

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET
TECHNOLOGIE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : HYDRAULIQUE
URBAINE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Beyragued Affaf

Boudiaf Aicha

Intitulé

**CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DE LA
QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA
BASSE VALLEE DE LA SOUMMAM-BEJAIA**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. GHODBANE.M

Université de M'sila

Rapporteur

Mr.ADJISSLO

Université de M'sila

Président

Mr. DOUGHA .M

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciements

*Langage tout d'abord à dieu qui nous a donné la force
Pour terminer ce modeste travail.*

*Toutes nos infinies gratitudees à notre promoteur, Monsieur
GHODBAANE pour son encadrement et ses aides précieuses.*

*Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait
l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.*

.

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du
département: hydraulique urbaine*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou
de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici
l'expression de notre profondes gratitudees et respects.*

Dédicace

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon coeur, ma vie et mon bonheur ; **maman** que j'adore*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi **mon père**.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à ma chère soeur **SARRA** et mon chère frère **MOHAMMED***

Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et en couragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de coeur.

AICHA

Dédicace

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la
flamme de mon coeur, ma vie et mon bonheur ; **maman**
Que j'adore*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien
moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours
sacrifié pour me voir réussir, à toi **mon père**.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour,
à mon mari, mes chères sœurs et mon chère frère **Mounir** et
mes filles **Raním** et **Amaní***

*Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en
premier lieu pour leurs conseils, aides, et en couragements.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui
étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient
durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables
amis, collègues d'étude, et frères de coeur.*

AFFAF

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Chapitre I : présentation de la basse vallée de la Soummam

I.1_ Situation géographique	4
I.2_ aperçu socio-économique	5
I.2.1 Agriculture	5
I.2.2 Industrie	5
I.2.3 tourisme.....	6
I.3_ Population	6
I.4_ chevelu hydrographique	6
I.5_ aspect géomorphologique	6
I.5.1 description du bassin versant	6
I.5.2 Analyse morphologique	7
I.5.2 .1_ Caractéristiques de forme	7
I.5.2 .2_ Les dimensions du rectangle équivalent.....	8
I.5.3 Altimétrie et Courbe hypsométrique	9
I.5.3 .1_ Hypsométrie du sous bassin	9
I.5.4 Les indices des pentes.....	11
I.5.4 .1_ Indice de pente globale (Ig)	11
I.5.4 .2_ Indice de pente de Roche (Ip).....	11
I.5.5 Dénivelée spécifique (Ds)	12
I.6_ Les caractéristiques du réseau hydrographique	13
I.6.1 Densité de drainage (Dd)	13
I.6.2 Temps de concentration (Tc)	13
I.6.3 Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc)	14
I.7_ context climatique.....	16
I.7.1 précipitation	16
I.7.1.1_ pluviometrie moyenne interannuelle	17
I.7.2 température de l'air	18
I.8_ Le climat de la région	19
I.8.1 Indice de De. Martonne	19
I.8.2 Le diagramme de L. Emberger.....	21
I.8.3 Méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls	22
I.8.4 Méthode d'Euverte	22
I.9_ Estimation des paramètres du bilan hydrologique	23
I.9.1 Evapotranspiration potentielle ETP.....	23
I.9.1 .1_ Calcul de l'ETP suivant la formule de C.W. Thornthwaite	23
I.9.2 Evapotranspiration réel	24
I.9.2 .1_ Méthode de Turc	24
I.9.2 .2_ Méthode de Coutagne.....	25
I.10_ Bilans hydrologiques	25
I.10.1 Bilan hydrologique de Thornthwaite	25
I.11_ Calcul du ruissellement	28
I.12_ Calcul de l'infiltration	29
I.13_ conclusion	29

CHAPITRE II : aperçu sur la géologie et L'Hydrogéologie de la région

II.1_ Introduction.....	31
-------------------------	----

II.2_CADRE GEOLOGIQUE.....	31
II.3_Géologie générale du bassin versant.....	31
II.4_ Lithologie.....	33
II.4.1. Le Trias.....	33
II.4.2. Le Jurassique.....	33
II.4.3. Le Crétacé	34
II.4.4 LE Néogène.....	34
II.4.4.1_ Le miocène.....	34
II.4.4.2_Le pliocène.....	35
II.4.5. Le quaternaire.....	35
II.5_ le domaine des flyschs.....	36
II.5.1 Le flysch Massylien.....	36
II.5.2 LE FLYSCH NUMIDIEN.....	36
II.6_La tectonique.....	36
II.6.1 Phase néocomienne.....	36
II.6.2 Phase sénonienne.....	37
II.6.3 Phase éocène.....	37
II.6.4 Phase miocène.....	37
II.6.5 Tectonique post-nappes.....	37
II.6.6 Tectonique récente.....	37
II.7_Cadre hydrogéologique	38
II.7.1.Unité de la vallée de la Soummam.....	38
II.8_Ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam.....	38
II.8.1.Evaluation des potentialités en eau souterraine	39
II.8.2.Mobilisation des eaux souterraines	39
II.9_ Les cartes piézométriques.....	41
II.9.1. Etude piézométrique.....	41
II.9.1.1_Interprétation de carte piézométrique.....	41
II.10_ Conclusion.....	42

Chapitre III: Introspection de la qualité des eaux par les

Méthodes statistiques

III .1_ Introduction.....	44
III .2_ Matériels et moyens d'analyse.....	44
III .3_ Etude des paramètres chimiques.....	45
III.3.1 Répartition et évolution des éléments majeurs.....	45
III .4_ Cartographie hydrochimiques.....	47
III.4.1 Le calcium (Ca^{++}).....	47
III.4.2 Le magnésium (Mg^{++}).....	47
III.4.3 Le sodium (Na^+).....	48
III.4.4 Le potassium (K^+).....	49
III.4.5 Les chlorures (Cl^-).....	50
III.4.6 Les sulfates (SO_4^{--}).....	50
III.4.7 Les bicarbonates (HCO_3).....	51
III.4.8 Les nitrates (NO_3^-).....	52
III .5_ Qualité chimique des eaux.....	52
III.5.1 Potabilité des eaux.....	52
III.5.1.1_ Selon l'O.M.S.....	52
III.5.1.2_ Degré hydrotimétrique total (D.H.T).....	53
III.5.2 Aptitude à l'irrigation.....	54
III.5.2.1_ Salinité.....	54
III.5.2.2_ Eaux à forte teneur en sodium	55
III.5.2.3_ Classification de Wilcox.....	55
III.6_ Classification chimiques des eaux souterraines.....	56
III.6.1 Classification des eaux souterraines selon PIPER	57
III.6.2 Classification des eaux souterraines selon Schoeller-Berkaloff.....	58
III.7_ Etude statistique des données hydrochimiques.....	59
III.7.1 Statistique descriptive	59

III.7.2 étude des rapports caractéristiques.....	65
III.7.3 L'indice d'échange de base au sein des aquifères (i.e.b).....	66
III.7.4 Analyse en composantes principales (ACP).....	68
III.7.4.1_ Principe de l'ACP.....	68
III.7.4.2_ Application de l'ACP.....	68
III.7.5 L'analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH).....	72
III.7.5.1_ Principe de la méthode.....	72
III.7.5.2_ Avantages de la classification ascendante hiérarchique	73
III.7.5.3_ Application de CAH sur les résultats d'analyses de la basse soummam.....	73
III.7.6 Analyse factorielle des correspondances (AFC).....	75
III.8_ comparaison de déférentes méthodes statistiques.....	77
III.9_ conclusion.....	77
CONCLUSION GENERALE.....	80

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
I.1	Paramètres géométriques du sous bassin versant	9
I.2	Répartition des tranches d'altitudes	9
I.3	Classification de l'ORSTOM	13
I.4	Récapitulatif des paramètres Morphométriques.	16
I.5	Précipitations moyennes mensuelles interannuelles en mm en (1988-2004).	17
I.6	Moyennes mensuelles et interannuelles température en 1988-2004	18
I.7	Indice d'aridité de De. Martonne	20
I.8	Classement en fonction de l'indice d'aridité de De. Martonne.	20
I.9	Paramètre de diagramme ombrothermique	22
I.10	Détermination de régime climatique par la méthode d'Euverte.	23
I.11	Calcul de l'ETP selon C.W. Thornthwaite à la Station de Béjaia.	24
I.12	Valeurs de l'ETR selon la méthode de coutagne	25
I.13	Calcul du bilan hydrologique (Station de Béjaia) par ETP-THORNTHWAIT	26
I.14	Le ruissellement selon la méthode de Tixteront et Berkaloff	28
I.15	récapitulation des différents paramètres du bilan hydrologique	29
II.1	Potentialités en eau par unité hydrogéologique (Source PNE (2004).	39
II.2	niveau piézométrique de point d'eau.	40
III.1	Résultats des analyses d'eau 2011	45
III.2	les éléments et leurs Origine	46
III.3	Normes de potabilité de l'O.M.S.	53
III.4	Dureté des eaux en (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)	54
III.5	classification de conductivité	54
III.6	calcul de SAR	55
III.7	Résultats statistiques des variables chimiques des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam.	60
III.8	Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson.	61
III.9	Matrice de corrélation (Pearson (n))	62
III.10	calcul d'IBE au différent forage	67
III.11	Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux	69
III.12	Corrélations entre les variables et les facteurs	69
III.13	Coordonnées des observations	71
III.14	la classification de SAR	82

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
I.1	Situation de la vallée de Soummam dans la willaya de Béjaia	5
I.2	Forme du sous bassin basse Soummam	8
I.3	La Courbe Hypsométrique	10
I.4	Le Réseau hydrographique de la basse Soummam	14
I.5	La carte hypsométrique de la basse Soummam	15
I.6	Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien A.N.R.H, 1993.	17
I.7	Variation interannuelle des précipitations en (1988-2004).	18
I.8	Variation mensuelle des températures en (1988-2004).	19
I.9	Abaque de l'indice d'aridité de De.Martonne.	20
I.10	Climagramme de L. EMBERGER	21
I.11	DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE (BANOULS-GAUSSEN).	22
I.12	Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de THORNTHWAITE de la station de Béjaia 1988-2004.	27
II.1	carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte géologique nord Constantine de 1/500 000).	32
II.2	Carte hydrogéologique de la willaya de Béjaia.	33
II.3	Zones d'études géophysiques et hydrogéologiques.	38
II.4	point d'eau de la basse vallée de Soummam.	40
II.5	Les niveau piézométrique de basse vallée de la Soummam.	41
III.1	Carte du calcium (Ca^{++}).	47
III.2	Carte du magnésium.	48
III.3	Carte du sodium	49
III.4	Carte du potassium.	49
III.5	Carte des chlorure	50
III.6	Carte des Sulfates.	51
III.7	Carte des Bicarbonates	51
III.8	Carte des Nitrates.	52
III.9	Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR.	56
III.10	Représentation des eaux souterraines sur le diagramme de PIPER	57
III.11	Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff	58
III.12	Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff (suite).	59
III.13	Droites des régressions de calcium en fonction de (Na^{++}) et (Cl^{-})	63
III.14	Droites des régressions de magnésium en fonction de (Cl^{-}), (K^{+}) et (Na).	63
III.15	Droite de régression de magnésium en fonction de (SO_4^{--})	64
III.16	Droite de régression de sodium en fonction de (Cl^{-}).	64
III.17	Droite de régression de potassium en fonction de (SO_4^{--}) et (Cl^{-})	65
III.18	Droite de régression de potassium en fonction de (SO_4^{--})	65
III.19	Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques	66
III.20	Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2)	70
III.21	Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F3).	70
III.22	Répartition des individus dans le plan F1 – F3	72
III.23	Dendrogrammes des faisceaux des variables et des échantillons analysés	74
III.24	graphique symétrique.	76

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تحديد نوعية المياه الجوفية للسهل السفلي لوادي الصومام و لهذا الغرض واستنادا على حصيللة القياسات و معطيات التحاليل الكيمائية للمياه الجوفية لهذه المنطقة التي قامت بها مصالح شركة الجزائرية للمياه لسبعة عشرة (17). التي تسنى لنا من خلالها معرفة الخصائص الكيمائية لهذه المياه من أجل تحديد مدى صلاحيتها لاستخدامها للشرب والسقي.

هذه المساهمة في معرفة نوعية المياه الجوفية لهذه المنطقة أنجزت باستعمال المخططات البيانية بتطبيق (Piper et Schoeller) وكذا التحليلات الإحصائية بطرق مختلفة على هذه النتائج، مثل طريقة التحليل بالتصنيف

التصاعدي (CAH) ، التحليل التوافقي (A FC) و التحليل للمركبات الأساسية (ACP) بواسطة البرنامج (XLSTAT2016).

Résumé

L'objectif de ce travail est de déterminer la qualité des eaux souterraines de la Basse vallée de la Soummam- Bejaia. A cet effet, nous sommes basés sur des mesures et des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de cette région, effectuées par les services de la société de l'Algérienne des eaux portant sur 17 forages. Ce qui permet de caractériser le chimisme des eaux souterraines en vue de leur utilisation dans l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation.

Cette contribution à la connaissance de la qualité des eaux souterraines de la Basse vallée de la Soummam a été réalisée par l'introspection des résultats des analyses chimiques des échantillons d'eau prélevés en utilisant les diagrammes chimiques (Piper et Schoeller) et l'application des analyses statistiques par des différentes méthodes; telle que l'Analyse en Composante Principale (ACP), Classification ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), a l'aide du logiciel statistique XLstat 2016.

Abstract:

The objective of this work is to determine the quality of groundwater of the Low valley Soummam- Bejaia-. For this purpose, we are based on measurements and physico-chemical analysis of groundwater of this area, made by the services of the company of Algerian water relating to 17 samples. What made it possible to characterize the chemistry of the groundwater for use in the drinking water supply and for the irrigation.

This contribution to the knowledge of the water quality groundwater of the Low valley Soummam, was made by the introspection results of the chemical analysis of the water samples taken by using the chemical diagrams (Piper and Schoeller) and the application of the statistical analysis by various methods; such as Analysis in Principal Component (APC), Hierarchical Ascendant Classification (HAC) and Factorial Analysis of Correspondences (AFC), Using the XLstat 2016 statistical software.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau souterraine est une source d'approvisionnement très importante à des fins de consommation dans la plupart des régions du monde surtout où il y a des faibles précipitations. Elle représente un pourcentage important de l'eau potable dans les zones rurales, arides et semi arides où la population n'est pas concentrée et où l'inexistence des infrastructures nécessaires pour traiter ou transporter les eaux de surface. Les eaux souterraines jouent également un rôle important dans l'agriculture, à la fois pour l'arrosage des cultures et pour l'irrigation des cultures durant les saisons sèches.

