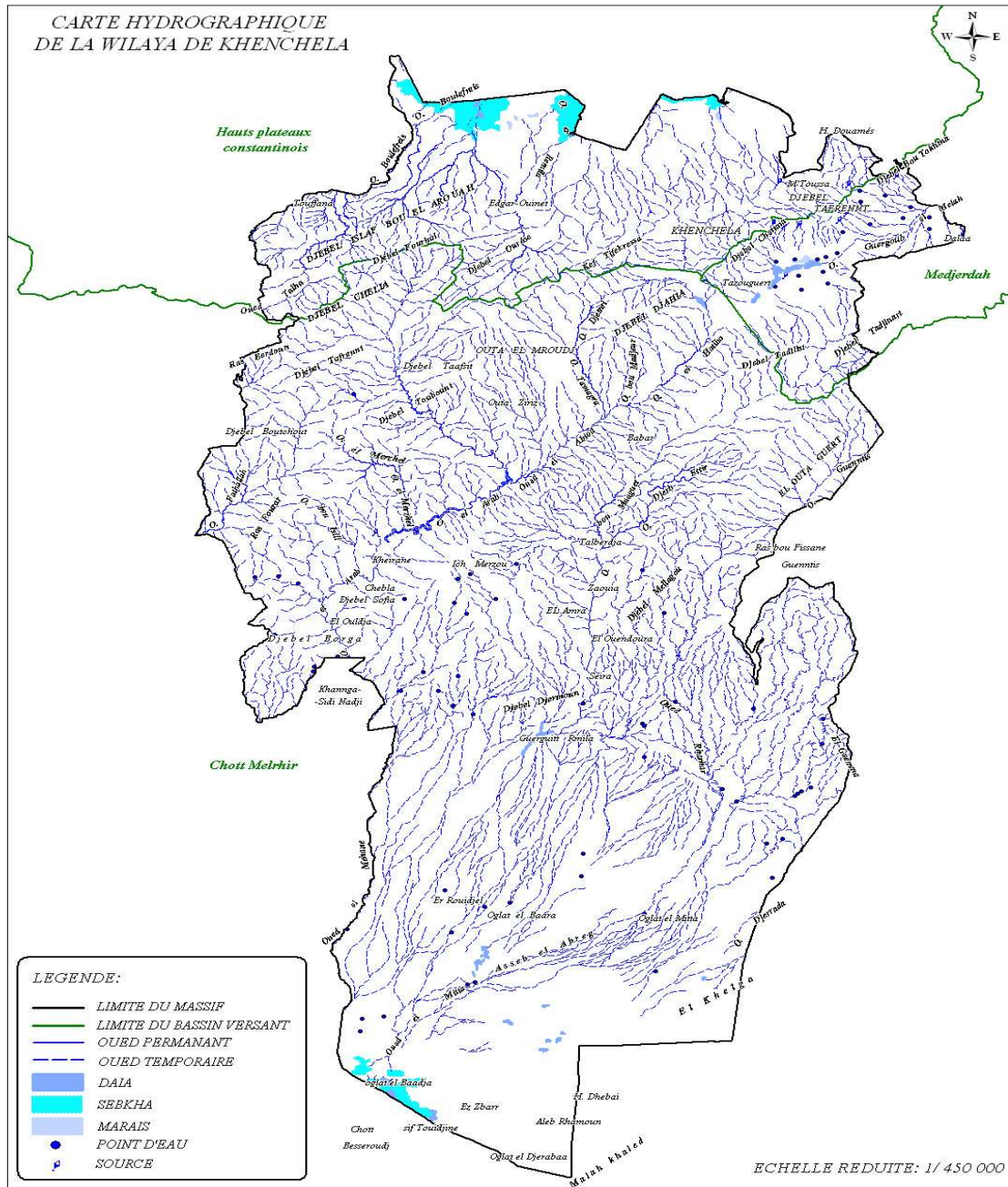


Fig.7 : la carte hydrographique de la wilaya de Khenchela. [17]

7. Hydrogéologie

En matière d'hydrogéologie et eaux souterraines, les connaissances actuelles sur la wilaya sont limitées et par conséquent ne permettent pas de tirer des conclusions objectives et pertinentes dans ce domaine. Toutefois, à partir des données en notre possession, on retient les aspects ci-après:

Selon l'étude PAW réalisée précédemment par l'agence nationale d'aménagement du territoire (ANAT), trois nappes ont été différenciées et ce, grâce à leur profondeur moyenne :

- La nappe phréatique (en moyenne inférieure à 100 mètres de profondeur). Elle est captée par plusieurs forages répartis à travers la wilaya (nord, est et sud) et alimente plusieurs sources d'intérêt local (Aïn El Fedj, Aïn Krim, Aïn Frengal), le point de résurgence étant généralement une faille ou une fracture ;
- Une nappe moyenne (nappe des grés miocènes) de profondeur variant entre 100 et 300 mètres. Elle est captée au sud de la wilaya dans la daïra de Babar ;
- Une nappe profonde, de profondeur variant entre 300 et 600 mètres. Elle est captée exclusivement dans au sud de la wilaya dans la daïra de Chechar. [5]

8. le cadre socio-économique

8.1. La population

Au recensement de 1966, la population totale de la wilaya était estimée à 128 169 habitants. Au RGPH de 1977, elle passe à 189 026 habitants et une décennie après, au recensement de 1987, elle atteint 246 541 habitants, soit respectivement des taux d'accroissement annuels moyens intercensitaires de 3,96%, entre 1966 et 1977 et 2,69% entre 1977 et 1987.

RGPH de 1998, la population de la wilaya approchait les 327 917 habitants soit un accroissement de 1,6% entre 1998 et 2008 ; soit une régression légère.

Dans l'ensemble les taux moyens annuels de la croissance démographique de la wilaya restent parmi les même taux, que ce soit au niveau régional ou national ; en revanche, ses densités de peuplement se situent parmi les plus faibles.

A travers le territoire, la population est inégalement répartie, elle distingue par Une concentration de la population au Nord de la Wilaya où le chef lieu de Wilaya abrite plus du 1/3 de la population totale, un quasi dépeuplement de la partie Sud et une armature urbaine déséquilibrée.

la Wilaya reste incontestablement la prise en charge de cet accroissement de la population dans le cadre d'une optique d'aménagement et de développement durable qui auront pour

effet immédiat de stabiliser les populations en âge d'activité dans leur milieu naturel et d'éviter le « surpeuplement » de la zone Nord.

Tableau 1 : Répartition de la population par strate

Strate	Nombre	%
- Population urbaine	250.080	65 %
- Population Rurale	136.720	35,3%
- Population agglomérée	304.805	78,8%

8.2. L'agriculture

A la lumière des résultats enregistrés par le secteur de l'agriculture, qui constitue la principale activité de la Wilaya, il est toujours constaté que celui-ci, présente d'une manière générale, des productions faibles.

Néanmoins de très grands efforts ont été consentis pour son développement, qui ont permis une grande amélioration de conduite de ses activités grâce à l'effort soutenu de l'Etat dans le cadre du PNDA et à travers la politique du Renouveau Rural.

L'activité agricole, étant imposée par la configuration physique du territoire avec des facteurs bioclimatiques contraignants; il est relevé que la S.A.U; n'est que de l'ordre de 232.481 Has, soit : 24,12%, de la superficie totale de la Wilaya.

La superficie irriguée représente quant à elle 16,13% de la SAU; soit:37.519 Has. Ceci Est notamment dû à la faiblesse des mobilisations d'eau et au manque d'équipements adéquats à même de permettre une utilisation maximale et rationnelle des ressources en eau existantes.

Concernant l'élevage; celui-ci est à dominance ovine avec une organisation quasi extensive, et fortement traditionnelle. Il est appelé à se développer par des actions appropriées en matière de conduite du cheptel en général et d'intensification du cheptel bovin laitier en particulier.

Les actions concertées des différents programmes de développement du secteur ont permis durant cette période 1999 – 2008 des réalisations fortes importantes, consistant en :

- La réalisation de 801 Kms de pistes agricoles dont 65 Kms en 2008.
- La réalisation de 365 Kms de lignes électrique pour l'électrification agricole, dont 30 Kms en 2008.
- La réalisation de Logements ruraux aux fins de fixation des populations dans leurs milieux.
- Le désenclavement d'une forte population rurale par la réalisation de chemins communaux et de pistes améliorées par le biais de P.C.D. [38]

8.3. La végétation naturelle

La végétation naturelle, dans les communes de l'aire d'étude, est scindée en deux grandes parties :

- Les zones forestières occupent les reliefs montagneux des communes de la zone. La commune d'El Hamma est dotée d'une zone forestière assez dense dans laquelle se trouve la forêt de Tarbat, qui est considérée comme l'une des plus grandes forêts de la zone, ainsi que la forêt de Ras Serdoune située à l'Est et qui s'étend dans la commune de Khenchela, limitant ainsi la ville à l'Ouest.
- Les zones des hauts plateaux et des plaines sont couvertes par un couvert végétal herbacé épars et dégradé. [16]

Conclusion

Sur le plan physique et naturel, la wilaya de Khenchla présente globalement cinq (05) paysages aux spécificités et aux problématiques différentes.

- **La zone des hautes plaines du Nord.**

Cette zone, qui constitue le prolongement, vers le Sud, des Hautes plaines Constantinoises, occupe la partie Nord de la wilaya. Elle se caractérise par :

- une topographie relativement plane où prédomine la classe de pente inférieure à 3% ;
- des sols à potentiel agricole appréciable.

- **La zone du massif forestier subhumide des Aurès.**

Cette zone, à cheval sur les wilayas de Khenchela et Batna, occupe la partie médiane Ouest de la wilaya. Elle se singularise par :

- des reliefs très élevés;
- un couvert végétal forestier appréciable (forêts naturelles et reboisement), dont deux magnifiques cédraies.
- une activité agricole de type agriculture de montagne où se côtoient : arboriculture, jardinage, élevage et apiculture.

- **La zone des monts semi-arides des Némenchas**

Cette zone occupe la partie médiane Est de la wilaya. Par rapport au massif forestier des Aurès, les monts se distinguent par :

- un couvert végétal de type steppique, constitué essentiellement de nappes alfatières souvent très dégradée
- des sols fortement soumis à l'érosion.

- **Les vallées de oued El Arab et oued Taberdga**

On rencontre dans la wilaya de Khenchela deux vallées importantes, bien qu'étroites et ne représentant pas de grande superficies : la vallée de l'oued El Arab et la vallée de l'oued Taberdga.

- **la zone de la basse plaine du Sud**

Située au Sud de la wilaya, principalement dans le territoire de la commune de Babar, la basse plaine d'El Meïta relève du domaine présaharien. Par rapport au reste du territoire de la wilaya.

Et sur le plan géologique le Crétacé inférieur s'est déposé sous forme de calcaires marneux, de marne, de calcaire gréseux et des calcaires compacts. L'Aptien et l'Albien affleurent dans le massif des Aurès. L'Albien existe dans les anticlinaux des Aurès, il présente souvent un faciès gréseux, marneux et dolomitique il devient franchement marneux à la base.

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

Chapitre II

Hydrogéologie et géométrie des aquifères

II. Hydrogéologie et géométrie des aquifères

Introduction

La ressource en eau du bassin de Rémila est presque exclusivement souterraine, il renferme plusieurs réservoirs aquifères. Les plus importants et les plus exploités sont situés dans le remplissage Mio-Plio-Quaternaire.

1. Lithologie de l'aquifère (fig.8)

La nappe de Hammam El Salihine se développe dans des terrains dont la nature et la texture sont variables. Il s'agit des formations gréseuses du Néogène et des marnocalcaires du Turonien. Chacune des formations a un caractère hydrogéologique propre ce qui nous amène à les décrire séparément.

1.1. Substratum : structure profonde

Les grandes lignes structurales du substratum anté-quaternaires sont marquées par un passage d'Ouest en Est des calcaires turoniens et cénomaniens aux marnes cénomaniennes. Ce sont ces marnes qui constituent le substratum sous la Garat et Tarf. Le substratum calcaire se trouve limité à la zone Ouest, au voisinage de Djebel Amrane, et à la partie Sud, dans les zones de Boulfreis à Kais.

Au pied du Djebel Fedjoudj, le plongement Sud des calcaires aptiens a pu être suivi jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 500-600m.

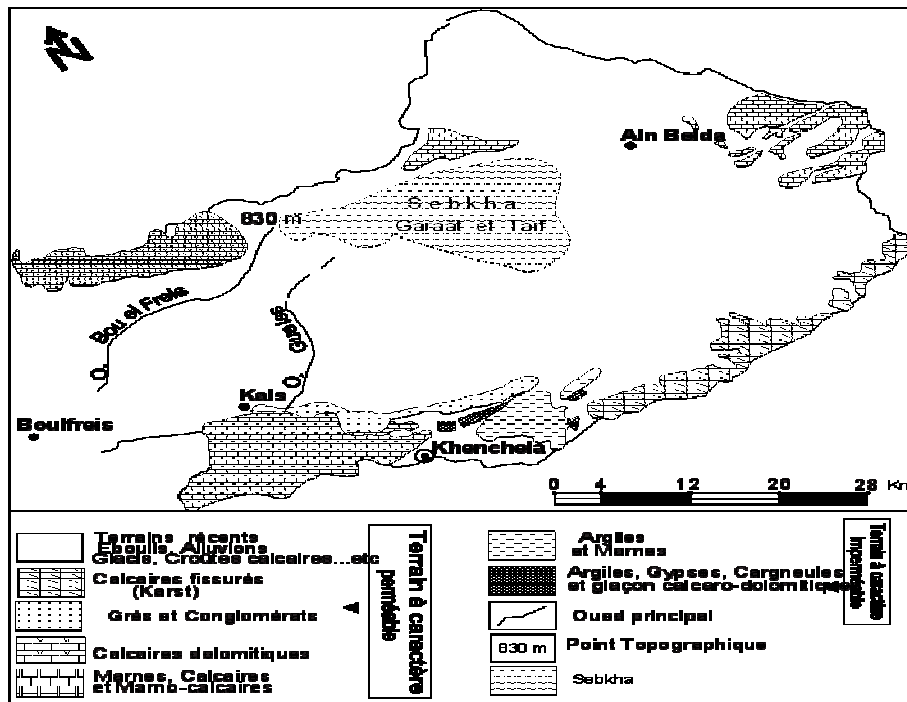


Fig.8 : Unités hydrogéologiques dans le bassin de Garâat Tarf. [35]

➤ **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 dure et peu perméable.

Cette formation n’est pas suffisante pour qu’une nappe continue puisse s’y développer. [36] Ces grès présentent une limite au Nord et se terminent en biseau ou réduits en épaisseur par l’érosion.

1.2. 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 grossiers, 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.

2. 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. Ces aquifères représentent la plus importante ressource régionale en eau souterraine occupent le bassin de Rémila et tout autour du massif des Aurès
- **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 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 du fait de son extension limité au Nord et se termine en biseau.

3. Identification de la typologie des nappes aquifères du bassin de Rémila

3.1. 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

3.2. Présentation et nature des nappes aquifères

a. Nappe phréatique

La nappe aquifère est contenue dans le remplissage quaternaire dans des intercalations argilo-sableuse et dans des sable et graviers. C'est un aquifère multicouches séparés par des argiles et des marnes. [50]

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.

a.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.

b. 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. [5]

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

C. Les eaux des calcaires et des grès miocènes de la bordure Sud

Le versant nord du massif des Aurès, constitué par les affleurements calcaires crétacé et les grès miocènes ont un pendage dirigé vers la plaine, constituent un front d'alimentation eau la plaine de Rémila, avec un débit de $1.11 \text{ m}^3/\text{s}$. L'écoulement alimente les nappes des alluvions de la plaine.

Conclusion

L'aquifère est composé d'affleurement carbonaté de l'Albo-aptien composé de calcaires dolomitiques fissurés et de sable, conglomérat et graviers du quaternaire récent.

Chapitre III

Le cadre hydroclimatique

III. Le cadre hydroclimatique

Introduction

Le cycle souterrain de l'eau et le climat sont étroitement liés. L'évolution du climat a une influence déterminante sur la variation de l'ensemble des réserves et les fluctuations des nappes d'eau souterraines qui s'alimentent par infiltration directe et se décharge par évaporation au cours de la saison en pays aride et semi-aride. Le climat intervient par sa composition hydrique (pluviométrie), qui régit fortement le régime des eaux souterraines et superficielles.

Le climat algérien est un climat de transition. Il varie du type méditerranéen dans le nord au type désertique dans le Sahara. Du fait de son appartenance géographique et bioclimatologique à la zone aride et semi-aride, L'Algérie du Nord est soumise à des conditions hydroclimatiques défavorables, caractérisées par des précipitations irrégulières avec des variations interannuelles importantes et une forte irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements. [17]

L'Algérie est subdivisée, du Nord au Sud, en cinq zones :

La zone littorale ;

L'Atlas tellien ;

Les hautes plaines steppiques (qui comprennent notre terrain) ;

L'Atlas saharien ;

Le Sahara.

Cette zonation hydroclimatique est régie principalement par le degré d'influence des courants froids issus du front polaire, qui s'atténuent en allant du Nord au Sud. Seule la région du Sahara reçoit aussi (en été) les perturbations issues de la mousson soudanaise.

Une étude globale de synthèse menée par les Nations Unies (1987) a abouti aux résultats portés dans le tableau [38].

Tableau 2: Résume les caractéristiques des cinq stations hydrométriques. [36]

Zones climatiques	Températures °C	Précipitations		
		Région Ouest	Région Centre	Région Est
Littoral	18	400	700	900
Atlas tellien	19 à 20	600	700 à 1000	800 à 1400
Hautes plaines	19 à 21	250	250	400
Atlas saharien	21	150	200	300 à 400
Sahara	22	20-50	20-50	20-50

Du point de vu climatique, la wilaya de Khenchela se caractérise par un climat continental, **semi-aride** ; à hiver froid et été chaud et sec. Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude sont celles de la station météorologique de Khenchela.

1. Les données climatiques

Les données de température et de précipitation correspondent à des hauteurs mensuelles des pluies et de température qui ont été recueillies à la station de **l'office national de météorologie (OMN) de khenchela** situées à **890 m** d'altitude suivant une période de mesures de **1994 à 2010**.

1.1. La pluviométrie

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

D'une manière générale, la répartition des pluies en Algérie obéit à certaines lois (P. SELTZER 1946), à savoir :

- La hauteur des pluies augmente avec l'altitude ;
- Elle croît d'Ouest en Est ;
- Elle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

Pour ce qui est de la wilaya de Khenchela, ces principes restent valables. Le régime pluviométrique de la wilaya de Khenchela, suit étroitement la variabilité du relief et les zones les plus élevées (nord-ouest de la wilaya) sont les mieux arrosées, contrairement aux basses plaines du sud, qui se distinguent par leur aridité :

- La zone « Centre-ouest de la wilaya », qui correspond principalement aux reliefs montagneux des Aurès, est la plus arrosée. C’est une zone qui bénéficie de 600 à 800 mm de pluie en moyenne par an et où prospèrent de magnifiques forêts ;
- La zone Nord, représentée par la « zone des Garaet » et les piémonts de l’Aurès, correspond aux hautes plaines céréalières s’étalant de Ain Touila à l’est à Yabous à l’ouest, est moins arrosée que la zone montagneuse des Aurès et ne reçoit que 200 à 400 mm de pluie par an ;
- La zone sud, correspond à l’espace saharien, présente un climat de type aride, dont la pluviométrie décroît jusqu’à atteindre une valeur minimale annuelle inférieure à 100 mm (partie sud de la commune de Babar). [7]

Tableau 3: Précipitation moyenne mensuelle interannuelle de la station de Khenchela (1994-2010) en mm.

P. (mm)	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
(1994-2010)	49,12	25,21	35,10	49,23	58,73	29,95	15,63	37,88	57,32	40,32	39,87	40,38	478,75

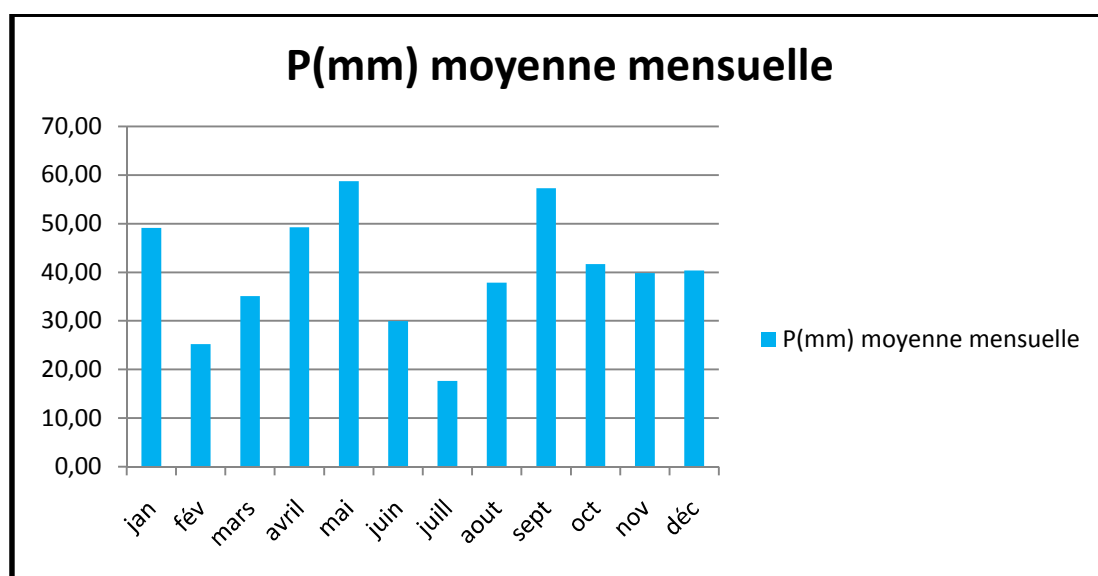


Fig.9: Précipitation moyenne mensuelle pour une période de 17ans (1994-2010).

Le mois de Mai est le plus arrosé avec une moyenne de **59 mm**. Juillet étant le mois le plus sec avec une moyenne de **18 mm**.

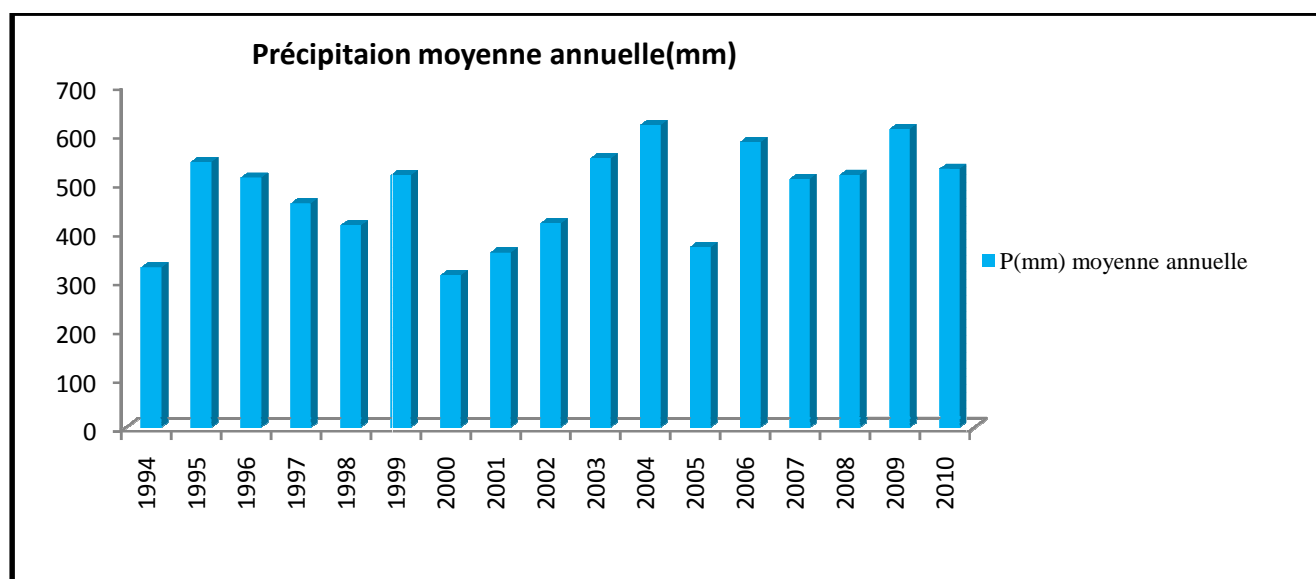


Fig.10: Précipitation moyenne annuelle pour une période de 17ans (1994-2010).

L'année la plus pluvieuse étant **2004**, avec une moyenne annuelle de **52mm**. L'année **2000** étant la plus sèche avec une moyenne annuelle de **26mm**.

1.2. Température

L'étude des températures est d'un grand intérêt, car elle permet de quantifier l'évaporation et par conséquent les conditions d'alimentation des aquifères profonds et la concentration des sels dissous dans leurs eaux et de préciser les limites de la thermalité.

La température est l'un des facteurs aussi qui caractérisent le climat d'une région. Les données de la température durant la période (1994-2010) sont représentées sur le tableau (4) avec des courbes de variation de la moyenne mensuelle et annuelle de température.

Tableau 4: Température moyenne mensuelle interannuelle à la station de kenchela (1994-2010) en (°C).

T. (°C)	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moyenne
(1994-2010)	6,74	7,61	10,45	13,28	18,41	23,29	26,74	26,15	21,20	16,61	11,13	7,65	15,77

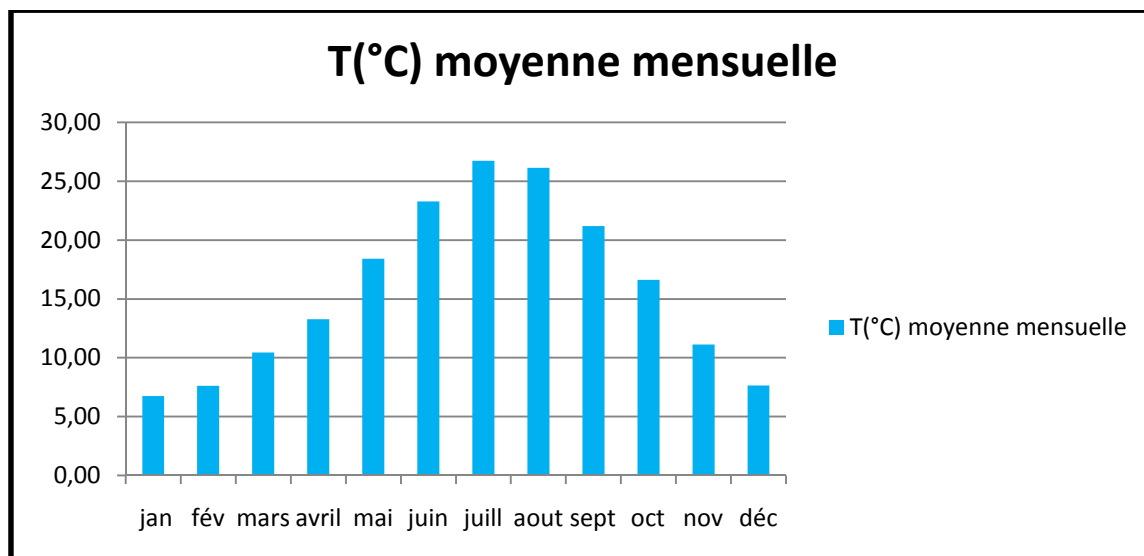


Fig.11: Température mensuelle moyenne pour une période de 17 ans (1994-2010).

La courbe des variations des températures moyennes mensuelles (Fig.11) montre que Janvier est le mois le plus froid avec 7°C . Juillet et Aout sont les plus chauds avec 26°C .

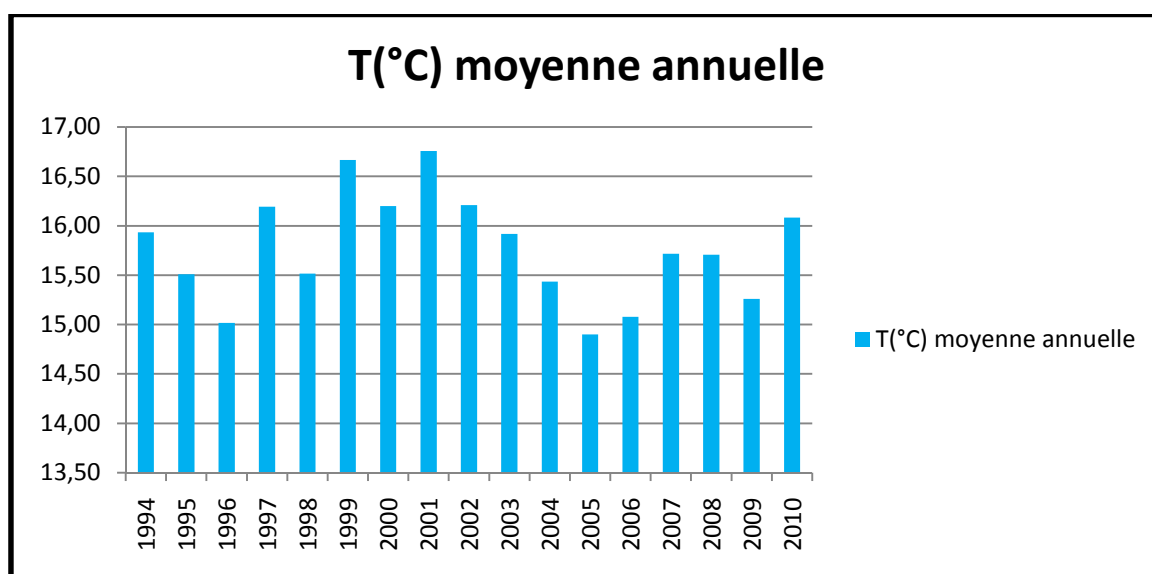


Fig.12: température moyenne annuelle pour une période de 17 ans (1994-2010).

La courbe des variations des températures moyennes annuelles (Fig.12), montre que l'année la plus chaude étant **2001**, avec une moyenne annuelle de $16,76^{\circ}\text{C}$. L'année **2005** étant la plus sèche avec une moyenne annuelle de $14,90^{\circ}\text{C}$.

1.3. Le régime pluviométrique saisonnier

Tableau 5 : Le régime pluviométrique saisonnier pour une période de 17ans (1994-2010)

station	/	A	H	P	E	Total	Type
El-HAMMA	P (mm)	138,85	114,71	143,06	85,48	482,1	PAHE
	%	28,80	23,79	29,67	17,73	100,00	PAHE

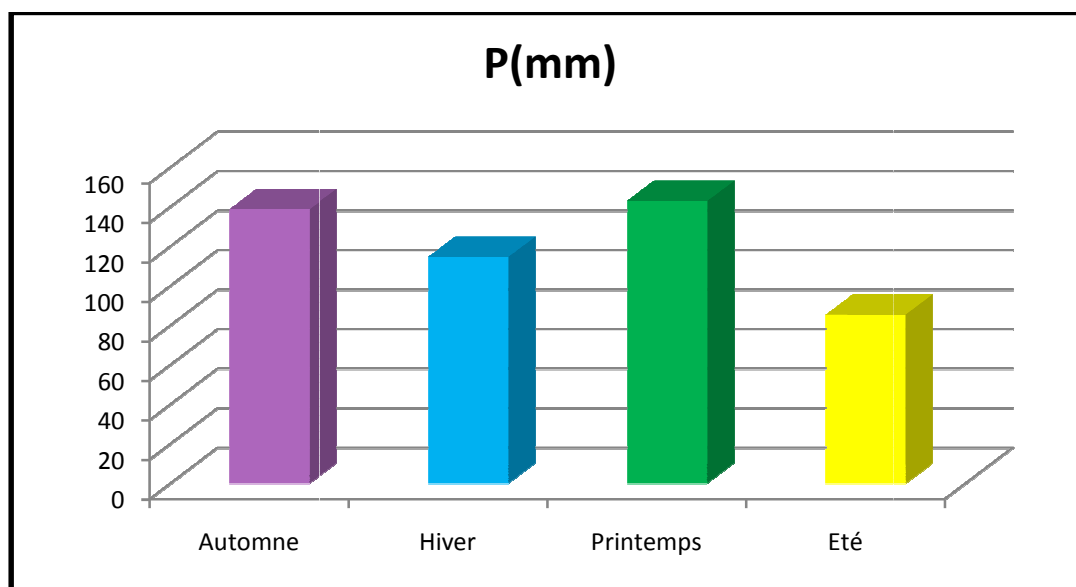


Fig.13 : le régime pluviométrique saisonnier pour une période de 17ans (1994-2010)

Les régimes saisonniers, schématisés par la (fig.13) ont de type P.A.H.E. Ce régime saisonnier des précipitations correspond à notre zone d'étude, le total des pluies d'automne est 29%, et de l'hiver est 24%, et celui de printemps 30%, et de l'été est 18%.

2. Synthèses climatiques

Pour La synthèse bioclimatique, nous avons retenue les deux indices les plus utilisés en méditerranéenne. La période sèche détermine à l'aide du diagramme ombrothermique des BAGNOULS et GAUSSEN, et l'indice d'aridité (**I a**) permet de déterminer le type de climat.

2.1. Diagramme ombrothermique

Selon BAGNOULS et GAUSSEN (1957), un mois est considéré comme sec, lorsque le total des précipitations "P" exprimé en "mm" est égale ou inférieur ou double de température moyenne "T" du mois exprimé en degré centigrade. [29].

La durée et l'importance de la période sèche peuvent être déterminées par le diagramme ombrothermique ce diagramme est obtenu par un graphique où les mois de l'année sont en abscisse; les précipitations moyennes mensuelles "P" en "mm" en ordonnée de gauche, les températures "T" en degré centigrade, en ordonnée de droite à une échelle double.

La période sèche s'individualise lorsque la courbe de précipitation passe sous celle des températures, c'est-à-dire lorsque $P < 2T$. La (Fig. 14), représente les courbes ombrothermiques pour notre zone d'étude.

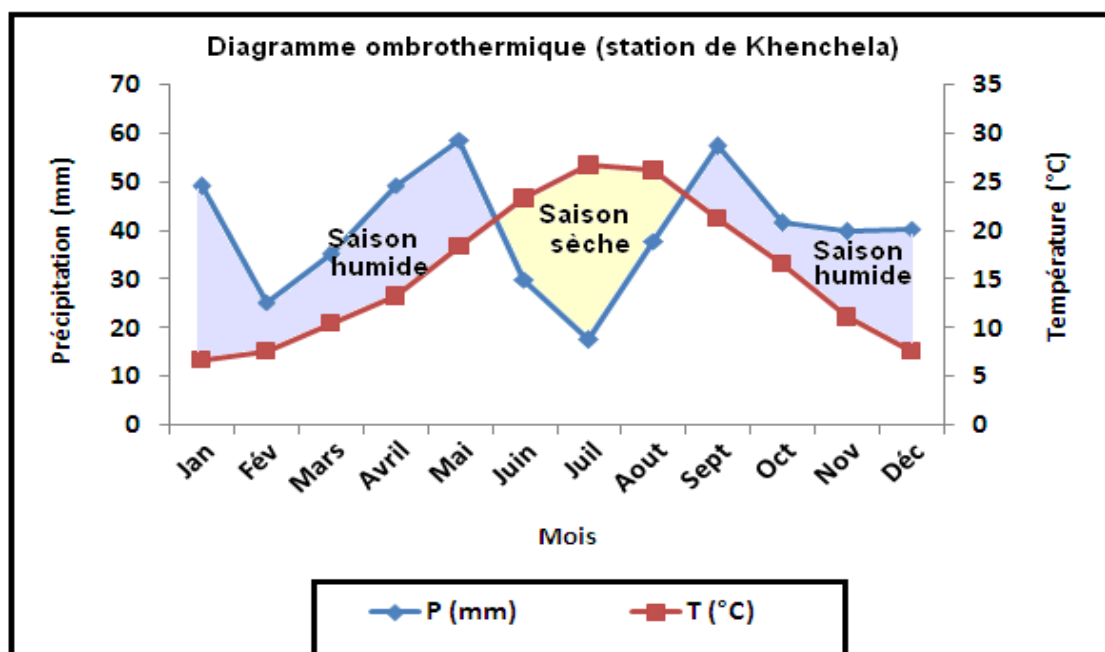


Fig. 14 : Diagramme ombrothermique.

On constate que la région de Khenchela présente une période humide débutant au mois de septembre et qui se termine au mois de mai et une période sèche qui s'étend de début de mois de juin au début de mois de septembre.

2.2. Indice 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 en 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.

Cet indice est calculé par la relation suivante :

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

Où :

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C

Application : **P** = 478,69 mm ; **T** = 15,77 °C

⇒ **I** = 17,88

Suivant les valeurs de (**I**), **De Martonne** a établi la classification suivante :

I < **5** : climat hyperaride ;

5 < **I** < **7,5** : climat désertique ;

7,5 < **I** < **10** : climat steppique ;

10 < **I** < **20** : climat semi-aride ;

20 < **I** < **30** : climat tempéré ;

30 < **I** < **55** : climat humide.

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

2.3. Indice d'aridité mensuel

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{12.P}{T^{\circ} + 10}$$

Où :

I : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm

T° : Température moyenne mensuelle en °C.

Tableau 06: Indices d'aridité mensuels (I) à la station d'El Hamma

Mois	Indice	Etage bioclimatique
Septembre	22,05	climat tempéré
Octobre	18,79	climat semi-aride
Novembre	22,64	climat tempéré
Décembre	27,45	climat tempéré
Janvier	35,21	Climat humide
Février	17,18	climat semi-aride
Mars	20,60	climat tempéré
Avril	25,38	climat tempéré
Mai	24,81	climat tempéré
Juin	10,80	climat semi-aride
Juillet	5,76	climat désertique
Aout	12,58	climat semi-aride

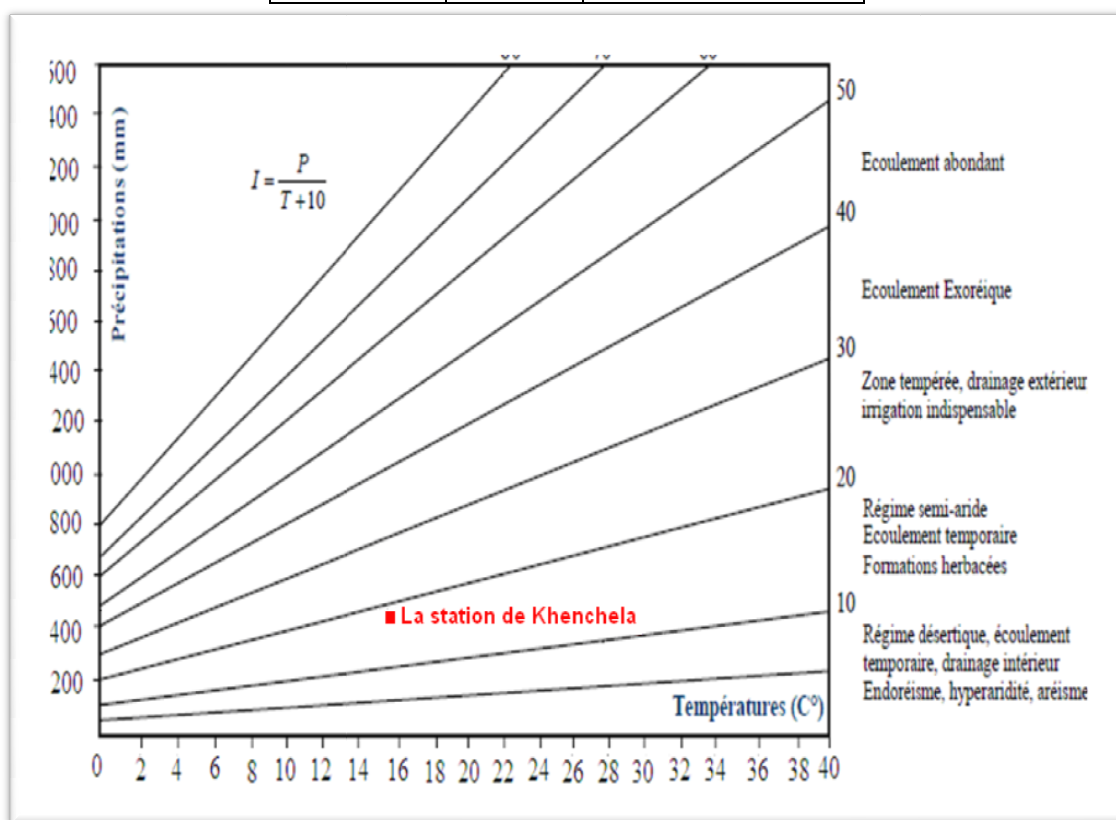


Fig.15 : l'indice d'aridité annuel de Martonne.