La qualité des eaux souterraines dépend des divers constituants chimiques et leurs concentrations, qui sont principalement dérivés des données géologiques des aquifères en particuliers. Les mesures physico-chimiques effectuées sur les forages captés vont permettre de distinguer les diverses classes d'eau selon leurs faciès chimiques et pour but aussi d'analyser ces paramètres par différentes méthodes statistiques tel que l'analyse par composantes principales (ACP) , la classification ascendante hiérarchique (CAH) appliquées et l'analyse factorielle de correspondant (AFC)

Ces méthodes sont de principe purement statistique et mathématique permettant de classer et regrouper les forages qui ont les mêmes éléments physico-chimiques. L'analyse par composantes principales (ACP) basée sur divers analyses statistiques notamment l'analyse des individus, variables, et l'étude de corrélations entre les variables suivant les axes principaux qui cumulent plus d'information de l'échantillon traité. La classification ascendante hiérarchique dont le principe est d'étudier la dissimilarité et le regroupement entre deux objets où paramètres dont le groupement minimise le critère d'agrégation et permet de former des sous classes ensuite la dissimilarité entre celles – ci. Cette opération est faite plusieurs fois jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

La basse vallée de la Soummam, située dans la wilaya de Bejaia, contient une plaine alluviale qui s'est développée le long de l'Oued Soummam et ses affluents. Cette plaine est comptée parmi les principaux aquifères côtiers de l'Algérie et recèle la seule ressource en eau disponible sur place, provenant des eaux souterraines peu profondes. Cette disposition favorable à l'exploitation par pompage a été l'un des atouts majeurs du développement socio-économique qu'a connu la région. Par ailleurs, la multiplication des pompages a engendré une baisse

significative de ces réserves. D'autre part, les eaux souterraines de la basse Soummam sont soumises à des pressions polluantes, tant industrielles qu'agricoles ou encore urbaines. Afin de donner un aperçu scientifique sur l'état actuel de la nappe de la basse vallée de la Soummam, du point de vue qualitatif et quantitatif, nous avons proposé une étude intitulée : Contribution à la connaissance de la qualité des eaux souterraines de la basse vallée de Soummam-Bejaïa.

L'objectif de cette étude est de connaître le comportement hydrodynamique de la nappe alluviale de la basse Soummam d'une part, et la qualité de l'eau souterraine d'autre part.

Le présent manuscrit se compose de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons la basse vallée de soummam dans lequel nous avons abordé la situation géographique et déférentes paramètre climatologique intervenant a cette région ;

Dans le deuxième chapitre, nous avons apporterons un aperçu sur la géologie et le hydrogéologie de la région ;

Dans le troisième chapitre, sera consacré à l'étude de l'impact de Introspection de la qualité des eaux souterraines par les méthodes statistiques ;

Finalement, nous donnerons une conclusion générale de cette étude, dans laquelle, nous mettrons en évidence les résultats auxquels nous avons abouti, d'autre part nous proposerons sur la base de ces résultats, des recommandations adéquates pour l'utilisation et préservation de cette ressource.

CHAPITRE I

Présentation de la basse vallée de la
SOUMMAM

Chapitre I : présentation de la basse vallée de la Soummam

I.1_ Situation géographique :

La vallée de la Soummam se situe à environ 230 km à l'Est d'Alger et appartient administrativement à la wilaya de Bejaia. Troisième fleuve d'Algérie, situé à la charnière de la Basse et de la Haute Kabylie, l'oued Soummam est formé de la confluence de l'oued Sahel qui descend des montagnes de Djurdjura et du plateau de Bouira, et de l'oued Boussellem qui descend du plateau Sétifien. Il se jette dans la mer Méditerranée à Béjaia après un cours de 80 km environ orienté Sud- Ouest – Nord-est. La basse Soummam, c'est-à-dire la partie du bassin comprise entre Sidi Aïch et l'embouchure.

Du fait de l'allongement de la vallée du Sud-Ouest au Nord-est, il devient plus convenable de fournir les coordonnées géographiques des deux extrémités du territoire, notamment l'amont et l'aval de l'oued Soummam, de la confluence de l'oued Boussellem et l'oued Sahel (amont) à l'embouchure (aval) :

- A l'amont (Akbou) : Longitude : 4° 32' 45'' Est ; Latitude : 36° 47' 17'' Nord.
- A l'aval (embouchure) : Longitude : 05° 04' 41'' Est ; Latitude : 36° 43' 36'' Nord.
- Au centre : Longitude : 5° 00' 00'' Est ; Latitude : 36° 42' 16'' **[02]**.

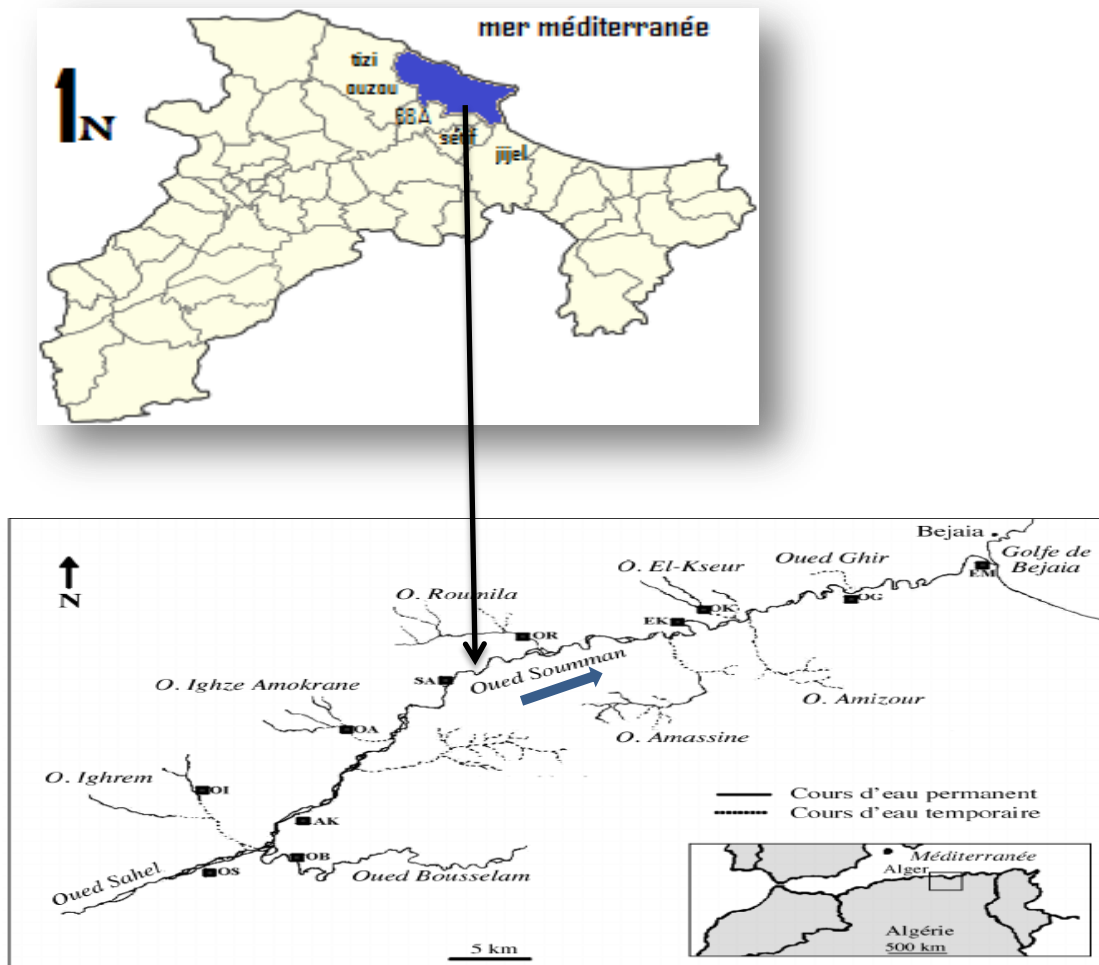


Fig. I.1 : Situation de la vallée de Soummam dans la willaya de Bejaia.

I.2_ aperçu socio-économique :

La vallée de Soummam est une région à vocation agricole, industrielle et touristique [02]

I.2.1 Agriculture :

Les pratiques agricoles traditionnelles basées sur l'entretien de vergers de fruitiers (oliviers essentiellement) et de petites parcelles de maraîchage de subsistance familiale, développés à la périphérie des zones habitées. La fertilité de ces sols confère au secteur de l'agriculture des aptitudes à une exploitation intensive (irrigation, mécanisation) dans le domaine du maraîchage, des agrumes, des fourrages et dans les élevages bovins laitiers et avicoles.

I.2.2 Industrie :

Zone industrielle de Taharacht Akbou, celles de la zone industrielle d'Ouzellaguen et celles des 47 stations de lavage et graissage ainsi que des fabricants de carrelage. outre l'unité de Alfaditex au sidi Aïch dans le textile

A la périphérie de ces agglomérations s'est développée des zones industrielles activant essentiellement dans l'agroalimentaire, le textile et l'extraction des granulats alluvionnaires (sable et graviers). Le couloir de la vallée est traversé par un réseau routier dense et une ligne ferroviaire Béjaia-Alger.

I.2.3 tourisme:

une situation géographique privilégiée avec une côte de 100 Km de long, son golf, ses montagnes couvertes de forêts et sa végétation très denses, ses musées, ses grottes et ses monuments sont des atouts certains pour un développement touristique d'envergure régionale, nationale et internationale. Aussi des sources d'eau naturelle comme IFRI et sources thermales à SIDI YAHIA, SILLAL et KIRIA sont recensées dans les massifs boisés avec comme propriétés thérapeutiques avérées le traitement des maladies pulmonaires, les maladies de la peau et les rhumatismes.

I.3_ Population :

La population de la vallée de la Soummam est dense (150 à 300 habitants au km²) et la majorité est regroupée dans les villages de la montagne. Le nombre des habitants des communes qui sont en relation avec l'oued Soummam est de 490423 habitants.

I.4_ chevelu hydrographique :

La vallée de l'oued Soummam est drainée par un réseau hydrographique dense, composé de nombreux cours d'eau permanents et intermittents dont l'oued Soummam représente le collecteur principal. Les principaux affluents de l'oued Soummam comme ceci :

En rive gauche on a : Oued Imoula, Oued Ighzer Amokrane, Oued Remila ,Oued El Kseur , Oued Ghir [01]

En rive droite on a : Oued Seddouk , Oued Amassine

I.5_ aspect géomorphologique :

I.5.1 description du bassin versant :

La basse vallée de oued Soummam se situe à la partie aval de oued Soummam Béjaia –sidi aiche , il est situé dans la partie Nord- East de l'Algérie sa position exacte est définie par l'espace se trouvant entre les méridiens 5.09° East et 4.57° ouest et les parallèles 36.76° nord et 36.48° Sud, il est limité par les chaînes montagneuses du Djurdjura et ses contreforts qui

s'étendent jusqu' à la mer au Nord, que s'arrêtent a quelque kilomètre de la mer la basse vallée le plus abrupt, est souvent border de terrasse alluviales fertiles[01].

I.5.2 Analyse morphologique :

I.5.2.1_ Caractéristiques de forme :

Le temps de concentration des eaux de surface dans un réseau de drainage est lié à l'aide de la formule suivante:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \Rightarrow \quad K_c = 0.28 \frac{146.3}{\sqrt{775.2}} = 1,47$$

Avec :

P : le périmètre en km et A : la surface en Km²

Selon la classification suivante:

$K_c \leq 1$	—————→	Bassin versant de forme circulaire.
$K_c = 1,12$	—————→	Bassin versant de forme carrée.
$K_c > 1,12$	—————→	Bassin versant allongé.

Notre bassin versant a une forme allongée (**Fig. I.2**)

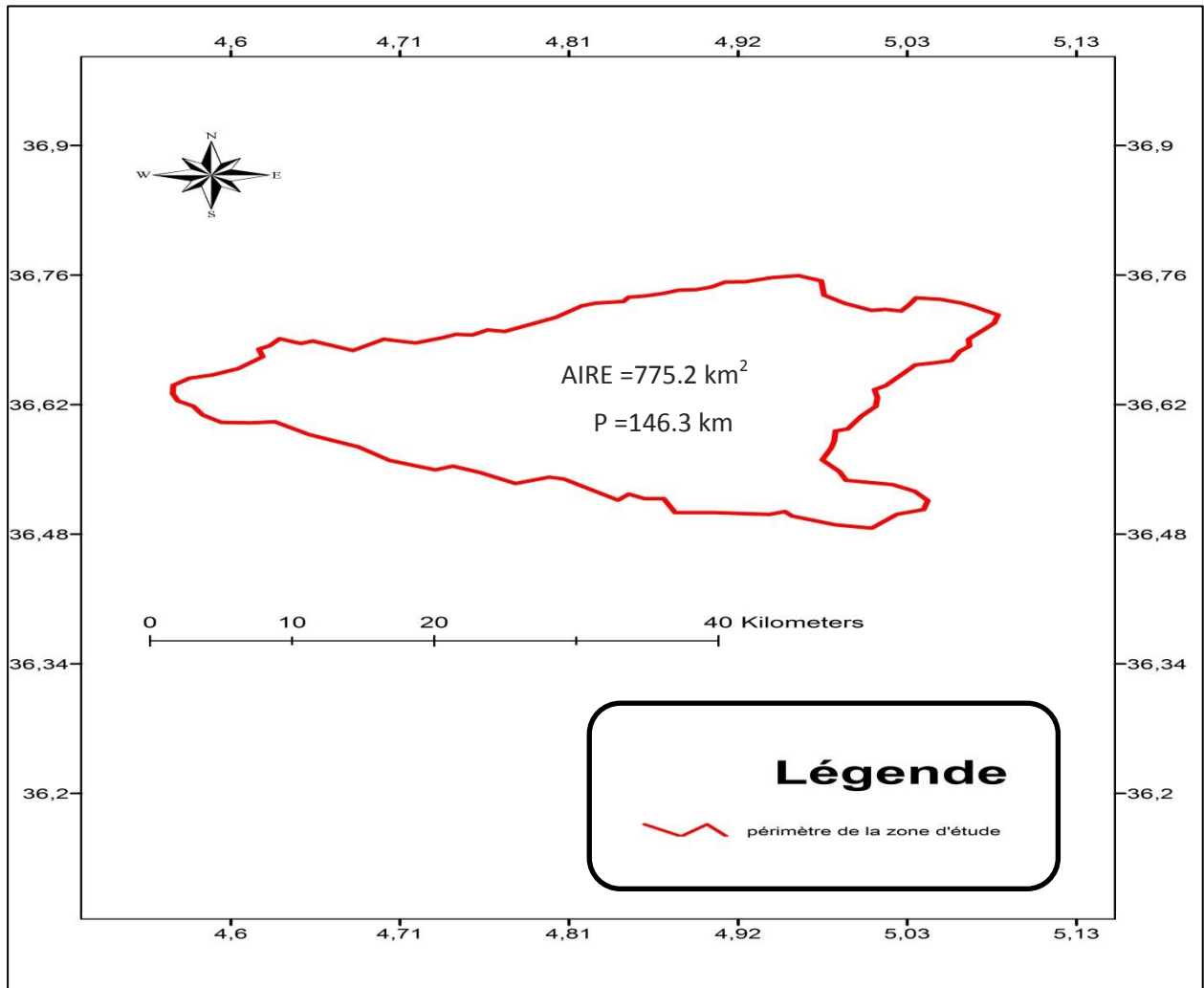


Fig. I.2 : Forme du sous bassin basse Soummam.

I.5.2.2_ Les dimensions du rectangle équivalent :

Afin de comparer les bassins versant entre eux, L. Roche a établi en 1963 deux relations relatives aux dimensions du rectangle équivalent dont les dimensions sont

Données par les relations suivantes :

$$L = \sqrt{A} \frac{K_c}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$I = \sqrt{A} \frac{K_c}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Avec : L : Longueur du rectangle équivalent en Km ;

I : Largeur du rectangle équivalent en Km ;

K_C : Indice de compacité ;

A : Superficie du bassin versant en Km^2 ;

Alors : L = 60.21Km et I = 12.87Km

I.5.3 Altimétrie et Courbe hypsométrique :

I.5.3 .1_Hypsométrie du sous bassin :

La topographie du bassin joue un rôle très important en hydrologie, elle conditionne le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

Les résultats d'une telle application sont donnés dans les tableaux suivants :

Tableau.I.1 : Paramètres géométriques du sous bassin versant.