3. Etablissement du bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pour un bassin versant sur une période donnée par comparaison entre les apports et les pertes en eaux dans ce bassin et pour cette période (Fig.16).

Il tient aussi compte de la composition des réserves et des prélèvements ultérieurs sur ces réserves. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la composition de l'évaporation et la transpiration des plantes, que l'on désigne sous le terme « évapotranspiration »

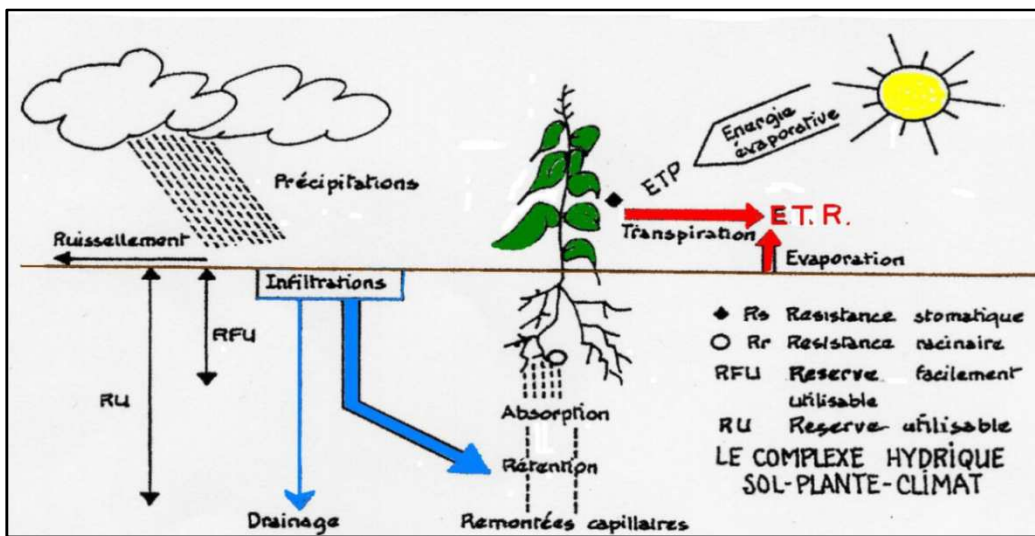


Fig.16 : Le complexe hydrique (sol-plante-climat).

3.1. L'évaporation/l'évapotranspiration

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. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire. Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes.

Pilgrim et al.1988 rapportent que l'évapotranspiration recycle 80% des précipitations dans Les milieux semi-arides et 95% en régions arides, elle joue donc un rôle majeur et ne peut pas être négligée sous ce type de climat.

On calcule l'évapotranspiration à l'aide de formules empiriques comme celle de Thornthwaite, de Penman ou de Turc. Les deux méthodes les plus couramment utilisées pour évaluer l'évapotranspiration sont ;

- la méthode Thornthwaite pour l'ETP.
- la méthode Turc pour l'ETR.

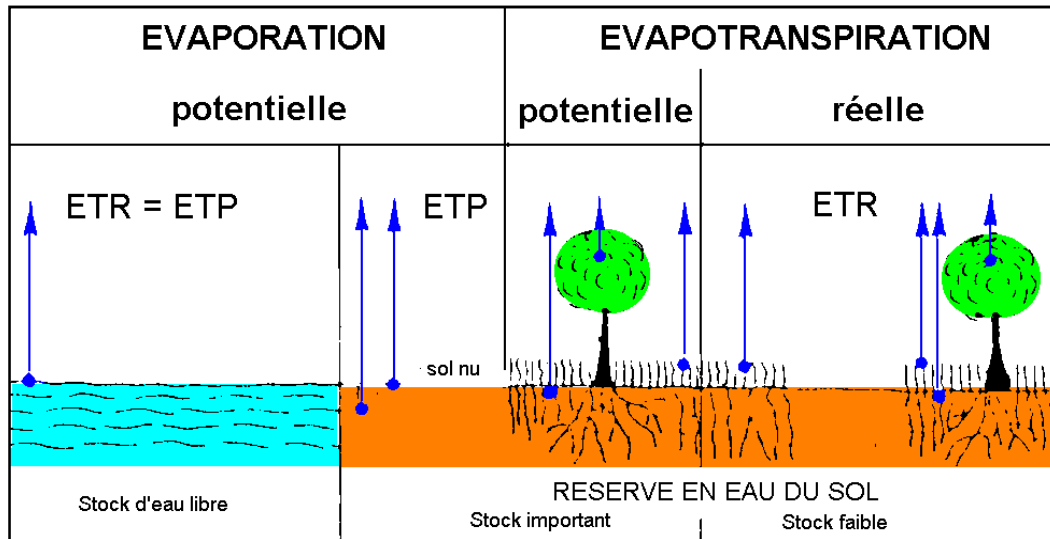


Fig.17: Evaporation et Evapotranspiration potentielle et réelle.

On distingue :

3.1.1. L'évapotranspiration potentielle ETP

Elle représente la température d'un couvert végétal en pleine croissance alimenté en eau continuellement. Cette grandeur correspond donc à un concept théorique et représente les possibilités maximales d'évaporation dans les conditions climatiques données. [24]

Lorsqu'un couvert végétal étendu et couvrant bien le sol est abondamment pourvu en eau, c'est-à-dire lorsque les végétaux qui le composent peuvent puiser sans restriction dans l'environnement aérien, l'évapotranspiration croît et tend vers une limite maximale que l'on peut considérer comme l'un des aspects de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ». (Bouchet et Gerbier, 1975, [41].

Selon **Roche (1963)** : ETP correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.

L'ETP est étroitement liée :

- à la quantité d'énergie apportée à la surface évaporante;
- à l'évacuation de la vapeur d'eau de la surface évaporante;
- à la végétation: l'albédo, couverture du sol, profondeur des racines, [10].
- au sol: la rétention d'eau (PF), la profondeur, le drainage, l'écoulement et enfin l'ascension capillaire (surtout les propriétés physiques du sol).

L'analyse des moyennes mensuelles en (mm).

a. La formule de Thornthwaite

Cette formule a été établie en 1948 c'est la méthode la plus répandue et tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

Thornthwaite a proposé la formule de l'ETP est la suivante:

$$\text{ETP} = 16 [10T/I]^a \text{ (mm)}$$

Où:

ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée en (mm)

T: température moyenne mensuelle du mois considéré en (°C)

I : L'indice annuel de chaleur, ($I = \sum_1^{12} i$).

i : L'indice mensuel de chaleur, ($i = (T/5)^{1,514}$).

a : L'exposant climatique, ($a = 0.016 I + 0.5$).

$$\text{ETPc.} = \text{ETP} * K$$

Où : **ETPc.** : L'évapotranspiration potentielle corrigée, (mm).

K : Le facteur de correction en fonction de la durée d'ensoleillement.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau n°(07) avec : **I = 73,60** et **a = 1,68**

Tableau 7: Coefficient de correction K dépend du site considéré (climat semi aride)

Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16

3.1.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

La somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.

Des méthodes peuvent être utilisées :

- La méthode de Turc.
- La méthode de Thornthwaite.

a) Formule de TURC

C'est la méthode la plus répandue, elle tient compte des précipitations et des températures moyennes annuelles.

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

ETR : évapotranspiration réelles (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : $300 + 25T + 0.05T^3$ où

T est la température moyenne annuelle en C°.

***Application numérique : L= 890.34, ETR= 440.08 mm.**

3.2. Le bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite

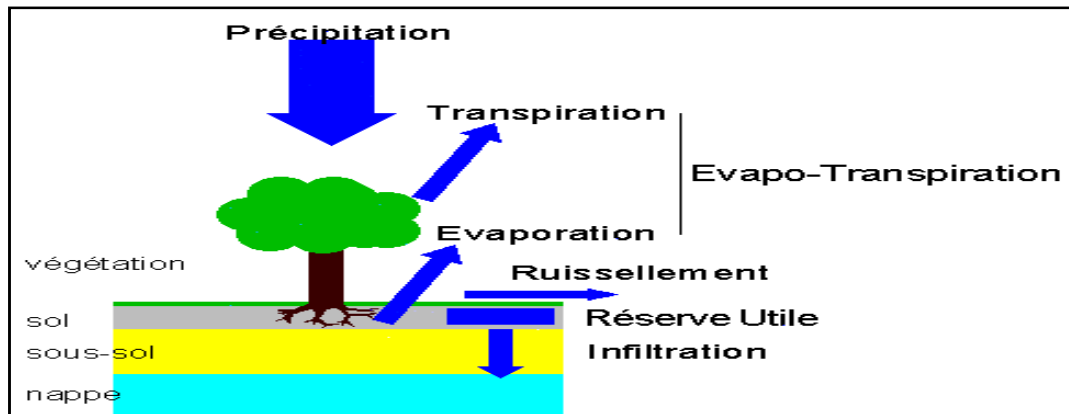


Fig. 18: Utilisation de l'eau du sol par les végétaux lors du cycle de l'eau.

Pour établir le bilan hydrique il faut d'abord calculer la **RFU** qui est la réserve facilement utilisable. Cette RFU est nécessaire pour le bon fonctionnement physiologique des plantes. Thornthwaite, dans ces calculs utilisait une valeur moyenne de la RFU = 98 mm pour la région de montagne et pour la zone d'alluviale RFU = 28 mm, en 1954 **Hallaire**, a proposé une méthode permettant d'améliorer la connaissance de la réserve en eau du sol qui est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{RFU = (C - F / 100) * P * D + 30 \text{ mm.}}$$

Où :

RFU : Réserve facilement utilisable en (**mm**) ;

C : Capacité de rétention aux champs ;

F : Capacité du point de flétrissement des plantes; c'est la limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes ;

P : Profondeur du sol en (mm) ;

D : Densité apparente du sol (Hallaire propose de prendre **D = 1**) ;

Les 30mm supplémentaires correspondent au déracinement capillaire.

Hallaire propose :

C - F = 05 % → pour un sol sablo - limoneux ;

C - F = 10 % → pour un sol limoneux ;

C - F = 20 % → pour un sol argilo - limoneux.

A partir des données des pluies mensuelles et l’ETP calculée par la formule de Thornthwaite, plusieurs cas peuvent être envisagés :

1- Si : $P > ETP \rightarrow ETR = ETP \rightarrow RFU = P - ETP$.

2- Si : $P = ETP \rightarrow$ Les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n’y aura pas de surplus pour alimenter la RFU $\rightarrow [RFU = 0]$.

3- Si : $P < ETP \rightarrow$ il y aura épuisement des réserves, dans ce cas on aura un déficit du bilan ($ETP - ETR$), ou encore ($ETP - P$) qui représentera la quantité d’eau qu’il faudra ajouter à l’ETR pour atteindre l’ETP, [25]

L’application de la méthode de Thornthwaite pour l’année moyenne a donné les résultats qui sont mentionnés dans les tableaux suivants :

Tableau 8 : Bilan hydrologique moyen (1994-2010) de la station de Khenchela, par la méthode de Thornthwaite (RFU=98)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
P (mm)	57,32	40,32	39,87	40,38	49,12	25,21	35,10	49,23	58,73	29,95	15,63	37,88	478,75
T (°C)	21,20	16,61	11,13	7,65	6,74	7,61	10,45	13,28	18,41	23,29	26,74	26,15	
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	
ETP (mm)	97,22	60,78	27,54	14,35	12,02	14,39	29,66	46,93	90,13	133,71	171,33	155,66	853,74
P-ETP	-39,90	-20,46	12,33	26,02	37,10	10,82	5,44	2,30	-31,40	103,76	155,70	117,78	
RFU_{max} (98mm)	0,00	0,00	12,33	38,35	75,45	86,27	91,71	94,01	62,61	0,00	0,00	0,00	
ETR (mm)	57,32	40,32	27,54	14,35	12,02	14,39	29,66	46,93	90,13	92,56	15,63	37,88	478,75
EX (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DA (mm)	39,90	20,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,15	155,70	117,78	374,99

Tableau 9 : Bilan hydrologique moyen (1994-2010) de la station de Khenchela, par la méthode de Thornthwaite (RFU=28)

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
P (mm)	57,32	40,32	39,87	40,38	49,12	25,21	35,10	49,23	58,73	29,95	15,63	37,88	478,75
T (°C)	21,20	16,61	11,13	7,65	6,74	7,61	10,45	13,28	18,41	23,29	26,74	26,15	
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	
ETP (mm)	97,22	60,78	27,54	14,35	12,02	14,39	29,66	46,93	90,13	133,71	171,33	155,66	853,74
P-ETP	-39,90	-20,46	12,33	26,02	37,10	10,82	5,44	2,30	-31,40	103,76	155,70	117,78	
RFU_{max} (28mm)	0,00	0,00	12,33	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETR (mm)	57,32	40,32	27,54	14,35	12,02	14,39	29,66	46,93	86,73	29,95	15,63	37,88	412,74
EX (mm)	0,00	0,00	0,00	10,35	37,10	10,82	5,44	2,30	0,00	0,00	0,00	0,00	66,01
DA (mm)	39,90	20,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,40	103,76	155,70	117,78	441,00

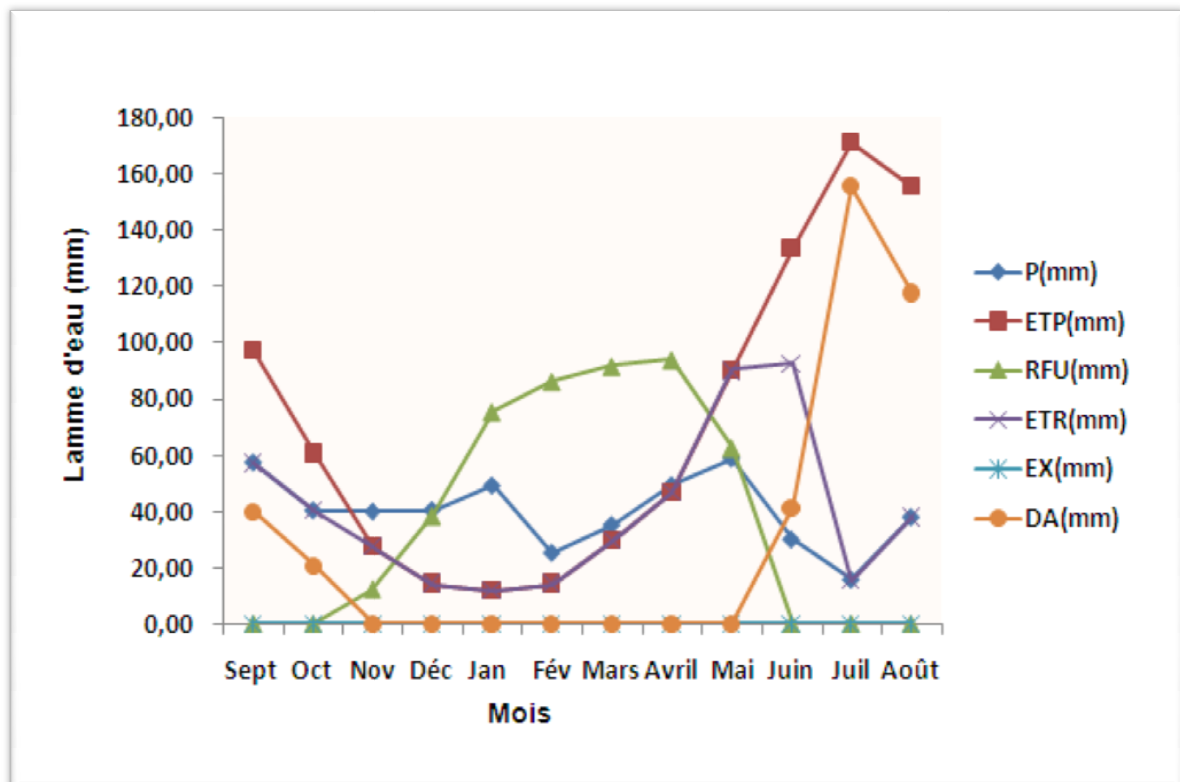


Fig.19 : Bilan hydrologique moyen (RFU_{max}= 98) par la méthode de Thornthwaite.

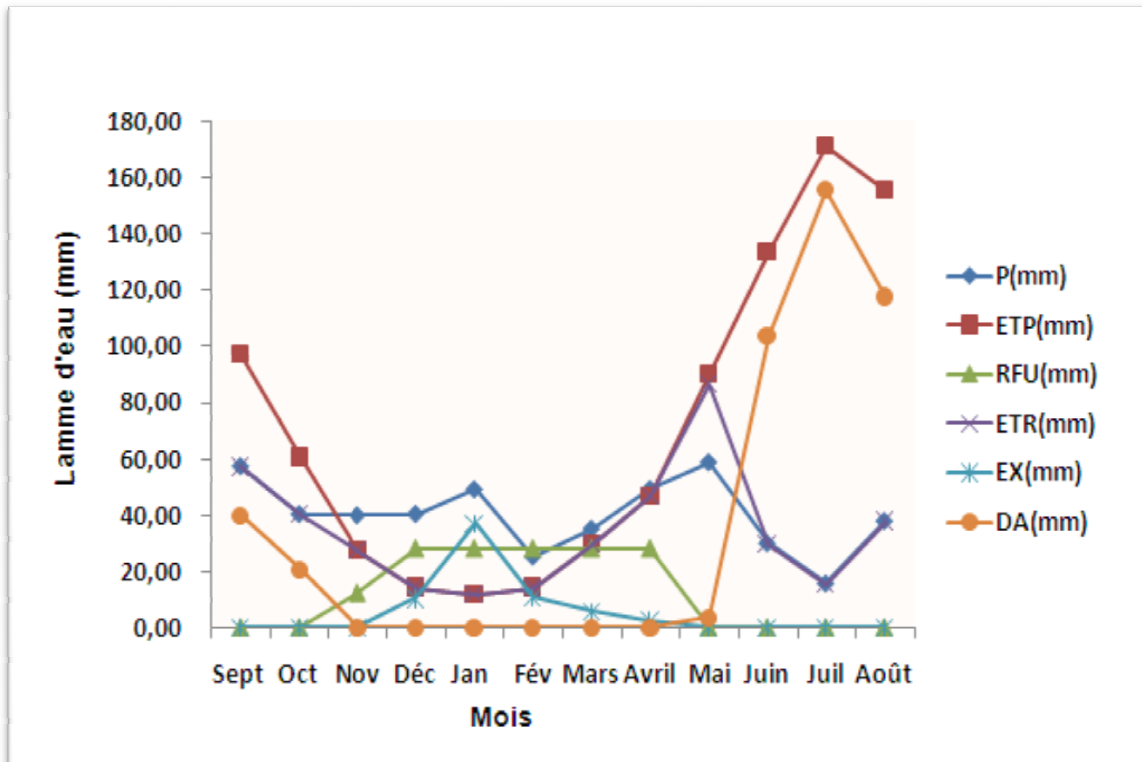


Fig.20 : Bilan hydrologique moyen ($RFU_{max}= 28$) par la méthode de Thornthwaite.

3.2.1. Interprétation du bilan hydrologique moyen ($RFU_{max}= 98$)

L'observation du graphe du bilan hydrologique nous permet de dire qu'il existe deux périodes la première est déficitaire où l'ETP est importante à partir de mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 171 mm au mois de juillet, dans cette période les sols sont secs et leur niveau de la réserve hydrique est nul, rendant la nécessité de l'irrigation. La deuxième période est humide qui commence à partir du mois de septembre où les précipitations couvrent les besoins de l'évapotranspiration potentielle et permettent la reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de Janvier et Avril. Toute la pluie non retenue par la couche superficielle du sol, s'infiltré et rejoint la zone saturée. Au-delà de cette période, la réserve commence à diminuer jusqu'à l'épuisement du stock.

3.2.2. Interprétation du bilan hydrologique moyen ($RFU_{max}= 28$)

Il existe aussi deux périodes la première est déficitaire où l'ETP est importante à partir de mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 171 mm au mois de

juillet, dans cette période les sols sont secs et leur niveau de la réserve hydrique est nul, rendant la nécessité de l'irrigation. La deuxième période est humide qui commence à partir du mois de septembre où les précipitations couvrent les besoins de l'évapotranspiration potentielle et permettent la reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de Décembre jusqu'au Avril. Toute la pluie non retenue par la couche superficielle du sol, s'infiltré et rejoint la zone saturée. Au-delà de cette période, la réserve commence à diminuer jusqu'à l'épuisement du stock.

⇒ Le bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des précipitations entre les différents composants de ce bilan, à savoir : l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration.

Le bilan est établi selon la formule suivante : $P = ETR + R + I$

Où :

P : La précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : L'évapotranspiration réelle en (mm).

R : Le ruissellement en (mm).

I : L'infiltration en (mm).

3.3. Ruissellement superficiel et l'infiltration

Il est estimé à partir de la formule de **T'ixeront-Berkaloff** qui est la suivante :

$$R = P^3 / 3(ETPc)^2$$

L'infiltration est le passage de l'eau à travers la surface du sol, il est exprimé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \rightarrow I = P - (ETR + R)$$

1- RFU: 98

Tableau 10: Répartition de précipitation en (mm, %) ; RFU_{max}=28 à la station de Khenchela

Précipitation (P)		Evapotranspiration réelle (ETR)		Ruissellement (R)		Infiltration (I)	
(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
478,75	100,00	478,75	100,00	50,18	10,48	-50,18	-10,48

2- RFU: 28

Tableau 11: Répartition de précipitation en (mm, %) ; RFU_{max}=28 à la station de Khenchela

Précipitation (P)		Evapotranspiration réelle (ETR)		Ruissellement (R)		Infiltration (I)	
(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
478,75	100,00	412,74	86,21	50,18	10,48	15,83	3,31

Conclusion

La zone d'étude est soumise à un climat semi-aride (environ de cinq mois secs), elle est caractérisée par un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec

Les précipitations moyennes annuelles, sur une période de **17 ans** (1994 – 2010), sont estimées à **478,69 mm**, leurs répartitions mensuelles montrent deux grandes saisons bien distinctes, la première est **humide**, qui s'étend du mois de **Septembre** à **Mai**. La deuxième est **sèche**, qui s'étale sur les mois de **Juin** jusqu'au **Octobre**. L'évapotranspiration réelle est estimée à **412,74 mm**, mobilisant **86,21%** des précipitations dans la plaine et **478,75mm** mobilisant **100%** des précipitations de la région de montagne.

Les températures moyennes mensuelles varient entre **7 °C** et **26 °C**, avec une moyenne annuelle de **15.77 °C**. Le mois de juillet étant le plus chaud, et janvier le plus froid.

Le ruissellement ne représente que **10,48%** des précipitations, ce qui représente **50,18mm**.

L'infiltration est estimée à **3,31%**. Ce qui permet de percoler **15,83 mm**, Cette dernière contribue à l'alimentation des nappes souterraines à partir de la surface dans la plaine et **-10,48%** permet de percoler **-50,18 mm** dans la région de montagne.

Le déficit agricole estimé est de **441mm** étalé sur la période allant de mai jusqu'à Novembre. Notons que le **bilan hydrologique est déficitaire**.

Chapitre IV

Généralité sur les sources thermales

IV. Généralité sur les sources thermales

Introduction

Le hammam a, de tout temps, fait partie de notre vie quotidienne, que ce soit comme lieu d'hygiène ou de purification à travers l'eau, mais aussi comme un endroit de détente et parfois de fêtes familiales. La fréquentation des sources thermales, en plus du rôle social joué par le hammam, se fait également dans un but de bénéficier des vertus curatives ou thérapeutiques liées à la température et aux propriétés physico-chimiques des eaux.

1. Historique

L'homme porte un intérêt particulier aux sources thermales depuis des millénaires. Outre la ressource d'eau naturellement chaude qu'offrent ces sources, il y verra pendant longtemps une manifestation du divin. Les traces retrouvées dans les stations thermales remontent à l'époque romaine. En effet les romains accordaient une importance très particulière aux sources thermales, très souvent ils construisirent leurs sites autour de ces sources, Comme c'est le cas pour les sites suivants : *Aquae Mauretaniae Cesarienne* (Hammam Righa) ; *Aquae Sirenses* (Hammam Bouhanifia) ; *Aquae Chibilita Nae* (Hammam Meskoutine).

Les sources thermales furent aussi bien exploitées par les arabes, en effet très souvent des sources portent le nom d'un marabout qui a vécu dans la région comme hammam Bouhadjar qui doit son nom au marabout Sid Ahmed Bouhadjar qui a vécu dans la tribu des Ouled Bouhadjar avant la colonisation française et dont le mosolé est situé au Sud-est de la ville de Hammam Bouhadjar. [44]

Dans la culture islamique, l'homme peut être revitalisé de diverses façons : par la purification de quelques organes du corps, par la prière ou par les bains, Le hammam est considéré comme complémentaire à la mosquée, Les Turcs ont également accordé aux hammams une attention particulière. Ils construisirent dans les villes plusieurs bains disposant d'installations permettant un stockage de l'eau de source pouvant être chauffée à la demande et distribuée à l'intérieur. [12]

Entre 1850 et 1930, les médecins français installèrent des hôpitaux thermaux autour des sources et y soignèrent les blessés et convalescents. Le Dr Bertherand (1860) retrouvera 90 sources et le Dr Hamiot (1911) cita dans un mémoire 77 sources.

Actuellement la fréquentation des sources se fait souvent par tradition familiale ou peut également être orientée par un taleb. Ces sources sont sous la protection d'un Marabout (saint). Les affections traitées sont d'ordre rhumatologique, dermatologique, et psychiatrique.

En 1970, l'Etat prit en charge la promotion et le développement du thermalisme : restauration de stations réputées (Hammam Bouhanifia, Hammam Meskoutine), construction d'une nouvelle station (Hammam Guergour) et d'un centre de thalassothérapie à Staouali, près d'Alger. [22]

2. Étymologie

Le mot thermale vient du grec ancien θερμός ou thermos signifie « chaud ». Syntagme (nom + déterminant adj.) d'usage fréquent. L'adjectif thermal (dérivé de thermes, lat. Termae, du grec thermos, chaud naturelle), d'après le Dict. de Castany et Margat. Eaux thermales est attesté en 1735, dans la traduction française de la Géographie physique de l'anglais Woodward. [27]

3. Définitions

Dans le domaine de l'hydrogéologie, plusieurs définitions se sont succédées ainsi :

Paramelle (1856) : "Les sources d'eau chaude ou thermales, présentent tous les degrés de chaleur depuis l'eau bouillante, qui est de 100 degrés, jusqu'à la tempérée".

Trésor de la Langue Française (eau) THERMALE : " Qui a une température élevée à son point d'émergence et qui possède des propriétés thérapeutiques".

Le Petit Robert (1994) Thermale : "Qui a une température élevée à la source et des propriétés thérapeutiques". (Eaux thermales chargées de principes minéralisateurs).

Dictionnaire des Sciences de l'Environnement (1990) "Eau de source ayant une température élevée".

Dictionnaire de l'Environnement (AFNOR, 1994) "Eau d'une source chaude ou tiède".

Dictionnaire français d'Hydrogéologie (1977) "Eau souterraine naturellement chaude à son émergence (source, puits jaillissant) et utilisable de ce fait à des fins particulières à: thermalisme, chauffage".

De Launay (1899) : "Une source est dite thermale quand sa température dépasse celle de la zone de température constante".

Les eaux thermales puisent leurs origines dans les profondeurs de la Terre. C'est au cours de leur long cheminement vers la surface, qu'elles s'enrichissent de propriétés chimiques et d'oligo-éléments. Selon le sol dont elle jaillit, l'eau sera utilisée pour diverses orientations thérapeutiques.

« Eau thermale ; c'est une eau dont la température propre est indépendante de celle du lieu de son émergence, elle est supérieure à la température moyenne annuelle de l'air +4°C ou, à la température moyenne du sol +2°C (les températures moyennes de l'air étant calculées sur une période statistiquement valable et ne peut par conséquent être inférieur à 30 années) ». [24]

« Aujourd'hui la majorité des auteurs reprennent cette définition et s'accordent à dire qu'une eau est thermale quand sa température à l'émergence est supérieure d'au moins 5°C à la température moyenne annuelle de l'air (Bakalowicz et al., 1987), celle-ci même qui impose la température des eaux superficielles de l'écorce terrestre. Au delà du contraste thermique entre eaux souterraines "superficielles" et eaux thermales, un autre critère de reconnaissance est la stabilité des leurs paramètres physico-chimiques dans le temps. C'est la conséquence directe de leur circulation en profondeur : isolées de l'atmosphère, les eaux thermales ne sont pas ou peu soumises aux variations climatiques saisonnières. Enfin, de telles circulations impliquent des temps de résidence assez longs de l'eau dans le réservoir profond ce qui permet à l'eau de se minéraliser en conséquence. Ainsi, les eaux thermales sont la plupart du temps fortement chargées et de ce fait impropres à la consommation ». [26]

4. Spécificités des aquifères hydrothermaux

Les études menées sur les aquifères profonds depuis le début du XXème siècle ont démontré que le circuit souterrain des eaux thermales ce que n'appelle le thermosiphon s'intègre dans le mouvement global des eaux souterraines et que il peut se décomposer en trois étapes.

- 1) l'alimentation ou recharge de l'aquifère : l'eau météorique infiltre le sol avant de rejoindre le réservoir chaud.
- 2) dans le réservoir la température maximale est atteinte et des réactions chimiques avec l'encaissant se produisent. Si le temps de séjour est suffisamment long, un équilibre avec la roche est atteint,

3) enfin l'ascension vers la surface d'une partie de la solution chauffée. Cette dernière étape résulte souvent de processus physiques particuliers. Si les étapes d'infiltration et de séjour de l'eau dans l'aquifère thermal sont similaires à celles des aquifères plus superficiels, la phase ascensionnelle en revanche fait appel à des "moteurs" propres au thermalisme (convection, effet de "gas-lift" ...).

Des singularités propres au thermalisme ressortent des spécificités des aquifères géothermaux, et notamment leurs liens avec la géologie. Le réchauffement d'une eau au cours de sa circulation souterraine fait appel à l'une et/ou l'autre des deux propriétés suivantes pour l'aquifère :

- Un flux de chaleur important,
- Un trajet souterrain développé en profondeur.

Les régions volcaniques, actives ou latentes, et les zones d'amincissement crustal offrent un gradient thermique favorable au développement du thermalisme. Quant au circuit souterrain développé en profondeur, il peut s'agir de formations sédimentaires plissées rencontrées dans les régions tectonisées, ou à nouveau des milieux volcaniques permettant à l'eau de s'infiltrer en profondeur par le biais des nombreuses fractures cerclant les volcans. Les observations faites sur différents champs géothermaux à travers le globe rapportent pour la plupart une similitude entre positionnement d'émergence thermique et zone de failles, actives ou non. Ces liens sont observés aussi bien en milieu volcanique actif ou latent, qu'en milieu sédimentaire, dans les bassins ou dans les domaines plissés. Le mélange de fluides d'origines diverses formant au final l'eau thermique est une autre spécificité des aquifères thermaux. La nature et le nombre de fluides engagés dans le mélange est variable et dépend du contexte géologique local. Il peut s'agir bien évidemment d'eau météorique mais aussi d'eau cônée¹, dont le faciès chimique est à l'équilibre avec l'encaissant, d'eau de mer piégée dans une formation géologique enfouie, ou encore de fluides d'origine profonde drainés vers la surface par de grands accidents ou par des structures volcaniques.

Les réservoirs hydrothermaux sont donc des aquifères particuliers, Le temps de transfert dans le circuit du thermosiphon peut être relativement long et se chiffre en dizaines de milliers d'années. Se positionnant à l'interface entre domaine externe et interne de l'écorce terrestre. Outre leur intérêt énergétique et médicinal, ils sont susceptibles de contenir une part de fluides d'origine profonde porteurs d'informations concernant la composition de leur milieu

d'origine, milieu difficilement accessible. Les seules conditions nécessaires pour la mise en place de ces systèmes sont d'une part des structures géologiques particulières favorisant une circulation rapide de l'eau en profondeur, et d'autre part une source de chaleur, c'est à dire un flux géothermique relativement important. [51]

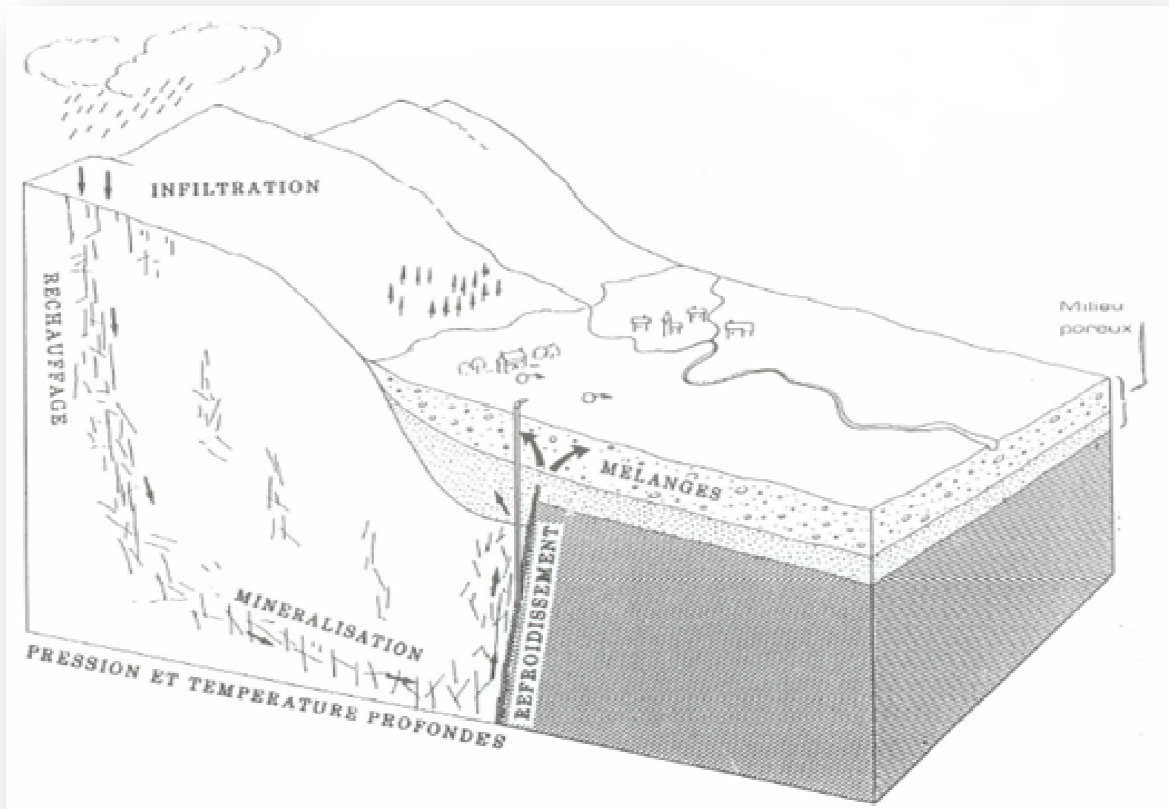


Fig. 21 : Schéma de la circulation des eaux thermales ; Thermosiphon [36]

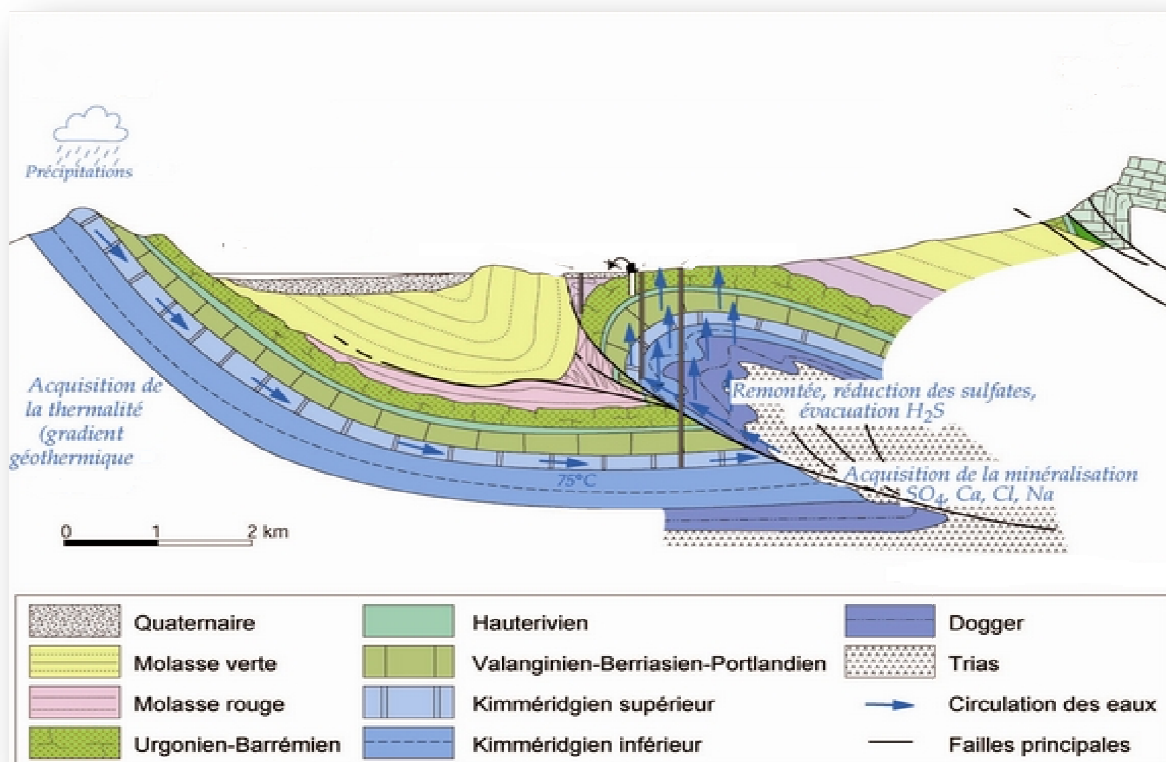


Fig. 22: Coupe longitudinale de la circulation des eaux thermales [36]

5. La classification des eaux thermales

Selon la température à laquelle se trouve l'eau souterraine, différents types de minéraux seront dissous ; raison pour laquelle, une classification des différents types d'eaux thermales doit être faite en fonction de leur origine, de leur température, des origines géologiques, de la composition chimique et composition minérale.

5.1. Selon l'origine

1) **Superficielles** : mers et lacs

2) **Infiltration** : Réseau hydrologique souterrain, dont l'origine est le cycle hydrologique. C'est dans ce type d'eaux souterraines que se trouvent les eaux thermales.

5.2. Selon leur température

1* **Eaux froides** : moins de 20°C

2* Eaux hypothermales : de 21° à 35°C

3* Eaux mesothermales : de 35° à 45°C

4* Eaux hyperthermales : plus de 45°C

5.3. Selon l'origine géologique

1* Eaux magmatiques : Eaux dont l'origine est à caractère éruptif et le débit constant en composition et température.

2* Eaux telluriques : leur débit varie suivant l'époque de l'année puisqu'il provient de l'infiltration des pluies.

5.4. Selon la composition chimique

Le cheminement de l'eau thermale pour arriver jusqu'à la surface est très important puisqu'il peut modifier sa composition.

Si l'eau est très chaude et atteint son point d'ébullition avant d'arriver à la surface, il ne sortira que de la vapeur. Ces gaz s'oxydent lorsqu'ils se mélangent avec les eaux froides et produisent des sources acides, lesquelles présentent un aspect boueux causé par l'acidité de l'eau qui corrode la roche environnante.

- Dans le cas de sources neutres ou alcalines, l'eau est propre et transparente.

1* Sources d'eaux acides : pH inférieur à 7

2* Sources d'eaux neutres : pH égal à 7

3* Sources d'eaux alcalines : pH supérieur à 7

5.5. Selon la composition dans des minéraux

a- Eaux bicarbonatées : Eaux de basse minéralisation, alcalines et froides. Leur utilisation se fait par ingestion, en agissant sur le métabolisme de sorte qu'elles alcalisent le PH gastrique si elles sont prises à jeun, en diminuant l'acidité et en aidant le processus digestif. Elles

stimulent aussi la sécrétion pancréatique et ont des fonctions diurétiques. Ce type d'eaux peut s'associer à la composition d'un autre type de minéraux qui vont varier leurs actions.

Celles plus communes sont :

- **Bicarbonatées sodiques** : Indiquées dans les affections gastriques comme l'hypermotilité intestinale, les ulcères duodénaux, les diarrhées et affections hépatiques et rénales.
- **Bicarbonatées calciques** : elles améliorent la digestion.
- **Bicarbonatées mixtes** : elles améliorent la digestion.
- **Bicarbonatées sulfatées** : indiquées dans des empoisonnements hépatiques et en cas de constipation.
- **Bicarbonatées chlorurées** : indiquées dans les affections rhumatisantes.

Leur application peut se faire par voie orale, en provoquant de la stimulation gastrique et du péristaltisme intestinal, ou par voie externe, indiquées dans des cas d'effort par son important effet sédatif, diminution de l'hypertonie musculaire, augmentation du flux sanguin et comme effet analgésique et anti-inflammatoire. Les eaux sont aussi indiquées pour les affections de l'appareil locomoteur, telles que les contractures musculaires.

Leur application se fait au moyen de douches, de jets, bains et piscine. Indépendamment des indications précédentes, cette application va augmenter les défenses la peau et les muqueuses. Elles sont aussi utilisées par le biais d'inhalations et d'étuves. Ce type d'eau est stimulant pour les fonctions organiques, endocriniennes et métaboliques.

b- Eaux Ferrugineuses

Eau qui contient une forte teneur en fer, bien qu'elles soient accompagnées généralement bicarbonates ou sulfates. Elles sont indiquées dans des cas d'anémies anémie sidéropénique et d'autres types d'anémies, puisque ce type d'eau est considéré comme reconstituant. Les eaux ferrugineuses sont indiquées en cas d'obésité, de rhumatismes, d'affections hépatiques, biliaires et pour certaines affections dermatologiques, ainsi que pour des bouleversements du développement infantile.

c- Eaux Sulfureuses

Eau hyperthermal, dont le PH est de 6.5 et minéralisation moyenne sulfater- sulfureuse. Elle se trouve dans des sols boueux et est indiquée pour des affections des articulations, comme pour des bouleversements du développement infantile.

Eaux Sulfureuses : Eau hyperthermale, dont le PH est de 6.5 et la minéralisation moyenne sulfatée- sulfureuse. Elle se trouve dans des sols boueux et est indiquée pour les affections des articulations, comme processus pour lutter contre les rhumatisants et postopératoires l'appareil locomoteur, anémies, neurologies, dermatoses prurigineuses, inflammations allergiques et affections respiratoires comme l'asthme. Les eaux sulfureuses sont contre-indiquées dans des cas d'hypertension et hémoptysie.

d- Eaux Sulfatées

Ce type d'eaux se caractérise par sa température et minéralisation qui sont variables. Elles peuvent être classées comme : Sodiques et magnésiques : elles ont une importante action laxative. Elles sont également indiquées pour lutter contre les affections dermatologiques, prurits et même dans quelques cas d'empoisonnement médicamenteux ou alimentaires.

- **Sulfatées calciques** : Ces eaux sont indiquées dans des affections gastriques, intestinales, hépatoptoses et biliaires en produisant une importante action diurétique et l'élimination de l'acide urique.
- **Sulfatées chlorurées** : Ces eaux sont indiquées dans des affections digestives, de la gastrite, en cas de constipation et aussi dans des cas d'insuffisance hépatique. La technique d'application de ce type d'eau se fait principalement par ingestion.

d- Eaux Radioactives

Eaux à haute teneur en gaz radon, un gaz radioactif d'origine naturelle. Ce type d'eaux est utilisé en thermalisme et n'a aucun effet négatif. Au contraire, elles sont indiquées pour les affections du système neurovégétatif, endocrinien et pour modifications dans le système auto-immun, ainsi que les affections respiratoires chroniques, rhumatologiques et dermiques. Les soins se font par des bains ou des inhalations. Ces eaux sont particulièrement indiquées pour les traitements anti-effort, dépressions et modifications du système nerveux, le radon ayant des caractéristiques sédatives et analgésiques.

e- Eaux Sulfurées

Eau dans la composition de laquelle prédomine le soufre, ce qui donne un parfum caractéristique des œufs putréfiés. Son administration est encore effectuée au moyen d'ingestion mais d'autres types d'applications sont également possibles. Dans leur composition elles peuvent être accompagnées sodium ou calcium. Elles sont indiquées principalement pour des processus rhumatisants, dermatologiques comme eczémas, kératose, psoriasis ou prurits et respiratoires chroniques, comme la laryngite, rhinite, bronchite, et l'asthme. Elles sont utilisées en postopératoire pour l'appareil locomoteur et les traumatismes. Elles ont aussi un effet sur les affections hépatiques

- **Sulfurées sodiques.**
- **Sulfurées mixtes sodico-calciques et sodico-chlorurées.**
- **Sulfurées calciques, hyposulfitées.**

6. Les eaux thermales en Algérie**Généralité**

La prodigieuse richesse de l'Algérie en eaux thermales est connue depuis bien longtemps et l'efficacité de ces eaux est bien établie. Des sculptures découvertes à Hammam Meskoutine établissent nettement qu'à l'époque punique un établissement balnéaire existait à cet endroit. Mais ce sont surtout les Romains qui tirèrent parti des sources thermales et minérales existant en Algérie. Les ruines multiples, dont quelques-unes sont grandioses, que l'on trouve au voisinage des sources, indiquent l'importance que les Romains ont donnée aux thermes qu'ils ont construits. L'on sait qu'ils attribuaient de grandes vertus thérapeutiques à l'usage des bains et plus spécialement des bains chauds; aussi ont-ils souvent bâti des villes importantes à proximité des établissements thermaux qu'ils utilisaient. Dans l'art de la captation et de la canalisation des eaux, ils sont restés incontestablement nos maîtres, sur cette terre africaine. [13]

Il existe sur le territoire algérien plus de 200 sources thermales d'après les études réalisées à ce sujet, ce nombre croit régulièrement quand on se déplace vers l'Est. Les températures mesurées à l'émergence varient de 19°C à Ben Haroune à 98 °C à Hammam Meskoutine. La minéralisation des eaux est déterminée surtout par la nature chimique et

minéralogique des sédiments qu'elles traversent. Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias si répandu en Algérie [1], ce cas est rencontré à titre d'exemple à Hammam Melouane 29.42 gr/l, Hammam El Biban 15gr/l, Hammam Salhine 9 gr/l. [33]

Aujourd'hui comme dans le passé les stations thermales sont très sollicitées par les algériens pour divers traitements d'ordre rhumatologique, dermatologique et psychiatrique [12]

Le perfectionnement général des méthodes analytiques et l'emploi de procédés physiques conduisent aujourd'hui à considérer cette conception comme insuffisante. De plus, l'avancement des études géologiques détaillées permet souvent une interprétation rationnelle des analyses chimiques. Il est en effet très important de connaître aussi exactement que possible la nature des terrains encaissants, car les eaux thermales dissolvent aisément les éléments qu'elles rencontrent pendant leur circulation souterraine. Comme la détermination de leur provenance est des plus ardues, il convient en l'occurrence, de ne négliger aucun élément d'information.

Cependant l'Algérie n'a pas encore réalisé dans le domaine de l'étude des eaux thermales, une coordination comparable à celle de la Métropole. [43]

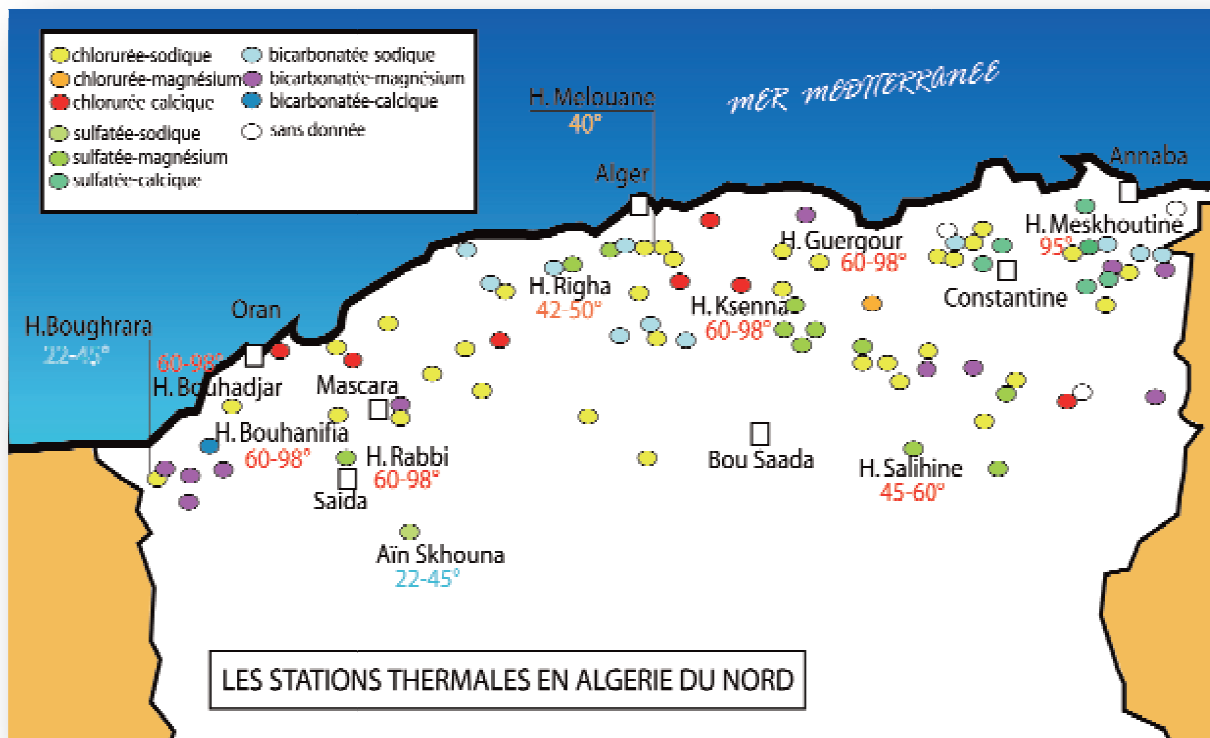


Fig. 23: Les stations thermales en Algérie du nord [40]

6.1. La classification des stations thermales algériennes

1/ Le dernier bilan thermal (1985) identifie 202 sources classées selon

- la température :

- Froides : 53
- Hypo thermales : 59
- Thermales : 13
- Hyperthermales : 77 dont 4 sources de température comprise entre 77° C et 98°C et 26 sources de température comprise entre 41° et 48°.

- l'altitude :

- Basse altitude : 69
- Moyenne altitude : 125
- Haute altitude : 8.
-

2/ Elles sont au nombre de 7 et se répartissent géographiquement :

- à l'ouest de l'Algérie (Oranie)

Hammam Boughrara

Hammam Bou-Hadjar

Hammam Bou-Hanifia

- au centre (Algérois)

Hammam Righa

- à l'est

Hammam Guergour (Sétif)

Hammam Meskhoutine (Guelma)

Hammam Salihine (Biskra)

3/ Le service des Mines a classé les sources des trois départements en **sources sulfureuses, ferrugineuses, alcalines, salines, chlorurées sodiques, sulfatées, ferrugineuses, carbonatées sodiques**. Cette classification n'a d'ailleurs rien d'absolu et le classement de certaines sources peut varier selon l'importance que l'on attache à tel ou tel sel minéralisateur.

7. Le thermalisme

7.1. Définitions

*Est l'utilisation, à des fins thérapeutiques, d'eaux minérales naturelles à l'émergence de la source. C'est une médecine naturelle par excellence faisant appel aux agents contenus dans les eaux, les boues et les gaz”.

* Parce que l'eau chaude a une meilleure capacité de dissolution, elle peut porter plus d'éléments dissous, les sources tièdes et surtout chaudes sont souvent très chargées en minéraux, du simple calcium au lithium, et même parfois du radium. À la fois le folklore et les propriétés médicales prouvées font que ces sources sont souvent des destinations populaires et des lieux pour des centres de soins (réhabilitation, handicaps divers).

7.2. Thermalisme en Algérie

Thermalisme en Algérie n'est pas un phénomène de l'époque contemporaine. L'usage des eaux thermales dans un but thérapeutique remonte à la nuit des temps. Déjà, les Romains avaient su "domestiquer" les eaux qui jaillissaient du sous-sol, de manière certes archaïque, car dépourvue de base scientifique. Il reste cependant qu'ils furent les premiers à nous donner la preuve historique de leurs vertus curatives.

L'histoire nous apprend en effet que les Romains en peuplant les régions d'Afrique du Nord, découvrirent des norias de griffons (ou points d'émergence d'une source). C'est ainsi qu'ils s'établirent dans l'environnement immédiat des thermes et y bâtirent des "tépidariums" (salles de thermes à température tiède) ainsi que des "caldariums" (salles de bains chauds et de vapeurs thermales). Parmi les différents produits touristiques que possède l'Algérie, le thermalisme ou "tourisme de santé", constitue une priorité de développement du secteur compte tenu de l'existence d'un potentiel thermal important à valoriser, ainsi que d'une demande multi forme de la population en quête de villégiature, de repos, de détente, de soins, de remise en forme et de bien-être.

C'est en 1823 que furent effectuées les premières études scientifiques sur le thermalisme algérien et que fut mise en place une réglementation portant sur des données médicales précises.

C'est ainsi que les bains de la reine à Oran devaient recevoir un agrément le 21 septembre 1842, celui du Hammam Meskhoutine de Guelma date du 12 décembre 1862. [24]

C'est précisément dans ce cadre que le Ministère en charge du Tourisme envisage à juste titre d'engager une vaste opération de mise à niveau et de modernisation de l'ensemble des stations thermales, du portefeuille public de GESTOUR. C'est ainsi que, parmi le patrimoine thermo minéral algérien qui se compose de plus de 200 sources ou gîtes thermaux recensés, les 04 Stations thermales relevant de l'Entreprise de Gestion Touristique de Tlemcen (E.G.T.T) sont concernées par ce projet de grande envergure qui permettra de les rendre conforme aux normes et standards professionnels de l'activité, de rehausser leur standing, d'améliorer la qualité des prestations ainsi que des soins prodigués et enfin de les positionner sur le marché mondial du thermalisme en vue de les intégrer progressivement dans les circuits commerciaux à l'international et ce, dans le cadre des dispositions prévues par le "Plan Qualité Tourisme Algérie". [44]

Il s'agit des Stations Thermales de : *Hammam BOUHANIFIA* (wilaya de Mascara), *Hammam BOUHADJAR* (wilaya de Ain T'émouchent), *Hammam BOUGHRARA* (wilaya de Tlemcen) et *Hammam RABBI* (wilaya de Saïda). Ces établissements situés dans la région ouest du pays sont dotés de toutes les commodités en matière de structures d'accueil (hôtels, bungalows familiaux, appartements, studios), d'installations et d'équipements médicaux-thermaux (établissements de soins), ainsi que d'un encadrement professionnel aussi bien hôtelier que médical et para médical pour répondre aux besoins des nombreux curistes, visiteurs, familles, touristes et ce, dans les meilleures conditions de confort. Ces établissements sont conventionnés avec les différents organismes de sécurité sociale (CNAS, CASNOS, CAMSSP) et accueillent, entre autres, des curistes assurés sociaux pour des cures thermales d'une durée de 21 jours. [11]

Conclusion

Les eaux exploitées par les stations présentent différents types de fonctionnement lié au mode de réchauffement des eaux (gradient géothermique simple ou accentué par la topographie, le magmatisme et/ou la tectonique) et du moteur de la remontée en surface (la pression hydrostatique). Fortes de cette diversité, les eaux thermales algériennes occupent une place économique non négligeable.

Chapitre V

Matériels et méthodes

V. Matériels et méthodes

1. Techniques de mesures et d'analyses in situ

Certains paramètres peuvent évoluer pendant le transport des échantillons au laboratoire et il est toujours préférable de faire ces déterminations sur le terrain. La Température d'un échantillon peut changer après le prélèvement et l'information sera erronée. Il faut donc prévoir des mesures rapides après chaque collecte de l'échantillon en question. De même les paramètres tels que, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique mesurée à 25°C (CE), la température et,... doivent être mesurés in situ.

La mesure de ces paramètres, réalisée par nous même, repose souvent sur des méthodes de précision inférieure à celle des méthodes de laboratoire mais l'intérêt de la mesure immédiate peut être prépondérant compte tenu des variations susceptibles qui pourraient intervenir durant le transport et la conservation en laboratoire.

1.1. Analyseur Paramètre physique avec un multi-paramètre portable Consort C931

a. Description

Cet appareil est construit selon les dernières technologies et ne nécessite aucun entretien particulier. Il est équipé d'un nouveau système « anti-encrassement », les sondes Consort C931 permettent de mesurer 3 paramètres simultanément : **PH**, **Température**, **Conductivité**.



Fig.24 : Le multi-paramètre portable Consort C931.

Tableau 12 : La précision de l'appareil Consort C931

pH	0.....14
Conductivité	0...2000 mS/cm
Température	-30...+130°C

b. Les Modes Opérateur

b.1. Mesure de pH

1. Sélectionnez [pH] en appuyant sur MODE. L'affichage indique immédiatement la valeur mesurée selon l'étalonnage précédent. Pour étalonner, appuyez sur CAL.
2. Rincez les électrodes avec de l'eau distillée et immergez les dans le premier tampon. Choisissez [ETALONNER], appuyez sur CAL et suivez les instructions sur l'écran.
3. Rincez les électrodes avec de l'eau distillée et immergez les dans la solution à mesurer. Lisez la valeur donnée.
4. Après usage, rincez toujours les électrodes avec de l'eau distillée et immergez les dans une solution de 3...4 M KCl.

La mesure avec des électrodes à point de zéro anormal:

1. Sélectionnez [E0 = x mV] et appuyez sur CAL.
2. Entrez le point de zéro de l'électrode et appuyez sur CAL.
 - Appuyez sur \hat{e} pour changer la résolution de 0,1 à 0,001 pH.

b.2. Mesure de température

1. Sélectionnez [°C] en appuyant sur MODE. Quand aucun Pt1000 n'est branché, corriger la compensation manuelle de la température et continuer en appuyant sur MODE. Pour étalonner, appuyez sur CAL.
2. Plongez le Pt1000 dans une solution de température connue. Ajustez à cette température et appuyez sur CAL.

b.3. Mesure de conductivité

1. Sélectionnez [S/cm] en appuyant sur MODE. L'affichage indique immédiatement la valeur mesurée selon l'étalonnage précédent. Pour étalonner, appuyez sur CAL.
2. L'affichage indique les trois standards en mémoire (1413 μ S/cm, 12.88 mS/cm, 111.8 mS/cm). Choisissez les valeurs désirées ou entrez manuellement des valeurs spéciales et appuyez sur CAL. Mettez les standards non-utilisés hors service.

3. Choisissez la température à laquelle toutes les futures mesures seront référées et appuyez sur CAL.
4. Décidez si la compensation automatique de température (ATC) doit être appliquée oui ou non et appuyez sur CAL.
5. Après l'avoir rincée avec la solution étalon, plongez la cellule dans cette solution. La température de la solution n'est pas importante mais elle doit être entre 0°C et 30°C. N'oubliez jamais de compenser manuellement la température, si vous n'utilisez pas le Pt1000! Choisissez [ETALONNER], appuyez sur CAL et suivez les instructions sur l'écran.
6. Après avoir rincé plusieurs fois la cellule avec la solution à mesurer, plongez-la dans cette solution et lisez la valeur donnée par l'appareil.
7. Après usage, toujours rincez la cellule et immergez-la dans de l'eau distillée (ajouter un peu de détergent pour bien conserver la surface de platine dans une condition optimale).

2. Techniques de mesures et d'analyses au laboratoire

Les travaux de laboratoires ont concernés les analyses chimiques aussi bien des éléments majeurs.

- Les paramètres mesurés et les appareils utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : travaux de laboratoire et appareillage.

Paramètres mesurés	Moyen de mesure
Eléments majeurs	La chromatographie ionique
Eléments mineurs	Spectrophotométrie D'Absorption Atomique
Les isotopes	spectromètre de masse Delta-V

- Les analyses chimiques :

Les analyses chimiques ont concernés :

✓ **pour les éléments majeurs :**

- **les cations :** Na⁺, K⁺, Ca⁺, Mg⁺⁺

- **Les anions:** Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, SiO₂⁻

✓ **les éléments mineurs :** Li⁺⁺, Sr⁺⁺, F⁻, Br⁻

✓ **Les isotopes :** ¹⁸O, ²H

Les analyses chimiques des eaux et la détermination de leur teneur sont d'une grande importance car elles permettent d'avoir une idée sur la nature des formations géologiques traversées par ces eaux. [9]

Tableau 14: le laboratoire qui a concouru le présent travail.

Eléments chimiques	Laboratoire
Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻ , HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , SiO ₂ , Sr ⁺⁺ , Br ⁻ , Li ⁺ , F ⁻ , ¹⁸ O, ² H	CRNA

CRNA : Centre de recherche Nucléaire d'Alger.

A/ Flaconnage et échantillonnage

Collecter les échantillons dans des flacons en polyéthylène à haute densité qui ont été nettoyés vigoureusement avec de l'eau distillée ensuite plusieurs fois avec de l'eau à échantillonner. Ne pas nettoyer les flacons avec des acides forts ou des détergents car ils laissent des traces d'ions sur les parois. Ces ions peuvent interférer avec les analyses. Réfrigérer les échantillons à 4°C pour minimiser l'activité bactérienne.

Analyser les échantillons contenant des nitrites ou des sulfites (éléments fugaces) dès que possible. Les nitrites s'oxydent en nitrates et les sulfites en sulfates et donc les concentrations mesurées de ces ions se trouvent supérieures. La plupart des échantillons qui ne contiennent pas de nitrite et de sulfite peuvent être réfrigérés pendant au moins une semaine sans de modifications notables dans la concentration des ions. Tous les prélèvements sont faits sous eau.

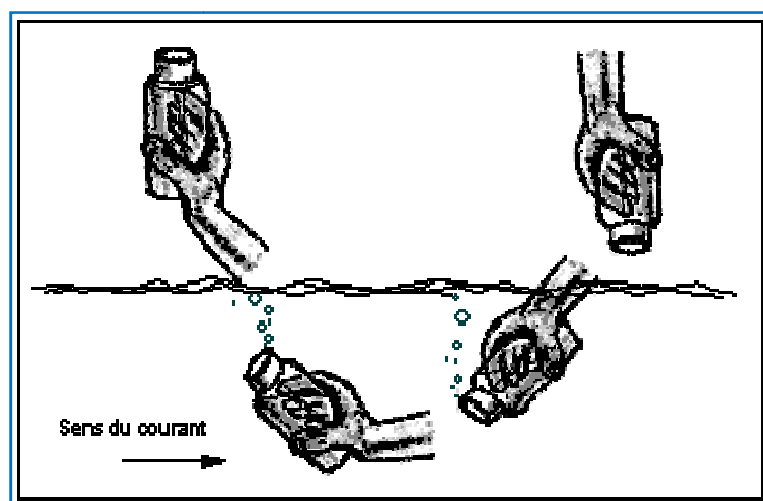


Fig. 25 : Echantillonnage Dans les sources moins chaudes.

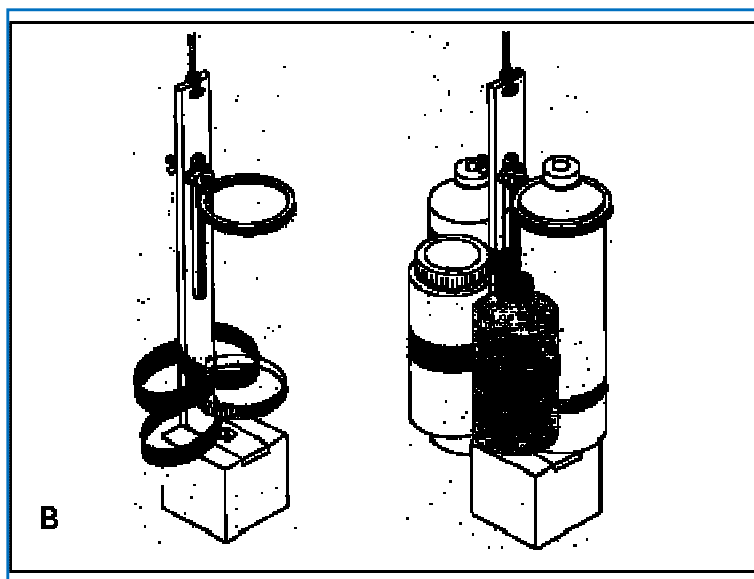


Fig.26 : Échantillonnage Lorsque la température élevée.

B/ prétraitement

Avant l'injection, Si les échantillons ne sont pas analysés le même jour que leur collecte, les filtrer avec des filtres de $0.45\mu\text{m}$ immédiatement après leur collecte, en utilisant les cartouches on Guard Dionex, sinon des bactéries dans l'échantillon peuvent faire changer la concentration des ions avec le temps.



Fig.27: le dispositif de la filtration à $0.45\mu\text{m}$

C/ dilution

Les concentrations des espèces ioniques dans différents échantillons peuvent varier d'un échantillon à l'autre, aussi aucun facteur de dilution ne peut être recommandé pour tous les

échantillons d'un même type. Dans quelque cas (par exemple beaucoup d'échantillons d'eau) les concentrations sont suffisamment basses pour qu'une dilution ne soit pas nécessaire.

Utiliser de l'eau désionisée ou de l'éluant pour diluer l'échantillon. La dilution par l'éluant minimise l'effet du pic négatif de l'eau en début de chromatogramme.

2.1. Analyse les éléments majeurs par La chromatographie ionique

2.1.1. Historique

Cette technique récente est apparue dans les années 70 grâce à **Small, Stevens et Bauman (DOW CHEMICAL)** et le terme "chromatographie ionique" désignait alors la séparation d'ions inorganiques par une détection conductimétrique. A l'heure actuelle, ce terme regroupe toutes les méthodes de dosage d'ions (organiques ou pas) par chromatographie en phase liquide, quel que soit le mode de séparation et de détection. [19]

2.1.2. Repères historique de la chromatographie ionique

1971 Première utilisation pour la chromatographie ionique

1972 Première utilisation de la chromatographie ionique chez Dow Chemical

1972 Premier prototype de chromatographie ionique utilisant une cellule de conductivité

1975 Le premier rapport de recherche en chromatographie ionique et publié « par Small, Stevens et Bauman dans » Analytical Chemistry.

1975 Dionex Corporation est créée sous la licence Dow.

1975 Premier chromatographe ionique commercialisé.

1977 Premier symposium EPA sur l'analyse par chromatographie ionique pollution de l'environnement.

1977 Small, Stevens et Bauman reçoivent le prix de la Conférence de Pittsburgh pour l'avance la plus significative en chimie analytique appliquée.

2.1.3. Définition de la chromatographie ionique

C'est une technique analytique qui permet l'analyse qualitative (par séparation des Espèces présentes) et quantitative des espèces ioniques présentes dans un échantillon liquide dépourvu de matières en suspension.

- D'un point de vue analytique, cette technique est devenue intéressante grâce aux progrès réalisés que l'on peut regrouper en 4 catégories:
 - **meilleurs composants chromatographiques,**

- résines échangeuses de plus grande efficacité,
- échantillons de faible volume,
- détection automatique.

De part les très nombreuses configurations possibles, la chromatographie ionique désigne plus un ensemble de méthodes de dosage des espèces ioniques qu'une séparation seule. Mais la configuration la plus fréquente demeure la détection **des anions** couplée à une **détection conductimétrique**. Néanmoins, nous verrons que d'autres moyens de séparation et de détection sont possibles, en sachant que pour un appareil donné, on ne peut trouver plusieurs configurations simultanées. [30]



Vue générale



vue à l'intérieur

Fig.28: La chromatographie ionique Dionex 120

2.1.4. Mise en fonctionnement

A/ démarrage du système

- 1- Appuyer sur le bouton de mise sous tension sous le panneau frontal de control. La version du microprocesseur s'affiche brièvement et ensuite est affiché la valeur de l'offset de conductivité.

Voici les conditions à la mise sous tension :

- ⇒ Le **DX-120** est en mode Local
- ⇒ La pression sur l'éluant, la pompe et le **SRS** sont en **OFF**
- ⇒ Le stabilisateur thermique **DS4** (s'il est installé) est en **ON**

- ⇒ Les vannes d'injection et de choix de colonne sont dans leur dernière position sélectionnée.
- ⇒ La valeur de l'offset est remise à zéro.
- 2- Appuyer sur l'interrupteur sur l'avant de la pompe pour mettre sous tension la pompe.
 - 3- Appuyer sur **Eluent Pressure** pour pressuriser les réservoirs.
 - 4- Appuyer sur **Pump** pour démarrer la pompe.
 - 5- appuyer sur SRS pour mettre sous tension le SRS. L'écran affiche brièvement le courant d'électrolyse en mA.
 - 6- Appuyer sur **Flow Rate** et vérifier que le débit de la pompe est correct. Si nécessaire, tirer sur le bouton sur la face avant de la pompe et le tourner vers la droite ou la gauche pour augmenter ou diminuer le débit est correct, repousser le bouton.
 - 7- Appuyer sur **Offset Cond** pour afficher la valeur de l'offset.
 - 8- Attendre que le système s'équilibre pendant 15 à 20 min. l'écran affiche la valeur du bruit de fond de la conductivité (la conductivité de l'éluant avant l'injection de l'échantillon). Appuyer sur **Auto Offset** pour mettre à zéro la valeur de bruit de fond.

Si un **DS4** est installé, la stabilisation du système doit aussi inclure le temps nécessaire au DS4 pour atteindre la température de travail. Le chauffage du DS4 se fait à la vitesse de 1°C/min. la ligne de base ne pourra se stabiliser que lorsque le DS4 aura atteint la température du DS4 apparait en bas de l'écran.

⇒ **LO CELL TEMP** apparait et la température sélectionnée clignote quand le **DS4** est en dessous de celle-ci.

⇒ **CELL TEMP** apparait et la température sélectionnée s'arrête de clignoter quand le **DS4** a atteint celle-ci.

⇒ **CELL TEMP HI** apparait et la température sélectionnée clignote quand le **DS4** est en dessous de celle-ci.

B/ injection de l'échantillon

On peut injecter l'échantillon quand le DX-120 est en mode local. Le logiciel **PeakNet** peut aussi être utilisé pour actionner la vanne d'injection.

C/ fonctionnement sous le contrôle de Peak Net

Quand le DX-120 est connecté à une station **Peak Net** via l'interface DX-LAN, le logiciel peut commander le DX-120 et contrôler les fonctions suivantes :

- ⇒ Sélectionner les positions de la vanne d'injection de choix de colonne.
- ⇒ Mettre en fonctionnement la pompe, la puissance du SRS et la pression sur les flacons.
- ⇒ Mettre en fonctionnement la pompe, la puissance du SRS et la pression sur les tampons.
- ⇒ Faire un Auto offset
- ⇒ Sélectionner l'unité de pression affichée sur l'écran
- ⇒ Contrôler les signaux de sortie **TTL1 et TTL2**
- ⇒ Contrôler les sorties d'alimentation

D/ Optimiser la température de compensation

Le **DX-120** est conçu par la compensation de température pour stabiliser les lectures de conductivité en corrigeant les variations de températures qui se produisent lors d'une analyse.

[30]

2.2. Analyse les éléments mineurs par Spectrophotométrie D'Absorption Atomique

Fig.29: la spectrophotométrie d'absorption atomique SAA (PHILIPS UP9100)

2.2. 1. Définition

La spectrophotométrie d'absorption atomique est essentiellement une méthode d'analyse quantitative qui convient beaucoup mieux à la détermination des traces qu'à celle des composants majeurs. Elle présente de nombreux avantages : haute sensibilité, grande

spécificité, influence négligeable de la composition du milieu analysé, rapidité, faible quantité de substance nécessaire (1 ml de la solution peut suffire) et facilité de préparation des solutions étalons.

Les inconvénients majeurs de cette technique sont les suivants : nécessité d'utiliser pour chaque élément à doser une source caractéristique, technique d'analyse destructrice, domaine d'application limité presque exclusivement aux métaux, nécessité d'avoir des concentrations assez peu élevées et nécessité enfin de faire passer l'échantillon en solution. [52]

La méthode est

- Quantitative
- Relative : il faut donc faire une courbe d'étalonnage.

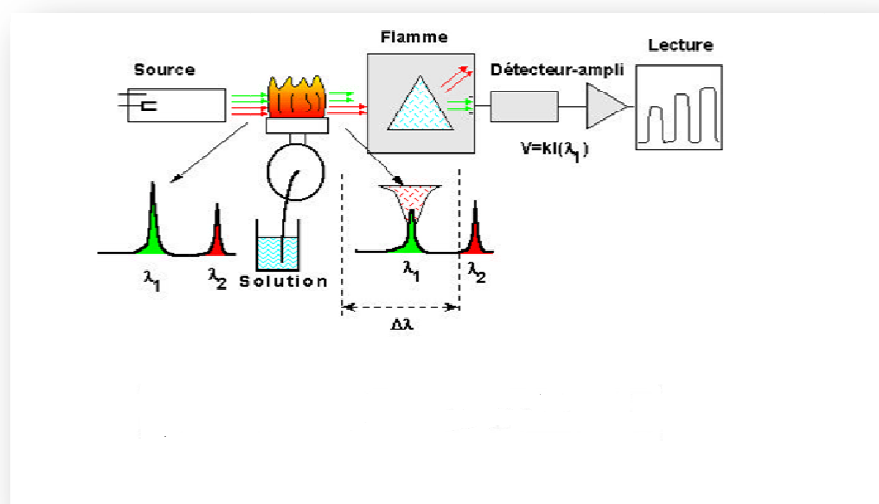


Fig. 30 : schéma de principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique. [18]

2.2.2. Méthodes de préparation des échantillons

Pour accéder à des atomes libres, il existe plusieurs moyens suivant l'état du produit, mais il faudra de toute façon en détruire une partie. Il faudra de plus que le nombre d'atomes obtenus soit représentatif de leur proportion dans le produit pour pouvoir rendre un résultat quantitatif. Il existe plusieurs méthodes d'obtention d'atomes libres à partir d'échantillons:

* chauffer l'échantillon de telle sorte que l'énergie thermique dissocie les particules (atomes, ions ou molécules). Dans bien des cas, il faudra un chauffage énergétique et une température élevée pour obtenir des atomes isolés

* soumettre l'échantillon à un bombardement d'électrons ou d'ions: arc ou étincelle électrique ou pulvérisation cathodique (métaux et alliage) dans lesquels les atomes seront alors excités et ionisés, ce qui conduira plutôt à une spectrométrie d'émission.

* chauffer l'échantillon dans un four à très haute température ou l'introduire dans une flamme ou un plasma capables de dissocier les particules Dans ce cas, pour des raisons techniques, il est préférable d'introduire une solution obtenue à partir d'une dissolution de l'échantillon (introduction plus faible et plus fidèle de l'échantillon, préparation d'étalons identiques aux échantillons, suppression d'interactions possibles et mal connues à haute température...).

2.2.3. Cellules de mesure

Les cellules d'absorption les plus utilisées en spectrométrie sont **la flamme** et le **four graphite** qui sont capables, à partir d'éléments présents en solution, de fournir des atomes libres en proportion suffisante pour utiliser la technique d'absorption.

Mais pour notre cas la cellule d'absorption qu'on a utilisé c'est la flamme puisque les éléments mineurs on a mesurés sont détectés facilement par la flamme.

➤ La flamme

Lorsqu'on utilise la flamme, on nébulise la solution grâce à un capillaire et un venturi qui fournit un fin aérosol de la solution (gouttelettes de quelques microns de diamètre), entraîné dans la flamme par les gaz qui l'alimentent.

Il faut noter que seulement quelques pour-cent de la solution se retrouvent dans la flamme et qu'après des phénomènes complexes de vaporisation, dissociation recombinaison, on obtient une proportion plus ou moins forte d'atomes libres susceptibles d'absorber le rayonnement.

C'est pour cela que l'on est obligé de préparer des étalons ayant une composition (une matrice) aussi voisine que possible que celle des échantillons afin de maîtriser au mieux les phénomènes physico-chimiques (nébulisation, vaporisation, réactions chimiques) qui interviennent dans l'obtention des atomes libres à l'état fondamental. [18]

2.2.4. La procédure d'analyse

Le dosage du lithium à l'aide de la technique appelée «spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme». L'échantillon est transféré dans un Vial et placé sur l'échantillonneur

automatique de l'appareil. L'échantillon à analyser est aspiré dans une flamme où l'élément présent est réduit à leur état d'excitation fondamental.

Le faisceau d'une lampe à cathode creuse contenant l'élément à doser est dirigé vers la flamme où l'élément présent absorbe l'énergie de la lampe proportionnellement à sa concentration.

2.3. Le dosage du silice SiO_2 par un colorimètre de terrain DR890 de HACH



Fig. 31 : le colorimètre de terrain DR890 de HACH)

- La méthode est : par la méthode de la colorimétrie de molybdate

2.3.1. Les réactifs

A- HCl.

B- Le molybdate d'ammonium : 10 g $(\text{NH}_4)_6 \text{MO}_7\text{O}_{24}, 4\text{H}_2\text{O}$.

C- Acide oxalique : 10g $\text{C}_2 \text{H}_2 \text{O}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ dilué dans 100 ml de l'eau distillée.

D- Le standard de Si : 1000ppm Si (SiCl_4 dans la solution de NaOH), standard (Merck).

[30]

2.3.2. La procédure

Pour 50 ml de l'échantillons ou 25 ml, ajouter rapidement 1ml ou $\frac{1}{2}$ ml de l' HCl. et 2 ml d'une solution de molybdate d'ammonium. Puis, agiter bien la solution (environ 6 fois) et

attendre 5 à 10 minutes. Ensuite, ajouter 1,5ml ou 0.75 ml de la solution d'acide oxalique et bien mixer pour mesurer après 5 minutes.

***Pour calculer :**

Si (ppm)

ppm (SiO₂) = 0.40 ⇨ pour SiO₂ = diviser par 40.

2.4. La représentation simplifiée des caractéristiques chimiques des eaux

L'interprétation des analyses chimiques repose sur la cartographie hydro-chimiques pour illustrer le faciès chimique des eaux et remonter leur origine. Cette représentation utilise des diagrammes puisés dans le logiciel qui s'appelle **DIAGRAMME** initié par le docteur Roland SIMMLER du laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon.

Le recours à des diagrammes et graphiques divers est donc assez fréquent et utile en hydrochimie.