Paramètre	Unité	valeurs
A	(km ²)	775.2
P	(km)	146.3
K _c	/	1.47
L	(km)	60.21
I	(km)	12.87

Tableau.I.2 : Répartition des tranches d'altitude.

tranche d'altitude Hi (m)	hauteur moyenne (m)	surface partielle Si (km ²)	surface cumulée Si (km ²)	surface partielle Si(%)	surface cumulée Si(%)
>1500	1500	5	5	0,64	0,64
1400-1500	1450	6	11	0,77	1,41
1300-1400	1350	7	18	0,90	2,32
1200-1300	1250	9	27	1,16	3,48
1100-1200	1150	12	39	1,55	5,03
1000-1100	1050	25	64	3,22	8,25
900-1000	950	37	101	4,77	13,02
800-900	850	42	143	5,42	18,44
700-800	750	50,05	193,05	6,46	24,90
600-700	650	46,8	239,85	6,04	30,94
500-600	550	55,2	295,05	7,12	38,06
400-500	450	74,23	369,28	9,58	47,63
300-400	350	84,97	454,25	10,96	58,59
200-300	250	101,1	555,35	13,04	71,63
100-200	150	97,75	653,1	12,61	84,24
0-100	50	122,1	775,2	15,75	100
totale bassin	/	775,2	/	100	/

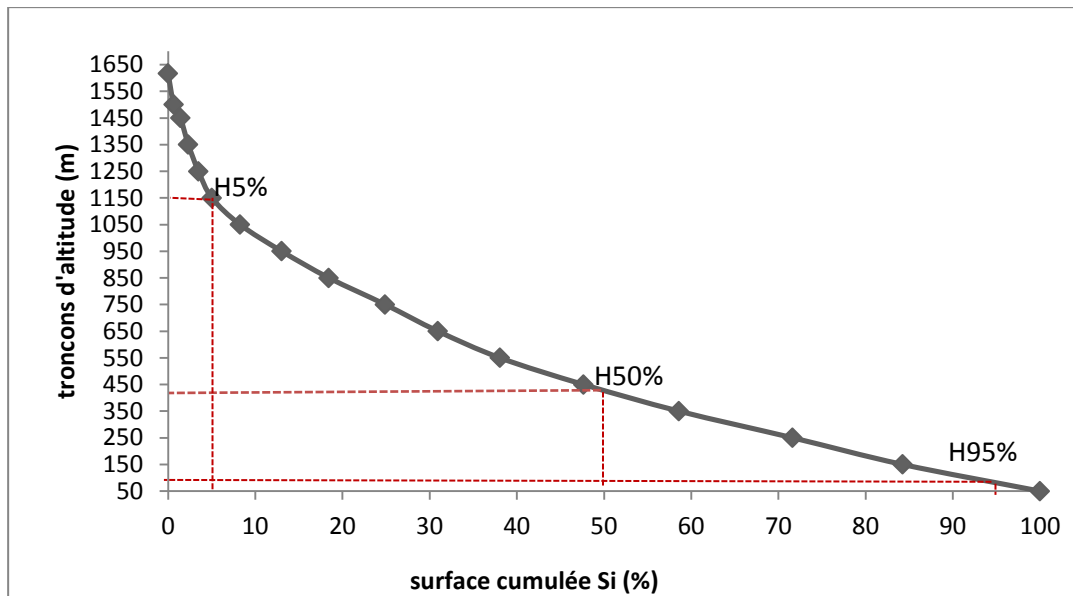


Fig. I.3: La Courbe Hypsométrique.

La courbe hypsométrique met en évidence trois zones distinctes :

- La première zone avec une pente relativement forte due aux reliefs.
- La deuxième zone une pente douce due aux piémonts.
- Une troisième zone à faible pente relative à la dépression.

Altitudes caractéristiques :

La courbe hypsométrique (**fig. I.3**) permet de déterminer les valeurs caractéristiques suivantes:

- **Altitude maximale (Hmax)** : l'altitude la plus élevée est de l'ordre de 1616,92 m.
- **Altitude minimale (Hmin)** : l'altitude minimale est de l'ordre de 0m.
- **Altitude moyenne (Hmoy)** : Elle correspond à l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique, c'est le rapport du volume montagneux ($V = \sum Si \cdot Hi$) du bassin versant par sa surface totale (St) peut être calculée par la formule suivante :

$$H \text{ moy} = \frac{\sum Si \cdot Hi}{St}$$

Avec :

H_i : altitude moyenne de chaque classe d'altitude en mètre.

Si : surface partielle des tranches d'altitude en Km^2 .

St : Surface totale du sous bassin en Km². ce qui ne permet d'avoir une $H_{moy} = 458,34m$.

L'altitude médiane $H_{50\%}$ correspond à 50% de l'altitude sur la courbe hypsométrique soit :

$$H_{50\%} = 428,39m.$$

Comparant l'altitude moyenne à l'altitude médiane $H_{moy} > H_{50\%}$ ce qui montre une dissymétrie des altitudes à l'échelle du sous bassin versant.

❖ Dénivelée simple (D) :

Sur la courbe hypsométrique tracée, on distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayants 5% et 95% de surface totale du sou bassin versant, la dénivelée simple est donc égale à :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1150 - 81,71 = 1068,29m$$

I.5.4 Les indices des pentes :

I.5.4 .1_ Indice de pente globale (Ig) :

L'indice de pente globale est déterminé à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90% de l'aire du sous bassin. Cet indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Avec :

D : dénivelée simple en (m).

L : longueur du rectangle équivalent (km).

Ig : Indice de pente globale, d'où $I_g = 17.74$ m/ km.

I.5.4 .2_ Indice de pente de Roche (Ip) :

L'indice de pente de roche est calculé par les formules suivantes :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i d_i} \quad \text{Ou :} \quad I_p = \sqrt{08 / I_g}$$

Avec :

Ig : Indice de pente globale.

Ip : Indice de pente de roche.

L : longueur du rectangle équival.

ai : surface partielle entre deux courbes de niveau.

di : l'équidistance entre deux courbe de niveaux.

Nous obtenons : Ip = 0,67 m/km

I.5.5 Dénivelée spécifique (Ds) :

L'indice Ig décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction de la notion de dénivelée spécifique calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Ds = \frac{D}{L} \sqrt{A}$$

Donc :
$$Ds = 17,74\sqrt{775,2} = 493,92$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelée spécifique de la basse vallée Soummam se trouve dans la classe R6 : caractérisée par un relief fort (**Tableau.I.3**).

Tableau.I.3: Classification de l'ORSTOM.

R1	Relief très faible	05 < Ds < 10m
R2	Relief faible	10 < Ds < 25m
R3	Relief assez faible	25 < Ds < 50m
R4	Relief modéré	50 < Ds < 100m
R5	Relief assez fort	100 < Ds < 250m
R6	Relief fort	250 < Ds < 500m
R7	Relief très fort	500 < Ds < 750m

I.6_ Les caractéristiques du réseau hydrographique :

I.6.1 Densité de drainage (Dd) :

La densité de drainage peut donner un aperçu sur la lithologie du bassin versant et permet de comparer l'écoulement superficiel au niveau de plusieurs bassins. Elle est donnée par la relation

suivante :

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n Li}{A} \text{ (km/ km}^2\text{)}$$

Li : longueur des talwegs (en km) et A : la superficie du bassin (en km²).

D'où :

$$Dd = 0,38 \text{ km/ km}$$

I.6.2 Temps de concentration (Tc) :

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe dans le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Il est exprimé par la formule de Crandotti qui a la forme suivante :

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.54}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

A : Superficie du sous bassin	= 775,2 km ² .
Lp : longueur du talweg principale	= 52,8km.
Hmoy : Altitude moyenne	=458,34 m.
H min : Altitude minimale	= 0 m.
Nous Obtenons alors :	Tc = 6,59 heures.

I.6.3 Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc) :

Elle est donnée par l'expression suivante:

$$Vc = \frac{Lp}{Tc}$$

Avec : Vc : Vitesse d'écoulement de l'eau en m/s.

Lp : Longueur du talweg principal : 52,8km = 52800 m.

Tc : temps de concentration : 6.59heures = s.

Donc : $vc = \frac{52800}{23724} = 2,23 \text{ m/s}$

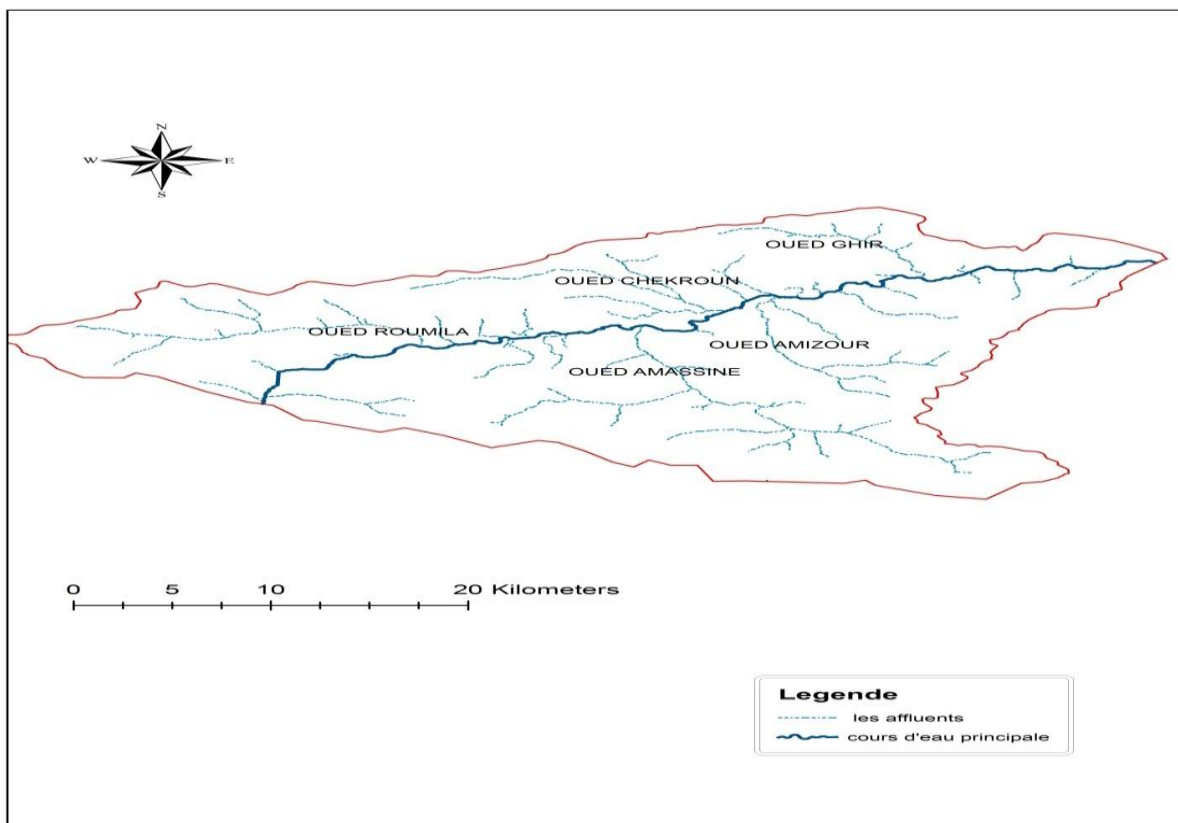


Fig. I.4: Le Réseau hydrographique de la basse Soummam.

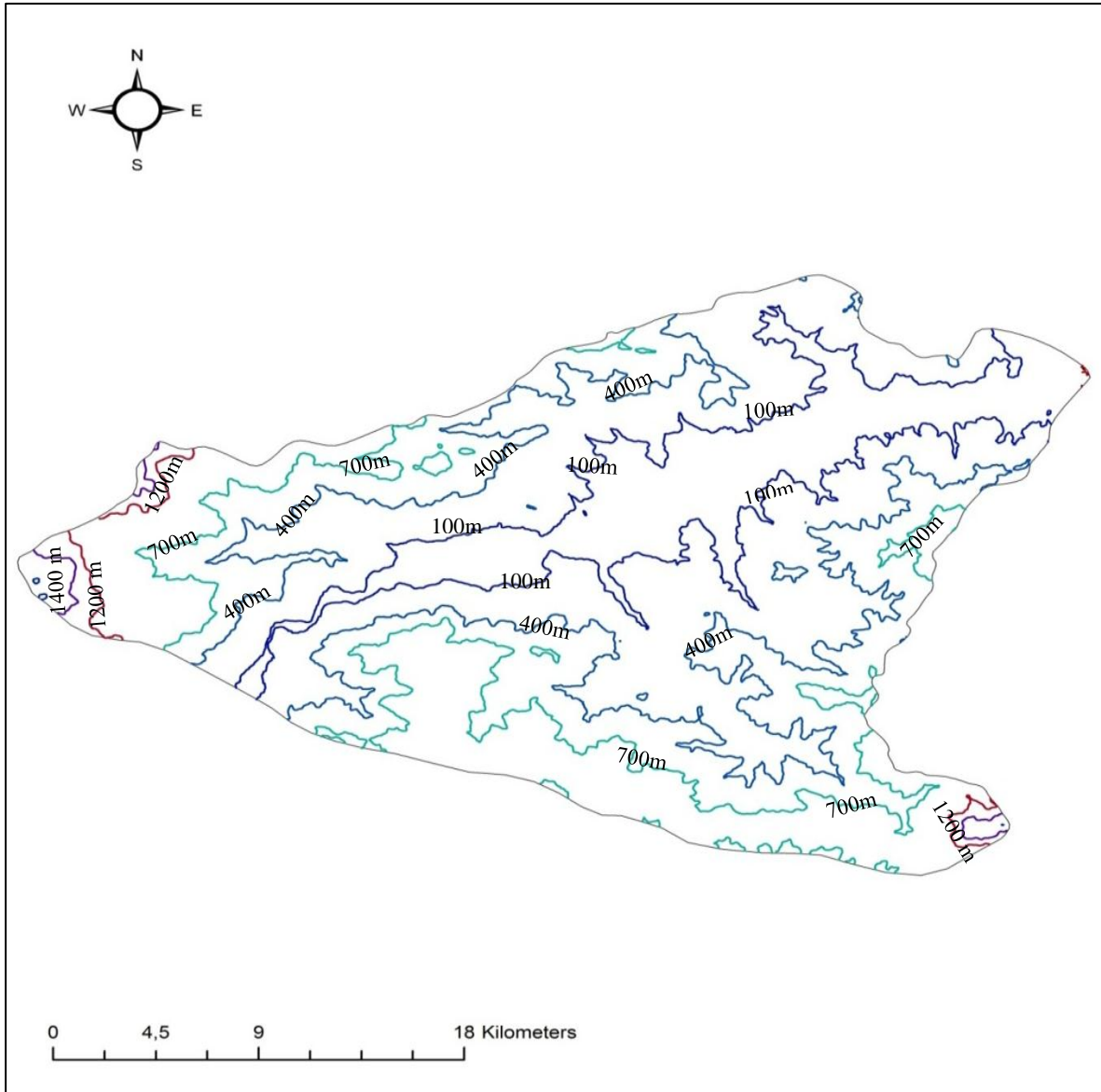


Fig. I.5: La carte hypsométrique de la basse Soummam.

Tableau.I.4: Récapitulatif des paramètres morphométriques.