2.4.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux.

Il est composé de deux triangles équilatéraux à la base surmontés d'un losange au milieu permettant de représenter le faciès hydro-chimiques des eaux par rapport à la concentration relatives des cations et des anions. Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons.

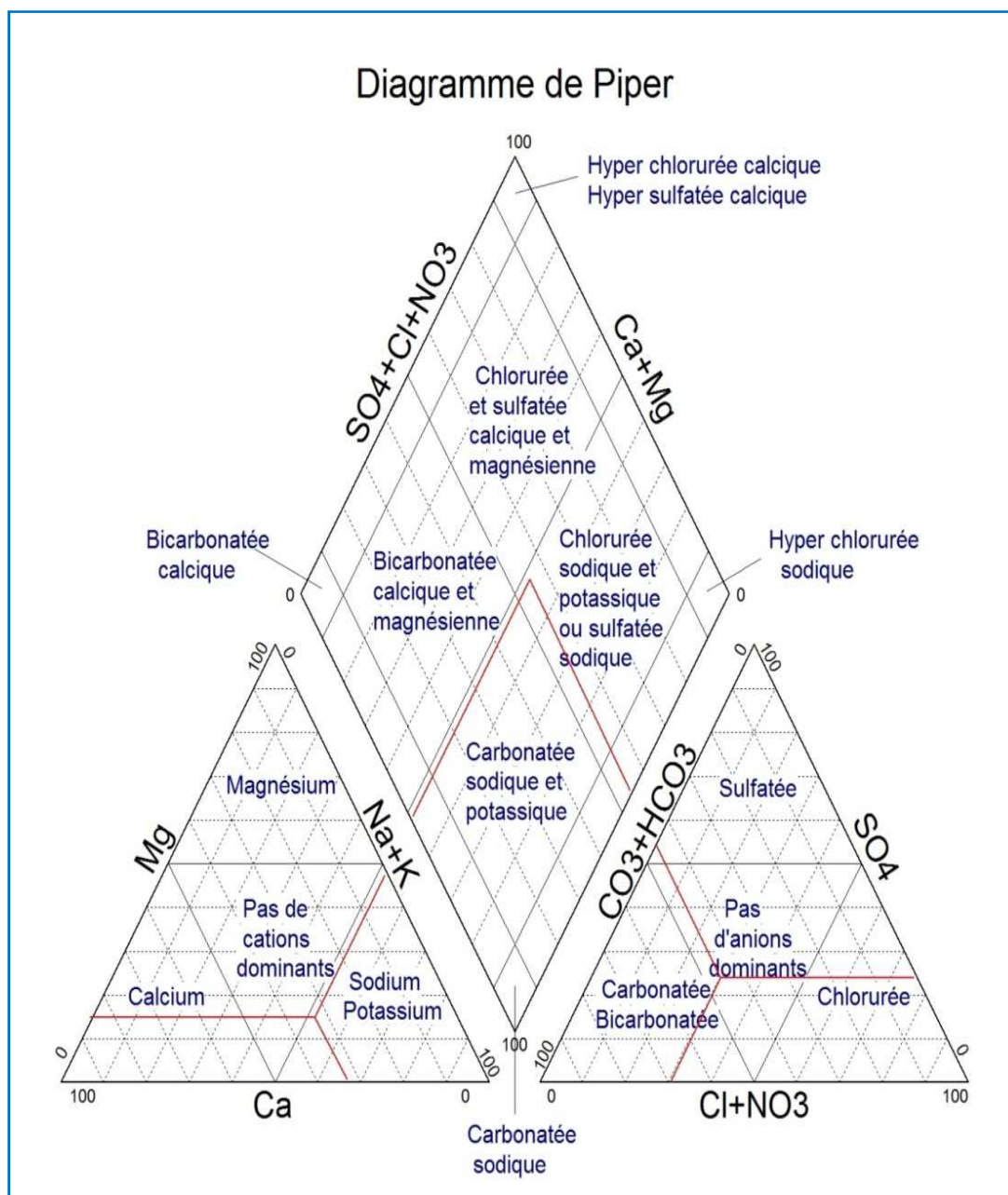


Fig. 32: Diagramme de Piper

2.4.2. Diagramme de Schoëller et Berkloff

Les diagrammes de Schoëller et Berkloff, établi en 1952, permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux.

Le diagramme semi-log de Schoeller, permet une représentation graphique des résultats d'analyses d'eau par des points reportés sur chaque axe réservé à un élément chimique (anions et cations) ; Les points ainsi, sont reliés entre eux par une ligne brisée. Les points les plus élevés sur les axes des cations et des anions, par conjugaison caractérisent le faciès chimique en question.

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.

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.

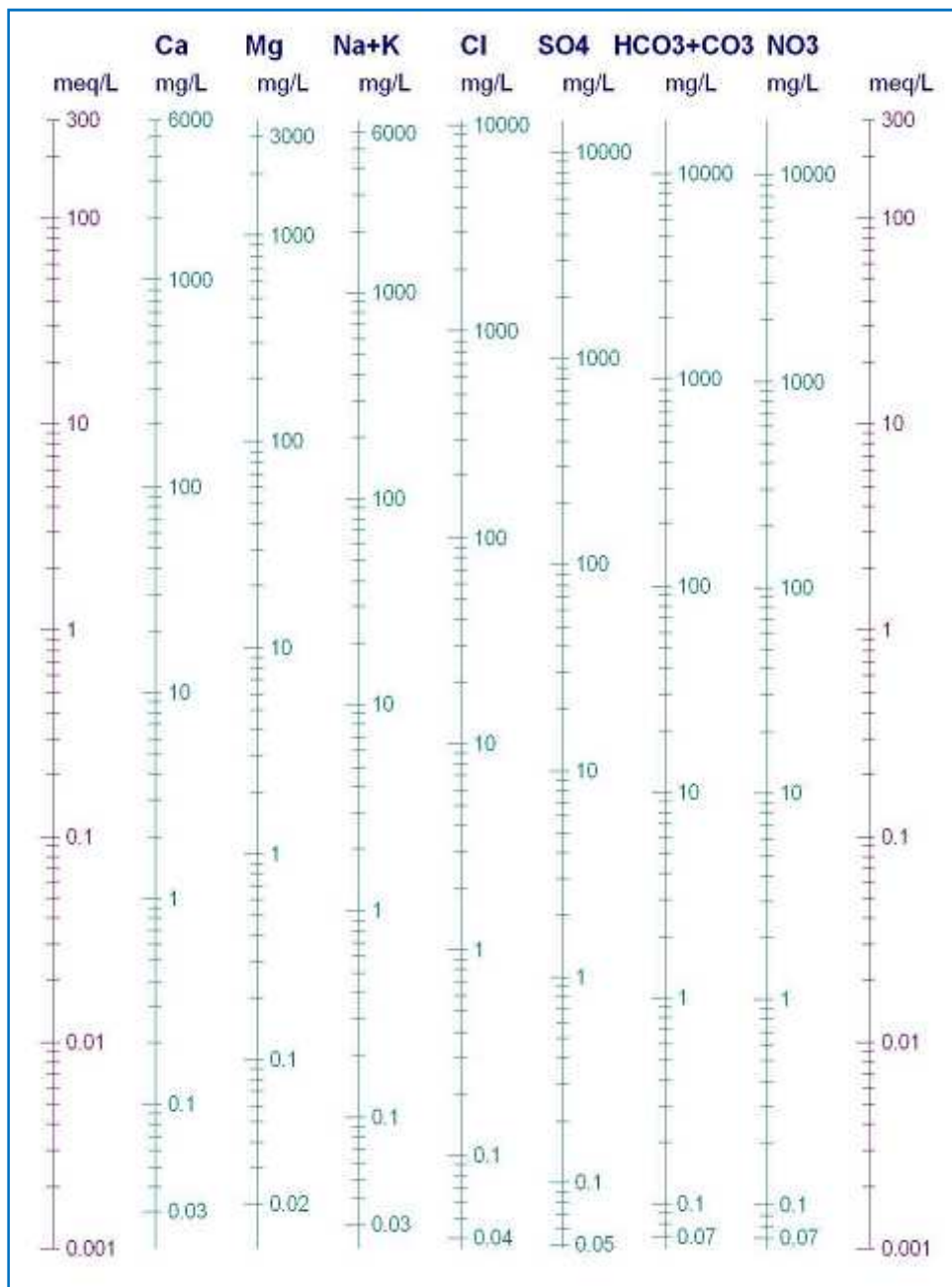


Fig.33: Diagramme de Schoeller et Berkaloff.

2.5. Mesure isotopique de l'oxygène O_{18} et le deutérium H_2

La mesure isotopique se fait à l'intérieur du spectromètre de masse Delta-V, au niveau de la source ionique et sous forme gazeuse.



Fig.34 : Spectromètre de masse Delta-V et leur équipement.

2.5.1. La méthode de la mesure

Au préalable, on procède à une équilibration au niveau du GasBench (auto échantillonneur), entre l'eau de l'échantillon et le CO_2 ou l'eau et l' H_2 en fonction de ce que l'on voudra mesurer, à savoir ^{18}O (phase CO_2) ou **D** (Deutérium) en phase H_2 .

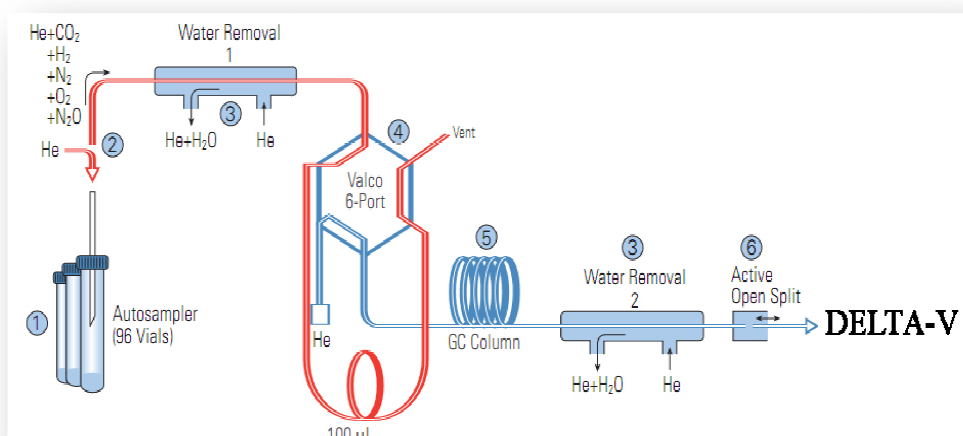


Fig. 35: Schéma de principe du GasBench. [48]

(1)⇒ On a prend **200 µl** d'eau introduite dans une fiole (Labco Exaitener) de 12.5ml que l'on place dans un banc thermostaté dont la température est maintenue à **25°C**. Une fois toutes les fioles remplies d'eau (selon la séquence adoptée 40 ou 96)

(2) ⇒ on fait venir au dessus de l'eau, par le biais d'une seringue qui pénètre dans le bouchon (en silicone) de la fiole, un gaz de mélange **He-CO₂** ou **He-H₂**, dont les proportions de mélange sont définies par le constructeur C'est l'opération de **flushing** (lavage) qui dure **10mn**. Celle-ci consiste à « évacuer » de la fiole toutes les impuretés existantes sur la paroi et au dessus de l'eau.

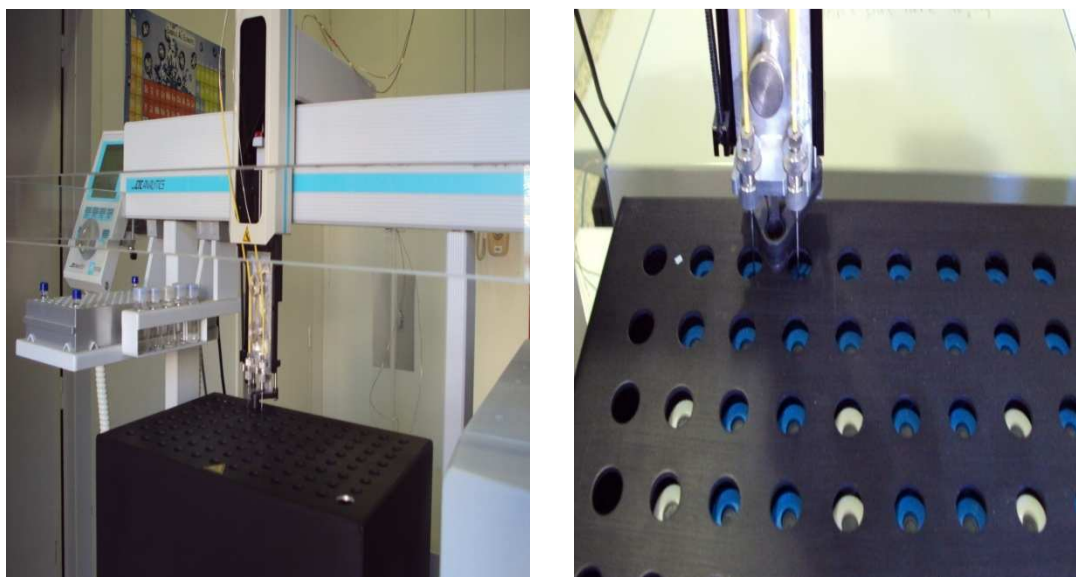


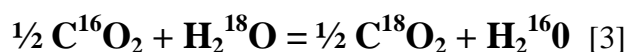
Fig.36: GasBench (auto échantillonneur) en mise en marche.

Ceci est fait à un débit constant (170ml/mn), afin d'évacuer tout l'air existant dans la fiole et ne laisser que le CO₂.

(3)⇒ Puis on procède à une **équibration du gaz** avec l'eau. De cette manière l'on va accélérer le transfert de l'O₂ (ou de l'H₂) de l'eau dans la phase gazeuse.

L'équibration avec la phase CO₂ est la plus longue car elle prend plus de 24h, alors que pour la phase Deutérium HD celle-ci ne prend qu'une heure en présence d'un catalyseur en platine (Pt).

- Au bout de cette période, le **transfert isotopique** est réalisé selon la réaction suivante :



- Pour réaliser l'analyse du CO_2 ainsi obtenu après la phase d'équilibration,

(4) \Rightarrow On introduit automatiquement une autre seringue (destinée à l'**acquisition**) dans le bouchon de la fiole. On introduit de l'He pur par le trou de l'aiguille (voir schéma) et on véhicule le gaz de mélange He- CO_2 .

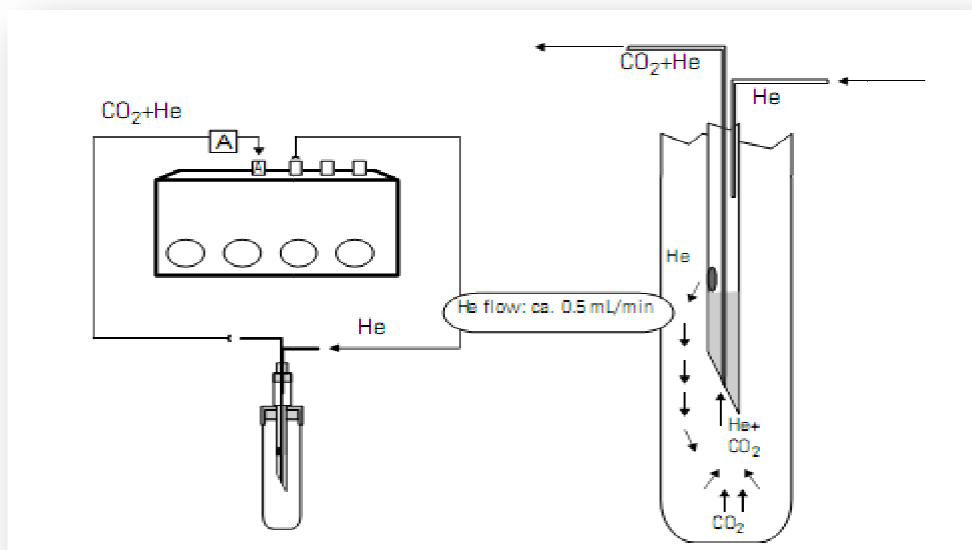


Fig. 37 : Schéma de la fiole et du transfert du gaz. [4]

(5) \Rightarrow Ce mélange va passer, à l'entrée du système GasBench, par un piège à eau (Water removal) en Nafion®, qui joue le rôle d'une membrane échangeuse d'ions et va permettre aux molécules de gaz entrantes dans le capillaire d'être déshumidifiées.

(6) \Rightarrow Le gaz CO_2 va entrer par la suite dans une vanne Valco à 8 ports pour faire passer le gaz directement dans la boucle d'échantillonnage (mode load) En mode « inject », l'échantillon est envoyé sous flux d'hélium directement dans la colonne chromatographique.

- Durant l'analyse, la colonne est maintenue à une température de **70°C** afin de bien séparer les gaz, CO_2 , N_2 et O_2 . [1,51]

(7) \Rightarrow A la sortie de la colonne chromatographique, les gaz passent par un deuxième piège à eau qui va retenir l'eau résiduelle (Fig.34).

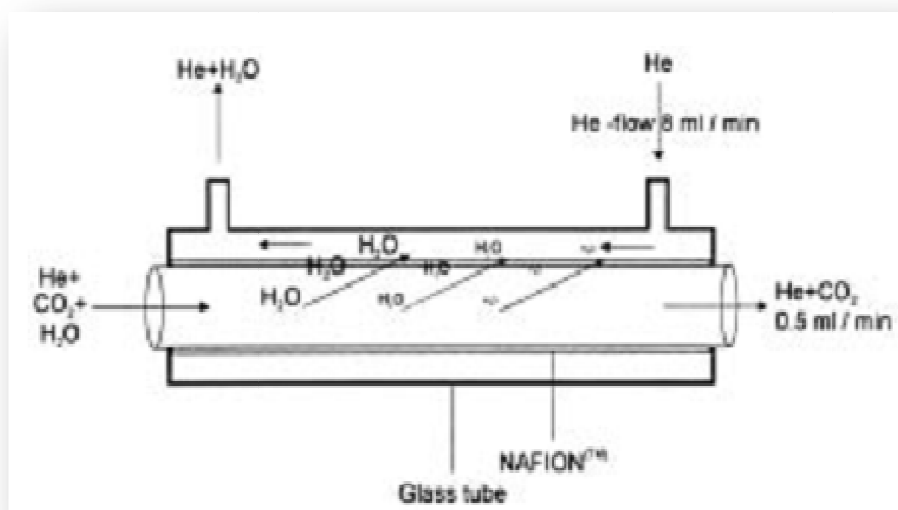


Fig.38 : Schéma de principe du piège à eau. [4]

*Une fois l'eau résiduelle retenue, puis envoyé vers le spectromètre. Et arrivés dans la source ionique, l'intensité des gaz (m/z) est constamment analysée. L'analyse d'un échantillon, standard ou autre se fait par la mesure de 04 pics (CO_2) et 5 (Deutérium, HD) ou D). Ils correspondent respectivement au gaz de référence utilisé pour l'une et l'autre phase et dont la valeur est connue. Ces pics servent à calibrer les mesures de l'échantillon par rapport au gaz de référence, et éventuellement à détecter une dérive de la valeur du gaz de référence. En général une séquence de 10 pics est analysée et se sera la moyenne de ces pics qui sera prise en considération, avec une valeur moyenne calculée en $\delta^{18}\text{O}$ ou en $\delta^2\text{H}$.

2.5.2. Calibration

Celle-ci se fait par l'utilisation de standards internationaux de référence destinés à ce que tous les laboratoires utilisant les techniques de mesures des rapports isotopiques dans les études d'eaux naturelles de surface ou souterraine le fassent par rapport à une même référence.

Dans le cas qui nous concerne cette calibration a été réalisée moyennant l'utilisation de trois standards de référence tels que préconisés par l'AIEA, à savoir le VSMOW2, le SLAP2 et le GISP. De la même manière, nous avons utilisé d'autres standards de travail (de l'USGS) et des échantillons de l'AIEA (de croisement international, *WICO 2002 IAEA report*) qui nous ont permis de vérifier le calage des mesures effectuées, leur valeur en ^{18}O et HD étant connue.

Au total, 09 échantillons d'eau ont été analysés en ^{18}O et D, selon différentes géométries (volume utilisé) en retenant cependant celle de 200 μl , car impérativement préconisée pour l'analyse en $\delta^{18}\text{O}$. Au préalable et avant toute analyse que ce soit pour une calibration ou une analyse de routine on fera un 'Scan' de l'appareil afin d'analyser le bruit de fond (Fig.35) et détecter s'il y a lieu toute anomalie qui pourrait perturber par la suite l'analyse. On précisera cependant que l'obtention du résultat final, à savoir la valeur réelle en $\delta^{18}\text{O}$ ou δD est tributaire de la normalisation par rapport aux standards de travail utilisés. [1,2]

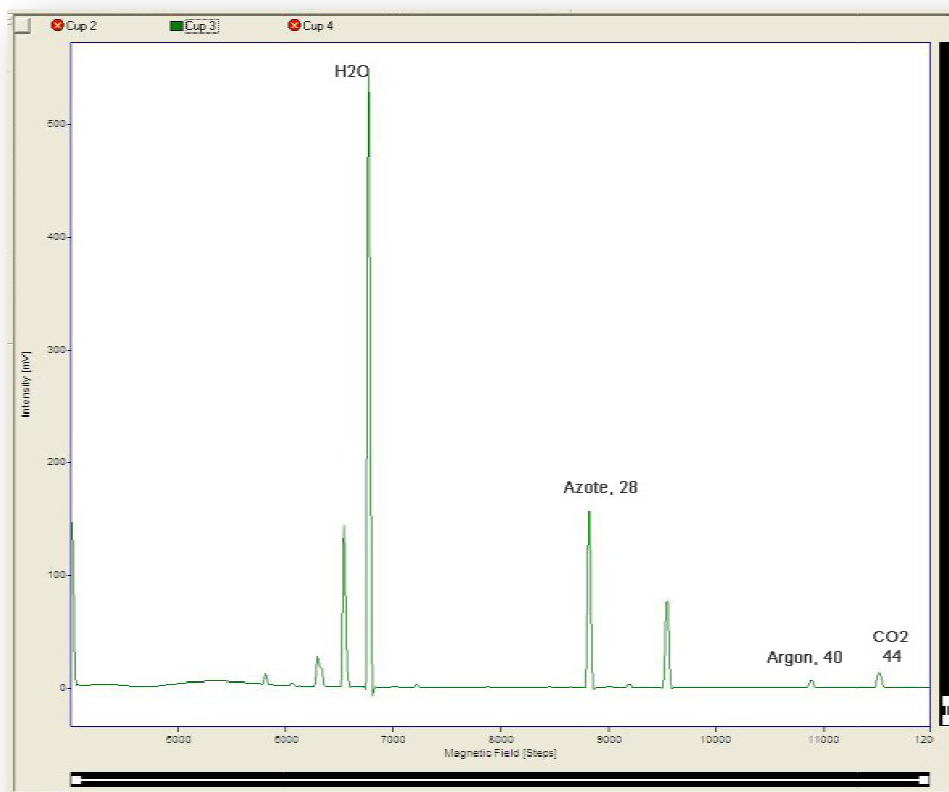


Fig.39: Chromatogramme type du Delta-V Visualisation du bruit de fond avant analyse.
[4]

Chapitre VI

Résultats et interprétations

VI. Résultats et interprétations

Introduction

L'hydrochimie des zones semi-arides endoréiques est marquée par les phénomènes de concentration des solutions et de salinisation sous l'influence de l'évaporation. Dans ce contexte les mécanismes responsables de la variation et de l'acquisition de la qualité chimique des eaux sont souvent nombreux et complexes : apports météoriques (pluie et évaporation), l'acquisition des éléments chimiques par dissolution ou l'altération des minéraux de l'aquifère, lixiviation de solutés, les échanges de cations et par processus biogéochimiques. Apprécier la diversité des mécanismes responsables des variations hydrochimique d'une région aride nécessite l'identification de la concentration de chaque élément chimique par rapport à la minéralité globale des eaux.

L'étude hydrochimique a porté sur l'analyse et l'interprétation de neuf sources. Les échantillons ont été prélevés au mois de Mai 2011. Pour aboutir aux résultats souhaités, nous avons tout d'abord effectué une visite de reconnaissance de quelques sources du versant nord du massif de l'Aurès.

Les analyses d'eau ont été réalisées au Département Datation et Traçage Isotopique du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA).

1. Les points d'eau concernés par le présent travail sont représentés sur la carte suivante:

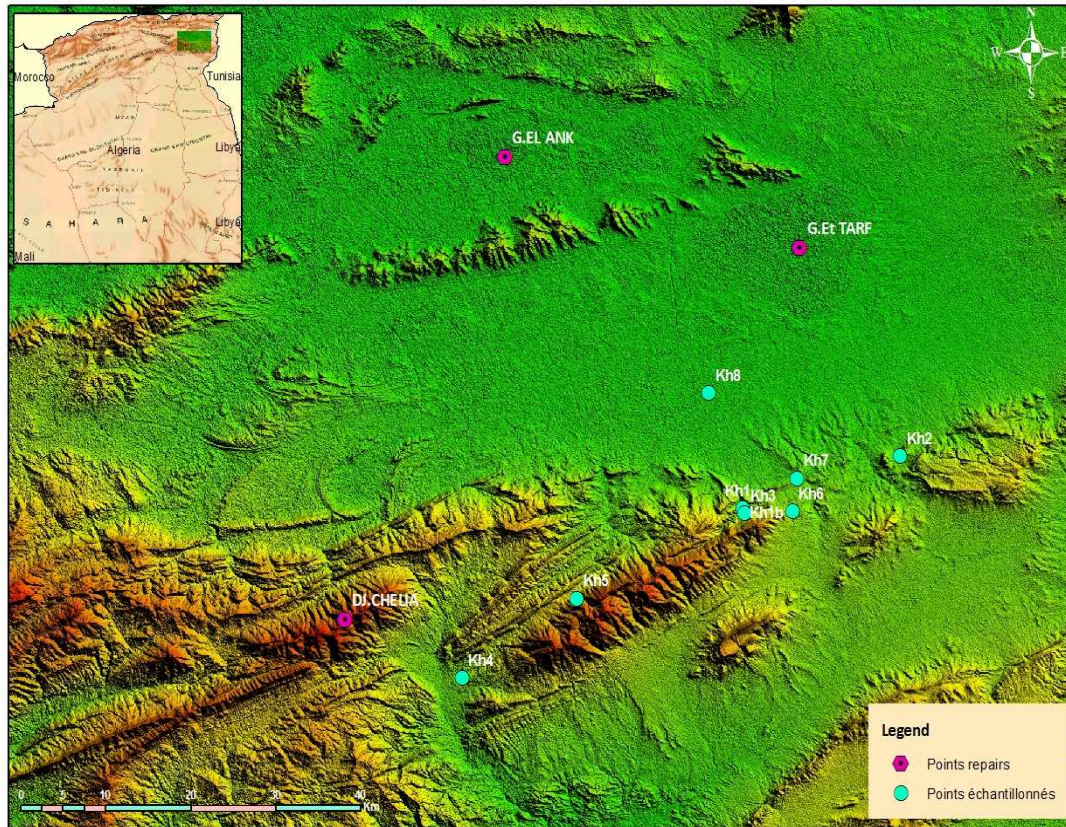


Fig.40 : la représentation des points d'eau à échantillonnées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT)

1.1. La source thermale de Hammam El Salihine (kh1, khb)

Cette source thermale est située dans la commune d'El Hamma, qui existe depuis 2 000 ans. C'est un site de loisir, touristique et thérapeutique par excellence. Il est situé à 7 Km du chef lieu de la wilaya, la date de son exploitation remonte à l'époque romaine. La température de ses eaux avoisine le 73° degré, sa composition chimique lui confère des propriétés thérapeutiques indiquées pour les maladies rhumatismales, respiratoires et dermatologiques. Elle dispose de 40 cabines pour bain thermal, de 5 piscines, elle enregistre jusqu'à 700.000 visiteurs /an. Le hammam est situé dans une région forestière au climat particulier, c'est un lieu de prédilection pour les nombreux touristes. Piscine romaine circulaire, vestige réhabilité .De nouvelles structures, pour accueillir le nombre sans cesse accru des visiteurs. A ce merveilleux paysage naturel allié au vestige antique où se situe la station thermale de Hammam Essalihine, s'ajoute d'innombrables structures d'accueils existantes ou programmées dans le cadre de projets d'investissement.

1.1.1. Appellations

Latines : *Aquae Flavianae, Aquae Caesaris*

Françaises : Thermes de Flavius, Fontaine Chaude.

Locales : Hammam Essalihine, Hammam Salehine, Hammam Khenchela

1.1.2. Principales structure

Il existe plusieurs constructions principales réservées indépendamment aux hommes et aux femmes (des piscines couvertes, à l'air libre, individuelles). Les plus remarquées sont les deux piscines à l'air libre, la piscine rectangulaire et la piscine circulaire.



La piscine rectangulaire



La piscine circulaire

Fig.41 : les deux piscines Romaines

La première piscine est plus large, d'environ 13,80 m x 10,05 m, pour une profondeur de 1,45 m. et la deuxième est de 8 m de diamètre et une profondeur de 1,45 m.

- Les coordonnées géographiques internationales de Kh1, Khb sont suivantes

-Altitude de 1076m

-latitude : 35° 26' 22.72" Nord.

-longitude : 7° 05' 06.71" Est.

1.2. Station à vapeur de Hammam El Knif (kh2)

La station de hammam El Knif se trouve dans la commune de Baghai à **15** kilomètre du chef lieu de la wilaya de Khenchela. Elle est composée par deux chambres collectives à vapeur et de onze chambres de détente, sa capacité d'accueil annuelle est de **40 000** personnes. Cette station est préconisée pour le traitement des maladies rhumatismales et dermatologiques.

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

- Altitude de 1020 m

-Latitude de : 35° 29' 11.18'' Nord

-Longitude de : 7° 15' 10.01'' Est

1.3. Ain Silène (kh3)

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

-Altitude de 1153m

-latitude : 25° 26' 02.70" Nord.

-longitude : 7° 05' 14.26" Est.

1.4. Hammam Djaarir (kh4)

La station de hammam Djaarir se trouve dans la commune de Bouhmama à **7** kilomètre du chef lieu de la commune. Elle était exploitée durant les années 90, il est composée par trois chambres.il est parmi les futures projets de la commune de Bouhmama pour faire des aménagements afin de le réutiliser.

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

-Altitude de 1107m

-latitude : 35° 16' 45.50" Nord.

-longitude : 6° 47' 23.07" Est.

1.5. Ain Zarif (kh5)

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

-Altitude de 1399m

-latitude : 35° 21' 12.80" Nord.

-longitude : 6° 54' 39.22" Est.

1.6. Ain El Karma (kh6)

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

-Altitude de 1149m

-latitude : 35° 26' 06.96" Nord

-longitude : 7° 08' 19.19" Est

1.7. Ain El Manchar (kh7)

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

-Altitude de 1025m

-latitude : 35° 27' 46.60" Nord.

-longitude : 7° 08' 38.49" Est.

1.8. Ain Djimente (kh8)

- Les coordonnées géographiques internationales suivantes

-Altitude de 861m

-latitude : 35° 32' 41.94" Nord.

-longitude : 7° 03' 00.71" Est.

2. Etude analytique des paramètres physico-chimiques

Introduction

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées, du temps de contact avec la roche, de la surface de contact et du temps de séjour des eaux. Cette interaction eau-roche contribue à la minéralisation des eaux par augmentation des teneurs des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que le climat, l'activité anthropique, les échanges eaux de surfaces-eaux souterraines, l'hydrolyse, l'hydratation et l'oxydoréduction. [34]

Les sources ordinaires de bonne qualité ont une température constante égale à la température moyenne annuelle de l'air du lieu où elles jaillissent. Elles sont donc plus chaudes que l'air ambiant en hiver et plus fraîche en été.

Les sources thermales ont elles aussi une température stable mais toujours supérieure à la température moyenne de l'air du lieu où elles émergent. Alors que l'eau pure est sans saveur les eaux thermales ont fréquemment un goût parfois salé qui traduit la présence de substances dissoutes. [11]

2.1. La température (T°)

La température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques. Toute variation brusque de ce paramètre entraîne une perturbation dans l'équilibre de l'écosystème aquatique. [38]

La température est un paramètre facilement mesurable, car la majorité des sondes de mesure de pH et conductivité sont dotées d'une sonde de température intégrée. Ce paramètre permet de mettre en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, permet d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau. [24]

2.1.1. La classification des eaux en fonction de la température d'émergence

- **Eaux hypothermales** : ce sont des eaux dont la température à l'émergence est inférieure à la température moyenne interannuelle du lieu d'émergence de plus de 4°C .
- **Eaux métriothermales** : ce sont des eaux dont la température à l'émergence est inférieure à 30°C mais supérieure à celle des eaux hypothermales.

□ **Eaux mésothermales** : ce sont des eaux dont la température à l'émergence est entre 30°C et 50°C.

□ **Eaux hyperthermales** : ce sont des eaux dont la température à l'émergence est supérieure à 50°C et inférieure à 100°C.

➤ **Les températures mesurées**

La températures mesurées in situ en degré Celsius, sont portées dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Classification des eaux selon la température mesurée

La source	T (°C)	La classification
Hammam Salihine (kh1)	73	Hyperthermales
Hammam Salihine (khb)	65	Hyperthermales
Hammam Knif (kh2)	49.8	Mésothermales
Ain Silène (kh3)	17.3	Métriothermales
Hammam Djaarir (kh4)	36.6	Mésothermales
Ain Zarif (kh5)	14.8	Métriothermales
Ain El karma (kh6)	17	Métriothermales
Ain El Menchar (kh7)	15.8	Métriothermales

La température de l'eau est influencée par la température de l'air, elle joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductibilité. Dans le cas des sources d'altitude, lorsqu'elle est proche de la température de l'air, elle donne des indications précieuses sur la vitesse d'alimentation et le temps d'émergence. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, c'est l'un des facteurs qui influe sur la vitesse des réactions chimiques. On remarque que les températures élevées pour les eaux thermales témoignent de l'origine profonde de ces eaux.

2.2. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1cm elle est l'inverse de la résistivité électrique. C'est une mesure indirecte de la salinité d'eau car elle nous renseigne ainsi sur la quantité de sels dissous dans l'eau.

L'unité de Conductivité est le Siemens par mètre(S/m), la conductivité électrique d'une eau s'exprime généralement en Micro siemens par centimètre (μS/cm). [50]

Issaadi (1992) a regroupé les sources minérales et thermales Algériennes en quatre classes citées dans le tableau suivant.

Tableau 16 : Classification des eaux des sources minérales et thermales Algériennes selon la conductivité. [37]

Classe	Conductivité
Classe 1	<2000 μ S/cm
Classe 2	2000 μ S/cm et 7000 μ S/cm
Classe 3	7500 μ S/cm et 15000 μ S/cm
Classe 4	>15000 μ S/cm

➤ **Les conductivités mesurées**

Les conductivités mesurées sont exprimées en Micro siemens par centimètre (μ S/cm) portées dans le tableau suivant :

Tableau 17: Classification des eaux selon la conductivité mesurée.

La source	Conductivité (μ S/cm)	Minéralisation (mg/l)	La classification
Kh1	3810	1890	Classe 2
khb	3610	1800	Classe 2
Kh2	4010	1980	Classe 2
Kh3	566	282	Classe 1
Kh4	6620	3300	Classe 2
Kh5	726	359	Classe 1
Kh6	650	310	Classe 1
Kh7	2210 (nappe captive)	1100	Classe 2
Kh8	1200 (nappe captive)	597	Classe 1

Toutes les valeurs mesurées de la conductivité indiquent une minéralisation élevée car elles sont toutes globalement supérieures à 1500 μ S/cm, cela traduit la grande solubilité des sels à des grandes températures. Ces valeurs indiquent que les eaux thermales de Khenchela sont minéralisées et auraient traversé les terrains triasiques gypso-salifères et sont liées à la grande solubilité des sels (Na Cl ; CaSO₄, 2H₂O ; CaSO₄ et Na₂SO₄, 2H₂O).

2.3. Le pH

Le pH ou bien Le potentiel d'hydrogène est l'activité des ions H^+ dans une eau, il mesure l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Le pH ou l'acidité d'une eau mesure généralement par le pH mètre solitaire ou par multi paramètre ; à pH 7 est une est dite neutre, à un pH inférieur à 7 une eau est dite acide, à un pH supérieur à 7 elle est dite basique.

➤ **Les valeurs du pH mesurées**

Les valeurs du pH mesurées sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 18: l'état des eaux selon les valeurs du pH mesurées.

La source	Le pH	Etat
Kh1	7,20	Neutre
Khb	6.9	Neutre
Kh2	6.70	Acide
Kh3	6.80	Neutre
Kh4	4.93	Acide
Kh5	6.40	Acide
Kh6	7,06	Neutre
Kh7	7.07	Neutre

Le pH de toutes les eaux varie de 4.93 à 7,20, avec un caractère plus ou moins alcalin pour les sources de Hammam Salihine, Ain Silène, El Menchar, Karma et pH acide pour Hammam Knif, Djaarir, et Ain Zarif. Ces valeurs témoignent des variations de CO_2 , dissous dans l'eau. Cela est imputé à l'apport du gaz carbonique dans l'eau, (1) soit par diffusion atmosphérique directement dans les griffons et à travers les fissures et les chenaux nombreux dans les massifs rocheux ou (2) à la remontée de CO_2 endogène.

3. Hydrochimie des éléments majeurs

Introduction

C'est en circulant dans les micros fissures des roches que les eaux en dissolvent certains composants. La dissolution est facilitée par la chaleur ambiante et par la durée du contact entre l'eau et la roche.

L'hydrochimie des éléments majeurs a fait l'objet d'une analyse aussi bien du point de vue statistique que par l'utilisation du logiciel de spéciation géochimique « Diagramme » qui nous a permis d'évaluer l'évolution des éléments majeurs ainsi que de déterminer les différents indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux. Les analyses chimiques, cations et anions, des eaux de Khenchela ont été faites au Département Datation et Traçage Isotopique du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, à l'aide d'un chromatographe ionique Dionex120 à colonne rapide après avoir filtré l'eau sur filtre 0.45 μ , la spectrophotométrie d'absorption atomique SAA (PHILIPS UP9100). La précision analytique pour les cations et les anions est de 5 à 10%.

3.1. L'analyse statistique multi-variée

Elle a été effectuée selon deux méthodes, la première la classification hiérarchique ascendante (Hierarchical Cluster Analysis) ou HCA (Fig.42), et la seconde à l'aide de l'analyse en composantes principales ou ACP.

Ces deux méthodes sont les plus utilisées dans le traitement des données géochimiques dans les sciences de la terre. Elles sont aussi reconnues comme pouvant différencier des groupes et des minéraux qui sont les plus prédominants. Les variables sont représentées par les paramètres physico-chimiques et les concentrations en ions majeurs. Le principe de la HCA est de lier des groupes d'échantillons. La méthode la plus utilisée est celle de WARD, et dont la mesure des distances est celle des distances euclidiennes. Ceci permet de grouper des points qui ont une même signature, sont homogènes et géo-chimiquement distincts des autres. L'analyse hiérarchique est basée sur l'observation du dendrogramme (Fig.42). L'analyse statistique effectuée sur les eaux de Khenchela, nous a permis de différencier deux masses d'eau, les eaux thermales, et les eaux froides en fonction de la concentration en éléments majeurs et des paramètres physico-chimiques. De cette observation on constate aussi que dans chacun des groupes des points s'individualisent comme Kh7 en G1 et Kh4 en G2.