N° d'ordre	Caractéristiques	Unité	Symboles	Valeur
1	Superficie du bassin	(km ²)	A	775.2
2	Périmètre	(km)	P	146.3
3	Indice de compacité	/	Kc	1.47
4	Longueur du rectangle équivalent	(km)	L	60.21
5	Largeur du rectangle équivalent	(km)	I	12.87
6	Altitude maximal	(m)	H max	1616.92
7	Altitude minimal	(m)	Hmin	0
8	Altitude moyenne	(m)	H moy	458.34
9	Dénivelée simple	(m)	D	1068.29
10	Indice de pente globale	(m/km)	Ig	17.74
11	Indice de pente de Roche	/	Ip	0.67
12	Dénivelée spécifique	(m)	Ds	493.92
13	Densité de drainage	(km/km ²)	Dd	0.38
14	Temps de concentration	(heures)	Tc	6.59
15	Vitesse d'écoulement d'eau	(m/s)	Vc	2.23

I.7_context climatique :

Pour avoir une idée sommaire sur le climat a basse vallée Soummam on a eu recours à exploiter les données de station climatique de Béjaia .

I.7.1 précipitation :

D'après la carte pluviométrique d'Algérie établie par l'A.N.R.H en 1993(**Fig. I.6**), la lame d'eau a la région de Bejaia atteindre de 600 mm jusqu'à 'a 900 mm

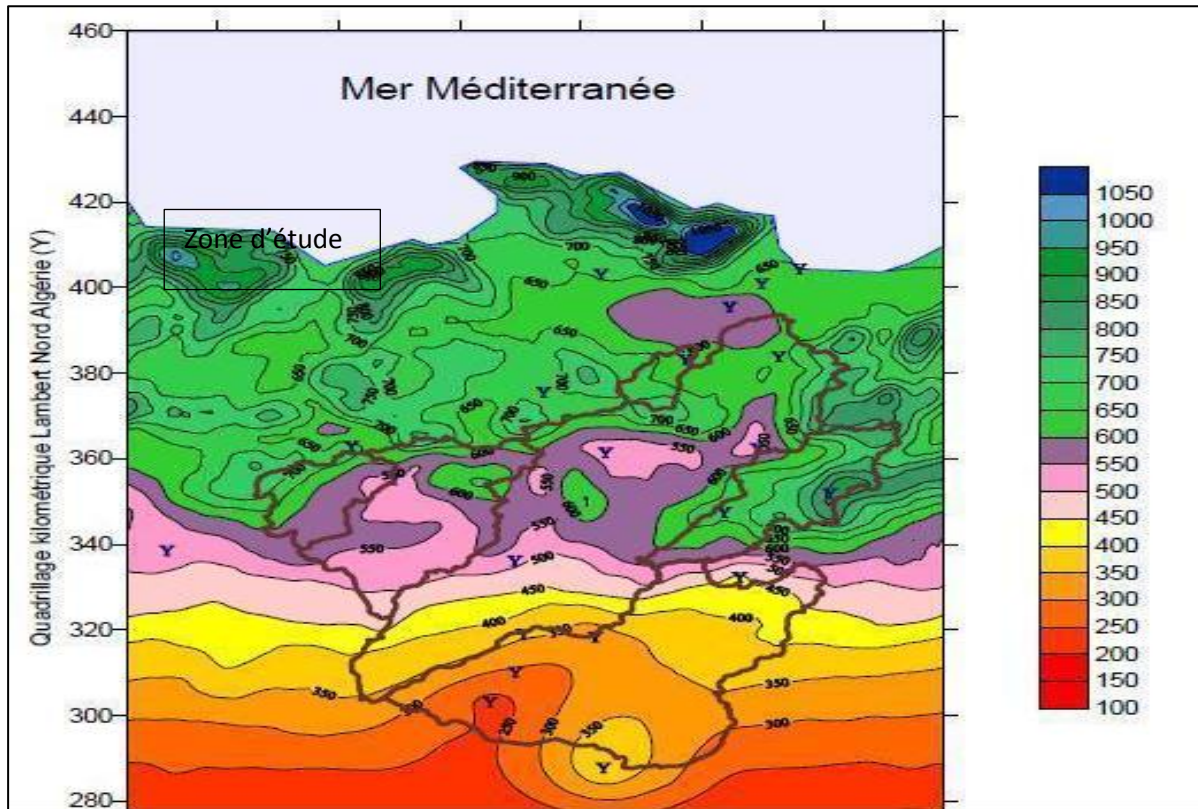


Fig. I.6: Carte des précipitations annuelles moyennes de l’Est algérien A.N.R.H, 1993.

I.7.1.1_pluviometrie moyenne interannuelle :

La station de Béjaïa reçoit en moyenne 738 mm/an ainsi Le mois de décembre est le plus pluvieux et le mois de avril le plus arrosé, Le mois celui est plus sec est le mois de d’Aout (Tableau. I.5)

Tableau. I.5: Précipitations moyennes mensuelles interannuelles en mm en (1988-2004).

Bejaia	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	TOTAL
P (mm)	52	64	82	143	121	72	56	78	42	12	9	8	738

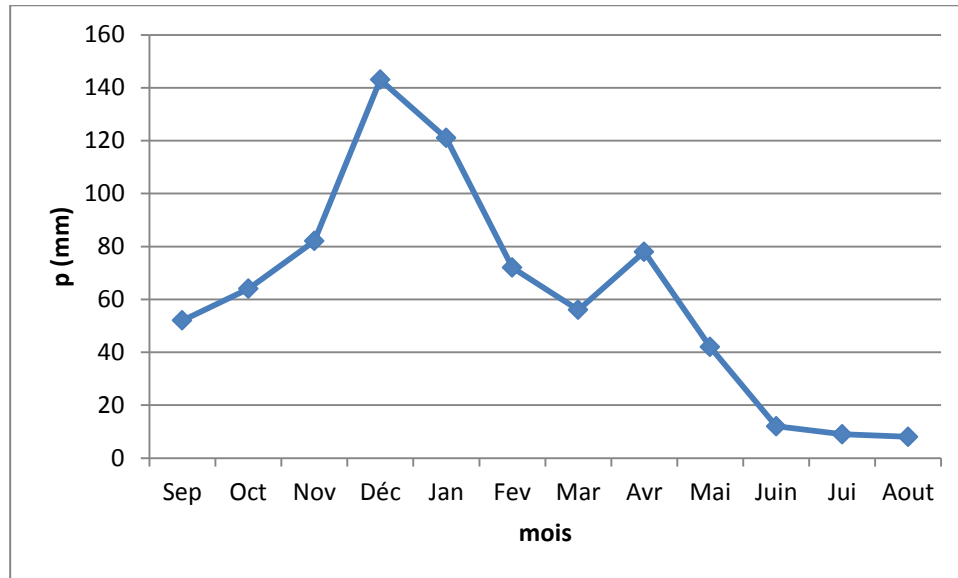


Fig. I.7: Variation mensuelle des précipitations en (1988-2004).

I.7.2 température de l'air:

L'étude des températures moyennes mensuelles et annuelles est déterminante pour évaluer le bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin versant.

Sur la station de Béjaia Nous constate que le mois janvier est plus froid et le mois d'août est plus chaud (**Tableau.I.6**)

Tableau .I.6: Moyennes mensuelles et interannuelles température en 1988-2004.

Béjaia T°C	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	TOTAL
	23,4	19,9	15,3	12,4	11,6	12,0	13,6	14,9	18,3	22,2	25,0	26,3	17,9

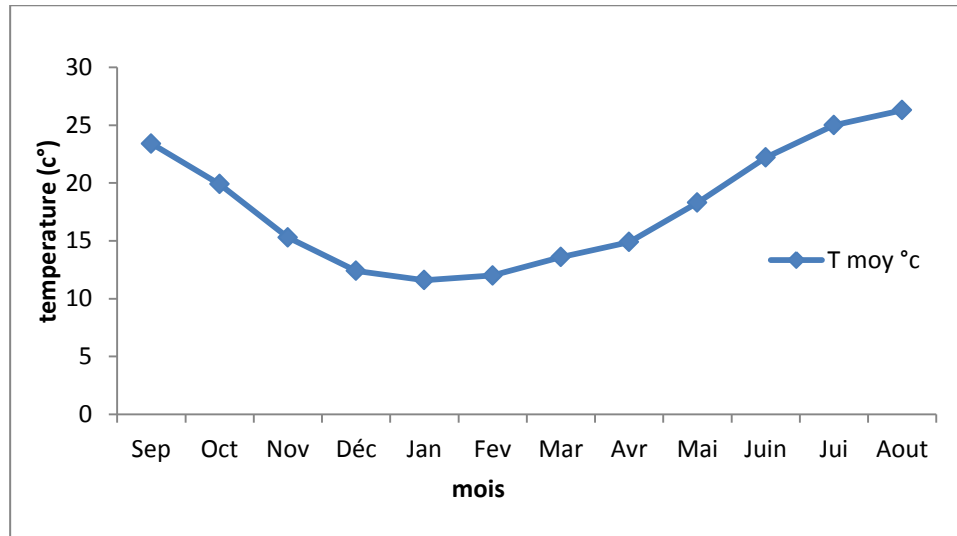


Fig. I.8: Variation mensuelle des températures en 1988-2004.

I.8_ Le climat de la région :

La basse Soummam est caractérisée par un climat de type méditerranéen .cela est caractérisée par des conditions climatiques qui seront précisées on utilisant plusieurs méthodes : l'indice d'aridité de De. Martonne, le diagramme de L. Emberger, la méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls et la méthode de G. Euverte.

I.8.1 Indice de De. Martonne :

Le géographe de De. Martonne (1989) définit un indice d'aridité I_a , calculé selon la formule suivante :

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

Avec :

I_a : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : températures moyennes annuelles (°C).

Les résultats d'une telle application sont soignés dans les tableaux (I.7), (I.8) et Figure(I.8)

Tableau . I.7: Indice d'aridité de De. Martonne.

Stations	P (mm)	T °C	I _a
Bejaia	738	17,9	26,45

Tableau. I.8: Classement en fonction de l'indice d'aridité de De. Martonne.

Classement de l'Indice d'aridité	Type de Climat
$I_a < 5$	climat hyperaride
$5 < I_a < 7.5$	climat désertique
$7.5 < I_a < 10$	climat steppique
$10 < I_a < 20$	climat semi-aride
$20 < I_a < 30$	climat tempéré
$I_a > 30$	climat humide

D'après la valeur de l'indice climatique on voit que la région se caractérise par un régime thermique tempéré avec un drainage extérieur.

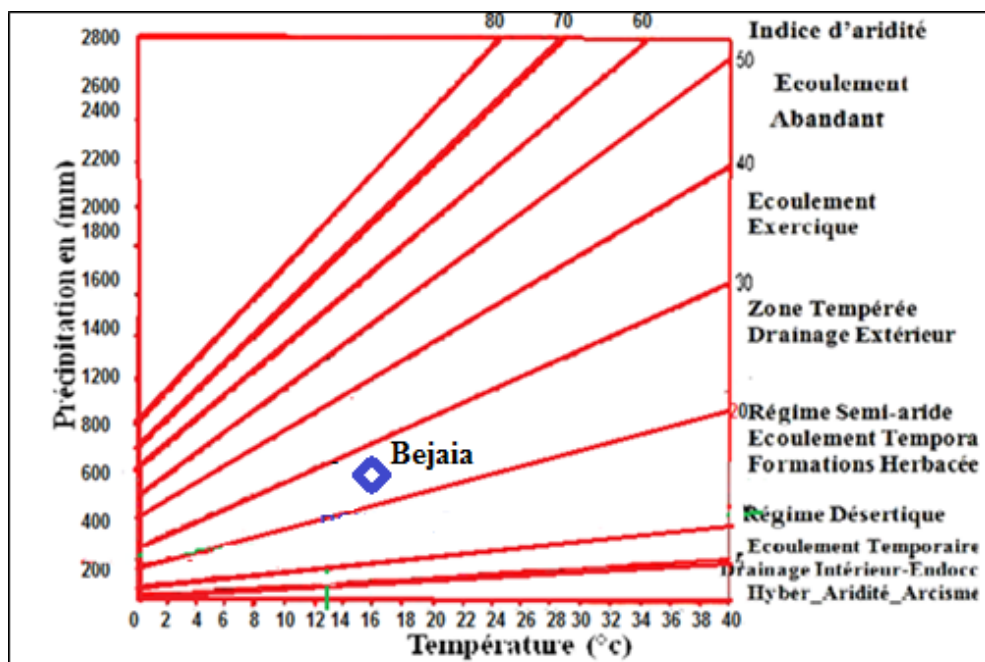


Fig. I.9: Abaque de l'indice d'aridité de De.Martonne.

I.8.2 Le diagramme de L. Emberger :

Pour préciser le climat de la région nous allons utiliser le Climagramme de L. Emberger sur lequel nous avons reporté les données de précipitation moyenne tombée sur le bassin versant Soummam est 429mm et les températures M et m sont respectivement de 26.6°C et 4.4 °C avec, en abscisse la moyenne des minimales de la saison froide (en 0C), et en ordonnée Q2 donné par la formule suivante

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

Avec : P : Précipitation annuelle en mm ;

M : Moyenne des maximum du mois le plus chaud en C°;

m : Moyenne des minimum du mois le plus froid en C°;

Après le calcul nous obtenons le résultat $Q_2=125$

- Le rapport de ces données sur le Climagramme de L. Emberger, nous permet de dire que le bassin Soummam se situe dans la zone climatique sub humide (Fig. I.9)

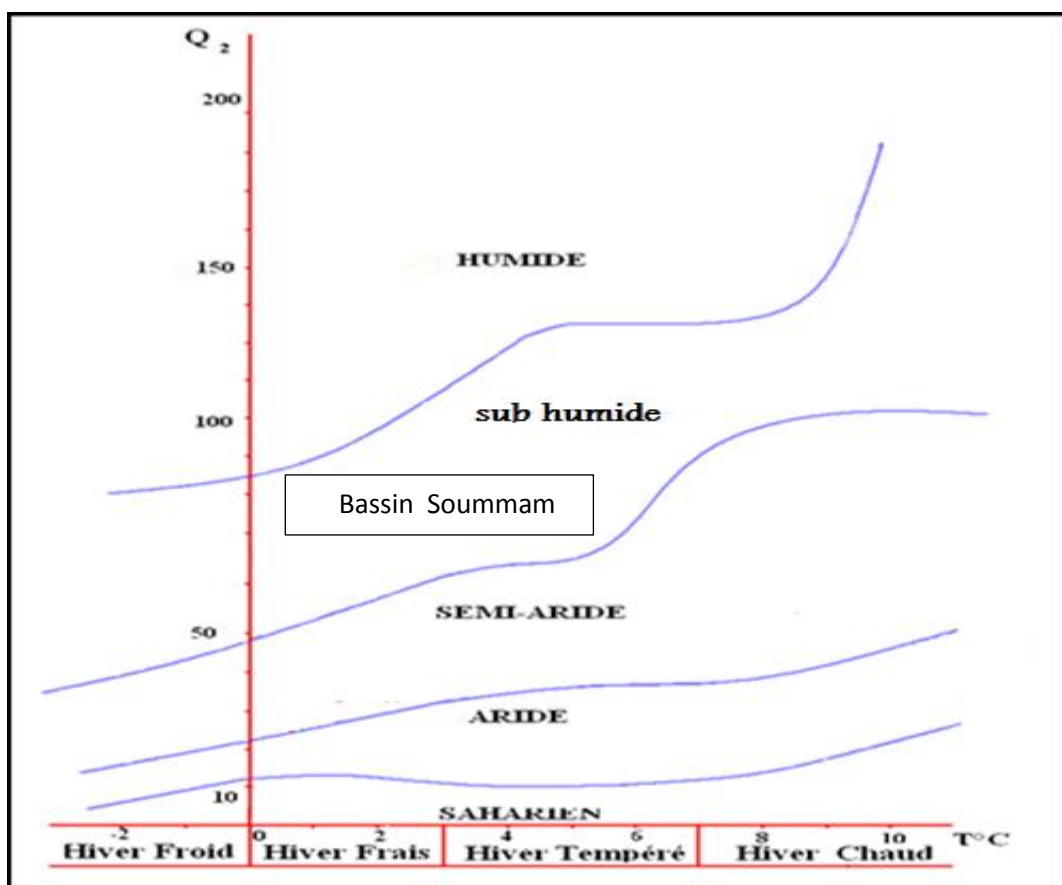


Fig. I.10: Climagramme de L. EMBERGER.