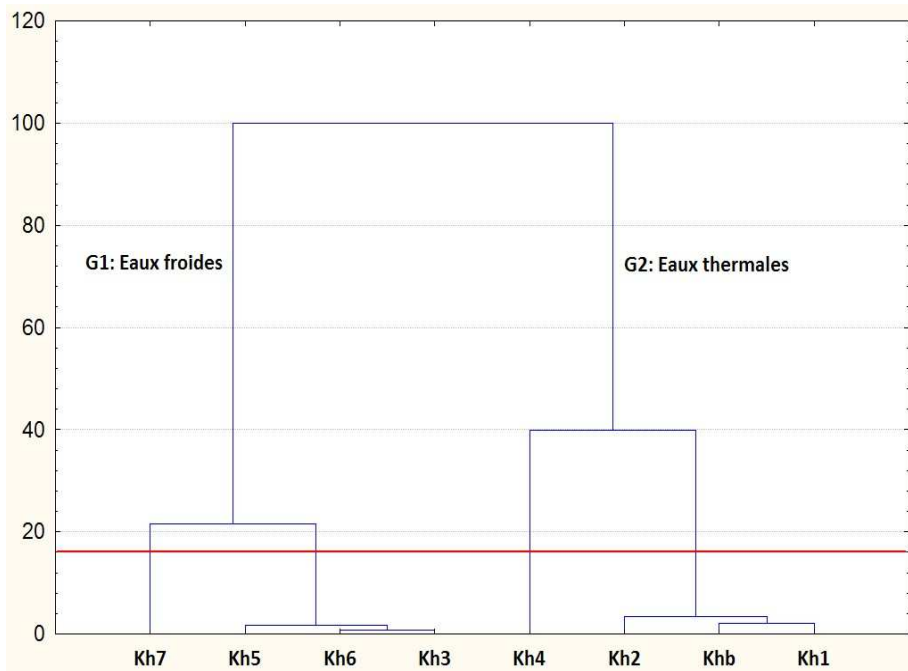


Fig.42 : la classification hiérarchique ascendante ou HCA des eaux de Khenchela.

Cette constatation est également confirmée par l'ACP (Fig.43).

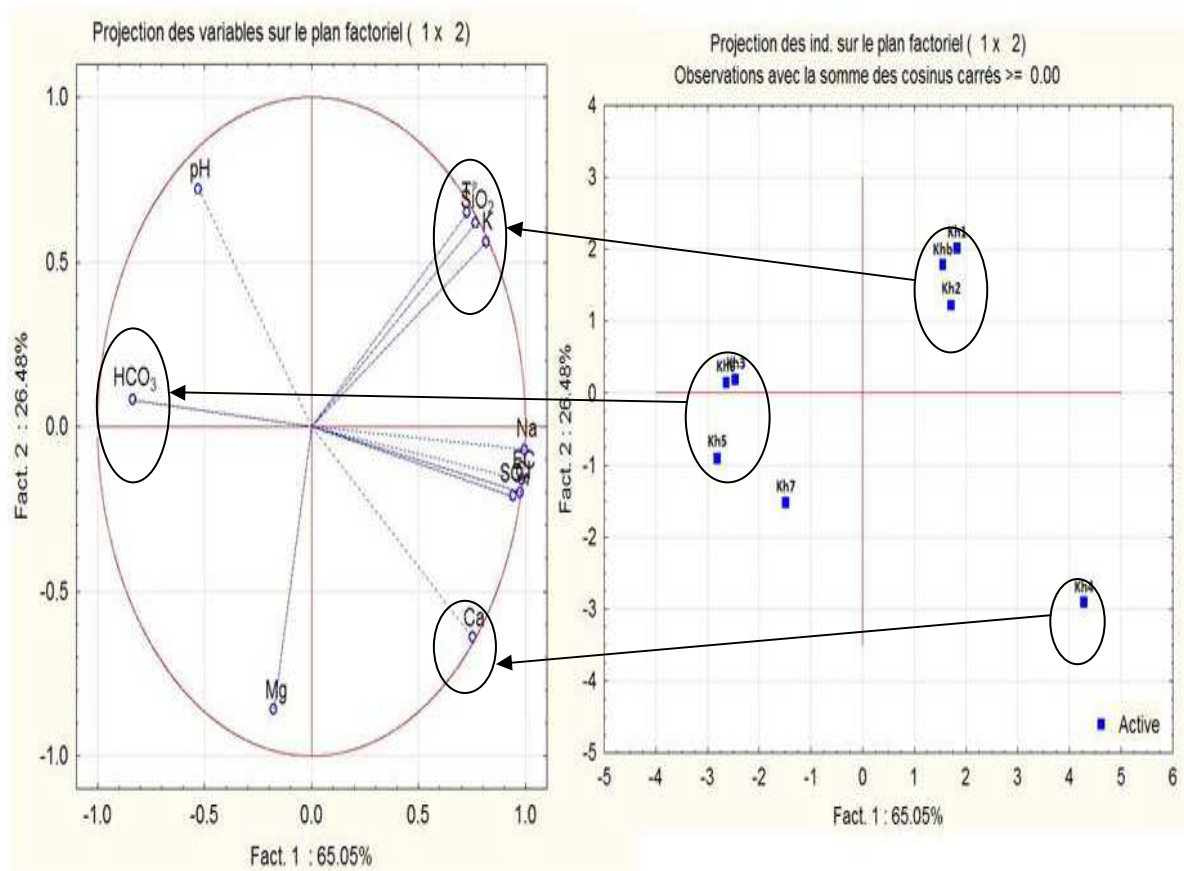


Fig.43 : l'analyse en composantes principales ou ACP des eaux de Khenchela

L'ACP est essentiellement représenté par deux facteurs, F1 et F2. Le premier F1 représente 65% d'inertie, il est marqué par la présence de tous les ions responsable, sulfate (SO_4), de chlorure (Cl), de sodium (Na), la silice, le potassium, le calcium, la température, et la conductivité et TDS. Le deuxième facteur F2 est marqué par le reste des ions.

Ainsi, le groupe des échantillons d'eaux thermales Kh1, khb, kh2 se détache nettement, ils sont notamment influencés par la silice (SiO_2), la température (T°), et le potassium (K). Le Kh4 est surtout marqué par la présence en quantité importante de calcium, alors que pour les eaux froides, certaines sont influencées par la présence du bicarbonate (HCO_3).

3.2. Les éléments chimiques

Les composés minéraux présents dans les eaux naturelles trouvent leur origine dans les échanges qui se produisent entre l'eau et le sol et entre l'eau et l'atmosphère pour les gaz (CO_2 et oxygène dissous).

3.2.1. Éléments majeurs

Certains éléments dits majeurs correspondant aux anions et cations conditionnent pour une part importante le développement de la biomasse, et constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux. Qui éventuellement, peut modifier les caractéristiques physico-chimiques d'une eau. [10]

- Les résultats d'analyses chimiques en éléments majeurs de notre zone d'étude sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 19 : analyses chimiques des éléments majeurs (mg/l)

La source	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl ⁻	SO_4^{-}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	SiO_2
Kh1	122,8	24,4	667,4	20,5	906,3	284,5	285,2	2	40
Khb	106,9	24,4	612,6	19,6	774	288,8	285,2	3,6	39
Kh2	131,9	22,1	669,9	19,6	825,5	444,8	332,5	5,5	37,5
Kh3	73	26,6	8,9	0,7	13,3	23,4	330,9	3,6	8
Kh4	293,7	53,7	1142,5	12	1786,9	599,4	204,4	00	22,2
Kh5	98,4	50,8	8,1	1,1	12,9	54,7	439,2	2,2	6,6
Kh6	53,1	37,3	9,2	1,1	14,6	22,1	338,6	8,4	8,8
Kh7	159,1	67,4	170,4	0,6	297,8	238,9	355,3	93,9	10,8
Kh8	62,1	51,8	139	01	61,7	287,7	288,2	00	12,2

L'étude analytique des paramètres chimiques sur les échantillons prélevés de neufs points d'eau de la zone d'étude, montre des valeurs différentes d'éléments dosés d'un point à un autre. Nous avons remarqué que : l'anion HCO_3^- est prédominant (sept points sur neufs) sur les ions SO_4^{2-} et Cl^- et les cations Ca^{2+} , Na^+ sont prédominant (six points sur neufs) sur les ions K^+ , Mg^{2+} .

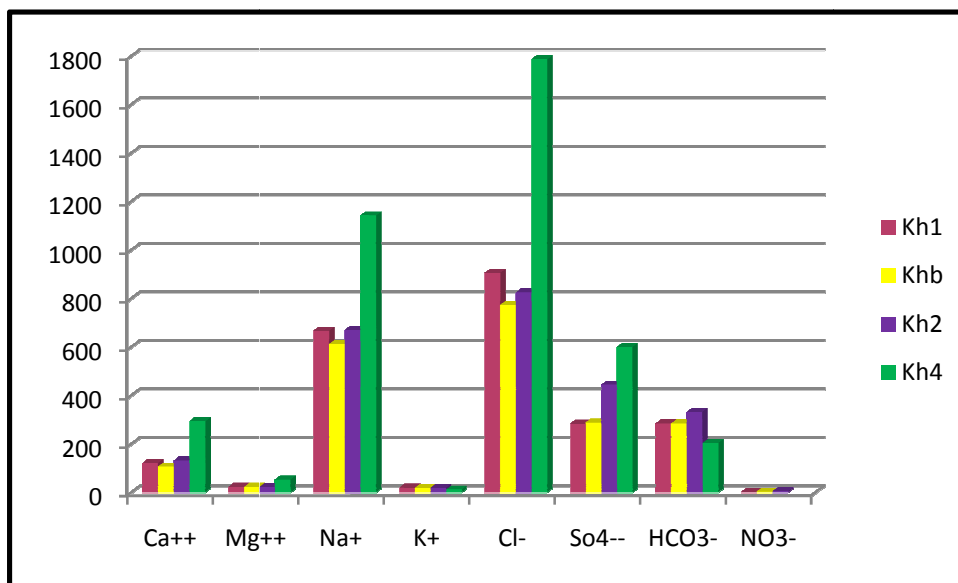


Fig.44 : Représentation comparative des éléments majeurs dans les quatre sources thermales.

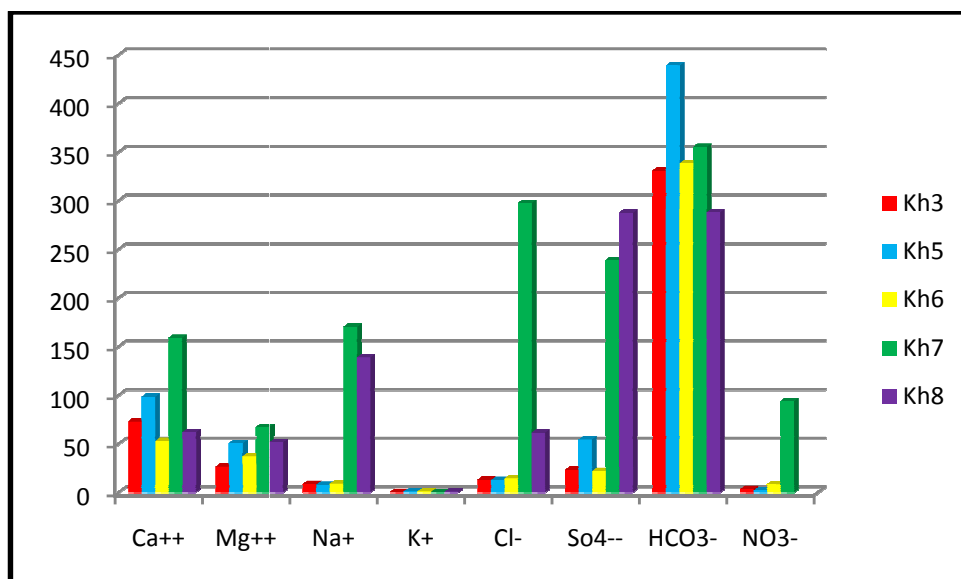


Fig.45 : Représentation comparative des éléments majeurs dans les cinq sources d'eau froides.

3.3. Les faciès chimiques

Les nombreuses données physico-chimiques, utiles à la caractérisation d'une eau, induisent l'utilisation de représentations graphiques. L'objectif principal est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique. Les deux graphiques de Piper et de Schöeller-Berkaloff sont les représentations des concentrations en ions majeurs les plus couramment utilisées.

3.3.1. Diagramme de Piper

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.

Diagramme de Piper des eaux souterraines de Khenchela

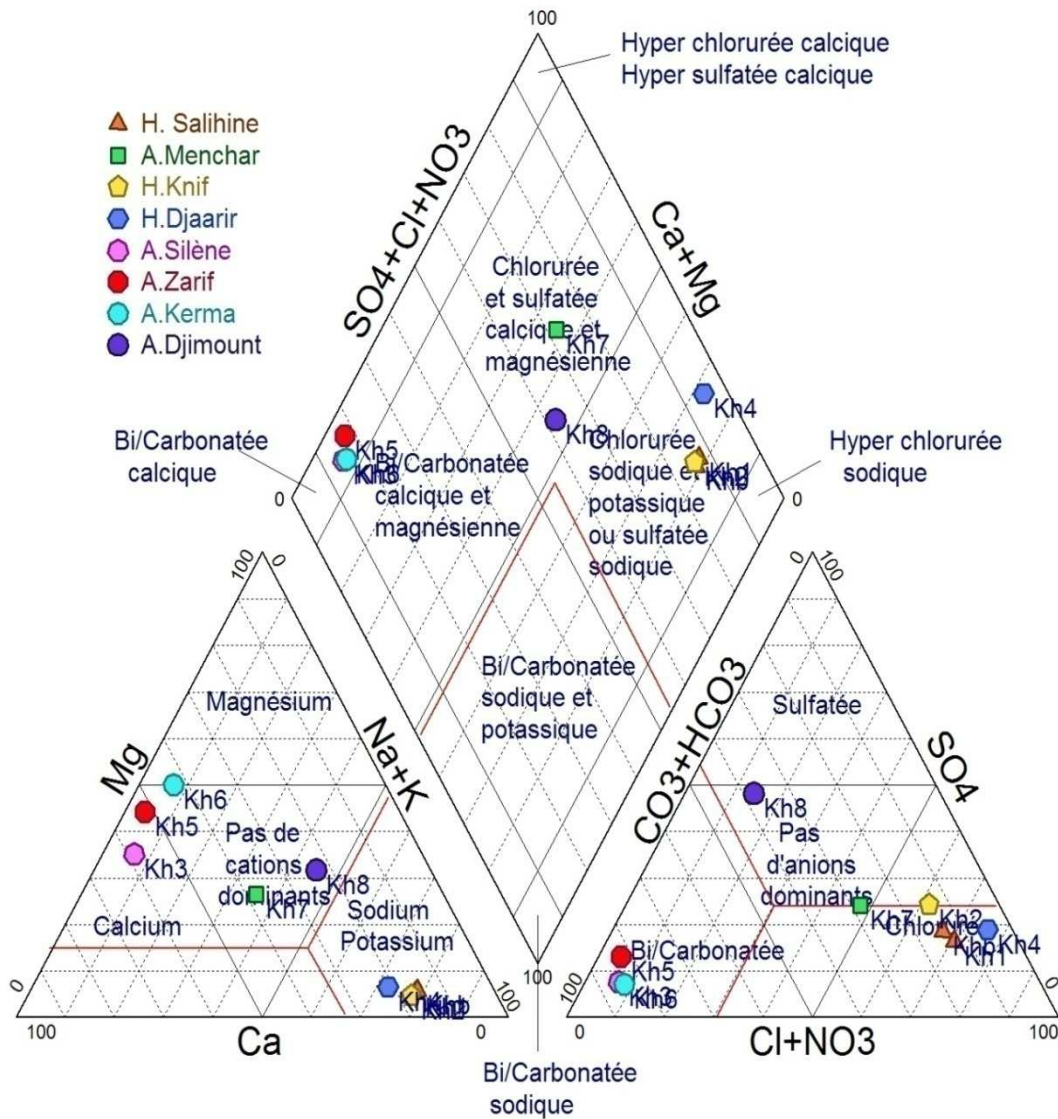


Fig.46 : Représentation sur diagramme de Piper des compositions en éléments majeurs des eaux de notre zone d'étude.

A partir de la représentation graphique du diagramme de Piper des eaux de sources analysées, trois faciès apparaissent, (1) le faciès **chloruré sodique** qui concerne essentiellement les eaux thermales, (2) le faciès **chloruré calcique** pour les eaux d'Ain Menchar et Djimonte, (3) le faciès **bicarbonaté-calcique** qui regroupe les eaux de Ain Silène, Zarif, Karma.

3.3.2. Diagramme de Schoëller- Berkaloff

Le diagramme de Schoëller-Berkaloff permet entre autre de reconnaître simplement le faciès d'une eau souterraine, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques.

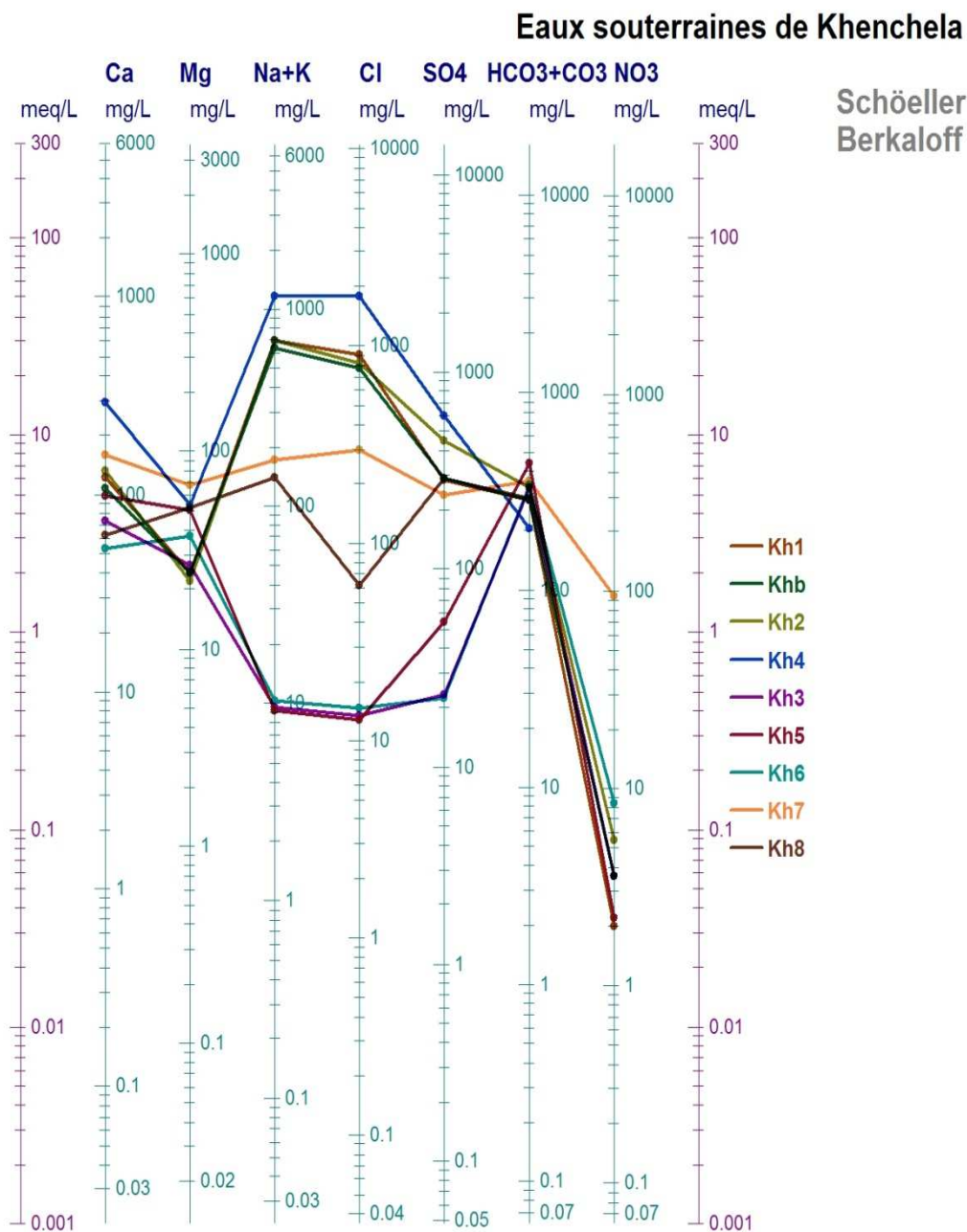


Fig.47 : Représentation sur diagramme de Schoëller -Berkaloff des compositions en éléments majeurs des eaux de notre zone d'étude.

4. L'origine de la minéralisation : évolution des différents ions

4.1. Les indices de saturation

Ces derniers ont été calculés par le biais du logiciel de spéciation géochimique « Diagramme ». Les indices de saturation (tableau N° 20) permettent de savoir ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de précipiter dans l'aquifère. La dissolution de ces minéraux se fait de deux manières (1) congruente, la dissolution est alors totale ou (2) la dissolution est incongruente, elle donnera naissance à un autre composé (cas le plus fréquent pour les silicates). Dans le cas des formations carbonatés ces deux types de dissolution pourraient être schématisés de la manière suivante pour ce qui est de la dolomite (1 et 2) et de la calcite (3):

1. $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$
2. $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{CaCO}_3$
3. $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

D'une manière générale, si un minéral (D) dans le milieu se dissout de façon congruente pour produire ($\text{U}^+ + \text{V}^-$) alors l'indice de saturation (IS) peut s'écrire :

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

Où Ks (constante d'équilibre) est le produit de $[\text{U}^+] \times [\text{V}^-]$, et PAI = Produit d'Activité Ionique.

Si $PAI = Ks$ alors $IS = 0$: l'eau est dite saturée vis-à-vis du minéral D considéré,

Si $PAI < Ks$ alors $IS < 0$: l'eau est dite sous-saturée vis-à-vis du minéral D,

Si $PAI > Ks$ alors $IS > 0$: l'eau est dite sursaturée vis-à-vis du minéral D.

Tableau 20: Indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux des eaux souterraines de Khenchela.

Nom	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Chalcedoine	Dolomite	Gypse	Quartz	SiO2(a)	Talc	Halite	Strontianite
Kh1	-1,06	0,5	0,61	-0,1	0,94	-1,21	0,2	-0,8	3,45	-4,98	-0,86
Khb	-1,19	0,07	0,19	-0,04	0,19	-1,26	0,28	-0,76	0,98	-5,07	-1,23
Kh2	-1,12	-0,2	-0,07	0,09	-0,44	-1,05	0,44	-0,68	-1,9	-4,98	-1,43
Kh3	-2,46	-0,56	-0,41	-0,23	-1,01	-2,22	0,22	-1,1	-6,4	-8,49	
Kh4	-0,91	-2,08	-1,94	0	-4,17	-0,75	0,4	-0,8	-14	-4,42	-3,39
Kh5	-2,06	-0,79	-0,64	-0,28	-1,36	-1,81	0,18	-1,16	-8,7	-8,55	
Kh6	-2,63	-0,49	-0,34	-0,19	-0,59	-2,38	0,27	-1,05	-4,7	-8,43	
Kh7	-1,37	-0,1	0,05	-0,08	-0,04	-1,12	0,38	-0,95	-3,6	-5,9	-1,28
Kh8	-1,59	-0,49	-0,35	-0,14	-0,44	-1,37	0,29	-0,98	-3,1	-6,68	-1,2

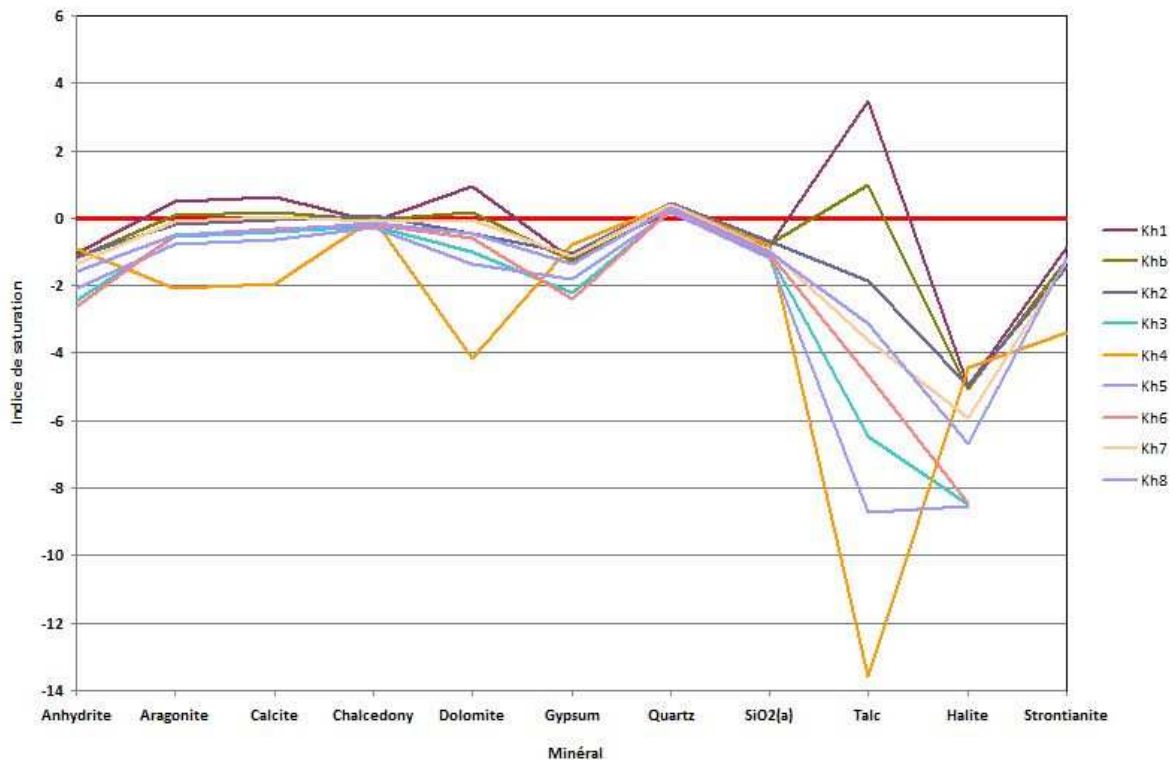


Fig.48 : Evolution des indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux

Comme on peut le constater (Fig.48), les eaux de Khenchela montrent un état d'équilibre, de saturation ou de sous-saturation par rapport aux principaux minéraux carbonatés ou évaporitiques. Ceci peut s'expliquer par le fait que durant leur transit, certaines eaux lessiveront préférentiellement des formations carbonatées (calcaires et dolomies) qui forment l'essentiel de la charpente du système karstique de Khenchela, ou rencontreront aussi des formations évaporitiques. En effet, la valeur IS_{gypse} pour Kh4 se distingue nettement des autres sources thermales, alors que Kh1 présente un IS_{dolomite} élevé qui pourrait s'expliquer ou bien par le fait que durant le transit les eaux de la source Hammam Salihine lessivent des dolomites ou alors des calcaires dolomitiques. Cependant comme pour la plupart des eaux de Khenchela le rapport Ca/Mg est presque toujours supérieur à 1, on peut penser que c'est bien d'une calcite magnésienne qu'il s'agit.

4.2. Les alcalino-terreux Ca^{2+} et Mg^{2+} , les hydrogénocarbonates et sulfates

Le calcium et le magnésium sont des alcalino-terreux extrêmement répandus dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Ils existent surtout à l'état de carbonates de calcium et/ou de magnésium ($CaCO_3$), $MgCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$, et associés

aux sulfates sous forme de sulfates de calcium ou de magnésium, et à un degré moindre sous forme de chlorures. Certaines eaux minérales peuvent en contenir plusieurs centaines de milligrammes par litre (mg/l). [9]

Comme vu plus haut, les origines naturelles et principales du calcium dans l'eau sont (1) soit la dissolution des formations carbonatées ($\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$), (2) soit la dissolution des formations gypseuses dans sa forme la plus répandue (Gypse) [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2(\text{H}_2\text{O})$].

Lorsqu'il y a une teneur faible en calcium on peut penser à un échange de base avec le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables soit à sa précipitation sous forme de calcite. Par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du calcium du gypse ou de l'anhydrite. Ceci est confirmé par l'évolution identique du Ca et SO_4 en fonction de la minéralisation (Fig.49).

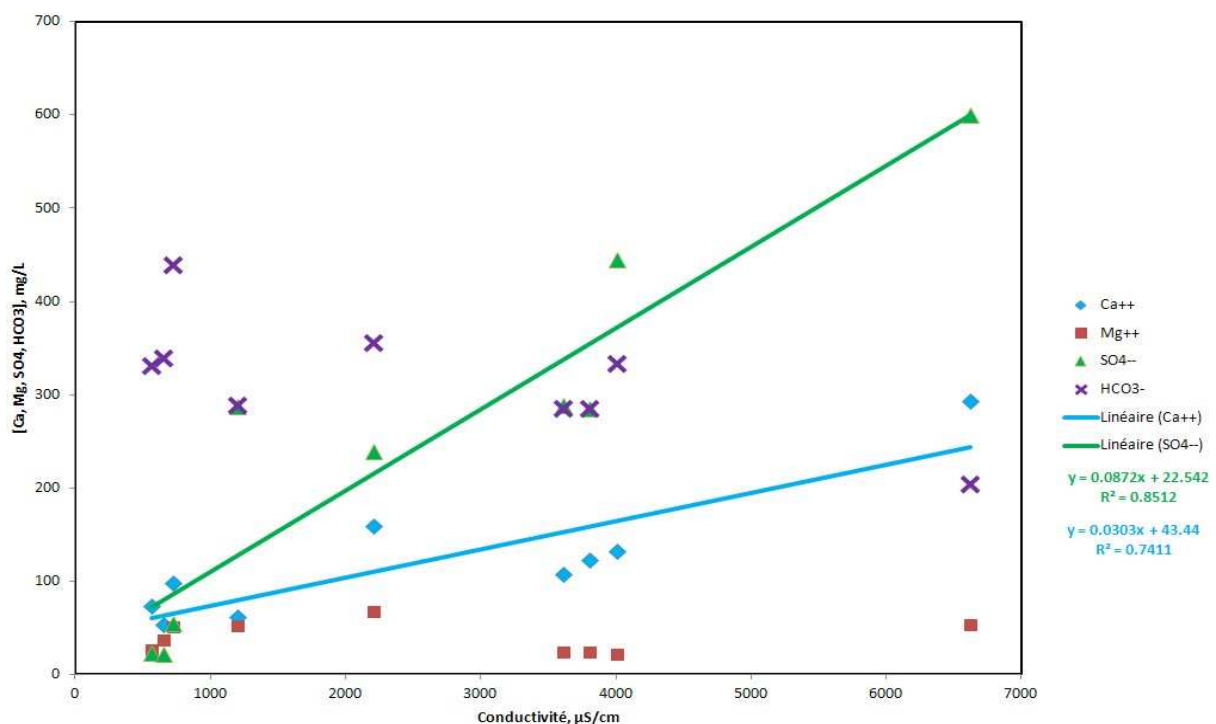


Fig.49 : Evolution de Ca, Mg et SO_4 en fonction de la conductivité

Nos sources contiennent des teneurs en calcium qui varient entre **53,1 mg/l** comme valeur minimale dans les eaux de **Ain El Karma** est **293,7 mg/l** comme valeur maximale dans les eaux de **Hammam Djaarir**, et dont la moyenne est **122,33** et pour les teneurs en Magnésium **22,1 mg/l** comme valeur minimale dans les eaux de **Hammam Knif**, et **67,4 mg/l** comme valeur maximale dans les eaux d'**Ain Menchar**. Où la moyenne est **39,83mg/l**. La valeur

maximale en sulfates de nos analyses est **599,4 mg/l** dans les eaux de **Hammam Djaarir**, est **22,1** comme valeur minimale celui de l'eau d'**Ain Karma**. Dont la moyenne est **249,37 mg/l**.

Pour les bicarbonates, la valeur maximale est **439.2 mg/l** dans les eaux d'Ain Zarif, et la valeur minimale est **204,4 mg/l** dans les eaux de **Hammam Djaarir** ; dont la moyenne est **204.40mg/l**.

Le rapport Ca/Mg est toujours supérieur à 1, alors que le rapport HCO₃/Cl décroît d'une manière exponentielle au moment où les concentrations en HCO₃ diminuent quand la minéralisation augmente. Ceci pourrait s'expliquer par le fait de l'apport massif de Ca issu à la fois de la dissolution de Calcite/Dolomite et également de Gypse, surtout pour Kh4. On observe aussi pour les eaux chaudes que ces dernières atteignent une saturation en Calcite et Dolomite et même en Gypse.

Ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et les formations gypseuses contenues dans les terrains salifères du Trias, d'une part et que d'autre part les concentrations en calcium contribuent fortement dans la charge cationique des eaux (Fig.50).

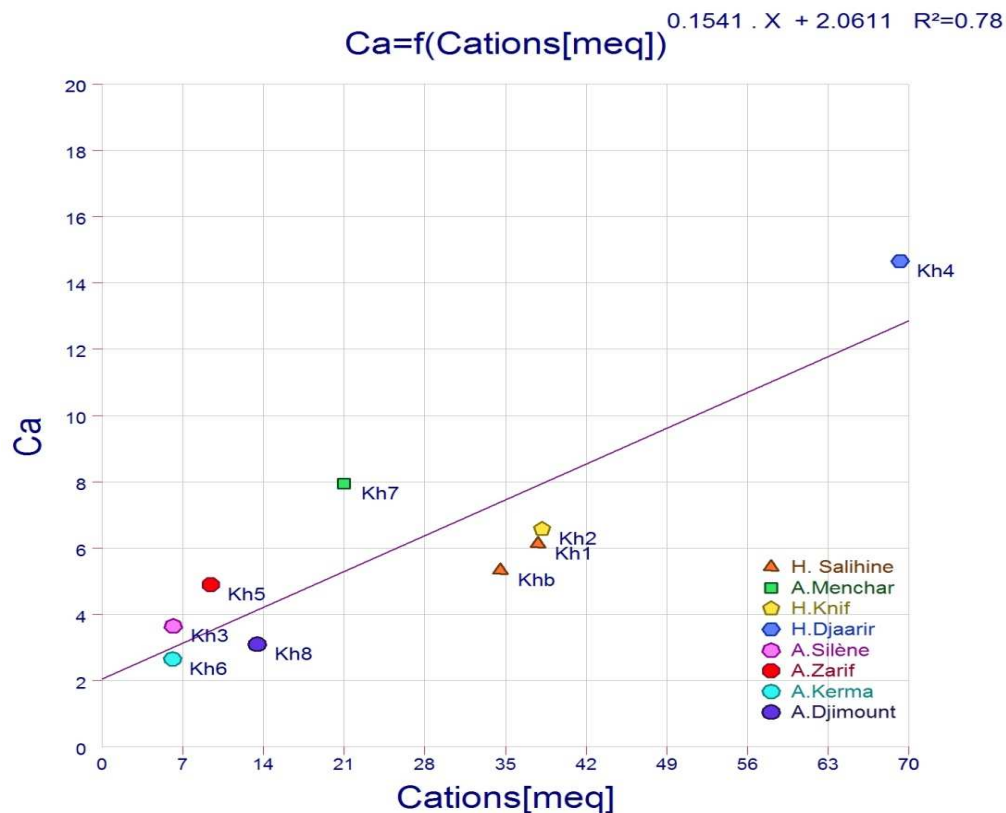


Fig.50 : Evolution de Ca en fonction des cations

Enfin, en matière de potabilité dans les eaux froides qui sont destinées à la consommation humaine, **(1)** concernant la présence de calcium: Ain Silène, Zarif, Karma, Menchar, Djimiente sont dans les normes selon l’OMS, et la réglementation européenne. **(2)** pour les teneurs en sulfates des eaux d’Ain Silène, Zarif, Karma, Menchar on constate qu’elles ne dépassent pas la valeur limite de l’OMS (250 mg/l). L’eau **d’Ain Djimiente** renferme des teneurs relativement peu élevées. **(3)** pour la présence de magnésium : Ain Silène, Zarif, Karma, Djimiente sont dans les normes et **Ain Menchar** représente une valeur un peu élevée selon la valeur guide 50mg/l.

4.3 Le sodium, Na⁺ et les chlorures, Cl⁻

Le sodium et les chlorures sont des éléments constitutifs importants de l’eau. Toutefois, les concentrations peuvent être extrêmement variables allant de quelques dizaines de milligrammes à 500 mg/L et même au-delà. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium.

La source la plus importante de sodium se trouve dans les évaporites, mais il peut-être également apporté à la faveur de l’hydrolyse des aluminosilicates tels que les feldspaths plagioclases (Albite) très répandus à la surface de la Terre. Dans les eaux de Khenchela, les teneurs en Na⁺ varient de 8,1 mg/l dans les eaux Ain Zarif comme valeur minimale à 1142,5 mg/l, à Hammam Djaarir comme valeur maximale. La valeur moyenne est 380,89 mg/l. et pour les teneurs en chlorures varient entre 12,9 mg/l à Ain Zarif et 1786,9 mg/l à Hammam Djaarir. La moyenne est 521,44 mg/l.