I.8.3 Méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls :

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls est la combinaison de deux paramètres climatiques principaux, qui sont la température et la précipitation (**Fig.I.10**). Pour ces deux auteurs un mois sec est celui où le total moyen des précipitations exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P \leq 2 T^0c$). Cette relation permet d'établir un graphique sur lequel les précipitations sont portées à l'échelle double des températures. Nous constatons que la station de Béjaia, il ressort une période sèche qui s'étale trois mois, du mois de juin au mois de aout et une période humide qui s'étale sur neuf mois, du mois septembre au mois de mai

Tableau.I.9: Paramètre de diagramme ombrothermique.

Mois		Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou
Béjaia	P _(mm)	52	64	82	143	121	72	56	78	42	12	9	8
	T ⁰ c	23,4	19,9	15,3	12,4	11,6	12,0	13,6	14,9	18,3	22,2	25	26,3

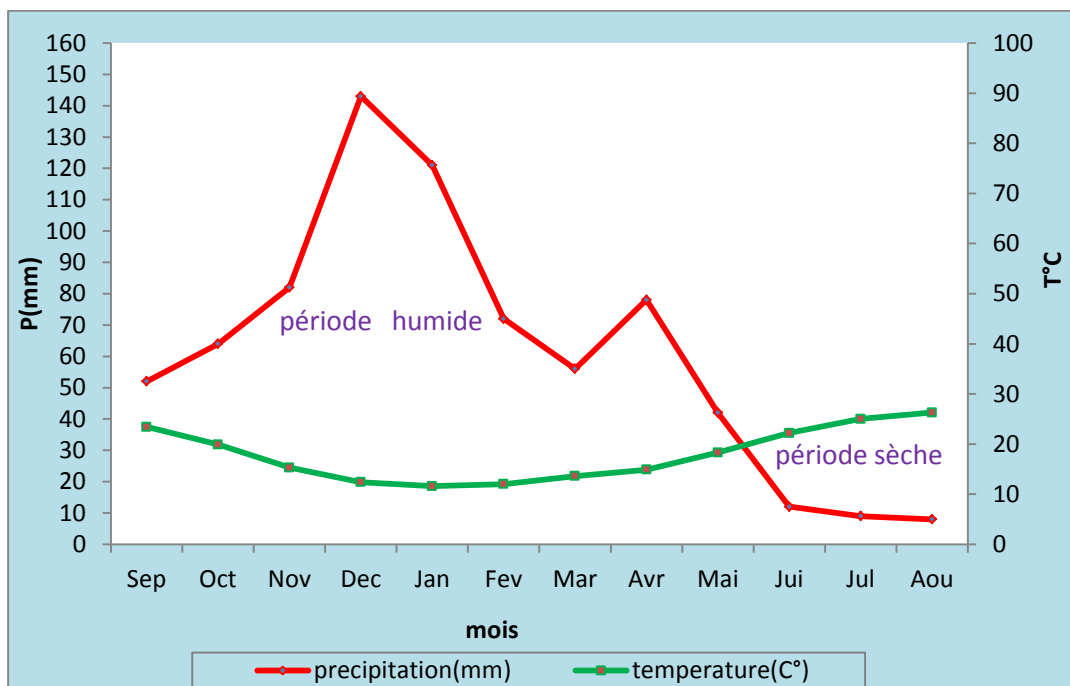


Fig.I.11: DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE (BANOULS-GAUSSEN).

I.8.4 Méthode d'Euverte :

Le rapport $\frac{P}{T}$, établi mensuellement permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol, il permet également de définir trois types de régimes :

- Un régime sec où : $\frac{P}{T} < 2$;
- Un régime sub- humide où : $2 < \frac{P}{T} < 3$;
- Un régime humide où : $\frac{P}{T} > 3$;

Selon le Tableau(I.10) , nous remarquons :

➤ **Station de Béjaia (Latitude 36°42'55" Nord, Longitude : 5°3'39"):**

Les valeurs de (P/T) les plus faibles sont celles des mois de Juin, Juillet, Août, a des régime sec en outre septembre et Octobre traduisant un régime sub humide et les mois restants sont régime humide

Tableau.I.10: Détermination de régime climatique par la méthode d’Euverte.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	
Béjaia	P _(mm)	52	64	82	143	121	72	56	78	42	12	9	8
	T ⁰ C	23,4	19,9	15,3	12,4	11,9	11,6	12	13,6	14,9	18,3	22,2	25
	P/T	2,22	3,22	5,36	11,53	10,17	6,21	4,67	5,74	2,82	0,66	0,41	0,32

I.9_ Estimation des paramètres du bilan hydrologique :

I.9.1 Evapotranspiration potentielle ETP:

Evapotranspiration potentielle ETP est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol/substrat et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau.

Il existe plusieurs formules empiriques qui permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle, mais elles ne sont applicables qu'après avoir subir des corrections locales.

I.9.1 .1_ Calcul de l'ETP suivant la formule de C.W. Thornthwaite :

La formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon C.W. Thornthwaite tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

La formule de l'ETP s'écrit de la manière suivante : $ETP_{cor} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * K$, (en mm).

Où : ETP cor : Evapotranspiration mensuelle corrigée, (en mm) ;

T : Température moyenne mensuelle, (en 0C) ;

I : Indice thermique annuel, $I = \sum i$;

i : Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression : $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,5}$

a : Coefficient calculé par la formule : $a = 1,6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0,5$

K : Coefficient de correction, qui dépend du temps et de la latitude.

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode C.W. Thornthwaite sont présentés

Tableau.I.11: Calcul de l'ETP selon C.W. Thornthwaite à la Station de Béjaia.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	année
T (°C)	23,4	19,9	15,3	12,4	11,6	12	13,6	14,9	18,3	22,2	25	26,3	17,9
I	10,12	7,94	5,35	3,91	3,53	3,72	4,49	5,14	7	9,36	11,18	12,06	6,98
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETPcor	119,95	79,04	40,95	27,21	24,59	25,74	39,67	50,24	81,13	117,48	149,34	153,63	895,96

I.9.2 Evapotranspiration réel:

Elle correspond à l'évapotranspiration qui se produit pendant un intervalle de temps donné, dans des conditions réelles des teneurs en eau du sol. Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes empiriques prenant en compte les précipitations et les températures.

I.9.2 .1_ Méthode de Turc :

Cette relation est en fonction des précipitations et des températures moyennes mensuelles.

La formule est la suivante :

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

Où : P : Précipitation moyenne annuelle, en mm ;

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

T: Température moyenne mensuelle, (en C) ;

ETR: Evapotranspiration réelle, en mm

$P = 738 \text{ mm}$, $T = 17,9^\circ\text{C}$, $L = 1034,27 \rightarrow \text{ETR} = 621,70 \text{ mm}$. Soit 84.24% des précipitations.

I.9.2 .2_ Méthode de Coutagne :

C'est une méthode qui fait intervenir les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles .L'ETR peut être estimée a l'aide de la formule suivante :

$$\text{ETR} = P - \lambda P^2$$

$$\text{Tel que : } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,147 T}$$

Cette formule n'est applicable qu'a la condition suivante : $\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$

T : température moyenne annuelle en °C ;

P : précipitation moyenne annuelle en m.

Les résultats sont donnés sur le tableau (I.12)

Tableau.I.12 : Valeurs de l'ETR selon la méthode de coutagne.

station	P	T	λ	ETR
Béjaia	0,738	17,9	0,30	574,60

I.10_ Bilans hydrologiques :

I.10.1 Bilan hydrologique de Thornthwaite :

Pour établir le bilan il faut d'abord calculer la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique (RFU) qui est facilement utilisable par les plantes et nécessaire pour leur bon fonctionnement physiologique. Cette méthode permet de déterminer les paramètres : ETP, ETR, déficit agricole (DA) et l'excédent (EX). A partir de ce dernier paramètre on aboutira au ruissellement et à l'infiltration. Tous ces paramètres, reposent sur l'estimation de la réserve

facilement utilisable (RFU). Richard en 1979 a proposé une formule pour le calcul de la RFU, dans la partie Nord- Est de l'Algérie qui est la suivante:

$$RFU = \frac{1}{3} D_a H_e P$$

Avec :

RFU: réserve facilement utilisable en (mm).

Da: densité apparente du sol, (Hallaire propose de prendre $D_a = 1.5$).

He: Capacité de retentions:

He = 5% → pour un sol sablo limoneux

He= 10% → pour un sol limoneux

He= 20% → pour un sol argilo limoneux

Pour notre cas et vu la nature du sol, on a adopté le dernier cas.

➤ He = 20% soit 0.20

P : Profondeur de la terre parcourue par les racines en m ($P = 0.4$ m).

Un sol alluviale de la basse soummam est soumis à une présence d'eau permanente plus ou moins longue dans leurs profil et de surcroit d'une grand extension dans toute la vallée, la raison pour laquelle nous fixons la valeur de RFU à 100 mm [03].

Le tableau (I.13), résume le calcul du bilan hydrologique pour la station météorologique de Bejaia à partir de la pluviométrie et des températures mensuelles.

Tableau.I.13 : Calcul du bilan hydrologique (Station de Béjaia) par ETP-

THORNTHWAIT.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Année
P (mm)	52	64	82	143	121	72	56	78	42	12	9	8	738
ETPcor	119.95	79.04	40.95	27.21	24.59	25.74	39.67	50.24	81.13	117.48	149.34	153.63	895.96
P-ETP	-46.4	-3.5	42.3	115.1	94.3	33.5	-8.4	-7.3	-67.7	-121.8	-144	-143	/
RFU	0	0	42.3	100	100	100	91.6	84.3	16.6	0	0	0	/
ETR	52	64	39.7	27.9	26.7	38.5	64.4	85.3	109.7	28.6	9	8	554
D_{agricole}	46.4	3.5	0	0	0	0	0	0	0	105.2	144	143	414
(E_x)	0	0	0	57.4	94.3	33.5	0	0	0	0	0	0	/

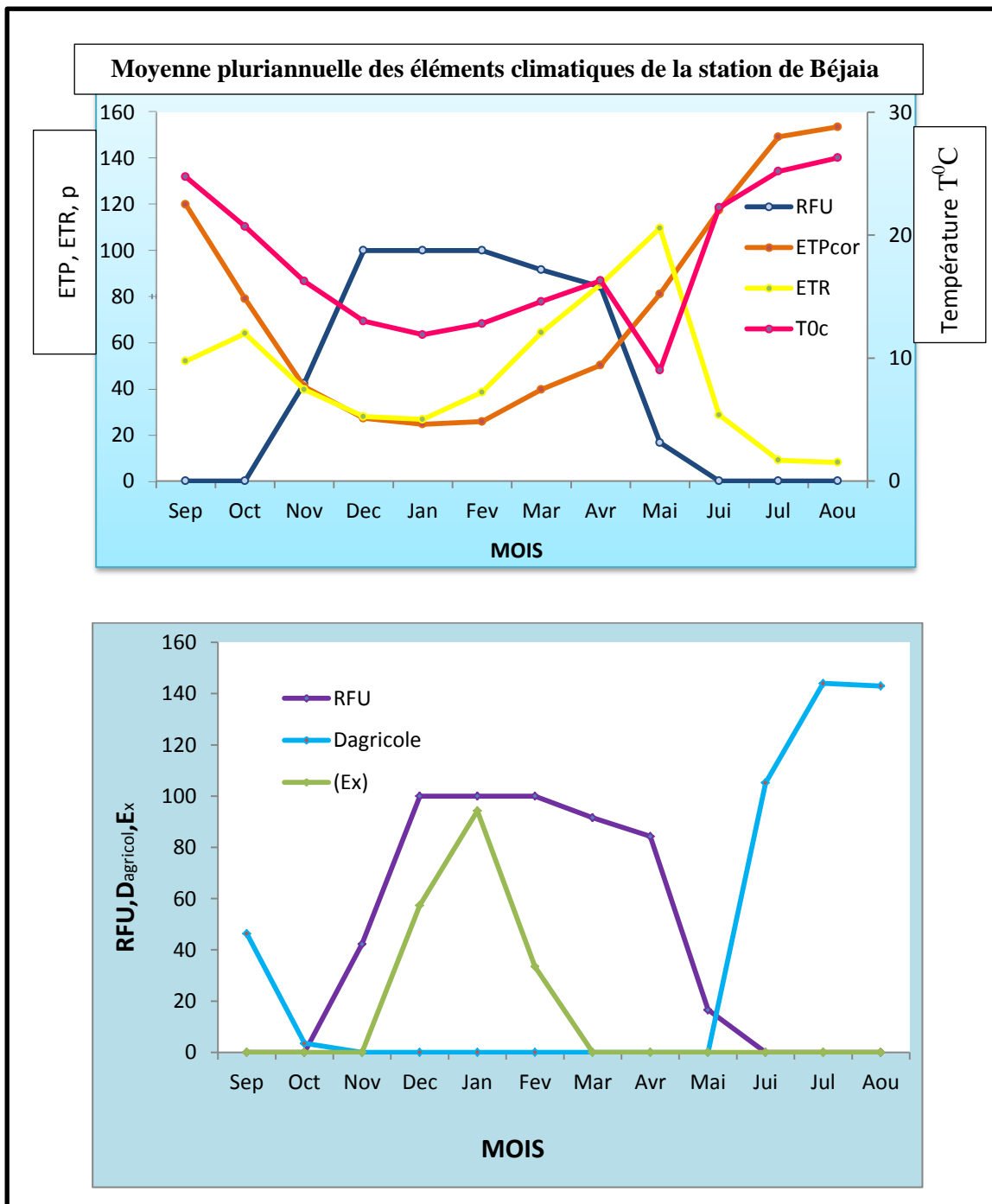


Fig.I.12: Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de THORNTHWAITE de la station de Béjaia 1988-2004.

La représentation graphique des bilans d'eau selon la méthode de Thornthwaite des stations de Béjaia montre que l'évapotranspiration maximale a été observée pendant le mois de aout pour ce qui produit des déficits agricoles discontinué recommence a mois septembre a la fin de octobre puis aussi faisant un mois de juin jusqu'à aout nécessitants l'irrigation pour les zones des cultures.

Cependant, durant les mois de décembre jusqu'au février, on remarque une recharge de la nappe . Lorsque l'eau de recharge dépasse la RFU, le surplus va partir vers le ruissellement superficiel et alimente de la nappe.

I.11_ Calcul du ruissellement :

Lors de leur étude sur les bassins tunisiens, Tixteront et Berkaloff ont donné en 1961 une méthode de calcul du ruissellement utilisable lorsque les précipitations sont inférieures à 600 mm, l'erreur étant alors inférieure à 10%. Sont définie par la formule suivant :

$$R = \frac{p^3}{3 \cdot (ETP)^2}$$

Où : R : ruissellement (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle (mm) ;

Cette méthode de calcul du ruissellement est critiquée car elle est empirique donc elle nécessite des corrections à l'aide d'installations lys métriques d'une part, et son utilisation est limitée aux précipitations moyennes annuelles inférieures à 600 mm d'autre part. Les valeurs du ruissellement selon la méthode de Tixteront et Berkaloff sont portées dans le tableau (**I.14**)

Tableau.I.14: Le ruissellement selon la méthode de Tixteront et Berkaloff.

stations	période	P (mm)	ETP(mm)	R	R%
Béjaia	1988-2004	738	895,96	166,91	22,62%

I.12_ Calcul de l'infiltration :

Par définition l'infiltration est la quantité d'eau qui pénètre dans le sous sol et alimente les aquifères souterrains, ce paramètre peut être estimé à partir de la formule du bilan hydrologique donnée par la relation suivante :

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

Où : **P** : précipitation (mm)

ETR : déficit d'écoulement ou (D) en (mm)

R : ruissellement (mm)

I : infiltration (mm)

Tableau.I.15: récapitulation des différents paramètres du bilan hydrologique.

station	période	P (mm)	ETR (mm)	ETR%	R (mm)	R en(%)	I (mm)	I en(%)
Béjaia	1988-2004	738	553.64	75,02%	166,91	22.62%	17,45	2,36%

I.13_ conclusion :

Notre étude se fait par deux parties :

- ✓ Etude morphologique de basse vallée de Soummam montre que :
 - Un bassin versant allongé, a vocation industrielle, agricole et aussi touristique avec un réseau hydrographique dense en amont.
- ✓ étude climatologique du bassin versant du basse Soummam montrent que bassin est Caractérisée par :

- un climat méditerranéen de type sub- humide avec deux saisons, Une saison humide allant du mois de septembre au moi mai. le reste des mois de l'année étant sec.

Un essai d'établissement du bilan hydrique a permis de fixer un ordre de grandeur des paramètres non mesurables directement. On remarque ainsi, que 75 .02 % des précipitations s'évaporent, ce qui correspond à une lame d'eau de 738 mm, 2.36 % environ s'infiltrant, ce qui correspond à une lame d'eau de 17.45 mm. Ainsi, le basse vallée de Soummam, est relativement bien arrosé , est une région aux potentialités hydriques notables, du fait de la fréquence et de l'importance de ces précipitations .

CHAPITRE II

Aperçu sur la géologie et
l'hydrogéologie de la région

CHAPITRE II : aperçu sur la géologie et l'Hydrogéologie de la région

II.1_ Introduction:

L'étude géologique et hydrogéologique nous permet d'identifier les formations perméables détritiques et les formations résistantes fissurées ou karstiques susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméables qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces formations; leurs épaisseurs, et leurs étendues. L'étude tectonique nous renseigne sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles entraînant la formation de fossés d'effondrement ou de soulèvement modifient ainsi la géométrie des couches qui va caractériser chaque type de nappe et permettent la communication probable entre les aquifères. La cartographie de l'aquifère a, pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser la fonction du réservoir et son comportement hydrodynamique.

II.2_ CADRE GEOLOGIQUE :

La détermination de la qualité des eaux souterraines, nécessite une étude géologique détaillée, en utilisant les cartes géologique d'une échelle 1/50 000 et leurs notices explicatives ainsi que l'utilisation des données des forages dans le bassin versant.

II.3_ Géologie générale du bassin versant :

Le bassin versant de l'oued Soummam est dans ses grandes lignes constitué, sur la rive gauche, par de l'oligocène traversé par des formations du crétacé inférieur ; du miocène inférieur apparaît dans la partie aval, en bordure de l'oued de terrasses alluviales importantes tapissent en générale pied des pentes sauf dans la région de Sidi-Aïch où le crétacé apparaît jusque dans le lit Figure (**II.1**).

Le rive droite est en majeure partie formé de crétacé inférieur moyen et supérieur ; les terrasses alluviales sont beaucoup plus restreinte. **[01]**

Les terrains rencontrés sont généralement imperméables : argiligrès de l'oligocène, schistes de l'alboaptien, marno calcaires du crétacé. Figure (**II.2**).

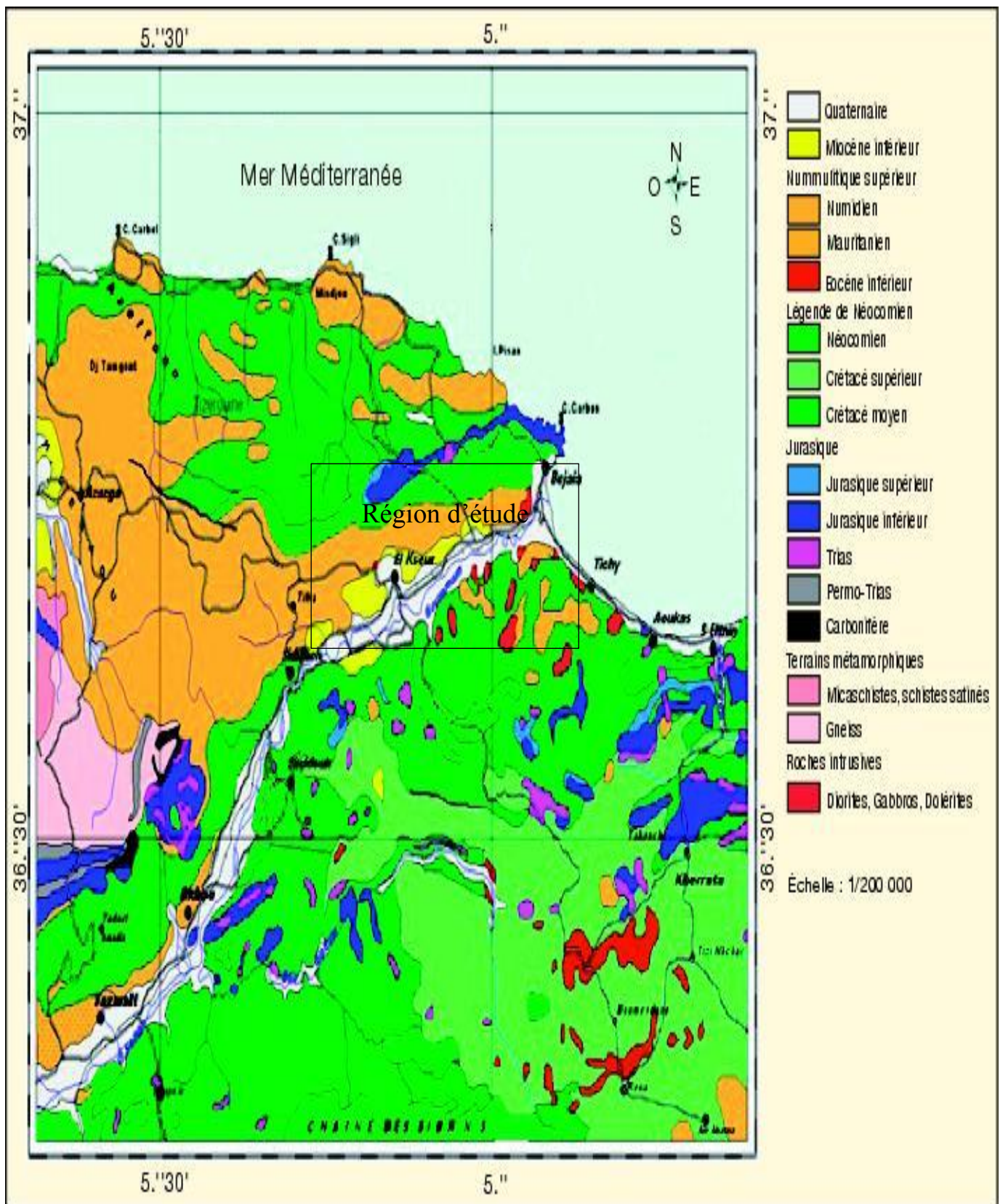


Fig.II.1 : carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte géologique nord Constantine de (1/500 000).

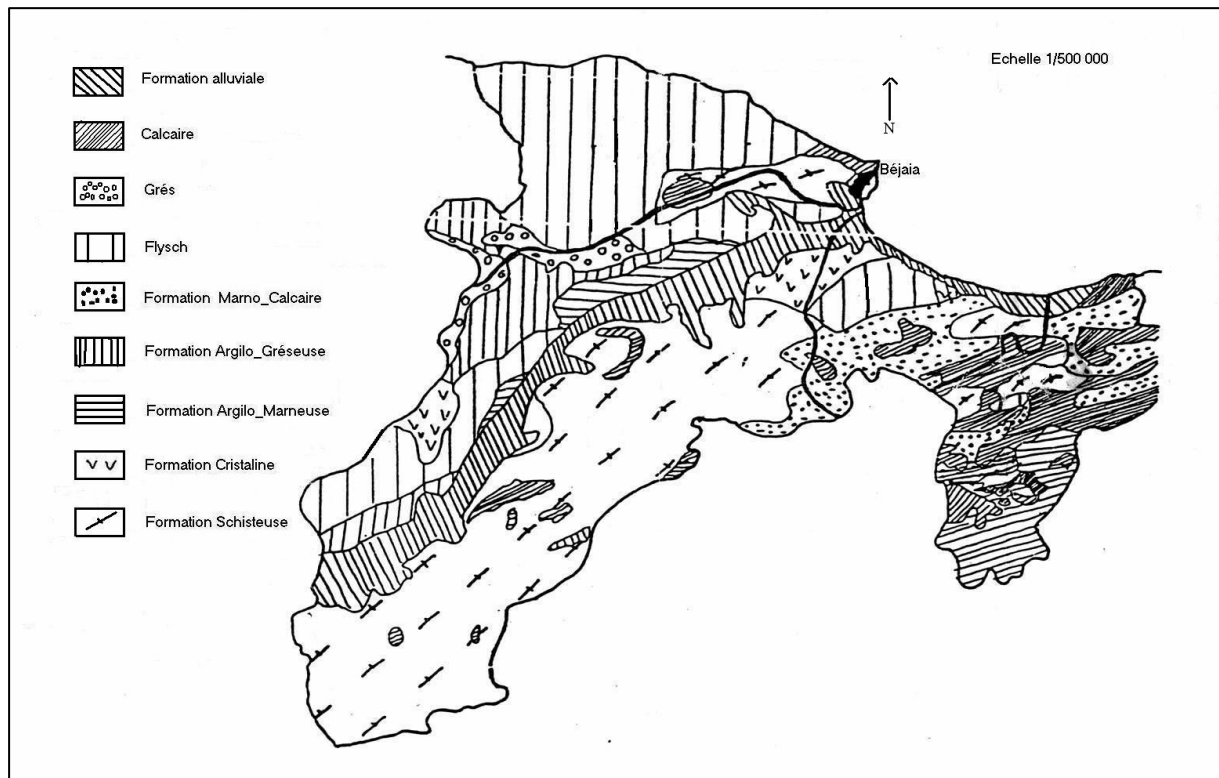


Fig.II.2 : Carte hydrogéologique de la willaya de Béjaïa.

II.4_ Lithologie:

Nous permet de localiser les différents affleurements présents dans la vallée et ses massifs environnants [03] .

La série stratigraphique de ces formations, en partant de la plus ancienne à la plus récente est la suivante :

II.4.1. Le Trias :

Il se manifeste sous forme de masses plus ou moins étendues remplissant de grandes cassures (Djebel Gueldamane), on le rencontre également le long des contacts de nappes (Région Nord d'Akbou), mais aussi sous forme d'épointements locaux (Sidi Aïch).

II.4.2. Le Jurassique :

Il s'agit des écaïlles chevauchant au Sud (le chaînon d'Ighil Ali) au Sud-Est (l'écaïlle de Sidi Yahia et l'anticlinal faillé de Djebel Guemldamane) et à l'Est (les crêtes de l'Azrou Chtoug qui appartiennent au massif du Djebel Trouna et le croissant de Timezrit). Il affleure également à la limite Nord du bassin, dans les massifs de l'Arbalou, de Toudja et du Gouraya.

L'anticlinal Jurassique de Djebel Arbalou et le synclinal tectonique du Gouraya, dont la lithologie est marquée par la présence de masses calcaires et dolomitiques, sont susceptibles de constituer d'immenses réservoirs aquifères.

A cet égard, la circulation des eaux souterraines est d'une part à porosité de fracture due aux jeux de la grande faille bordière, et d'autre part, fissura le résultant des phénomènes karstiques particulièrement développés, qui sont à l'origine des grandes fissures ouvertes et des centaines de cavités. L'élargissement des joints de calcaires est accéléré par la corrosion.

De ce fait, de nombreuses résurgences apparaissent à la faveur de ces failles. L'apparition des eaux de source dans le bassin n'est pas régulière et dépend de l'intensité des précipitations, elles sont soumises à de fortes fluctuations au cours de l'année et la plupart tarissent en été.

Les calcaires liasiques fissurés du flanc Sud-Est de la chaîne du Djurdjura.

Le massif de Chellata, massif de l'Akfadou, le pic de L'alla Khadîdja dont la perméabilité est assurée par les nombreuses et larges fissures alimentant plusieurs sources : Tala T'raline, Tala Tiffit, Timiliouine, Anzor Lanak...etc., plus en aval le débit des sources décroît.

II.4.3 Le Crétacé :

Le Crétacé parautochtone qui affleure en rive droite depuis l'Oued d'EI Mehrir jusqu'au Djebel Gueldamane, également entre l'Oued de Seddouk et Sidi Aïch et en rive gauche à l'Ouest du village d'Ighram.

II.4.4 LE Néogène:

II.4.4.1_ Le miocène :

Il est représenté par deux types de roches : Les roches sédimentaires et les roches éruptives.

1 - Roches sédimentaires :

Unité d'Akbou : ce sont des marnes gréseuses et conglomératiques transgressives sur le flysch numidien. Les conglomérats se montrent plus ou moins cimentés par des dépôts de travertin récents et dont les éléments de taille très variable sont empruntés aux flyschs et à la chaîne calcaire

Unité de Takrietz : ce bassin miocène est développé sur la rive gauche de la Soummam entre Sidi Aïch et Oued Ghir. Les premiers lambeaux apparaissent à Takrietz, Il s'agit d'un lambeau de grés grossiers et de poudingues rougeâtres avec nombreux fragments d'huître épaisse et de marnes Jaunâtres à Ostrea. Il forme une dalle faiblement inclinée vers le NW, coupée en deux par le lit de la Soummam, reposant en rive droite sur le Numidien de Takrietz.

2 - Roches éruptives:

Ces roches sont essentiellement de deux types :

- Ces roches éruptives possèdent un degré de fracturation très élevé, censé être un facteur les roches volcaniques proprement dites avec une série inférieure riche en brèches et tufs. Elle est représentée en particulier à Oued Ghir par des rhyolitoïdes associées à des tufs, des pélites et de marnes franches, et une série supérieure avec des laves abondantes. Cet ensemble volcanique est recouvert au Nord-ouest par le Mio-plio-quadernaire de la vallée de la Soummam
- les roches plutoniques avec le granodiorite d'Ait Smail en rive droite de la Soummam et le granite monzonitique de Drour. Les argiles de base numidien sont kaolinisées au contact des roches éruptives.