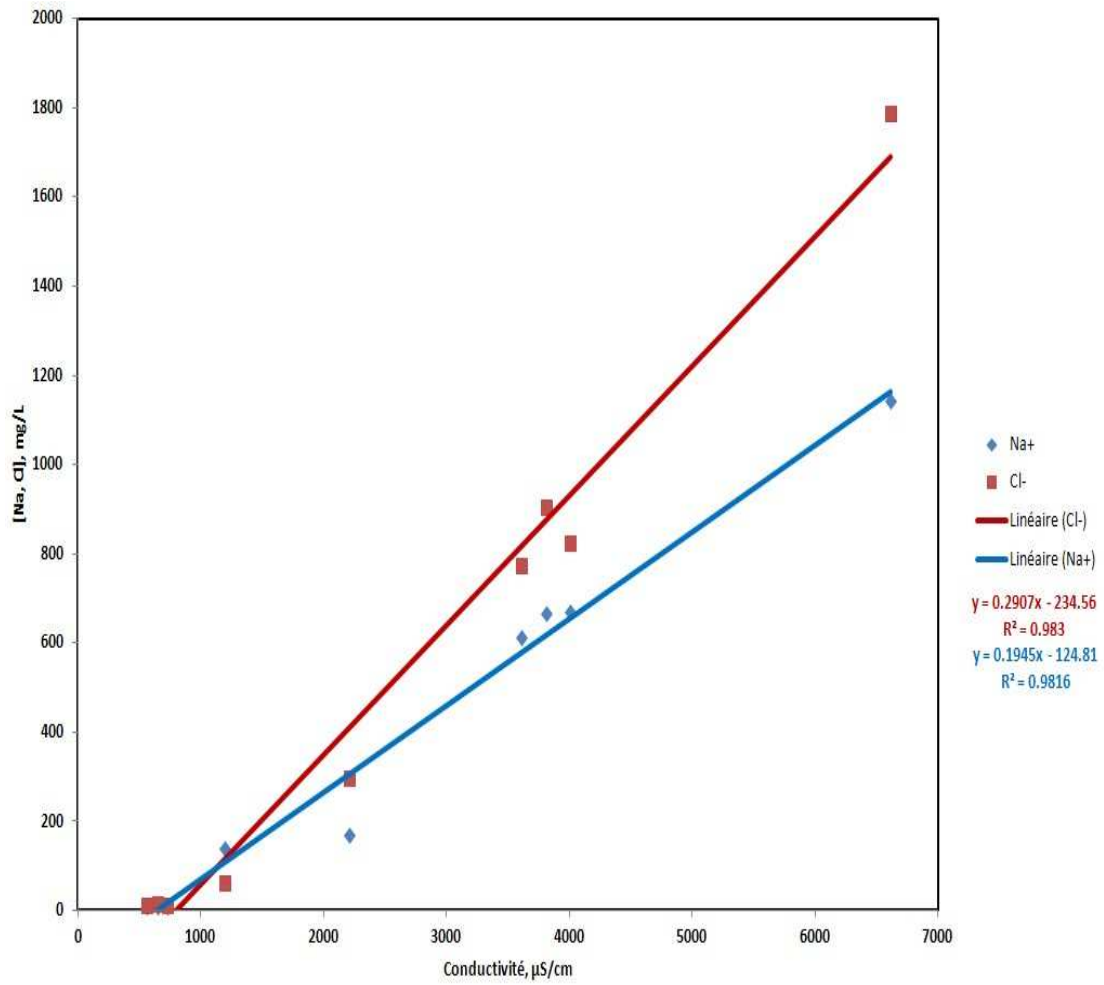


Fig. 51 : (A) Evolution de Na et Cl en fonction de la conductivité

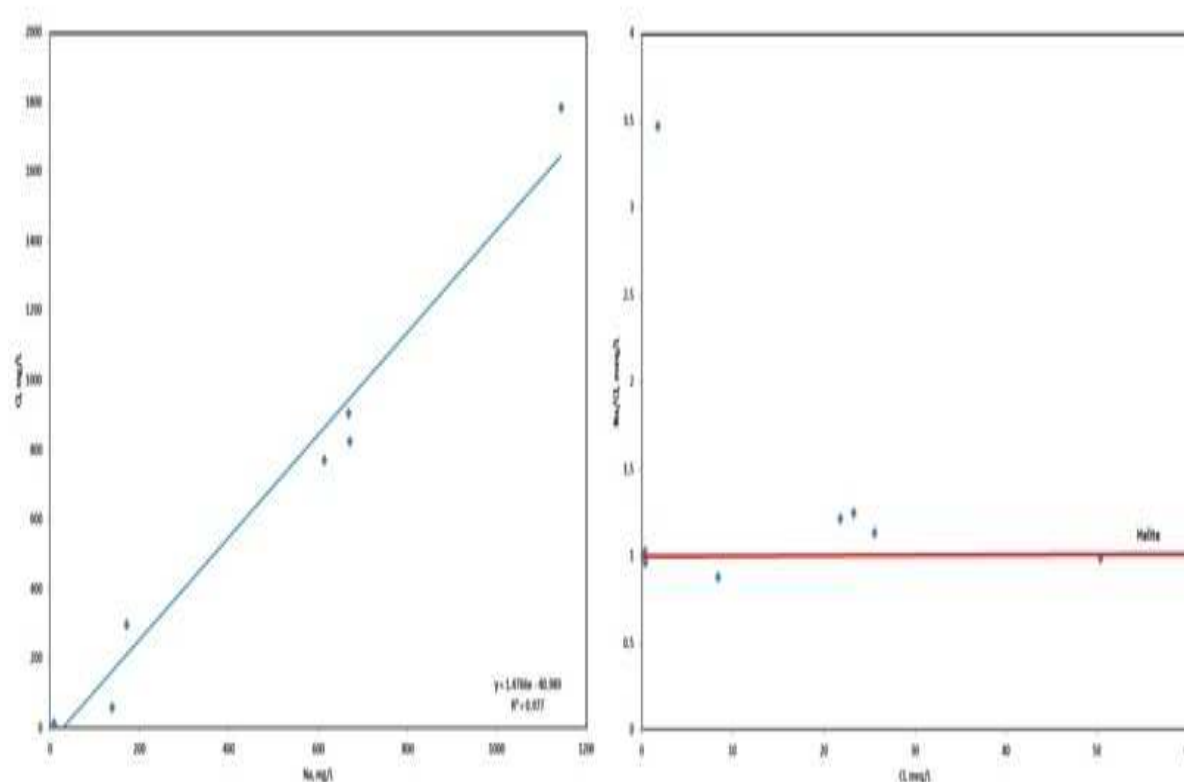


Fig.52: (B) relation NaCl

On constate que Na et Cl augmentent de la même manière en fonction de la minéralisation, de même que le rapport Na/Cl est presque toujours proche de 1 sauf pour un point Kh8. Cette évolution identique de ces deux éléments ainsi que la constance du rapport Na/Cl sont deux raisons qui militent pour une origine commune et unique à savoir la dissolution de la Halite (NaCl) au cours du transit des eaux souterraines à travers les aquifères traversés.

Une origine secondaire (bien que restreinte), telle qu'un échange n'est pas à exclure capacité d'échange cationique (CEC), à savoir que les argiles libèrent ou désorbent plus de sodium pour fixer un autre cation, le calcium ou le magnésium de même que la pollution par l'utilisation de produits détergents (savon) dans le Hammam doit être pris en compte.

Concernant la présence de sodium et chlorure dans les eaux de sources qui sont destinées à la consommation humaine telles que : Ain Silène, Zarif, Karma, Djiméte on peut les considérer dans les normes selon la réglementation européenne (150 mg/L de Na, 250 mg/l de Cl), alors que Ain Menchar présente une valeur un peu élevée dans les éléments.

4.4. Le potassium, K⁺

Bien que dans les roches ignées il provient de l'altération des formations silicatées, des argiles potassiques. La teneur en potassium soit presque aussi importante que celle du sodium, sa présence à peu près constante dans les eaux naturelles ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/L. Dans les eaux de mer le potassium avoisine les 380 mg/l.

Les teneurs en potassium dans les eaux de Khenchela varient de **0,7 mg/l** comme valeur minimale dans les eaux **Ain Silène**, à **20,5 mg/l** comme valeur maximale dans les eaux de Hammam Salihine. Et la valeur moyenne est **8,47 mg/l**.

L'analyse des résultats nous permet de dire que la présence de potassium dans les eaux de sources qui sont destinées à la consommation humaine tels que : Ain Silène, Zarif, Karma, Menchar, Djiméte, certes inférieurs à la valeur maximale admissible retenue par les directives du conseil des communautés Européennes (12 mg/L).

4.5. Les nitrate NO₃²⁻

Toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacque, nitrites, etc.) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Dans les eaux naturelles non polluées, le taux de nitrates est très variable suivant la saison et l'origine des eaux ; il peut varier de 1 à 15 mg/L et une concentration de 2 ou 3 mg/L peut être considérée comme normale. Les résultats de l'analyse en ce qui concerne les nitrates ont montré que les eaux de sources d'Ain Silène, Zarif, Karma, Djiméte présentent des taux de nitrates relativement faibles et inférieurs partout à la limite maximale retenue par l'OMS (50 mg/l). La valeur remarquable dans nos analyses est 93,9 mg/l de Ain El Menchar qui est supérieure à la valeur guide de L'OMS; qui affleure près d'un effluent d'eau usée domestique et l'infiltration des produit des engrais chimiques des terres agricoles avoisinent de la source.

La présence des nitrates dans une eau destinée à la consommation humaine est d'une connotation péjorative et souvent injustifiée ont une toxicité indirecte par le fait qu'ils se transforment en nitrites (action bactérienne) ; en ce qui concerne la toxicité à long terme, on n'a pas enregistré une quelconque relation de cause à effet quant à une surconcentration en nitrates sur la santé publique. Par contre c'est bien cette réduction des nitrates en nitrites qui pose problème, car ces derniers nommés vont fixés l'hémoglobine du sang et provoquer une «cyanose» du sang plus communément appelée «la maladie du sang bleu ou Méthémoglobinémie ».

4.6. La Silice, SiO₂

Les composés siliceux représentent environ 28 % de la lithosphère (quartz, sables, roches ignées, etc.). Combinée à de nombreux minéraux, la silice forme des silicates. L'altération ou le lessivage de ces produits est à l'origine de la silice naturelle dans l'eau où elle se présente soit à l'état soluble (ionique), soit à l'état colloïdal, soit en suspension. Sa faible solubilité est liée à la température, au pH et à la composition des minéraux. En solution, cet élément peut exister, en fonction du pH, sous forme d'acide silicique (H₄SiO₄) ou d'ions silicates. Les eaux des régions volcaniques peuvent en contenir plusieurs dizaines de milligrammes par litre.

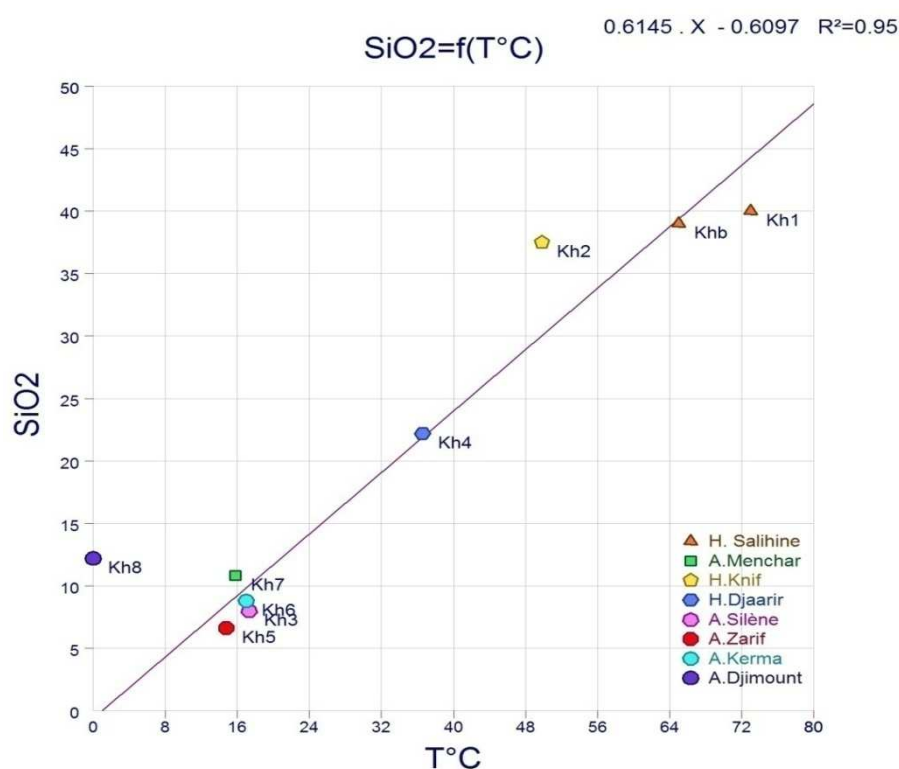


Fig.53 : Relation SiO₂-Température

La silice est employée comme géothermomètre qui sert à l'estimation de la température de l'eau en profondeur. L'altération des roches à laquelle est attribuée à la mise en solution de Na, K, Ca, et Mg provoque la libération de la silice et c'est pour cette raison que toutes les eaux thermales contiennent de la silice en teneurs variables.

On remarque 40mg/l comme valeur maximale dans Hammam El Salihine et 22,2mg/l valeur minimale dans Hammam Djaarir. Sur la (fig.53) Qui met en relation la silice avec la température, on constate également l'existence d'une nette ségrégation de la silice des eaux froides de celle des eaux chaudes. La bonne relation établie permet, (1) d'établir le caractère thermo-dépendant de la silice, (2) de confirmer la profondeur importante du transit des eaux

chaudes qui peut-être estimé en fonction du gradient géothermique (1°C pour 33m) entre 1200m et 2200m de profondeur entre kh4 et Kh1, (3) de différencier les aquifères mis à contribution et dire que pour les eaux froides celles-ci circulent fort probablement dans des formations carbonatées alors que les eaux chaudes circulent dans des formations sinon différentes des premières ou alors qu'elles rencontrent et dissolvent durant leur transit en cours de remontée des formations détritiques riches en aluminosilicates pour expliquer ces concentrations élevées en silice (SiO₂).

En ce qui concerne les eaux destinées à la consommation humaine celles d'Ain Silène, Zarif, Karma, Menchar et Djimente elles présentent des valeurs inférieures à la valeur guide de l'OMS (20 mg/l).

5. Éléments mineurs en traces

À côté des éléments majeurs, les eaux contiennent de nombreux autres éléments que nous qualifierons de mineurs, en raison de leurs concentrations généralement plus faibles que pour les premiers. L'origine de ces éléments peut être géologique.

- Les résultats d'analyses chimiques en éléments mineurs de notre zone d'étude sont portées dans le tableau suivant :

Tableau 21 : analyses chimiques en élément mineurs (mg/l).

Nom	Li ⁺	Sr ⁺⁺	F ⁻	Br ⁻
kh1	0,31	2,1	0,52	2,17
khb	0,4	2	0,52	2,09
kh2	0,43	2,6	1,17	2,15
kh3	0,02	00	0,39	00
kh4	0,05	4,1	0,59	2,65
kh5	0,01	00	0,37	00
kh6	0,02	00	0,39	00
kh7	0,02	2,3	0,62	2,17
kh8	0,03	3,1	1,72	1,91

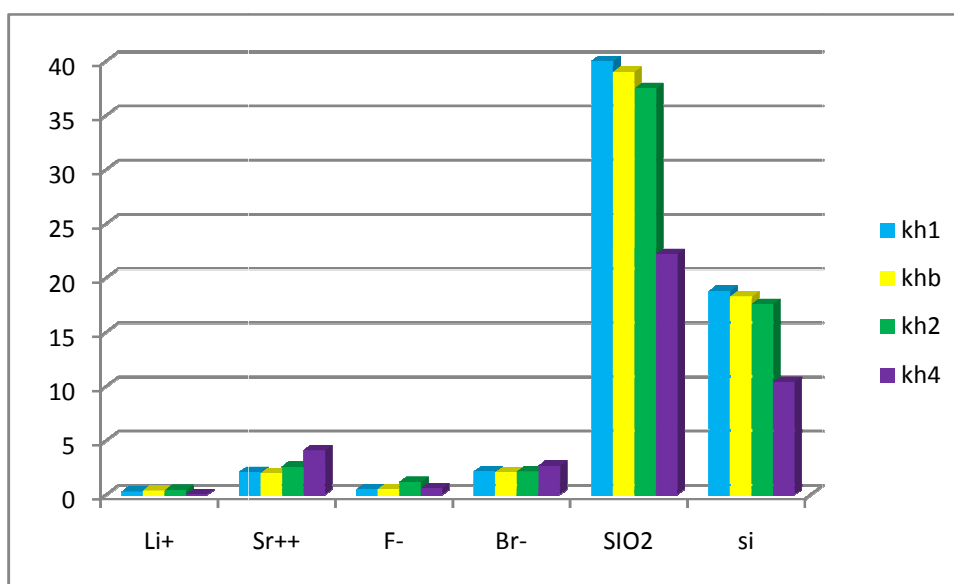


Fig.54 : Représentations comparative entre les quatre sources thermales (les éléments mineurs).

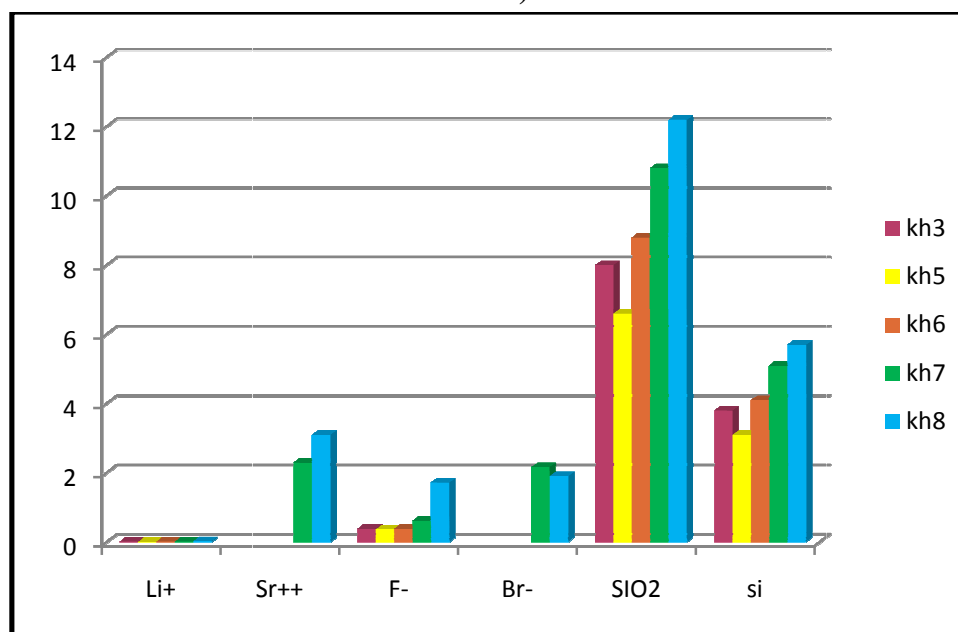


Fig. 55: Représentation comparative entre les cinq sources d'eau froides (les éléments mineurs).

5.1. Le Strontium et le Lithium

Le strontium et le lithium sont considérés comme des éléments de lithofaciès (Edmunds, 1981), c'est-à-dire qu'ils ne sont pas apportés par les pluies météoriques mais qu'ils sont strictement acquis au contact de la roche. [23] Les activités anthropiques (p. ex. industrie, pollution agricole, technologie nucléaire) pouvant constituer d'autres sources possibles. Ainsi, plus l'eau sera chargée en ces deux éléments et plus l'on dira que l'échange aura été long avec l'encaissant.

On constate déjà que l'on a une notion de temps de résidence dans l'aquifère. La présence de ces deux éléments peut-être liée soit à la dissolution, s'ils existent, de minéraux tels que la Strontianite (SrCO_3), ou la Célestite (SrSO_4), ou encore le Lépidoïte [$(\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2)$] qui est un phyllosilicate du groupe très important des micas. Ces derniers (blancs ou noirs), dont les granites et pegmatites sont riches, pourraient être les principaux pourvoyeurs en Lithium.

5.1.1. Le Strontium, Sr^{2+}

Le strontium est un élément caractéristique des évaporites. Il est faiblement intégré dans le réseau des carbonates et est peu absorbé par les argiles. Il est surtout présent dans les évaporites et les roches volcaniques. [23] Selon Carré (1975), dans les évaporites, il est rencontré sous forme de Célestite (SrSO_4) qui est toujours associé au sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$). Dans les eaux souterraines, les concentrations varient largement de 0,2 à 20 mg/l. En proportions importantes, il est un indice de la présence des évaporites. Les concentrations en strontium mesurées dans les précipitations ont toujours été faibles et variaient peu (0.02 à 0.05 mg/l).

Le rapport ionique en concentration molaire $\text{Sr}^{++}/\text{Ca}^{++}$ est caractéristique d'une origine évaporitiques lorsqu'il est supérieur ou égal à 1 ‰. On distingue en fonction de la valeur du rapport Sr/Ca différents ensembles évaporitiques:

- Évaporites du Trias : le rapport s'échelonne de 3 à 10‰. Les valeurs qui sont supérieures à 10 ‰ traduisent une franche origine triasique.
- Évaporites du Crétacé: sont caractérisées par des rapports de 1 à 3‰.

Les valeurs du rapport ionique molaire $\text{Sr}^{++}/\text{Ca}^{++}$ (Fig.57) nous permettent de distinguer des eaux dont les valeurs supérieures à 10 ‰ les distingue bien des eaux des formations carbonatées. Les rapports obtenus présentent une variation importante (13.96 – 49.92 ‰) avec des teneurs élevées en Sr^{++} (2.1- 4.1 mg/l) en relation probable avec les marnes évaporitiques cénomaniennes comme semblerait le montrer la bonne relation entre Sr et SO_4^{2-} (Fig.56), qui témoignent donc de la diversité des formations évaporitiques de la région et/ou de modifications ultérieures (mélange d'eau, précipitations de calcite, pollution agricole etc.). [36]

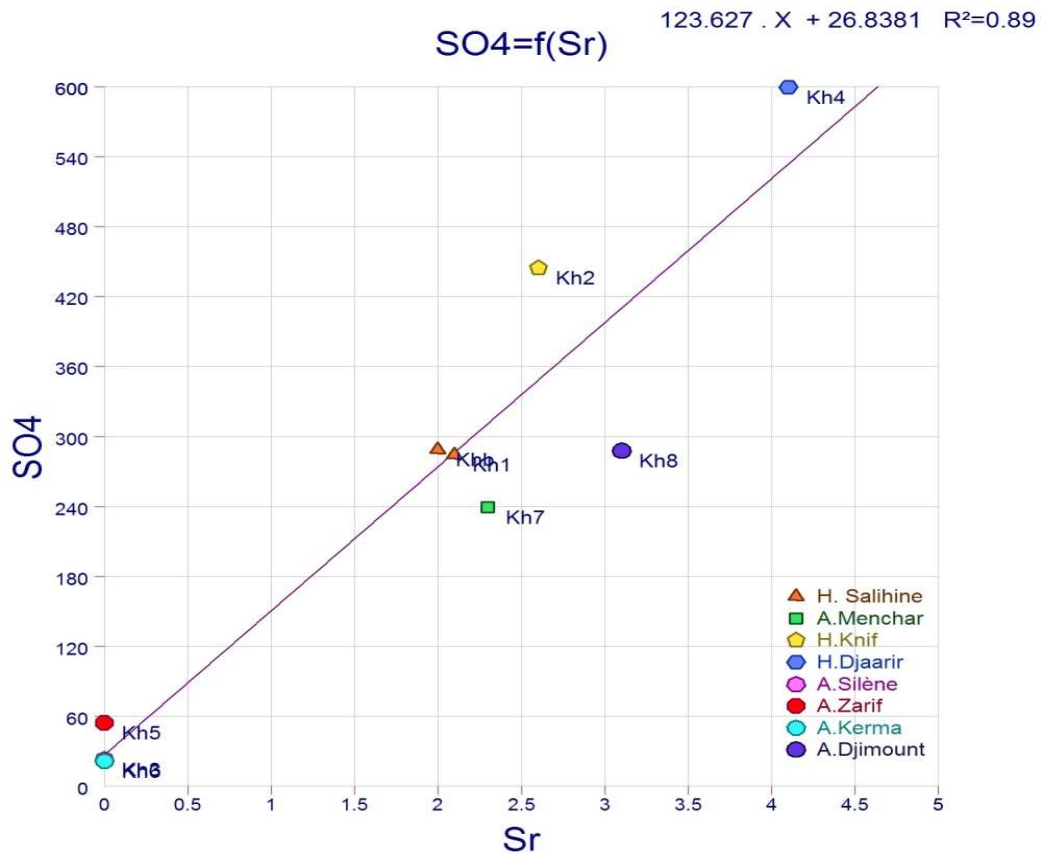


Fig.56 : Relation SO4-Sr

En conclusion, l'étude du strontium et l'utilisation du rapport Sr^{++}/Ca^{++} ont permis de caractériser les eaux de sources du versant Nord des Aurès. La minéralisation des eaux est liée essentiellement à la dissolution des évaporites.

Tableau 22 : Rapport Sr^{++}/Ca^{++} des eaux analysées

La source	Sr ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Sr/Ca(mg/l)	Sr/Ca*1000
Kh1	2,1	122,8	0,017	17,10
Khb	2	106,9	0,019	18,71
Kh2	2,6	131,9	0,020	19,71
Kh3	0	73	0,000	0,00
Kh4	4,1	293,7	0,014	13,96
Kh5	0	98,4	0,000	0,00
Kh6	0	53,1	0,000	0,00
Kh7	2,3	159,1	0,014	14,46
Kh8	3,1	62,1	0,050	49,92

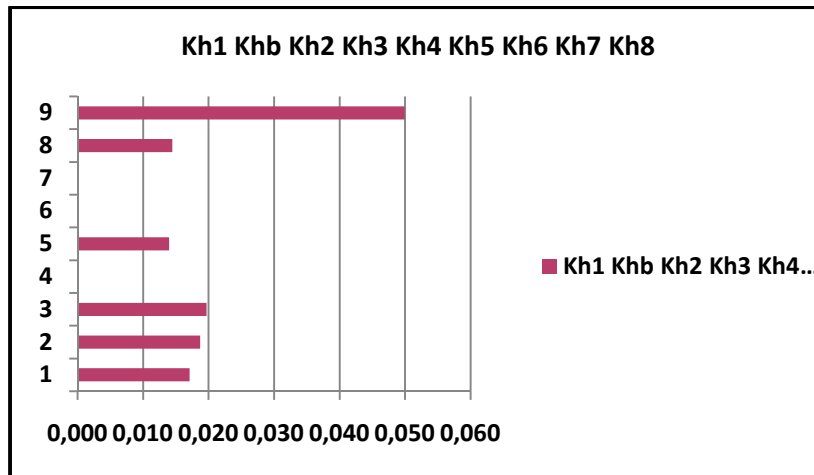


Fig.57 : représentation graphique du rapport ionique en concentration molaire Sr^{++}/Ca^{++} des sources d'eau.

5.1.2. Le Lithium, Li^+

Le lithium est souvent considéré comme un indicateur de lithofaciès (Edmund, 1981) ; c'est un indicateur du degré d'interaction eau-roche, par conséquent il donne une idée sur le temps de résidence des eaux souterraines. C'est un élément hydrophile, sensible à la variation de la température, d'où son utilisation dans certain géothermomètres. [20] Le lithium peut être intégré dans une évaporite en se substituant à Na^+ dans l'Halite ou K^+ dans la Sylvite, comme il peut être lié aussi aux minéraux carbonatés. [23]

Tableau 23: les valeurs comparatives de Li^+ entre les sources d'eau en (mg/l)

Les sources	Kh1	Khb	Kh2	Kh3	Kh4	Kh5	Kh6	Kh7	Kh8
Les valeurs de Li^+	0.31	0.40	0.43	0.02	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01

Dans nos sources, la concentration en lithium varie entre **0.43 mg/l** à **hammam Knif** comme valeur maximale et **0.01 mg/l** à **Ain Zarif** comme valeur minimale. (Fig.58) Plus la différence de concentration en lithium est grande plus le temps de contact-eau-roche est grand plus les échanges sont importants et la minéralisation est élevée.

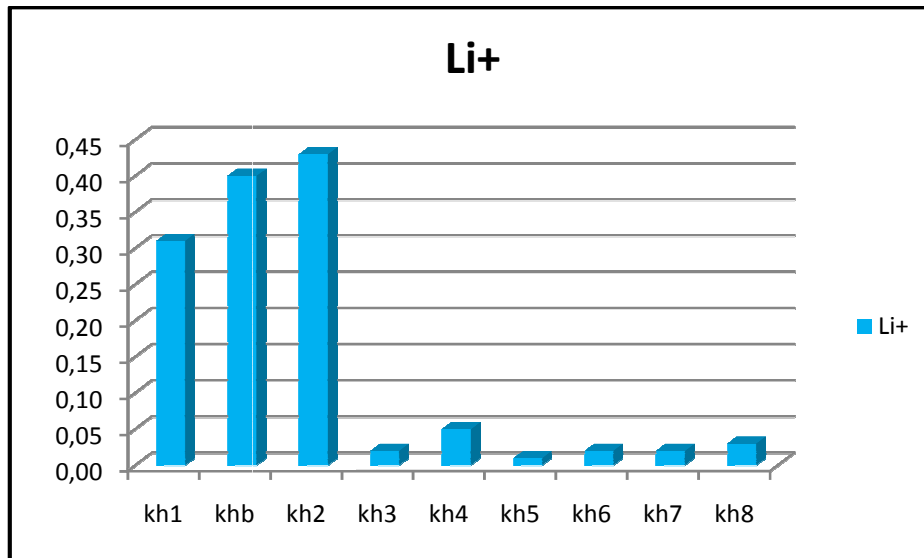


Fig. 58 : Représentation comparative du lithium dans les neuf sources.

L'ordre de grandeur de cette différence est de **0.42 mg/l**, ce qui est un indice d'échange de base avec le sodium et aussi de la dissolution d'évaporites. Ce comportement est probablement un indice d'un contact eau-roche assez important. A titre d'exemple, dans l'aquifère gréseux (Trias) de Sherwood, en Angleterre, la concentration en Li+ augmente de 2 µg/l au bout de 1000 ans de résidence de l'eau dans l'aquifère. [36]

On peut constater que le groupe d'échantillons (**Hamam Knif** et **Hamam El Salihine**) sont enrichis en Lithium par rapport à l'ensemble des échantillons. Il s'agit d'eaux issues des horizons profonds. Ce caractère est probablement dû à un type de lithofaciès différent et/ou à un temps de résidence plus long.

5.2. Le brome, Br⁻ et le fluor, F⁻

Ces deux éléments ont été également dosés par chromatographie ionique. Ils sont également lithophiles et ne sont donc pas apportés par les pluies. Ils sont comme le Strontium et le Lithium acquis au contact eau-roche. Le Brome et le Fluor sont abordés dans cette étude, parce que l'un et l'autre élément font partie du groupe des halogènes et sont des indicateurs pour le premier dans la détermination de l'origine ou non d'un caractère évaporitiques d'une eau ou de sa salinisation alors que le second est important par l'action bénéfique reconnue qu'il a sur la carie dentaire ou sur la charpente osseuse d'une manière générale. Alors que pour le Brome l'on n'enregistre pas de limite de concentration admissible, pour le Fluor celle-ci est fixée par l'OMS à 1.5mg/l, au-delà de laquelle une surconcentration pourrait provoquée un brunissement des dents, appelé fluorose dentaire qui est très répandue dans tout le sud

Algérien. Cette surconcentration pourrait-être aussi à l'origine d'une fragilité de la charpente osseuse.

5.2.1. Le Brome, Br-

Aucune norme maximale admissible n'est signalée pour une eau destinée à la consommation. Le brome, du fait de sa similarité avec le chlore, est un bon indicateur des processus affectant l'eau. Il permet de distinguer les différentes sources qui seront à l'origine de l'eau en question. Le rapport Br/Cl, dans ce cas de figure, est le plus utilisé. Le rapport B/Cl sera proche de celui de l'eau de mer ($1.5 \cdot 10^{-3}$) sinon il sera acquis à la faveur du lessivage de formations évaporitiques. Les bonnes corrélations Br-Cl et Br-TDS (Fig.59) montrent que le brome est acquis lors du transit, et ce quelles que soient les sources. L'analyse, du rapport Br/Cl, nous permet de voir également que les eaux de Khenchela ont, toutes, un rapport proche à celui de l'eau de mer, confirmant ce qui avait été dit plus haut à savoir que les eaux de Khenchela dissolvaient de l'Halite. Ceci avait été confirmé par la relation Na/Cl vs Cl dont on avait vu qu'elle était proche de l'Halite. Pour deux points le rapport est supérieur à celui de l'eau de mer, à Kh7 et Kh8 et on peut vraisemblablement invoquer une pollution anthropique.

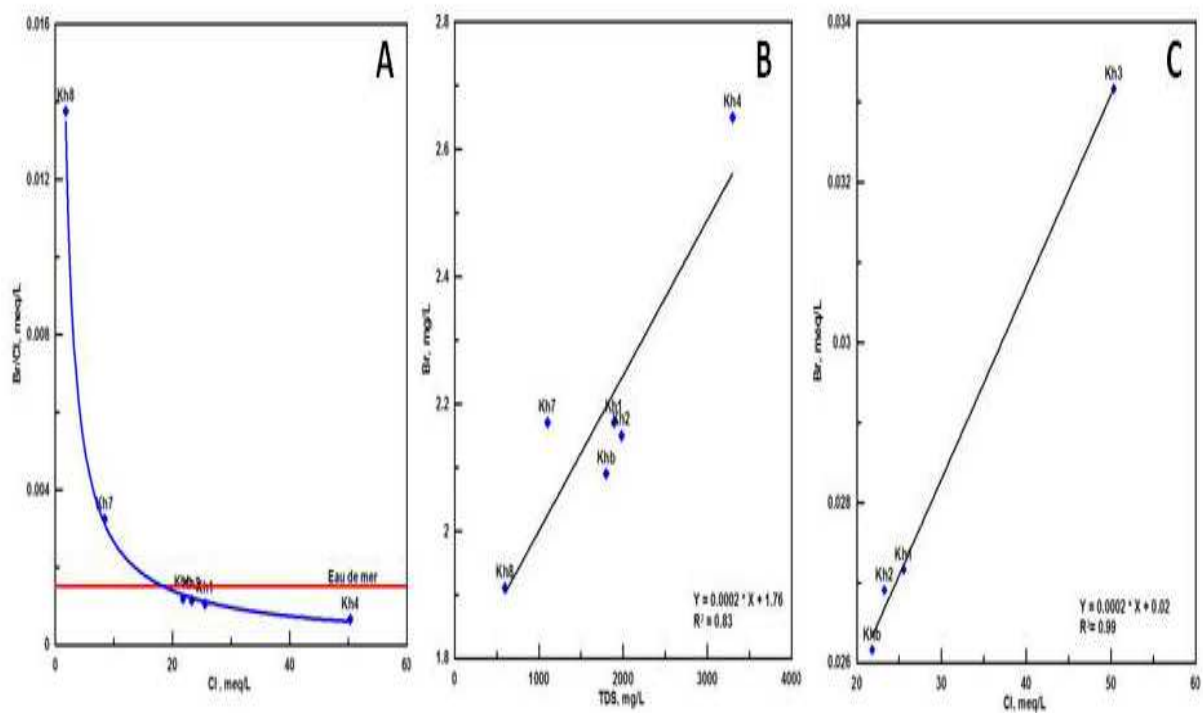


Fig. 59 : Evolution du rapport Br/Cl et du Brome en fonction de la TDS et des chlorures

5.2.2. Le Fluor, F-

A l'exception de deux points (Fig.60) ou pour l'un (Kh2, F=1.17mg/L) on approche la dose maximale admissible (F=1.5mg/L) et pour le second (Kh8, F=3.1mg/L) on la dépasse du double, pour les autres points la concentration est dans les normes requises pour une eau de consommation.

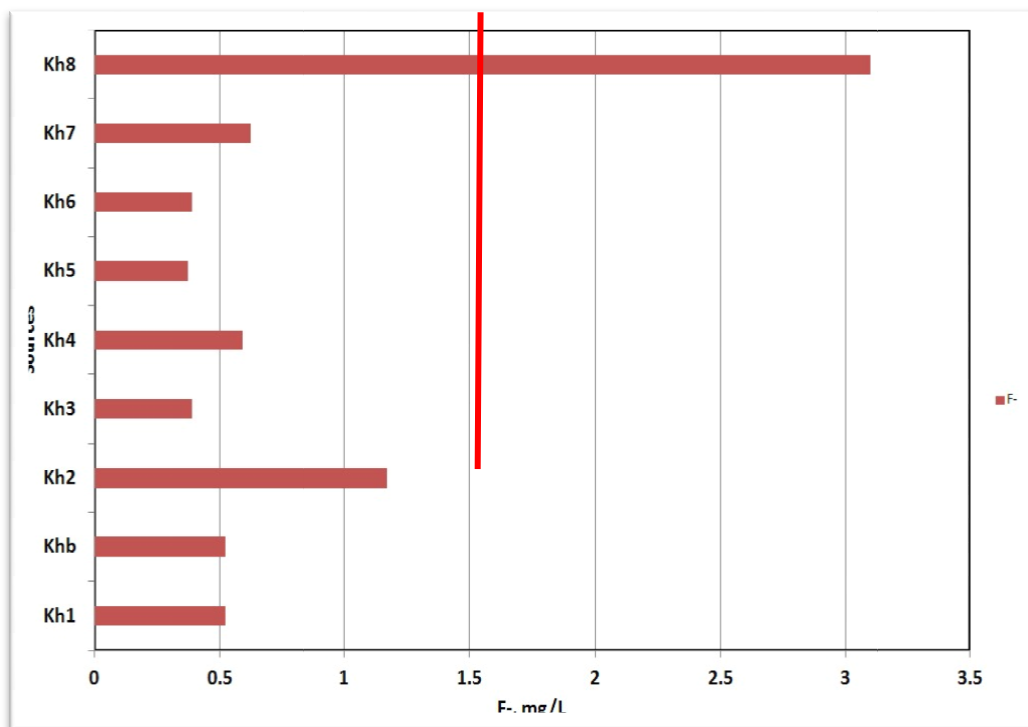


Fig.60: Evolution du Fluor pour les différentes sources analysées.

Dans le même temps, on constate que les concentrations en Fluor, en fonction de Cl et Ca, (fig.61) augmentent dans le même sens. Ceci confirme d'une part (1) que le Ca participe à la minéralisation des eaux d'une manière effective, (2) que cette identité d'évolution est bien due au lessivage de gypse au cours du transit, le F étant fortement lié au Ca, (3) que la forte teneur en F à Kh2 et Kh8 est sans doute lié à une origine anthropique.

On observe en effet que leur concentration en Cl est la plus élevée parmi les eaux froides, de même que la conductivité est supérieure presque du double par rapport aux autres sources froides.

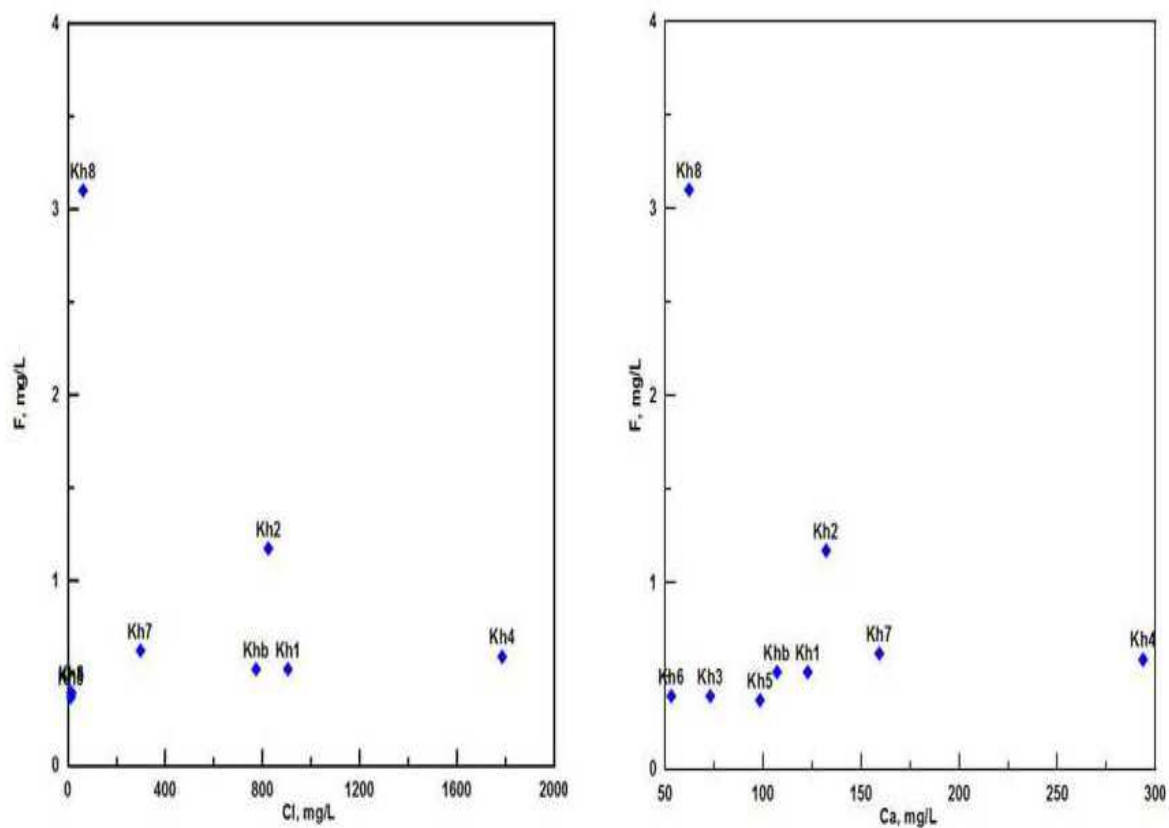


Fig.61 : Evolution du F en fonction de Cl et Ca.