Les granodiorites, les granites et laves miocènes du complexe magmatique Béjaia-Amizour peuvent présenter des possibilités aquifères. Ces roches éruptives possèdent un degré de fracturation très élevé, censé être un facteur favorisant la circulation des eaux d'infiltration. En outre, la position structurale et les dimensions des fractures jouent un rôle déterminant quant à l'exploitation des ressources souterraines. On ignore réellement le potentiel hydraulique de ces formations ainsi que leurs caractéristiques hydrodynamiques.

II.4.4.2_Le pliocène :

1 - Le Pliocène marin

Il n'est connu que dans la vallée de la Soummam, à proximité de Bejaia et en contrebas de l'Oued Ghir, il s'est avancé jusqu'à 15 km vers le Sud à la faveur de la dépression occupée par la Soummam. Ce sont des marnes bleues à Globorotalia Margarita, de grès rouges et de gypses (Triasiques) sédimentés.

2 - Le Pliocène continental

Il s'agit de brèches consolidées à très gros éléments de calcaires jurassiques provenant du démantèlement du Djebel Gouraya, qui reposent sur un terrain du Crétacé supérieur tellien, et de quelques blocs de poudingues infra-créatiques.

II.4.5. Le quadernaire :

Il tapisse le fond de la vallée creusée par l'Oued de la Soummam et ses affluents. Il comprend les importants cônes de déjections des affluents de rive gauche: Oued Béni Mellikeuch, Ighzer Illoula, Ighzer Tifrit et ceux de la rive droite : Oued Seddouk et Ighzer Oukri. La couverture alluviale de la vallée de la Soummam paraît largement épaisse. Déposée sous forme de terrasses Mio-plio-quadernaires superposées l'une sur l'autre, elle constitue, de par sa lithologie formée essentiellement d'alluvions grossières: sables, galets, graviers du Miocène,

Sus-jacentes à un substratum marneux miocène, argileux oligocène et même parfois crétacé plus ou moins profond, et de par sa porosité d'interstice un réservoir considérable.

D'ailleurs, l'approvisionnement en eau potable, industrielle et d'irrigation est en partie basée sur l'exploitation de cet aquifère à travers les nombreux ouvrages hydrauliques qui y ont été implantés forages d'exploitation, puits, sondages de reconnaissance.

II.5_ le domaine des flyschs :

Le domaine paléogéographique des flyschs est un large sillon qui a reçu des sédiments flyschoides principalement au Crétacé inférieur. Sur la base de leurs faciès.

II.5.1 Le flysch Massylien :

Il affleure au Sud de l'arête Gouraya-Arbalou et au Nord de la Réunion, il se situe entre le numidien et le Crétacé supérieur tellien. Ce flysch, qui surmonte tectoniquement le flysch mauritanien, est une succession de bas en haut des formations suivantes :

- un flysch alboaptien représenté par une alternance de grés et d'argiles brunes.
- une alternance de microconglomérats et de niveaux décimétriques de marnes surmontés de bancs bréchiques[03].
- un niveau de roches siliceuses noires appelées phtanites, s'intercalant de micro brèches
- un flysch marno-calcaire.

II.5.2 LE FLYSCH NUMIDIEN:

La formation numidienne, d'âge plus récent (Oligocène-Miocène inférieur), constitue l'élément géométrique le plus élevé dans toute l'orogénie alpine périméditerranéenne. Localement formation des grés numidiens joue un rôle principal dans la constitution du massif d'Akfadoul et de la chaîne littorale[03]

Les grés du numidien (massif de l'Akfadou) alimentent de nombreuses sources de faible débit car les marnes inter stratifiées empêchent la création de grands réservoirs d'eau.

Les grés du Medjanien renferment des nappes irrégulières qui se déversent par des sources peu abondantes: Béni Méllikeuchl, Ait Ouakour.

II.6_ La tectonique :

A. Coutelle en 1979 avait résumé chronologiquement le déroulement des différentes phases tectoniques précoces dans la vallée de la Soummam comme suit :

II.6.1 Phase néocomienne:

C'est une phase de plissements assez complexes orientés NE-SW, parallèle à l'actuelle direction des couches de l'Adrar Gueldamane, avec fracturations locales. Le Néocomien est partout conglomératique, tantôt concordant avec le Jurassique, tantôt discordant et affecté de failles synsédimentaires (Azrou Toudert).

II.6.2 Phase sénonienne:

Dans la mesure où les plis à schistosité de l'unité de Bou Hamza ont la même direction que les plis à cœur Vracono-cénomaniens du Djebel Edni. Ces phénomènes sont alors postérieurs à ces niveaux, par comparaison avec l'unité des Béni Ourtilène, anté-sénonien.

II.6.3 Phase éocène :

La sédimentation des unités externes de la vallée de la Soummam est interrompue dès le Lutétien supérieur jusqu'au Miocène anté-nappes. La structuration des unités des Bibans, de Bou Hamza et des Béni Ourtilène est antérieure à l'arrivée des nappes qui les recouvrent ;

II.6.4 Phase miocène :

Elle est reconnue comme une phase très importante dans la région. Au langhien a eu lieu la phase paroxysmique responsable des charriages des nappes. Cette phase a été précédée par une autre période de tectonisation (Bizon et Gélard, 1975) où les flysch ont glissé par-dessus le domaine kabyle. La série de la Djema N'schribt, qui a été mise en évidence à Sidi Aïch, est discordante sur le Sénonien de l'unité de Barbacha. Elle est immédiatement surmontée par le Miocène post-nappe de la Soummam.

II.6.5 Tectonique post-nappes :

Elle est importante, l'individualisation des trois super-unités de la région d'Akbou est postérieure au dépôt du Miocène de la Soummam. Le contact faillé séparant le Miocène continental des flysch étant post-nappe.

II.6.6 Tectonique récente :

A l'Est d'Akbou et à l'Ouest de Takrietz, elle est représentée par une fracturation assez importante. De nombreuses failles orientées NE-SW sont visibles telles que la faille de Tachaouaft au SE, la faille de Tibouamouchines et la faille de la Soummam, qui a été reconnue par Boudiaf (1999) comme étant active de la région de Tazmalt. Cette famille de failles est parfois décalée par une autre famille de fracturation d'orientation moyenne WNW-ESE, qui paraît plus ancienne que la précédente avec laquelle semble constituer un réseau ordonné.

II.7_Cadre hydrogéologique :

L'exploitation des rapports hydrogéologiques effectués dans la basse de la Soummam a permis d'y identifier unités hydrogéologiques de vallée soummam, dans notre cas nous avons choisi l'unité de la vallée de soummam (**fig. II.3**).

II.7.1.Unité de la vallée de la Soummam :

C'est un vaste couloir à fond plat, bordée de part et d'autre des chaînes de montagnes. Elle comprend l'unité de la basse Soummam et l'unité de la haute et moyenne Soummam qui s'étend sur une superficie de 368 km².

La perméabilité pour la nappe pliocène de la basse Soummam ($K=1.10^{-5}$ à 5.10^{-5} m/s) et les débits sont dans l'ensemble satisfaisants [03].

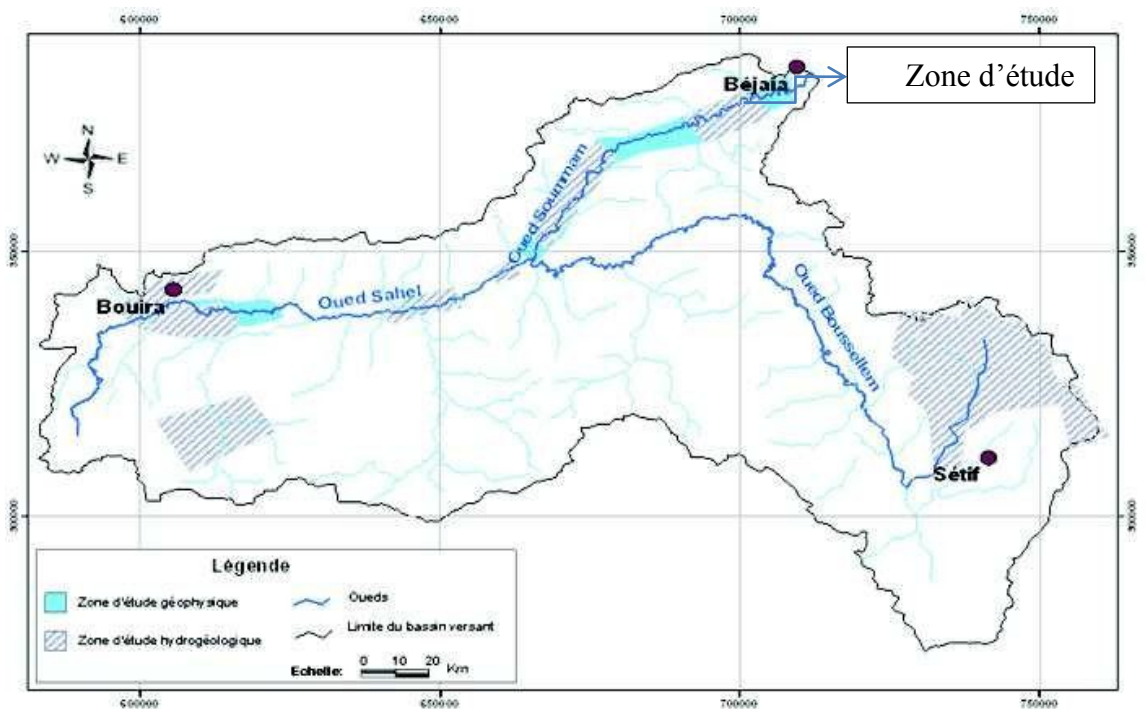


Fig.II.3 : Zones d'études géophysiques et hydrogéologiques.

II.8_ Ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam:

Nous représentons dans ce chapitre, les ressources en eaux qualitatives et quantitatives dans le bassin versant de la Soummam.

II.8.1. Evaluation des potentialités en eau souterraine :

Les unités hydrogéologiques du bassin se répartissent comme suit

- nappe de la haute et moyenne Soummam.
- nappe de la basse Soummam.
- nappe d'El Asnam.
- nappe des hautes plaines Sétifiennes.

L'estimation de la ressource en eau souterraine dans le bassin de la Soummam faite sur la Base des résultats du Plan National de l'Eau (PNE), est donnée dans le tableau (**II.1**)

Tableau II.1: Potentialités en eau par unité hydrogéologique (Source PNE (2004).

Unité hydrogéologique	Nature des réservoirs	Potentialités(Hm ³ /an)
Soummam	Alluvions de Oued Soummam et Miocène	100
Cap Aokas	Alluvions et sables dunaires	3
Plateau d'El Asnam(Bouira)	Graviers et argiles quaternaires et Miocène	15
Plaines côtières de Béjaïa	Quaternaire	35
Total		153

II.8.2. Mobilisation des eaux souterraines :

La mobilisation de la ressource en eau souterraine se fait par forages, puits et sources qui captent les principales nappes du bassin. Selon la direction de l'hydraulique des wilayas (DHW) Bejaïa, Une campagne de mesure de niveau piézométrique ont été effectuée en mars 2011 sur 17 points d'eau (**Fig.II.4**) et(**Tableau.II.2**). ont été choisi la conception des cartes piézométrique

Tableau .II.2: niveau piézométrique de point d'eau.

Points de prélèvement	N	x(UTM)	y(UTM)	niveau piézométrique
La Soummam à Sidi Aïch	1	651927,87	4052869	45
Puits Remila à Sidi Aïch	2	654950,05	4054478,84	47,9
La Soummam à VSA Fenja II	3	659435,55	4055723,54	40,6
Forage 7 villages à VSA Fenja II	4	661221,88	4056049,62	39,8
Forage VSA Fenja II	5	659040,39	4056415,81	40,3
Puits EAC 04 à El Kseur	6	667022,23	4059613,38	20
La Soummam à Mardj Ouamène	7	673407,48	4061259,21	11
Forage Mardj Ouamène	8	673420,39	4061226,16	11,5
Puits Mendi à Tahanout	9	681401,45	4063307,93	10,5
La Soummam à Tala Hamza	10	682368,16	4064190,58	9,4
Forage Cevital 3 à la réunion	11	678694,35	4063940,51	10,9
Puits Ramdani à Irza	12	682150,79	4064448,25	9,6
Puits Saidj à Bougie	13	684220,42	4065174,86	7,9
Puits Ferme Amzal réunion	14	668434,66	4060000,57	11,7
La Soummam Tunnel d'El Kseur	15	671528,50	4060728,23	11,5
Puits Djemaa à Mellala	16	679819,38	4064193,51	10,4
La Soummam aux 4 chemins Bougie	17	684821,53	4066991,82	6

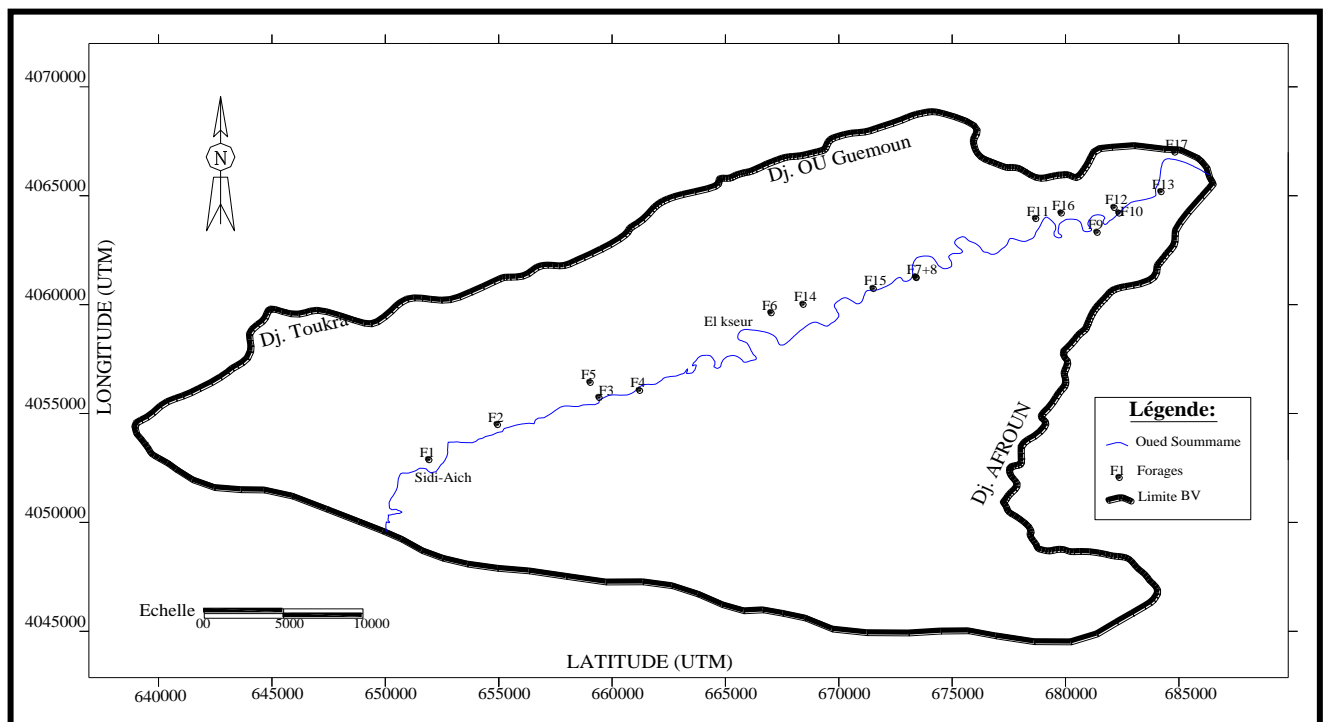


Fig.II.4: point d'eau de la basse vallée de Soummam.