6. Traçage isotopique

Introduction

Les techniques isotopiques ont été très vite introduites dans les études hydrogéologiques tout juste après la fin de la 2^{ème} guerre mondiale et suite aux développements décisifs qu'a connu la spectrométrie de masse (spectromètre de Nier). Dès 1955 en effet, le laboratoire d'Ottawa commença à émettre les 1ères analyses en isotopes stables (¹⁸O et ²H). Il allait être suivi par d'autres laboratoires dont celui de l'AIEA, celui de Pretoria et de Thonon-les-Bains (1963). Ce dernier ayant malheureusement fermé ces portes que récemment en 2005 pour faute de budget. [1, 23]

En fait et dès le début, les sciences de l'eau allaient non plus s'appuyer sur les moyens de l'hydrogéologie physique et sur l'analyse hydrochimique mais également sur les moyens qui allaient être mis en œuvre par cette nouvelle technique et qui se devaient d'être différents des techniques ordinaires. Les grandeurs à mesurer seront pour les isotopes stables les très légères différences de masse (IRMS), pour les isotopes instables, la radioactivité totale (compteurs à gaz, spectromètres à scintillation liquide), les désintégrations radioactives (spectrométrie alpha ou gamma) ou alors les rapports absolus (TIMS). Le principe de l'introduction et de l'utilisation des techniques isotopiques dans les sciences de l'eau était de pouvoir s'adresser à n'importe quel milieu sans pour autant être limité dans l'espace et le temps [28].

Ainsi, grâce aux isotopes de l'environnement pouvait on étudier tout type d'aquifère, de surface, souterrain (englobant les systèmes poreux, fissuré et karstique), les circuits géothermiques. La connaissance des eaux souterraines passant par la compréhension des phénomènes contrôlant les eaux de précipitation, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, AIEA a, pour se faire, initié le GNIP, *Global Network for Isotopes in Precipitation* [2,3]. Le « *Gnip* » consiste en un programme de surveillance des eaux de précipitation à l'échelle mondiale et ce par l'intermédiaire de stations de référence dispersées à travers les cinq continents.

Aussi, la mise en application des techniques isotopiques est rapidement devenue une nécessité et s'est vite répandue dans l'étude de grands aquifères en particulier pour les pays situés en zone aride. On citera parmi ces études :

1. L'étude du grand bassin artésien d'Australie,
2. L'étude de l'aquifère des grès de Nubie qui est partagé par l'Egypte, le Soudan, le Tchad et la Libye,

3. L'étude du système aquifère du Sahara Septentrional (SASS) commun à l'Algérie, la Tunisie et la Libye. [20]

En Algérie différentes études faisant intervenir les techniques isotopiques ont été effectuées ou sont en cours d'exécution. Elles seront maintenant intégrées dans ce qui est appelé le Schéma Directeur de l'Eau, récemment développé par le Ministère des Ressources en Eau. Ce schéma a pour but la généralisation de l'utilisation de l'outil isotopique pour une meilleure appréciation des phénomènes régissant l'écoulement des eaux souterraines en zone aride et semi aride. Par ces techniques on doit être en mesure de pouvoir :

1. -Identifier et évaluer les zones de recharges,
2. -Identifier les eaux anciennes (utilisées comme eaux potables en régions arides).
3. -Evaluer les mélanges entre différents types d'eaux.
4. -Evaluer les échanges entre l'eau et la matrice.
5. -Identifier les climats anciens (coquilles, eaux).
6. -Remonter aux paléo températures.
7. -Détecter l'origine de la pollution.
8. -Déterminer l'origine de la salinisation. [4]

6.1. Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène

6.1.1. Approche méthodologique

La gestion des eaux souterraines, c'est à dire leur exploitation, nécessite une bonne connaissance des circuits souterrains empruntés par l'eau. Un circuit se caractérise généralement par deux facteurs : l'espace et le temps. La connaissance de ces deux paramètres est donc fondamentale. Les différents isotopes utilisés en hydrogéologie sont d'une part les isotopes de la molécule d'eau (l'oxygène 18, le tritium et le deutérium) et d'autre part les isotopes des espèces dissoutes (le carbone 14 et le carbone 13) du carbone inorganique.

Les isotopes stables nous permettront de connaître une caractéristique spatiale (altitude, ...) et les isotopes instables, un facteur temporel (âge, ...).

Les méthodes d'application les plus courantes font appel au deutérium (^2H ou D), à l'oxygène 18 (^{18}O) et au tritium (^3H) de la molécule d'eau, ainsi qu'aux isotopes du carbone des carbonates dissous (^{13}C et ^{14}C). [14]. Ces méthodes apportent des informations concernant l'origine de l'eau minérale, ou des éléments dissous, la durée du transit souterrain de cette eau (son âge) et permet dans certains cas de caractériser des processus dits secondaires, mais qui

peuvent parfois contribuer de façon importante à l'originalité du faciès de cette eau. La molécule d'eau est constituée de deux éléments (O et H) possédant chacun trois isotopes stables ou radioactifs. L'abondance relative d'un isotope dépend de plusieurs facteurs dont le lieu de précipitation de la pluie (altitude, latitude, distance à l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, des échanges avec les minéraux.

L'abondance relative moyenne de ces isotopes dans la nature est :

- 1) Pour l'hydrogène : ^1H : 99,984 % ; ^2H : 0,015 % ; ^3H : 10^{-16} à 10^{-14} % ;
- 2) Pour l'oxygène : ^{16}O : 99,76 % ; ^{17}O : 0,037 % ; ^{18}O : 0,10 %.

Par exemple, l'atome d'hydrogène peut se présenter sous la forme 1H (aucun neutron), 2H (aussi appelé deutérium D , avec un neutron) ou 3H (aussi appelé tritium T , avec deux neutrons). L'atome d'oxygène peut se présenter sous la forme ^{16}O , ^{17}O ou ^{18}O . L'eau est composée en majorité de molécules $\text{d}^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, mais contient aussi quelques molécules plus lourdes $\text{d}^1\text{H}_2^{17}\text{O}$ (0.004%), $\text{d}^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ (0.2005%), d^1HDO (0.0155%), et d^1HTO (en quantité très faible actuellement). Ces différentes molécules sont appelées *isotopologues*, ou, par abus de langage, simplement "*isotopes de l'eau*". [24] En hydrologie, l'utilisation des isotopes repose sur leurs qualités de traceurs des espèces chimiques auxquelles ils sont intrinsèquement liés. Dans la présente étude, nous avons utilisé une catégorie d'isotopes :

- les isotopes stables (^{18}O et ^2H)

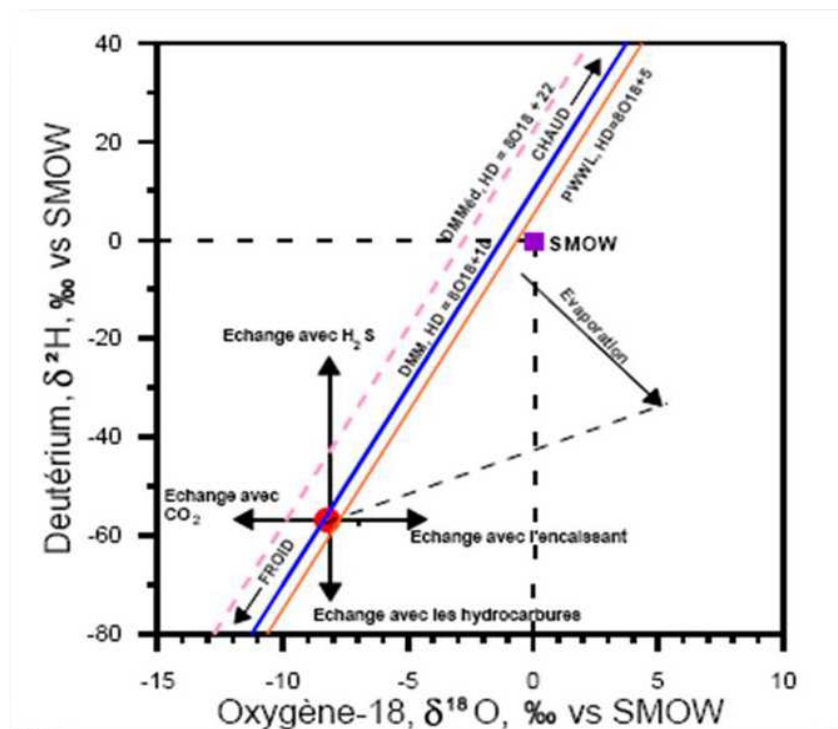


Fig.62 : Définition des différents domaines d'application des isotopes stables [20]

6.2. L'apport des isotopes de l'environnement en hydrogéologie

6.2.1. Les isotopes stables (^{18}O et ^2H) et la notation delta (δ)

Dans l'eau naturelle (océan, lac, vapeur, glace, etc.), le rapport $^2\text{H}^{18}\text{O}/^2\text{H}^{16}\text{O}$ est de l'ordre de 1/500 (0.002). Ce rapport varie extrêmement peu, 1 à 2 ‰ à nos latitudes, 3-4 ‰ aux hautes latitudes. On utilise la notation "delta" qui permet d'exprimer ces petites variations. On exprime ces variations en "pour mille" Ainsi et pour des raisons pratiques on ne mesurera pas l'abondance isotopique absolue mais l'abondance isotopique relative qui peut être mesurée à l'aide d'un spectromètre de masse.

Dans l'eau, l'abondance relative des isotopes stables ^2H et ^{18}O est exprimée par rapport au standard V-SMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) qui représente un échantillon hypothétique de l'eau océanique moyenne. Les rapports isotopiques de ces différentes molécules, $^2\text{H}/^1\text{H}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, s'appelle la *composition isotopique* et sont alors représentés par les variations delta (δ) telles que : $\delta = (R_{\text{sample}} / R_{\text{SMOW}} - 1) * 1000$ [4]

Avec R_{sample} le rapport du nombre de molécules lourdes sur le nombre de molécules totales dans l'échantillon et R_{SMOW} ce même rapport dans une référence internationale correspondant à une eau de surface océanique moyenne; Par convention il est entendu que la valeur du SMOW sera $\delta^{18}\text{O} = 0$; $\delta^2\text{H} = 0$

Le δ s'exprime en ‰. On définit ainsi le $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ et δD pour quantifier la richesse en H_2^{17}O , H_2^{18}O et HDO respectivement.

Dans le langage courant, on dit qu'une eau est plus "*riche*" ou "*enrichie*" lorsqu'elle possède une plus grande concentration en isotopes lourds. Inversement, une eau est plus "*pauvre*" ou "*appauvrie*" quand la concentration en isotopes lourds est plus faible.

Exemple pour l'eau H_2O : L'isotope de l'oxygène le plus commun est ^{16}O , puis ^{18}O et ^{17}O . L'isotope de l'hydrogène le plus abondant est ^1H puis ^2H (Deutérium) puis ^3H (Tritium).

On distingue ainsi les isotopes abondants et les isotopes rares, les isotopes légers et les isotopes lourds.

Tableau 24: Isotopes du milieu de l'oxygène et de l'hydrogène : traceurs intimes de la molécule de l'eau. [46]

Élément	Isotope	Abondance naturelle moyenne %	Propriétés
Hydrogène	1H	99,985	stable
	2H = D (Deutérium)	0,015	stable
	3H = T (Tritium)	10-18	radioactif (période T = 12,43 ans)
Oxygène	16O	99,76	stable
	17O	0,04	stable
	18O	0,20	stable

6.2.2. Les isotopes stables de la molécule d'eau

Les isotopes stables de la molécule d'eau oxygène-18 (^{18}O) et deutérium (^2H) sont utilisés en hydrogéologie comme traceurs du milieu. Ils permettent de suivre l'évolution des eaux depuis l'infiltration jusqu'à l'exutoire, d'apporter des renseignements sur l'origine de l'eau, de déterminer l'aire de recharge des aquifères, leur taux de renouvellement ainsi que les relations éventuelles entre les aquifères.

La composition isotopique d'une eau est donnée en partie pour mille de différence par rapport au standard international de référence, le SMOW (Standard Mean Ocean Water), exprimé en unité δ (delta) et définissant la composition isotopique moyenne théorique de la masse océanique.

$$\delta = \frac{R(\text{échantillon}) - R(\text{standard})}{R(\text{standard})} \cdot 1000, \text{ (CRAIG, 1961)}$$

Avec : $R = \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}$ et $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$

Le standard a par convention internationale une composante isotopique $\delta \approx 0 \%$

Si le rapport de l'échantillon est inférieur ou égal au standard le δ (**delta**) est négatif

D'après la relation ci-dessus, les valeurs de δ positives indiquent que l'échantillon est enrichi vis-à-vis de l'étalon correspond à la composition isotopique moyenne des eaux océaniques. Dans la nature, les variations isotopiques de la plupart des éléments sont faibles.

Rappelons que les deux principaux phénomènes responsables de la modification des compositions en ^{18}O et ^2H de l'eau sont la condensation et l'évaporation.

Ces phénomènes sont thermodépendants ; la condensation est un phénomène d'équilibre thermodynamique tandis que l'évaporation s'opère dans des conditions hors d'équilibre à cause de l'effet cinétique lié au processus de diffusion moléculaire. [8,36]

En zone aride ou semi-aride, le facteur dominant est le profil d'humidité de l'atmosphère qui conditionne l'évaporation, mais les caractères propres à la précipitation elle-même interviennent également : granulométrie des gouttelettes, intensité de la précipitation [28]

Comme le principe de l'utilisation des techniques isotopiques est de tracer le cycle de l'eau, on conçoit bien que toute étude hydrogéologique aura pour but de comparer les eaux souterraines à celles des précipitations. De cette manière on pourra avoir une idée sur la recharge ou non de l'aquifère de la même manière que l'on pourra discerner si une eau a un cachet évaporé ou non, ou si elle a échangé longtemps avec la matrice. On pourra donc indirectement apprécier un temps de résidence

Dans la région des Aurès, où le fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères karstiques est fortement influencé par la structure relativement complexe qui contrôle les écoulements et détermine les émergences, les isotopes stables, en particulier l'oxygène 18 et le deutérium, constituent un outil pour déterminer l'origine et l'histoire des eaux, les impluviums et les conditions de recharges des aquifères.

Nous disposons essentiellement des données isotopiques d'une campagne d'échantillonnage effectuée en Mai 2011 sur une dizaine de sources, et dont les échantillons ont été analysés au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger. Nous allons tenter d'étudier la relation oxygène 18/deutérium, afin de mettre en évidence le climat sous lequel s'est effectuée la recharge des différents systèmes aquifères et les éventuels phénomènes d'évaporation.

6.3. Corrélation des isotopes stables deutérium (^2H) et Oxygène (^{18}O)

L'étude de la corrélation en ^2H et ^{18}O est réalisée par un graphique de $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$. A l'échelle du globe, les teneurs en oxygène-18 et en deutérium des précipitations mondiales qui n'ont pas subi d'évaporation sont corrélées entre elles par une droite d'équation des eaux météoriques (DMM) :

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \text{ de la forme } 2\text{H} = \delta \text{ 18O} + \mathbf{d} \text{ (Craig, 1961)}$$

La pente de la droite météorique mondiale (**8**), caractérise le phénomène de condensation produit à l'équilibre ; et, **d** (**10**), l'ordonnée à l'origine ou excès en deutérium ; L'excès en

deutérium est variable en fonction de l'humidité relative et de la température de l'interface océan-atmosphère, lors de la formation des masses de vapeur atmosphérique.

Ainsi, d , prend la valeur de **+10** lorsque les précipitations sont d'origine océanique (Craig, 1961), mais peut avoir aussi des valeurs supérieures ou inférieures à 10, notamment :

- $d = +22$, pour les précipitations du bassin oriental de la méditerranée ;
- $d = +13.6$ pour les précipitations de bassin occidental de la méditerranée ;
- $d = +6$, pour les précipitations des stations continentales d'Amérique du Nord.
- $d = +5$, pour les paléo-eaux.

Les eaux se plaçant sur la ligne des eaux météoriques sont ainsi supposées avoir pour origine les précipitations océaniques et n'avoir pas subi aucun processus de fractionnement isotopique. Les eaux situées au-dessus ou en dessous de cette ligne reflètent respectivement l'appauvrissement ou l'enrichissement en l'un ou l'autre des isotopes sous l'effet de différents processus.

6.4. Relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux souterraines

Les isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et δD de la molécule de l'eau ont été déterminés au CRNA à l'aide d'un spectromètre de masse CF-IRMS Delta-V de Thermo Finnigan en se reportant aux méthodes bien établies. [1]

Les mesures ont été effectuées sur 200 μl d'eau après équilibration (GasBench method) avec du CO_2 (pendant 24h) pour la mesure du $\delta^{18}\text{O}$ et avec du Platine (Pt pendant 45mn) pour le δD . Les valeurs sont reportées en pour mille (‰) par rapport au standard international Vienna-Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). Après des mesures répétées (triplicate) du standard, des échantillons et des standards internes, la précision analytique pour le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD est de $\pm 0.05\text{‰}$ et $\pm 1.0\text{‰}$ respectivement. Sur le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (fig.63), on note que les points représentatifs des eaux souterraines de la région de Khenchela s'alignent vraisemblablement selon deux droites :

1. Une droite d'équation $^2\text{H} = 5,27 ^{18}\text{O} - 10,7$, qui concerne les sources froides
2. Une droite d'équation $^2\text{H} = 4,11 ^{18}\text{O} - 24,5$, qui concerne les sources thermales.

Tableau 25 : Résultats d'analyses isotopiques des eaux de Khenchela

Code	$\delta^{18}\text{O}$	StD	$\delta^2\text{H}$	StD
	% vs V-SMOW			
KH1	-8.32	0.09	-60.17	0.19
KH1b	-8.13	0.10	-55.51	0.39
KH2	-7.86	0.05	-57.81	0.48
KH3	-7.35	0.000	-51.31	0.24
KH4	-8.50	0.10	-58.22	0.06
KH5	-6.71	0.03	-43.66	0.10
KH6	-7.69	0.02	-50.91	1.09
KH7	-5.99	0.05	-43.37	0.77
KH8	-7.79	0.06	-58.20	0.40

Différentes observations peuvent être faites concernant le comportement isotopique (Fig.63) des eaux souterraines de Khenchela :

1. Les points représentatifs des eaux souterraines profondes se distinguent par des teneurs nettement appauvries par rapport aux sources froides. Ils se démarquent et se situent au bas de la droite météorique mondiale (DMM). On note également que deux sources thermales (Kh1b et Kh4) se situent au dessus de la droite météorique mondiale. Les points, appauvris en isotopes lourds, indiquent que les eaux souterraines ont pour origine des précipitations qui n'ont subi aucune modification après les condensations qui les ont générées et se sont directement infiltrées durant la période humide froide. De la même manière que l'on peut considérer que ces eaux ont été générées par des précipitations d'origine océanique.

2. On observe que deux points du groupe des sources froides (Kh5 et Kh6) se situent également sur la droite météorique mondiale et que les seconds points légèrement enrichis. Ils traduisent une évaporation partielle des gouttelettes en cours de chute ou dans la zone non saturée.

3. Les sources froides comme les sources chaudes ont le même comportement. On peut considérer que se sont les mêmes pluies météoriques qui ont générées ces eaux souterraines sauf que les secondes, les eaux thermales, ont un caractère plus évaporé s'apparentant aussi à un échange géothermique, du fait de la profondeur d'enracinement et du degré géothermique atteint par les eaux de Hammam Salihine et Knif.

4. La source Ain Djimente se détache des autres sources froides et se situe 13kms plus au nord. Elle se situe à la même altitude (≈ 840 masl) que les deux sebkhas **Garaet el Tarf** et **Ank el Djemel**. Il se pourrait qu'elle soit affectée par une ascendance (remontée) verticale des eaux thermales, ce qui pourrait expliquer qu'elle se situe également à droite du pôle des eaux

thermales, et pour lesquelles on pourrait alors définir un ancien circuit géothermique. (Fig.63, 64).

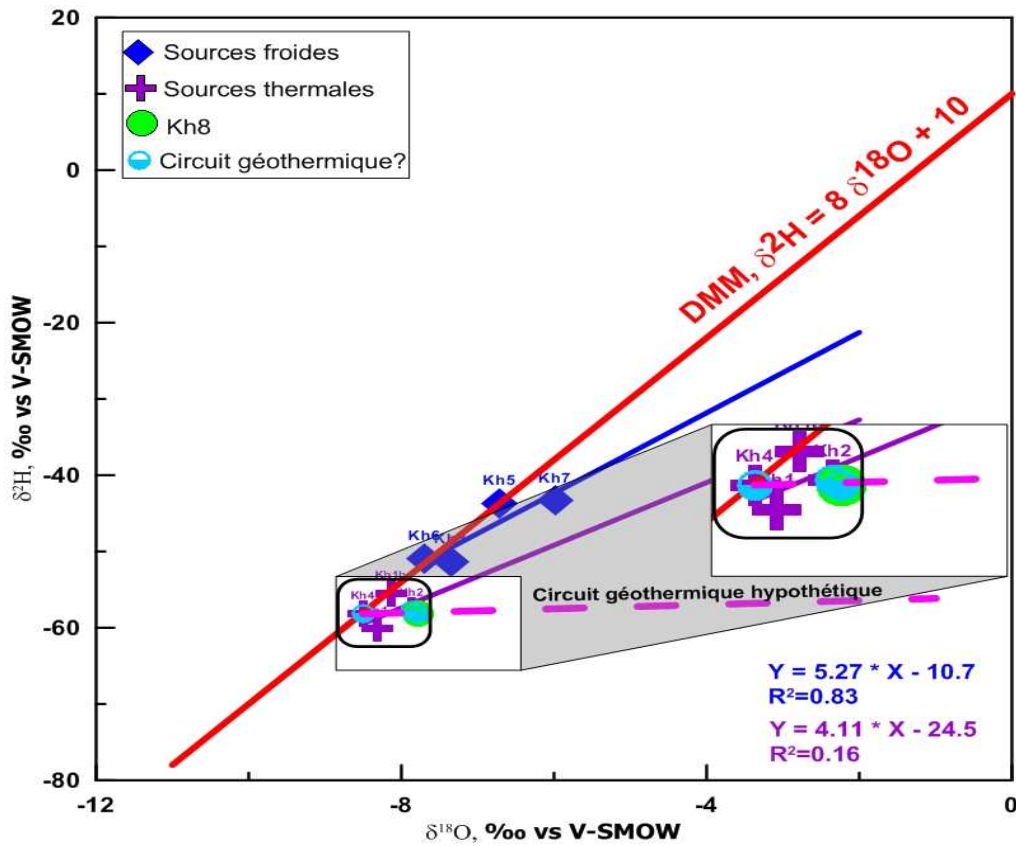


Fig.63 : Relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de nos sources par rapport à la droite météorique mondiale de Craig(1961)

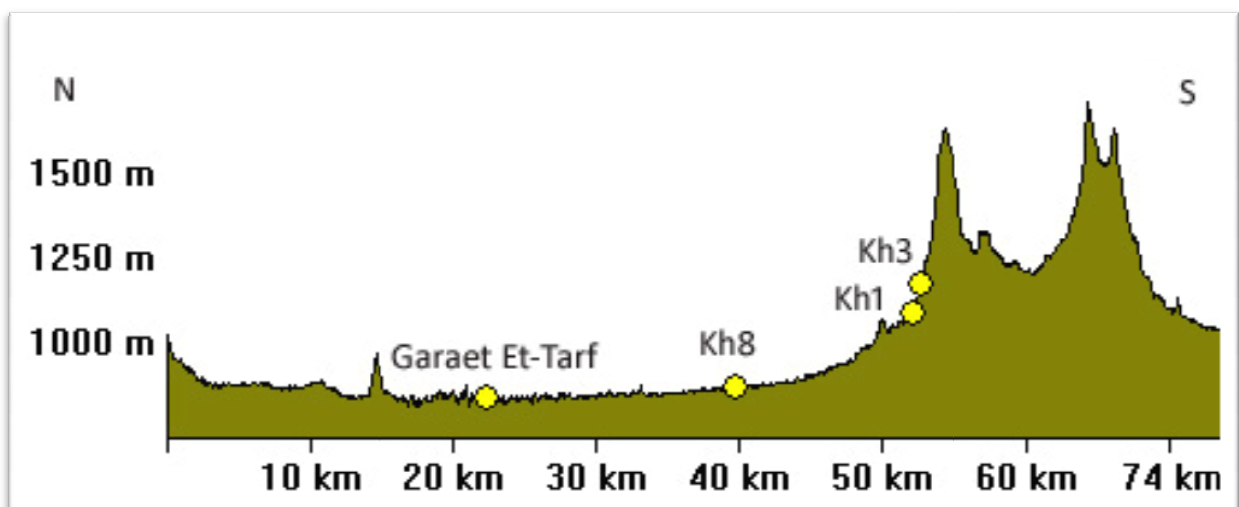


Fig.64 : l'altitude d'Ain Djimente par rapport à l'altitude de Garaet El Tarf.

L'identité de comportement des sources de Khenchela peut-être liée au contexte géologique et structural, car comme on peut le constater, elles sont toutes alignées NE-SW selon l'axe des deux anticlinaux du Djebel Chelia et de Khenchela (Fig.65). Ainsi donc, l'existence de ces sources pourrait être liée à la mise en place des Monts des Aurès, qui eux-mêmes résulteraient de la rencontre des deux Atlas Tellien et Saharien.



Fig.65 : Carte de situation des sources.

7. Etude microbiologique

Introduction

L'étude bactériologique des eaux du Nord des Aurès (W. de kenchela), s'est imposée d'elle-même suite aux différentes observations qui ont été faites. Lesquelles ont montré une pollution importante des eaux de certaines sources, en particulier celles d'Ain El Menchar. Pour cette dernière source en effet, comme vu dans la partie hydrogéochimie, on a noté des concentrations anormalement élevées en nitrates que nous avons directement mis sur le compte d'une pollution anthropique, due à l'homme. Les analyses sont réalisées au laboratoire à Alger (CRNA) par la microbiologiste du centre.

7.1. Procédure d'échantillonnage

Des échantillons d'eau ont été prélevés à partir des neuf sources d'eaux au niveau de la wilaya de Kenchela. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide des flacons en verre préalablement stérilisés au four de Pasteur pendant une durée de trois (3) heures à 150°C.

Pendant le transport, les échantillons ont été conservés dans une glacière à 4°C. [45]

Les flacons destinés à la recherche des microorganismes aérobies-anaérobies facultatifs n'ont pas été complètement remplis d'eau et bouchés hermétiquement. Ils ont été stockés à 4°C à l'abri de la lumière jusqu'à l'analyse.

7.2. La procédure d'analyse

La méthode utilisée est celle de nombre le plus probable NPP. En ensemençant une série de trois tubes pour chaque volume d'échantillon. Les valeurs NPP ont été déterminées par la table statistique de Mac-Grady correspondant au nombre des tubes positifs.

La confirmation est réalisée pour les coliformes fécaux (sur milieu de Schubert) par l'ensemencement des tubes positifs des coliformes totaux (BCLP). De même pour les Entérocoques intestinaux, la confirmation est réalisée par ensemencement des tubes du milieu de Roth, positifs dans des tubes du milieu de Litsky.

Tableau 26: Les résultats d'analyse des Coliformes et des Entérocoques intestinaux.

/	Coliformes totaux /100 ml	Coliformes fécaux /100 ml	Escherichia coli /100 ml	Entérocoques fécaux /100 ml
Kh1	0	0	0	0
Khb	0	0	0	<u>14</u>
Kh2	0	0	0	<u>7</u>
Kh3	0	0	0	0
Kh4	<u>9</u>	0	0	<u>4</u>
Kh5	0	0	0	0
Kh6	0	0	0	0
Kh7	0	0	0	0
Kh8	0	0	0	0

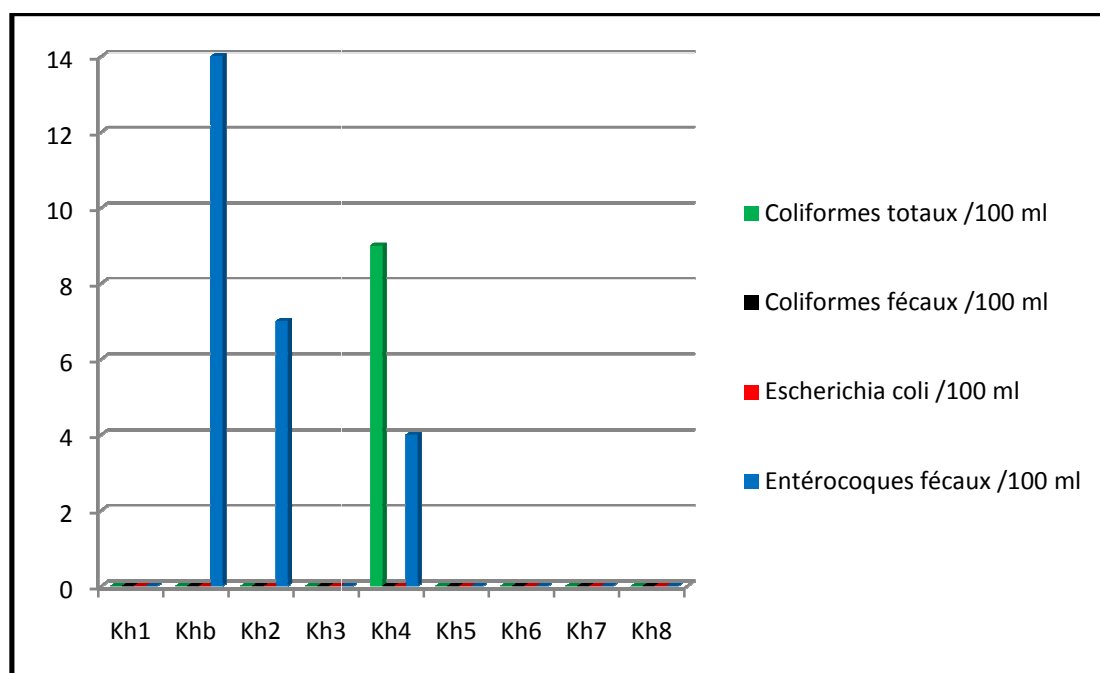


Fig.66 : Représentation comparative des résultats du dénombrement des Coliformes et des Entérocoques intestinaux

Tableau 27: Les résultats d'analyse des Germes Totaux et Staphylocoques.

/	Flore aérobie mésophile totale (37°C)/ ml	Staphylocoques/ml	Levures et moisissures/ ml
Kh1	142	0	0
Khb	5.10^2	0	0
Kh2	3.10^4	0	0
Kh3	5.10^2	3.10^2	0
Kh4	2.10^2	0	0
Kh5	0	0	0
Kh6	0	0	0
Kh7	0	0	0
Kh8	2.10^2	0	0

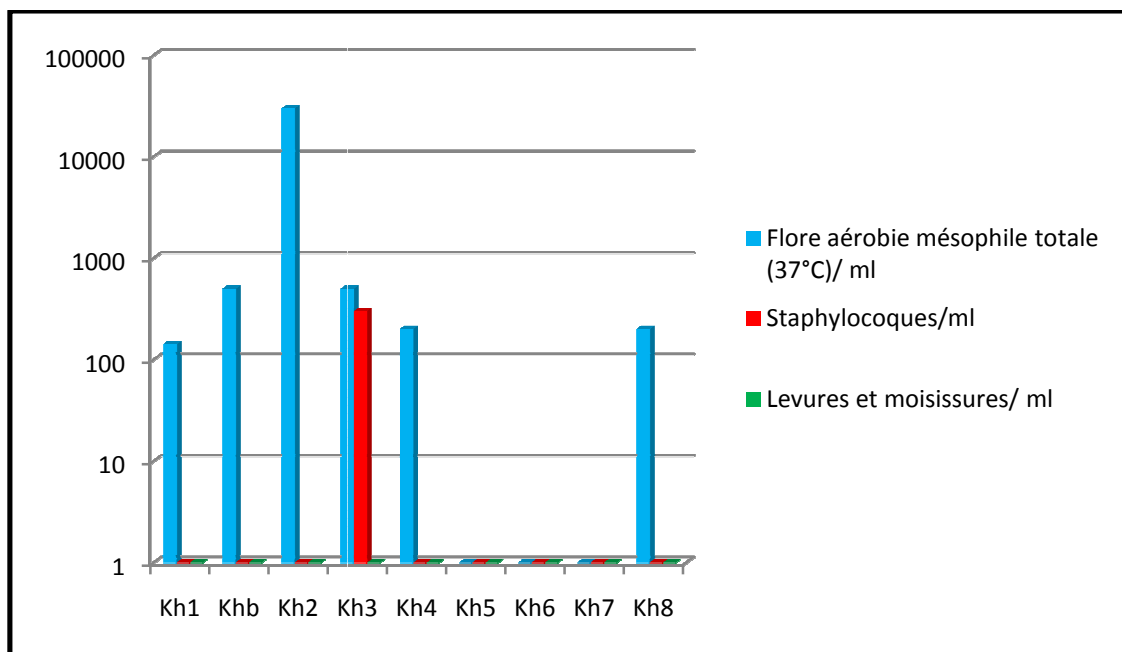


Fig.67 : Représentation comparative des résultats Germes Totaux et Staphylocoques

7.3. L'interprétation des résultats

La norme pour la flore mésophile totale à (37°C) spécifie une limite inférieure ou égale à 100 germes/ml dans les eaux thermales et minérales.

Dans notre cas les neuf sources ont présenté des valeurs qui dépassent cette limite. En effet, les eaux minérales et thermales peuvent être riches en matière organique qui est à l'origine d'un développement microbien important. La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau des deux sources : Salihine et Ain Silène.

Pour les coliformes totaux, aucune norme ne spécifie une valeur pour ce groupe. Néanmoins, une catégorie d'*Entérobactéries* propre aux sources thermales correspond à des espèces se trouvant naturellement dans l'eau parce que faisant partie de la flore autochtone et provenant d'un apport tellurique ou végétal sans signification sanitaire. Il s'agit notamment des germes *Serratia fonticola*, *Enterobacter intermedium*, *Klebsiella terrigena*, *Buttiauxella agrestis* et du groupe d'espèces *Enterobacter agglomerans*. [21]

C'est le cas pour la source de Hammam Djarir (Kh4) qui a présenté une densité en coliformes totaux de 9 dans 100 ml.

Concernant les coliformes fécaux et les *Escherichia coli*, les normes européennes exigent une absence totale dans l'eau minérale et thermale. Nos sources échantillonnées ont été exemptes.

Par contre, les Entérocoques intestinaux ont été retrouvés dans les échantillons d'eau de trois sources sur les neuf échantillonnées. Alors que la norme exige leur absence totale. Il s'agit de la source de Salihine, Knif et Djaarir.

Celle de Knif est réputée par la présence des entérocoques, puisque un travail similaire a été réalisé au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger dans le cadre d'un projet de recherche national. Les résultats signalent une présence de ces germes et dont l'explication est la suivante :

Du fait de leur résistance, leur présence dans l'eau thermale peut être due à une migration intermittente de bactéries d'origine fécale lors de l'infiltration rapide des précipitations à travers le sol dans la zone saturée du milieu fissuré. Ce genre de contamination microbiologique se rencontre surtout dans les aquifères à perméabilité de fissure (craie, massifs calcaires), dans lesquels la fonction épuratrice du sous-sol ne peut s'exercer et dans lesquels la matière organique est dégradée partiellement. Comme c'est le cas des contaminations à entérocoques fréquentes dans les eaux des sources souterraines au sud de l'Italie, si bien démontrées par le procédé de laboratoire élaboré par Celico. [15]

La source d'Ain Silane qui a présenté une forte concentration en flore mésophile totale de 5.10^2 /ml. Elle a marqué aussi une présence en Staphylocoques, qui devraient être totalement absents selon la norme. Cette contamination a été confirmée par la présence de l'espèce *Staphylococcus aureus*, (Fig.68), (observations macro et microscopique, test catalase) cette dernière est reconnue dangereuse pour ses affections dermiques. Son origine peut être due à une contamination par infiltration des eaux superficielles.

Dans l'échantillon d'eau d'Ain Menchar (Kh7), nous avons noté une valeur élevée en nitrates (93 mg/l) avec absence totale de germes d'origine fécale. Ceci peut être expliqué par le fait que les rejets ont une origine chimique sans aucune relation avec une contamination bactériologique ou encore que ces eaux présentent une composition en éléments inhibiteurs de développement bactérien.

7.4. L'observation macroscopique d'Ain Silène (Kh3)

Le résultat de la recherche et dénombrement des Staphylocoques sur milieu gélosé de Chapman au mannitol a révélé une présence de deux types de colonies :

1/colonies roses petites à 1 mm de diamètre, circulaire, lisse, brillante, opaque, bords réguliers, non pathogènes. Qui sont des colonies Mannitol négative.

2/colonies jaunes avec un halo jaune petites à 2 mm de diamètre, circulaire, lisse, brillante, opaque, bords réguliers. Mannitol positive. Catalase positive : suspicion de *Staphylococcus aureus*.

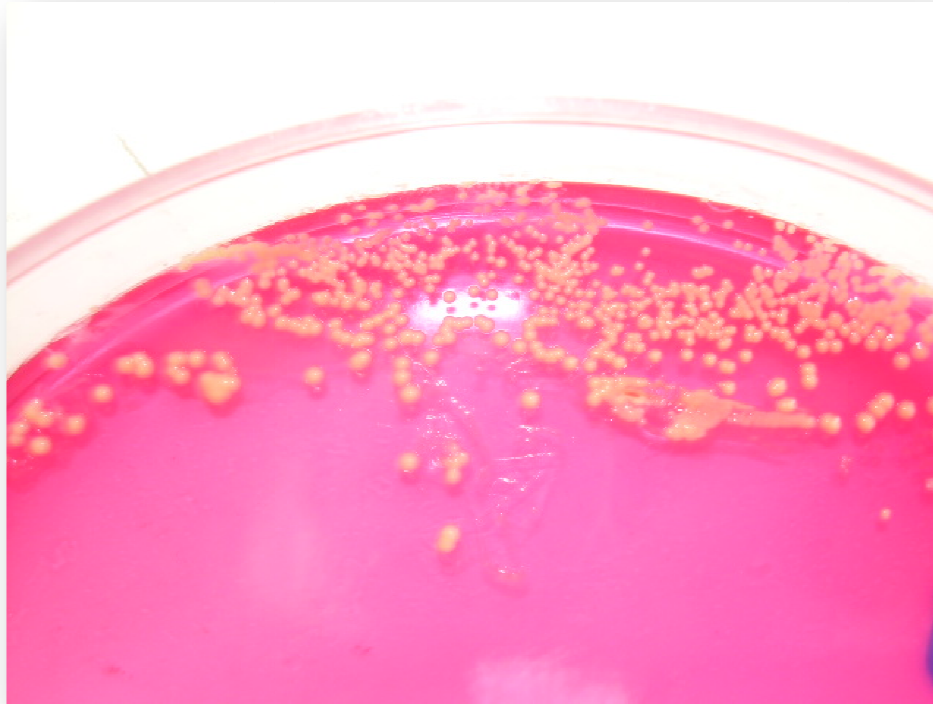


Fig.68 : Colonies de *Staphylococcus aureus* isolées sur gélose de Chapman (au mannitol) après 48h.

Conclusion

D'après les résultats hydrochimique nous pouvons conclure :

-Les principaux faciès chimiques de nos sources ; pour les sources thermales présentent un faciès chloruré sodique par contre les sources froides présente un faciès chimique qui évolue depuis les eaux bicarbonatées calciques à bicarbonatées magnésiens pour les sources d'altitudes vers un faciès chlorurés sodiques pour les sources des plaines.

-La température des eaux, elles évoluent de **36.6°C** à **73°C** pour les eaux thermales et de **14.8°C** à **17.3°C** Pour les eaux froides avec une moyenne de **16°C** , La conductivité électrique varie de **566** à **6620 mS/cm**, elle présente une moyenne de **2600 mS/cm** ,Le potentiel d'hydrogène évolue de **4.93** à **7.20**.

-La contribution du traçage isotopique, nous avons mis l'accent sur l'origine de l'alimentation des sources d'eau qui se fait exclusivement par les eaux météoriques.

-L'étude statistique multi variée à travers la classification hiérarchique ascendante (HCA) et l'analyse en composantes principales (ACP) sur les deux axes factoriels à montré que les eaux ont subi une minéralisation avec un pourcentage élevé d'information sur l'axe F1, représenté par tous les sels dissous en plus de la conductivité et l'axe F2 traduit une contamination des eaux par la pollution azotée.

-Les indices de saturation permettent de savoir ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de précipiter dans l'aquifère, les eaux des sources des Aurès montrent un état d'équilibre, de saturation ou de sous-saturation par rapport aux principaux minéraux carbonatés ou évaporitiques.

- La silice est employée comme géothermomètre qui sert à l'estimation de la température dans le gisement hydrothermal (T° en profondeur), et de différencier les aquifères mis à contribution et dire que pour les eaux froides circulent fort probablement dans des formations carbonatées alors que les eaux chaudes circulent dans des formations sinon différentes des premières ou alors qu'elles rencontrent et dissolvent durant leur transit en cours de remontée des formations détritiques riches en aluminosilicates pour expliquer ces concentrations élevées en silice (SiO_2).

- L'étude du strontium et l'utilisation du rapport Sr^{++}/Ca^{++} ont permis de caractériser les eaux de sources du versant Nord des Aurès. La minéralisation des eaux est liée essentiellement à la dissolution des évaporites.

- L'analyse, du rapport Br/Cl, nous permet de voir également que les eaux de Khenchela ont, toutes, un rapport proche à celui de l'eau de mer du fait des effets associés de la sécheresse, de l'aridité du climat et de l'évaporation des eaux dans un bassin endoréique. Comme celui de Khenchela et de la relation nappes-chotts.

- pour les eaux froides qui sont destinées à la consommation humaine, la présence de calcium, magnésium et sulfates dans les eaux d'Ain Silène, Zarif, Karma sont dans les normes selon l'OMS, et la réglementation européenne, mais pour l'eau d'Ain Djimente renferme des teneurs relativement peu élevées en sulfates dans ce cas la saveur de l'eau devient alors désagréable, et une valeur de 3.1mg/L en Fluore qui la dépasse du double selon la dose maximale admissible ($F=1.5mg/L$) pour une eau de consommation, cette surconcentration pourrait provoquer un brunissement des dents, appelé fluorose dentaire. et concernant l'eau d'Ain Menchar présente des teneurs en nitrate 93,9 mg/l et qui est supérieure à la valeur guide

de L'OMS c'est une consonance péjorative et souvent injustifiée pour une destinée à la consommation humaine.

Et selon les résultats microbiologiques :

- Pour la source Kh2 à présenté un nombre important de germes totaux témoins d'une richesse d'une matière organique mais aucune présence de bactérie pathogène.
- Kh3 à montré une présence de staphylocoque témoins d'une contamination des eaux superficielles.
- Kh4 à affiché une présence de coliformes totaux et des entérocoques.
- Khb et Kh2 ont présentent des deux valeurs de 14germes/100ml et 7 germes/100ml respectivement en entérocoques.
- Kh1, Kh5, Kh6, Kh7 ont été empreintes aucune contamination fécale.

Conclusion générale

L'étude hydrologique, biogéochimique et isotopique des eaux du versant Nord du massif des Aurès (Wilaya de Khenchela), nous a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau du massif des Aurès.

Le contexte géologique se présente en un large synclinal dans lequel s'est déposé en discordance les grès miocène sur le Crétacé inférieur sous forme de calcaires marneux, de marne, de calcaire gréseux et des calcaires compacts. L'Aptien et l'Albien affleurent dans le massif des Aurès, ils se présentent souvent un faciès gréseux, marneux et dolomitique il devient franchement marneux à la base, le tout est couvert par des argiles rouges gypseuses avec quelques concrétions calcaires.

Les principaux **aquifères** sont rencontrés dans le remplissage alluvionnaire dans lequel siège deux nappes : l'une profonde, c'est la nappe des conglomérats et graviers et l'autre superficielle c'est la nappe des sables et argiles. Aucun sondage n'a touché les calcaires du Crétacé inférieur. Toutes les sources d'altitude trouvent leurs émergences dans les formations carbonatées du Crétacé supérieur et dans les calcaires dolomitiques, notamment les sources d'Ain Kerma et Silène.

L'étude **hydro-climatologique** nous a permis d'avoir une idée sur le climat de la région pour préserver la ressource en eau et promouvoir l'agriculture et le pastoralisme qui est en vogue dans la région et point fort de son économie. Ainsi et sur une période d'observation de 17ans (1994-2010), la température moyenne annuelle de l'air varie de 7 à 26°C avec une moyenne de 16°C, les précipitations sont de l'ordre de 479 mm/an. Nous avons noté la coexistence de deux climats bien distinct ; un climat semi-aride dans la plaine (300 mm/an) et l'autre tempéré dans la région des montagnes (479 mm /an). Nous avons noté la présence dans le sous bassin versant l'absence de la saisonnalité et l'existence de deux saisons bien distinctes : l'une froide, pluvieuse et humide qui s'étend du mois d'octobre au mois de mai et l'autre sèche. La région est caractérisé par un hiver frais et doux et un été chaud et sec. L'évapotranspiration réelle est de 413 mm/an, Le déficit agricole estimé est de **441mm** étalé sur la période allant de mai jusqu'à Novembre. Notons que le **bilan hydrologique est déficitaire**.

Le contexte **hydrochimique** a mis en exergue les principaux faciès chimiques et leur évolution grâce aux diagrammes de Piper et de Schoëller. Ainsi les sources thermales présentent un faciès chloruré sodique par contre les sources froides présente un faciès chimique qui évolue depuis les eaux bicarbonatées calciques à bicarbonatées magnésiens pour les sources d'altitudes vers un faciès chlorurés sodiques pour les sources des plaines.

La température des eaux est fortement influencée par la température de l'air, elle évolue de **36.6°C** à **73°C** pour les eaux thermales et de **14.8°C** à **17.3°C** Pour les eaux froides avec une moyenne de **16°C** , La conductivité électrique varie de **566** à **6620 mS/cm**, elle présente une moyenne de **2600 mS/cm** ,Le potentiel d'hydrogène évolue de **4.93** à **7.20**.

La contribution du traçage isotopique dans la compréhension du fonctionnement et de l'alimentation des aquifère est indéniable. Ainsi, grâce à la droite météorique mondiale, nous avons mis l'accent sur l'origine de l'alimentation des sources d'eau qui se fait exclusivement par les eaux météoriques.

L'étude statistique multi variée à travers la classification hiérarchique ascendante (HCA) et l'analyse en composantes principales (ACP) sur les deux axes factoriels à montré que les eaux ont subi une minéralisation avec un pourcentage élevé d'information sur l'axe F1, représenté par tous les sels dissous en plus de la conductivité et l'axe F2 traduit une contamination des eaux par la pollution azotée dont l'origine sert soit, les échanges hydraulique entre l'oued et la nappe du coté d'El Manchar, soit l'utilisation des fertilisants.

Les indices de saturation permettent de savoir ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de précipiter dans l'aquifère, les eaux des sources des Aurès montrent un état d'équilibre, de saturation ou de sous-saturation par rapport aux principaux minéraux carbonatés ou évaporitiques. Ceci peut s'expliquer par le fait que durant leur transit, certaines eaux lessiveront préférentiellement des formations carbonatées (calcaires et dolomies) qui forment l'essentiel de la charpente du système karstique de Khenchela, Cependant comme pour la plupart des eaux du massif des Aurès le rapport Ca/Mg est presque toujours supérieur à 1, on peut penser que c'est bien d'une calcite .

La silice est employée comme géothermomètre qui sert à l'estimation de la température dans le gisement hydrothermal (T° en profondeur). peut-être estimé en fonction du gradient géothermique (1°C pour 33m) entre 1200m et 2200m de profondeur entre kh4 et Kh1, de différencier les aquifères mis à contribution et dire que pour les eaux froides circulent fort

probablement dans des formations carbonatées alors que les eaux chaudes circulent dans des formations sinon différentes des premières ou alors qu'elles rencontrent et dissolvent durant leur transit en cours de remontée des formations détritiques riches en aluminosilicates pour expliquer ces concentrations élevées en silice (SiO₂).

L'étude du strontium et l'utilisation du rapport Sr⁺⁺/Ca⁺⁺ ont permis de caractériser les eaux de sources du versant Nord des Aurès. La minéralisation des eaux est liée essentiellement à la dissolution des évaporites.

L'analyse, du rapport Br/Cl, nous permet de voir également que les eaux de Khenchela ont, toutes, un rapport proche à celui de l'eau de mer du fait des effets associés de la sécheresse, de l'aridité du climat et de l'évaporation des eaux dans un bassin endoréique. Comme celui de Khenchela et de la relation nappes-chotts.

En **matière de potabilité** pour les eaux froides qui sont destinées à la consommation humaine, la présence de calcium, magnésium et sulfates dans les eaux d'Ain Silène, Zarif, Karma sont dans les normes selon l'OMS, et la réglementation européenne, mais pour l'eau d'Ain Djimene renferme des teneurs relativement peu élevées en sulfates dans ce cas la saveur de l'eau devient alors désagréable, et une valeur de 3.1mg/L en Fluore qui la dépasse du double selon la dose maximale admissible (F=1.5mg/L) pour une eau de consommation et sans doute lié à une origine anthropique, cette surconcentration pourrait provoquer un brunissement des dents, appelé fluorose dentaire, et concernant l'eau d'Ain Menchar présente des teneurs en nitrate 93,9 mg/l et qui est supérieure à la valeur guide de l'OMS c'est une connotation péjorative et souvent injustifiée pour une eau destinée à la consommation humaine.

L'étude microbiologique a permis de confirmer la contamination de la source d'Ain-Silène par la présence de staphylocoque témoins d'une contamination des eaux superficielles.

- Et pour hammam Salihine, Ain Zarif, Karma, Manchar ont été empreintes aucune contamination fécale. Pour la source de Hammam Knif à présenté un nombre important de germes totaux témoins d'une richesse d'une matière organique mais aucune présence de bactérie pathogène.
- Kh4 à affiché une présence de coliformes totaux et des entérocoques.
- Hammam Salihine et Knif ont présentent des deux valeurs de 14germes/100ml et 7 germes/100ml respectivement en entérocoques.

Néanmoins une analyse microbiologique ne suffit pas pour confirmer une contamination bactérienne.

Perspectives et Recommandations

- Pour la source d'Ain Silène, Il est très important d'alerter les pouvoirs publics et de sensibiliser la population quant aux risques sanitaires qui peuvent survenir de la consommation de ces eaux.
- Pour les eaux riches en nitrates, Ain Menchar doivent être analysé pour connaître l'origine ces concentrations élevées et l'absence de développement bactérienne en relation avec cette contamination.
- Il est conseillé de Faire un aménagement de la source de Hammam Djaarir pour une réutilisation en agriculture.
- Il est conseillé d'aménager les sources thermales afin d'optimiser et de valoriser leur rendement et cela par leur utilisation à des fins thérapeutiques. Ainsi, de part leur composition chimique il serait utile d'utiliser ces eaux dans la cure de certaines affections pathologiques comme les maladies rhumatismales, dermatologiques, osseuses et traumatologiques et certaines affections respiratoires.
- Il est aussi, recommandé d'exploiter certaines sources (Ain el karma et Ain Zarif) comme eau minérale (les mètrent comme eaux d'embouteillage), car les indices de vertus thérapeutiques existent et cela par la construction de stations de conditionnement des eaux qui contribuera certainement au développement de la région par la création des emplois et à la valorisation de cette richesse naturelle.
- Il est préconisé de réduire les déchets liquides et solides tout autour de ces aquifères afin de préserver ce patrimoine et de contribuer au développement de l'éco-tourisme par l'instauration des périmètres de protection rapprochés et immédiats.

Enfin développer des axes de recherches qui toucheraient à l'hydrologie, à la climatologie, à la géologie, à la microbiologie, à l'environnement et pour faire de ce milieu un laboratoire naturel.

Références bibliographiques

- [1] **A.I.E.A., Neuherberg, 19-23 Juin 1978** -Isotopes hydrology, Vol.1 et 2.
- [2] **A.I.E.A., 1992** - Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation. Technical reports series n°331, Vienne.
- [3] **A.I.E.A., 2005** -Tec Doc 1453, Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate.
- [4] **A.I.E.A.**, Environmental Isotopes in the Hydrological cycle, Principles and applications. Vol I, II, III, IV, V et VI.
- [5] **A.N.R.H., 2002** -Etude de synthèse sur l'hydrogéologie des nappes aquifères de la plaine Rémila – Khenchela.
- [6] **Agence Nationale pour la protection de l'Environnement, 1992** - Monographie de la wilaya de Khenchela.
- [7] **AGGUERABI, 1995** -Etude d'aménagement de station thermale hammam Amamra commune d'el Hamma.
- [8] **Arizona State University** -Data reduction for waters equilibrations. Keck Laboratory for Environmental Geochemistry.
- [9] **ATHAMENA M., 2006** -*Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud Sétifien*. Mémoire de Magister, Départ. Hydraulique, Univ. Batna, 130 p.
- [10] **BENSACI T., 2007** -*Détermination de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de surface : Cas de barrage Timgad (W. de Batna) et la retenue Collinaire d'Ourkis (w. d'Oum El Bouaghi)*. Mémoire de Magister, départ. De Biologie, Uni. De Batna, 85p.
- [11] **BOUDIA F. M.** -Thermalisme et tourisme de santé retour aux sources ; tourisme magazine, entreprise de gestion touristique de Tlemcen ; p 48,49.
- [12] **BOUGHALLI M., 2003** -Thermalismes et thalassothérapie en Algérie, Revue la Presse thermale et climatique, pp 140-165.
- [13] **Bulletin de la Société de Géographie d'Alger et de l'Afrique du Nord**, 1er trimestre 1922, n° 87.

- [14] **Bureau de recherche géologique et minière, Août 1996** -Les techniques isotopiques ; application aux eaux minérales, Bureau de recherche géologique et minières, Note technique n° 7 ; p1, 2.
- [15] **CELICO F., VARCAMONTI M., GUIDA G., NACLERIO, May 2004** -Influence of precipitation and soil on transport of fecal Enterococci in fractured Limestone Aquifers. Appl. Environ. Microbiol. vol. 70 No. 5 pp. 2843-2847.
- [16] **CENEAP, 2009** -Plan d'aménagement et de développement durable de la wilaya de khenchela ; phase n°1 : rapport n°2 évaluation territoriale « bilan critique-problématique d'aménagement ». Direction De L'environnement.
- [17] **CENEAP, 2009** -Schéma De Cohérence Urbaine De L'aire Urbaine De La ville De Khenchela, Direction De L'environnement -Rapport Final
- [18] **Centre SPIN, école des mines de Saint- Etienne** -Méthode instrumentale d'analyses et de caractérisation ; spectrométrie d'absorption atomique axe de recherche, Génie des procédés, 43p.
- [19] **Centre SPIN, école des mines de Saint-Etienne** -Méthode instrumentale d'analyses et de caractérisation ; chromatographie ionique axe de recherche ''Génie des procédés'' 30p.
- [20] **CHERCHALI M.E.H., 2008** -*Caractérisation hydrogéochimique et isotopique des eaux souterraine des nappes d'infero-flux et du socle fissure du Hoggar central (Sahara Central)*, Mémoire de Magister, en science de la terre Uni. Houari Boumediene, Alger, 131p.
- [21] **Circulaire DGS/VS 4 N° 2000-336, 19 Juin 2000** -Relative à la gestion du risque microbien lié à l'eau minérale dans les établissements thermaux.
- [22] **Communication présentée à la séance, 3 mars 2001** de la Société française d'hydrologie.
- [23] **DAOUD D., 1995** -*Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines et estimation du taux d'évaporation, dans le bassin du Chott Chergui (zone semi-aride), Algérie.* Thèse de Doc., en science de la terre Uni., de Paris Sud 11,256p.
- [24] **DIB H., Alger 2008** -Guide pratique des sources thermales de l'Est algérien ; mémoires du service géologique national ANGCM, 105p.
- [25] **DIB, 2009** - *Impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine, Ain Yaghout (Est Algérien)*, mémoire de magister en hydraulique, Batna, 110p.

- [26] **DURIEZ A., 2006** -*Origine et processus de minéralisation d'eaux thermales en milieu continental méditerranéen cas de système géothermale des Thermopyles (GRECE)*. Thèse de doc. En science de la terre, Uni. De Paris Sud 11, 306p.
- [27] **Extrait du Dictionnaire de l'Académie française**, 8^{ème} édition, 1932-1935.
- [28] **FONTES, J.Ch., 1976** -*Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. Quelques aspects*, thèse de Doc. Des Sciences. Uni. De Paris VI.
- [29] **GHAZOUALI R., 2007** -*Flore et végétation de la Kabylie des Babors ; Etude Floristique et phytosociologique des groupements forestiers et post-forestier des djebels Takoucht, Adrar ou Mellal, Tababors*, Thèse Doc. En biol. Végét., Uni. de Sétif, 321p.
- [30] **GOLTERMAN H.L., 1970** -*Methods for chemical analysis of fresh waters*. Second printing, IBP Handbook N°8. Blackwell Scientific Publications, Oxford and Edinburgh.166 p.
- [31] **GOUADIA L., 2008** -*Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est Algérien*. Mémoire de Magister. Départ. Géologie, Uni. Annaba. 131 p.
- [32] **GUENDOUIZ A., 2005** -*Application des techniques nucléaires et hydrogéochimiques à l'étude des nappes profondes du bassin sédimentaire du Sahara Septentrional. Implication pour la gestion des ressources en eau*. Thèse de Doc. D'Etat en Génie rural, Spécialité Sciences de l'eau, Université Saad Dahlab, Blida.
- [33] **GUIGUE S., 1947** -*Les sources thermo-minérales de l'Algérie''*, Etude géochimique, Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie, série 3, vol. 2.
- [34] **GUIRAUD R., 1990** -*Evolution post-triasique de l'avant pas de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines-Mémoires n° 3*. Publication de l'Office national de la géologie.
- [35] **HOUHA B., 1996** -*Qualité des eaux de kenchela, étude hydrochimique*, mémoire de magistère, Uni. D'Annaba.120p.
- [36] **HOUHA B., 2007** -*Etude de fonctionnement hydrogéochimique et isotopique des eaux de kenchela*, thèse doc. En hydrogéologie, Uni. D'Avignon, France, 140p.

- [37] **ISSAADI A., 1992** -*Le thermalisme dans son cadre géostructural, apports à la connaissance de la structure profonde de l'Algérie et de ses ressources géothermales*, Doctorat d'état. IST. USTHB. Alger. 274 p.
- [38] **KHABTANE A., 2010** -*Contribution à l'étude du comportement écophysologique du genre Tamarix dans différents biotopes des zones arides de la région de Khenchela*. Mémoire de Magister, Départ. De Biologie et écologie, Uni. de Batna, 125 p.
- [39] **LAFFITTE R., 1939** -Etude géologique de l'Aurès Bull. Serv. Géol. Algérie, N° 15,451p.
- [40] **Le magazine des journalistes scientifiques, juillet 2006**- La faim de l'eau; Uni. Saad Dahleb de Blida p.5.
- [41] **MUSY et Al., 2001** -Cours d'hydrologie appliquée. Edition HGA, Bucarest.
- [42] **OMS, 1994** -Directive pour la qualité de l'eau de besoin ; vol. I, recommandation.
- [43] **OUALI S., KHELLAFE A. et BADDARI K., 2007** -Etude des ressources géothermiques du sud algérien Centre de Développement des Energies Renouvelables, Uni. M'Hamed Bouguerra.
- [44] **OUALI S.**, Les sources Thermales en Algérie, Division Energie Solaire Thermique et Géothermie.
- [45] **REJSEK F., 2002** -Analyses des eaux, Aspects réglementaires et technique ; série : science et technique de l'environnement ; Dunod, 360p.
- [46] **RISI C., 2009** -*les isotopes stables de l'eau ; application à l'étude du cycle de l'eau et des variations du climat*, thèse de doc. Science de la terre Uni. De parisVI.
- [47] **RODIER J.**, -l'Analyse de l'eau, 9^{ème} édition, Dunod ; 1526 p.
- [48] **Thermo Fisher Scientific** -Gas Bench II, Operating Manual, Revision A-1118343.
- [49] **USGS**: Determination of the δ ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) of Water; Reston Stable Isotope Laboratory. Techniques and Methods. 10-C2.
- [50] **VALLES V., 1985** -*Etude et modélisation des transferts d'eau et des sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation*, Thèse Doc. De l'institut national polytechnique de Toulouse.
- [51] **VALLES V.**-Cours sur les eaux thermales université d'Avignon.

[52] VANDEGANS J., HOENIG M. -Spectrométrie d'absorption atomique Techniques de l'Ingénieur, traité Analyse et Caractérisation PE 2 825 Page 4.

[53] VILA J.M., 1977 -*La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens.* Thèse de doctorat Es Sciences Naturelles, Uni. De Paris VI. 665 p.

Site web:

[http:// web word.unesco.org/water/ihdb/glu/frdiceauth.htm](http://web.world.unesco.org/water/ihdb/glu/frdiceauth.htm); consulter le 12/04/2011.

<http://www.doctissimo.fr/htm/form/remforme/thermalisme/fo-2326-eaux-therm.htm>.le 07/03/2011.

[http:// www.ligne-balneo.com/ les eaux- thermales-html](http://www.ligne-balneo.com/les_eaux_thermales.html) ; le 07/03/2011

<http://www./absence/support/bin/reques/3Fcontact%3Dabg> ; le 07/03/2011

<http://alger-roi.fr/Alger/document-Algérien/document-sommaire.htm>; le 18/02/2011

<http://alger-roi.netr/Alger/cahiers-centenaire/Alger-touristique/algérie-touristique.htm> le:02/02/2011.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/thermalisme>; le 18/02/2011.

<http://www.pole-fomager-aoc-mc.org/doc/Basesmicrobiologie.pdf>; le 23/04/2012.

Annexes

Annexe -I-

**Tableau 1: Précipitation moyenne mensuelle et annuelle de la station de Khenchela
(1994-2010) en mm.**

Précipitation	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sept	oct.	nov.	déc.	P.moy. an.
1994	38	23	29	12	7	10	30	3	41	77	31	26	27,25
1995	98	1	24	42	3	95	16	58	129	38	21	18	45,25
1996	141	102	79	59	16	22	01	36	19	19	6	11	49,10
1997	27	9	17	29	54	9	22	38	73	50	75	55	38,17
1998	6	31	61	59	57	28	00	30	44	34	42	21	37,55
1999	48	14	23	21	64	30	17	86	26	42	89	56	43,00
2000	10	4,4	14,6	10,3	81	60	1,2	9,7	47,2	34,7	17	20,8	25,91
2001	17,8	15,4	4,3	32,4	97,4	1,4	6,5	16,5	81	26,6	38,7	19,4	29,78
2002	9,9	14,9	12,1	26,9	22,2	13,1	27,4	128,6	28	20	84,5	29,5	34,76
2003	110	66	26,2	88,8	17,6	41,7	11	5,9	37,9	81,8	19	44,3	45,85
2004	29	3,9	41,8	53,6	141,7	66,2	5,2	14,5	24,6	15	112,5	110,6	51,55
2005	5	43	35,9	36,4	14,9	46,1	10,8	19,9	42,2	43,2	24,8	46,4	30,72
2006	88,7	43,1	10,5	46,7	148,7	11	41,1	47	22,2	36,6	11,9	76,2	48,64
2007	8,1	17,4	103	76,7	30,4	38,1	12	20,7	122,4	16,8	13,4	49,1	42,35
2008	23,1	7,7	24,8	14,5	102,7	5,6	26,8	57,8	93,7	96,2	15,2	48,5	43,05
2009	145,3	17,8	74,9	145	53,4	6,7	20,7	29,7	72,7	17,9	3,6	23	50,86
2010	30,1	15	15,5	84	87,4	25,3	17	42,7	70,6	36,7	73,2	31,6	44,09
P.moy. mens.	49,12	25,21	35,10	49,23	58,73	29,95	17,65	37,88	57,32	41,66	39,87	40,38	478,69

Annexe -II-

**Tableau 2: température moyenne mensuelle et annuelle de la station de Khenchela
(1994-2010) en mm.**

Température	jan	fév.	mars	avril	Mai	Juin	juil.	aout	sept	oct.	nov.	déc.	T°.moy.an.
1994	6,7	7,8	9,7	10,3	20,4	23,1	26	28,2	22,4	16,2	12,5	7,9	15,93
1995	8,4	9,8	8,5	11,2	18,3	22,3	25,9	24,3	20,8	15,9	11,6	9,1	15,51
1996	8,5	5,9	9,3	11,9	16,6	19,6	24,9	26,5	20,5	14,9	11,9	9,7	15,02
1997	8,1	9,8	9,4	12,4	20,3	26,2	26,9	24,9	20,4	16,5	11,2	8,2	16,19
1998	6,7	7,9	9,2	13,9	16,4	23,5	27	26,8	23,2	15,1	10,3	6,2	15,52
1999	7,1	5,3	10,1	14,5	21,7	25,8	26,5	29,5	23,3	19,4	10,2	6,6	16,67
2000	4,3	8	11,4	15,8	20	22,2	27,1	26,3	22,1	15,6	12,4	9,2	16,20
2001	7,8	7,6	15,7	13,5	18,1	23,9	28,2	26,4	21,9	20,7	11	6,3	16,76
2002	6,3	9,1	11,8	14,3	18,7	24,2	26,2	25	20,8	17,7	11,6	8,8	16,21
2003	6,4	5,7	9,6	13,7	18,2	24	28,6	26,9	21,2	18,8	11,3	6,6	15,92
2004	6,7	9,3	11,3	12,4	14,9	21,1	25,5	27,3	20,8	20	9,1	6,8	15,43
2005	4,2	4,4	10,8	13,3	19,8	23,2	27,5	22,7	18,3	17,2	11,3	6,1	14,90
2006	4,3	6,4	11,2	15,9	20,05	24,1	25,5	24,5	20,4	9,5	12	7,1	15,08
2007	8,3	8,8	8,4	12,8	17,8	25	26,3	26,3	21,4	16,8	10,1	6,6	15,72
2008	7,2	8,1	10,2	14,7	18,7	22,3	28	26,5	21,7	16,2	9,1	5,8	15,71
2009	6,2	5,8	9,1	10,2	16,8	22,7	28,1	26	20	15,4	12,5	10,3	15,26
2010	7,4	9,7	11,9	14,9	16,2	22,7	26,3	26,4	21,2	16,4	11,1	8,8	16,08
T°.moy.mens.	6,74	7,61	10,45	13,28	18,41	23,29	26,74	26,15	21,20	16,61	11,13	7,65	15,77

Annexe -III-

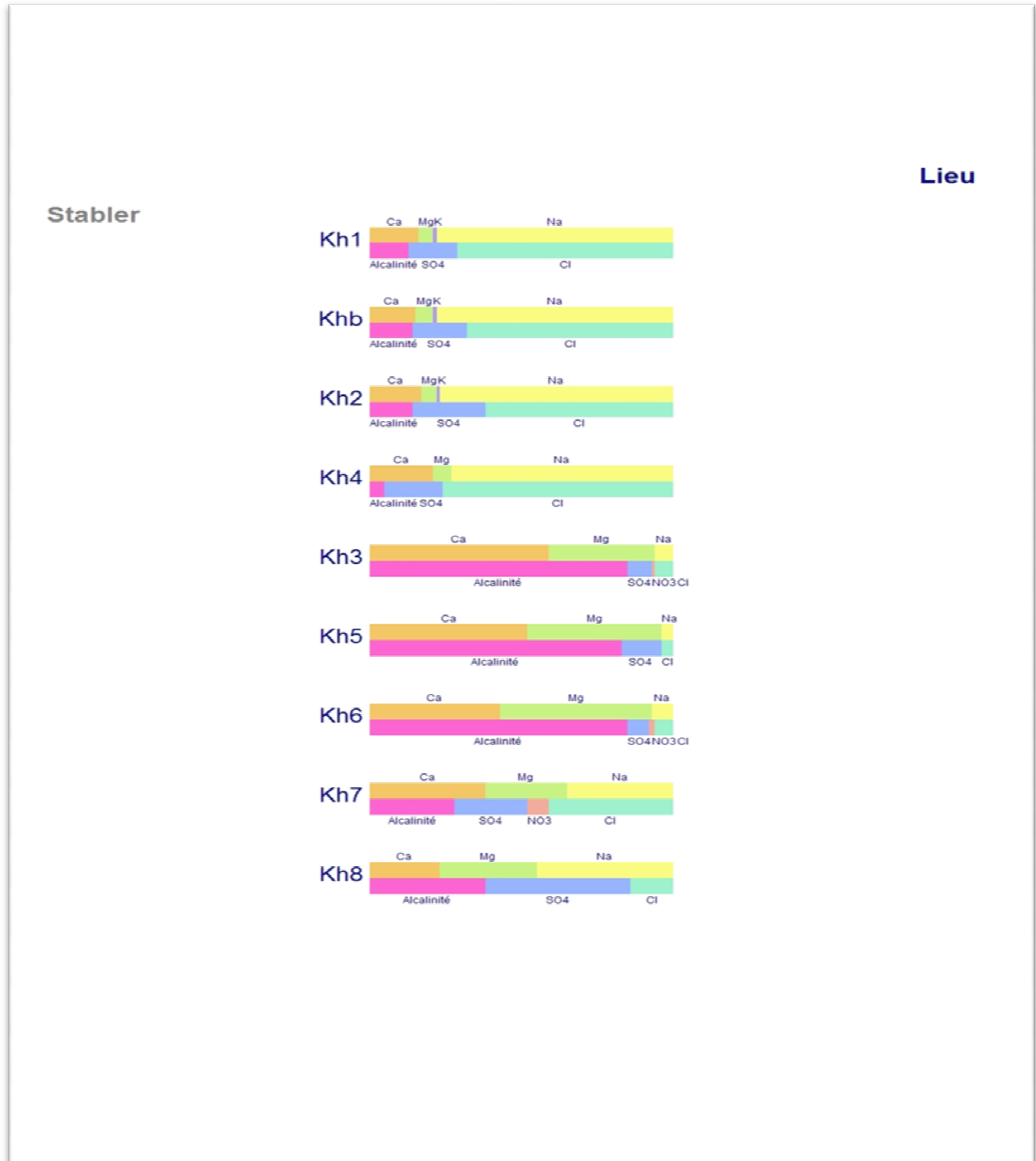


Fig. 1: Représentation sur diagramme de stabler des compositions en éléments majeurs des eaux de notre zone d'étude

Annexe -IV-

Les microorganismes recherchés :

1. Les champignons

Ils regroupent en réalité deux types de micro-organismes : les levures et les moisissures.

1/a. les levures

Etant donné leur grande capacité d'adaptation à de nombreux substrats, les levures sont très largement répandues dans l'environnement. Ce sont des champignons chez lesquels la forme unicellulaire est prédominante. La forme la plus fréquente est ovulaire ou sphérique. Elles sont classées par genres et espèces et sont regroupées elles aussi au sein de famille selon leur morphologie et leur mode de reproduction. On compte notamment parmi elles *Geotrichum candidum*, *Saccharomyces cerevisiae*.

1/b. les moisissures

Tout comme les levures, les moisissures peuvent être véhiculées par l'environnement et se retrouver dans les eaux. Ce sont des micro-organismes filamenteux qui sont disséminés par l'émission de spores.

2. Les coliformes totaux

Correspondent à des bacilles Gram négatif, non sporulé, oxydase négatif, aérobie et anaérobie facultatifs, capables de se multiplier en présence de sels biliaires et de fermenter le lactose avec production de l'acide et du gaz en 48h à une température de 35- 37°C.

Ils se répartissent en fait en deux catégories :

*Les germes d'origine fécale stricte : *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Klebsiella*, *serratia*.

*Les germes provenant d'autre sources environnementales (aquatique et tellurique) : *Enterobacter intermedium et amnigenus*, *Klebsiella terrigena*.

3. Les coliformes fécaux ou thermotolérants

Présentent les mêmes propriétés mais qui ils se développent à 44°C dont l'origine fécale est plus nette.

***Escherichia coli* présumé** : correspond à des coliformes thermotolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane à 44°C. cet indicateur est le plus spécifique d'une contamination fécale.

4. Des streptocoques fécaux ou Entérocoques

Bactéries Gram positif, sphériques ou ovoïdes, formant des chainettes, non sporulées, catalase négative, possédant l'antigène D, cultivant en anaérobiose à 44°C, et à pH 9.6, et capables d'hydrolyser l'esculine en présence de bile.

- Ils se répartissent en deux genres *Streptococcus* et *Enterococcus*.

5. Staphylocoques à coagulase positive

Définition

On entend par Staphylocoques à coagulase (+):

- ✓ Cocci à Gram (+)
- ✓ Isolées ou en grappes de raisin,
- ✓ Catalase (+) et coagulase (+)
- ✓ Se multiplie en 24 à 48 h à $36 \pm 2^\circ\text{C}$ sur un milieu sélectif Chapman au mannitol.

L'espèce type du genre est *Staphylococcus aureus*. Elle est pathogène et très redoutée.

Bactérie appartenant à la famille des Micrococcaceae (les staphylocoques), présentant une forme arrondie (coccus), non sporulé.

Résumé

L'étude hydrologique, biogéochimique et isotopique des eaux du versant Nord du massif des Aurès (Wilaya de Khenchela), nous a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif sur la réserve en eau des sources thermales et quelques sources d'eaux froides de la région.

La région de Khenchela est située au Nord de l'Algérie, au Sud-est du constantinois ; et au contrefort du mont des Aurès, Cette étude a pour objectif d'apporter des informations sur le mode de fonctionnement des systèmes aquifères des altitudes, l'origine de leur alimentation et enfin leurs composition chimique, isotopique et microbiologique et de voir si on pourra utiliser ces eaux à des fins sanitaires dans la cure de certaines maladies ou comme eau minérale de large consommation.

L'hydrochimie de cette zone semi-aride endoréique est marquée par les phénomènes de concentration des solutions et de salinisation sous l'influence de l'évaporation. Dans ce contexte les mécanismes responsables de la variation de la qualité chimique des eaux sont souvent nombreux: apports météoriques (pluie et évaporation), l'acquisition des éléments chimiques par dissolution ou l'altération des minéraux de l'aquifère. Il est nécessaire l'identification de la concentration de chaque élément chimique par rapport à la minéralité globale des eaux pour apprécier la diversité des mécanismes responsables des variations hydrochimique d'une région.

Mot clés : khenchela, Aurès, biogéochimique, hydrochimie, isotopique, sources thermales, sources d'eaux froides.

Abstract

The study hydrological, biogeochemical and isotopic waters of the north side of the Massif des Auras (Khenchela), allowed us to gain insight on the quantity and quality of the available water of hot springs and some sources cold waters of the region.

Khenchela region is located in northern Algeria, south-east of Constantine, and the foothills of Mount Auras, this study aims to provide information on the operating mode of the aquifer systems altitudes, the origin of their power and finally their chemical composition, isotopic and microbiological and see if we can use this water for sanitary purposes in the treatment of certain diseases or as wide mineral water consumption.

The hydrochemistry of the semiarid endothechia is marked by the phenomena of concentration and salinity of solutions under the influence of evaporation. In this context the

mechanisms responsible for the variation of the chemical quality of water are often many: meteoric inputs (rainfall and evaporation), the acquisition of chemical elements by dissolution or alteration minerals of the aquifer. It requires the identification of the concentration of each chemical element relative to the overall mineral waters to appreciate the diversity of mechanisms responsible for the hydro chemical variations between regions.

Keywords: Khenchela, Auras. Biogeochemistry, hydrochemistry, isotope, hot springs, cold springs.

الملخص

الدراسة الهيدروولوجية, البوجيوكيميائية, النضائية لمياه الواجهة الشمالية لجبال الأوراس (ولاية خنشلة). سمحت لنا باستخراج نظرة عامة على الحالة الكمية والنوعية على مخزون المياه للمنايع الحارة وبعض المنايع العذبة للمنطقة. تقع منطقة خنشلة في الشمال الجزائري و على الشمال الشرقي القسنطيني و على حائط جبال الأوراس, هدف هذه الدراسة هو تقديم معلومات على الطريقة الوظيفية لنظام المحتوي المائي للارتفاعات, و مصدر تمويها و أخيرا المكونات الكيميائية و النضائية و المكر وبيولوجية و استخلاص إمكانية استعمال هذه المياه في المعالجة الإشفائية لبعض الأمراض, أو كماء معدني واسع الإستهلاك. هيدروكيمياة هذه المنطقة النصف الجافة ذات المياه المحتبسة محددة بظواهر تركيز المحاليل و الملوحة بسبب التبخر تحت هذا المفهوم, الميكانيزمات المسؤولة على تغيير النوعية الكيميائية للمياه كثيرة منها: الإسهامات الجوية (الأمطار, التبخر), تحلل المواد الكيميائية عن طريق تحويل معادن المحتوي المائي, إذن من الضروري تحديد تركيز كل مادة كيميائية بالمقارنة مع التمدن الكلي للمياه من اجل تقييم تنوع الميكانيزمات المسؤولة على التغيرات الهيدروكيميائية لأي منطقة.

الكلمات الأساسية: خنشلة, الأوراس, البوجيوكيميائية, هيدروكيمياة, النضائية, المياه الحارة, المياه العذبة.

Résumé

L'étude hydrologique, biogéochimique et isotopique des eaux du versant Nord du massif des Aurès (Wilaya de Khenchela), nous a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif sur la réserve en eau des sources thermales et quelques sources d'eaux froides de la région.

La région de Khenchela est située au Nord de l'Algérie, au Sud-est du constantinois ; et au contrefort du mont des Aurès, Cette étude a pour objectif d'apporter des informations sur le mode de fonctionnement des systèmes aquifères des altitudes, l'origine de leur alimentation et enfin leurs composition chimique, isotopique et microbiologique et de voir si on pourra utiliser ces eaux à des fins sanitaires dans la cure de certaines maladies ou comme eau minérale de large consommation.

L'hydrochimie de cette zone semi-aride endoréique est marquée par les phénomènes de concentration des solutions et de salinisation sous l'influence de l'évaporation. Dans ce contexte les mécanismes responsables de la variation de la qualité chimique des eaux sont souvent nombreux: apports météoriques (pluie et évaporation), l'acquisition des éléments chimiques par dissolution ou l'altération des minéraux de l'aquifère. Il est nécessaire l'identification de la concentration de chaque élément chimique par rapport à la minéralité globale des eaux pour apprécier la diversité des mécanismes responsables des variations hydrochimique d'une région.

Mot clés : khenchela, Aurès, biogéochimique, hydrochimie, isotopique, sources thermales, sources d'eaux froides.

Abstract

The study hydrological, biogeochemical and isotopic waters of the north side of the Massif des Auras (Khenchela), allowed us to gain insight on the quantity and quality of the available water of hot springs and some sources cold waters of the region.

Khenchela region is located in northern Algeria, south-east of Constantine, and the foothills of Mount Auras, this study aims to provide information on the operating mode of the aquifer systems altitudes, the origin of their power and finally their chemical composition, isotopic and microbiological and see if we can use this water for sanitary purposes in the treatment of certain diseases or as wide mineral water consumption.

The hydrochemistry of the semiarid endothechia is marked by the phenomena of concentration and salinity of solutions under the influence of evaporation. In this context the mechanisms responsible for the variation of the chemical quality of water are often many: meteoric inputs (rainfall and evaporation), the acquisition of chemical elements by dissolution or alteration minerals of the aquifer. It requires the identification of the concentration of each chemical element relative to the overall mineral waters to appreciate the diversity of mechanisms responsible for the hydro chemical variations between regions.

Keywords: Khenchela, Auras. Biogeochemistry, hydrochemistry, isotope, hot springs, cold springs.