II.9_ Les cartes piézométriques :

Les cartes piézométriques constituent la synthèse de l'étude hydrogéologique, Elles schématisent la fonction du réservoir souterrain et le comportement hydrodynamique de l'aquifère, avec la configuration des conditions aux limites.

II.9.1. Etude piézométrique :

Afin d'étudier le comportement de la nappe superficielle du Quaternaire de la basse Soummam, nous avons établi la carte piézométrique, en se basant sur le traitement des données par le logiciel Mapper global15 et Surfer8.

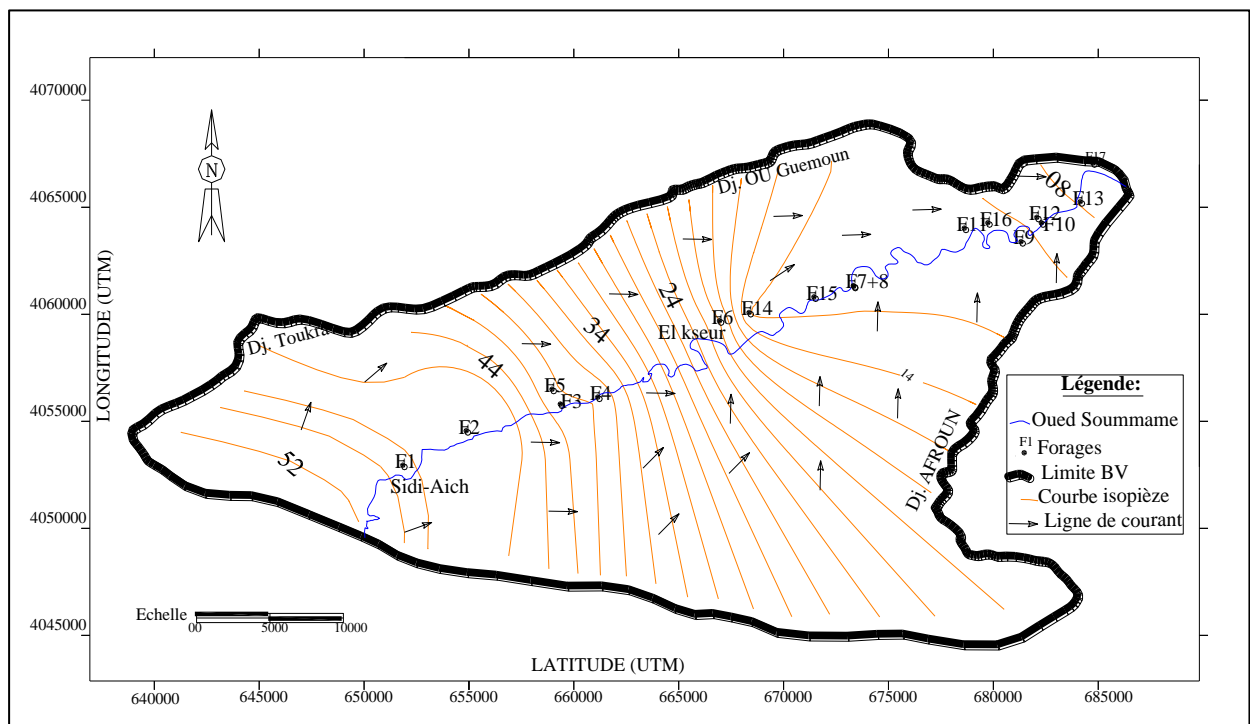


Fig.II.5 :Les niveau piézométrique de la basse vallée de la Soummam.

II.9.1.1_ Interprétation de carte piézométrique:

La carte piézométrique, établie pour montre deux Directions principales d'écoulement des eaux souterraines de la nappe du remplissage Alluviale de la vallée de la Soummam .Suivant la direction longitudinale, l'écoulement de la nappe se fait du Sud-ouest vers le Nord-est conformément au sens d'écoulement des eaux superficielles. Le sens d'écoulement caractérise la

circulation principale du bassin hydrogéologique du remplissage alluvial, de l'amont vers l'aval.
.Cette circulation traduit un écoulement qui se fait de la nappe vers la mer

Suivant la direction transversale à l'axe de la vallée, l'écoulement de la nappe se fait des bordures vers le centre de la plaine. De façon générale, l'écoulement principal de la nappe est convergent d'amont en aval.

II.10_ Conclusion :

La vallée de la Soummam est une plaine de basses terrasses alluviales, allongée sous forme d'une étroite bande sinueuse orientée SW-NE de Tazmalt à Bejaïa. Elle constitue une limite méridionale du Tell algérien

La couverture alluviale de la vallée de la Soummam paraît largement épaisse. Déposée sous forme de terrasses Mio-plio-quadernaires superposées l'une sur l'autre, elle constitue, de sa lithologie formée essentiellement d'alluvions grossières: sables, galets, graviers du Miocène, sus-jacentes à un substratum marneux miocène, argileux oligocène et même parfois crétacé plus ou moins profond, et de par sa porosité d'interstice un réservoir considérable pour l'emmagasinement de l'eau.

CHAPITRE III

Introspection de la qualité des eaux
par les méthodes statistiques

Chapitre III: Introspection de la qualité des eaux par les

Méthodes statistiques

III .1_ Introduction :

L'introspection de la qualité des eaux souterraines consiste à recueillir des échantillons d'eau, tout en respectant les techniques de prélèvement prescrites. De procéder à un certain nombre d'analyse pour avoir une idée sur l'identité physico-chimique de l'eau et son mode de répartition spatiale dans le milieu environnant. La composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, de l'évolution hydrodynamique des écoulements de la nappe, de la profondeur de cette dernière et de la zone climatique. Elle donne de précieux renseignements sur les conditions de gisement et le mouvement des eaux souterraines [08].

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la qualité des eaux, à cet effet nous pouvons avoir recours à des analyses multivariées. C'est un ensemble de méthodes d'analyse statistique qui traitent simultanément plus d'une variable, comme : Analyse en composante principale(ACP) , Classification hiérarchique (CAH) ,Analyse factorielle des correspondances (AFC), analyse de la variance (analysis of variance, ANOVA),etc.

Dans ce cadre , nous avons procédé à l'étude des résultats d'analyses chimiques d'une campagne de prélèvement d'eau pendant le mois de Mars 2011 au niveau de dix-sept forages situé dans la nappe alluviale de la basse vallée de la Soummam, pour ce fait une étude statistique a été réalisée par les méthodes, ACP, CAH et AFC pour déterminer et classifier la qualité chimique d'eau.

III .2_Matériels et moyens d'analyse :

Les analyses chimiques ont été effectuées par l'ADE de Béjaia en respectant les techniques de prélèvement prescrites, pour que son analyse démontre les caractéristiques de l'ensemble des éléments chimiques duquel l'eau est tirée. L'eau doit être manipulé de manière à ce que sa composition ne soit pas modifiée pendant le transport et toutes les précautions possibles doivent être prises afin d'éliminer la contamination ou un changement de composition de l'eau causé par la température ou les manipulations inadéquates.

Dans notre campagne les prélèvements sont effectués par des équipements et des techniques d'analyse d'eau modernes. Les teneurs en chlorures ont été déterminées par la méthode de titration (méthode de Mohr). Le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, les sulfates et les bicarbonates ont été analysés à l'aide d'un Specto photomètre à flamme (SKALAR) et Les nitrates ont été dosés par autoanalyseur (SKALAR).

III .3_ Etude des paramètres chimiques :

III.3.1 Répartition et évolution des éléments majeurs :

Les concentrations des éléments chimiques qu'on peut rencontrer dans les eaux souterraines, ainsi que leurs origines sont reportées dans le Tableau (.III.1) En effet, on peut relier entre ces éléments et la géologie ou une origine anthropique.

Tableau .III.1: Résultats des analyses d'eau 2011.

N°	x (UTM)	y(UTM)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻
			mg/l							
1	651927,87	4052869	300,6	90,7	1926,7	23,8	423	2829,6	537,2	/
2	654950,05	4054478,8	308,1	128,4	606,2	1,7	1208	957,6	481,5	35,9
3	659435,55	4055723,5	549	100,2	1851,2	23,3	845	2685,1	469	/
4	661221,88	4056049,6	230,6	89,3	336,6	3,6	1076	688,1	371,3	40,8
5	659040,39	4056415,8	238,2	65,1	361,9	4,4	958	772,9	287,1	8,8
6	667022,23	4059613,4	256,7	71	256,2	4	881	508,4	230,4	30,5
7	673407,48	4061259,2	293,2	99	1797,7	21,9	761	2896,9	501	/
8	673420,39	4061226,2	253,8	73,1	275,8	2,5	562	509,4	415,4	22,7
9	681401,45	4063307,9	178,9	45,4	110,6	3,2	812	89,6	263,8	33,8
10	682368,16	4064190,6	276,1	95,1	1594,7	19,1	1098	2608,4	460	/
11	678694,35	4063940,5	215,1	69	211	2,6	556	352	368,4	/
12	682150,79	4064448,3	238,1	97,9	131,8	0,2	871	378,5	197,1	2,4
13	684220,42	4065174,9	155,3	68,7	272,5	17,3	804	194,2	279,5	6,3
14	668434,66	4060000,6	184,3	47	208,2	5,9	674	251,6	138,4	7,8
15	671528,5	4060728,2	278,8	96,7	1797	19,2	671	2339,2	439	2
16	679819,38	4064193,5	190,4	48,9	170,5	0,9	691	180,6	159,9	3,1
17	684821,53	4066991,8	280,7	197,5	2472,7	53,4	912	3960,2	688,1	/

Les concentrations des éléments chimiques qu'on peut rencontrer dans les eaux souterraines, ainsi que leurs origines sont reportées dans le Tableau (.III.2) En effet, on peut relier entre ces éléments et la géologie ou une origine anthropique.

Tableau .III.2: les éléments et leurs Origine [11].

Elément	Concentrations habituellement rencontrées (mg/L) hors pollution	Sources potentielles
Calcium (Ca ²⁺)	Centaines de mg/L	Le calcium Ca ²⁺ et le magnésium Mg ²⁺ sont présents dans les roches cristallines et les roches sédimentaires. Ils sont très solubles et sont donc largement représentés dans la plupart des eaux.
Magnésium (Mg ²⁺)	Dizaines de mg/L	
Sodium (Na ⁺)	Dizaines de mg/L	Le cation sodium (Na ⁺) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites). La roche Halite (évaporite NaCl) est le sel de cuisine. Il est très soluble dans l'eau
Potassium (K ⁺)	Inférieur à 10 mg/L (hormis pour les eaux ayant traversé des formations évaporitiques)	Le potassium (K ⁺) est assez abondant sur terre, mais peut fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombinaé dans les sols (sur les argiles notamment). Les sources principales de potassium sont les roches cristallines.
Bicarbonates (HCO ₃)	Centaines de mg/L	Roches carbonatées (calcaires, dolomies)
Chlorures (Cl)	Quelques mg/L (la dissolution d'halite ou la présence d'un biseau salé peut engendrer des valeurs de quelques centaines de mg/L)	Origine atmosphérique : dans les aquifères libres, la concentration en chlorures est directement liée à la teneur en chlorure des précipitations. Dépend finalement plus de la distance à la mer que de la lithologie
Sulfates (SO ₄)	Quelques mg/L à quelques dizaines de mg/L (quelques centaines de mg/L dans le cas de lessivage de roches évaporitiques)	Origine atmosphérique (eau de pluie), la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse (CaSO ₄) et la pyrite, pollution agricole (engrais)
Nitrates (NO ₃)	Inférieure à 5 mg/L pour l'origine naturelle	Sources naturelles : précipitations, interactions sol/végétation Sources anthropiques dès lors que les concentrations excèdent 10 mg/L : lessivage d'engrais, rejets domestiques ou industriels

Dans le but de voir cette évolution et répartition des éléments chimiques dans notre zone d'études on a essayé d'établir une carte pour chaque élément chimique

III .4_Cartographie hydrochimiques :

III.4.1 Le calcium (Ca^{++}):

L'analyse de la carte de teneur en calcium montre que la forte concentration est enregistrée au centre de la plaine au niveau du forage (F3, 549mg/l). La concentration la plus faible est marquée à la partie East de la basse de la Soummam (F13, 155.3 mg/l). Les parties Nord et sud sont caractérisées par des teneurs moyennes variées de 200 mg/l à 300mg/l.

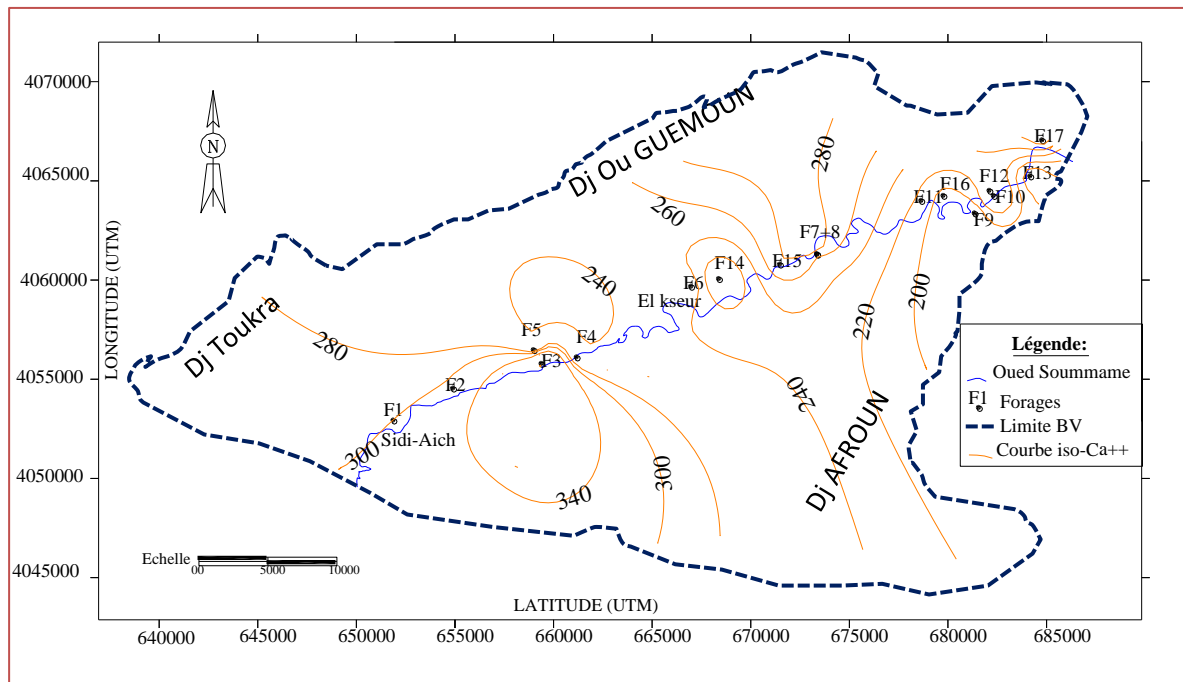


Fig.III.1 : Carte du calcium (Ca^{++}).

III.4.2 Le magnésium (Mg^{++}):

La concentration du magnésium sont en générale dans la norme de l'OMS (150 mg/l), avec une valeur minimale de 45,4 mg/l au niveau de forage F9. Les concentrations maximales sont enregistrés à la partie Nord de la basse Soummam au niveau du F17 et avec une valeur de 197,5mg/l.

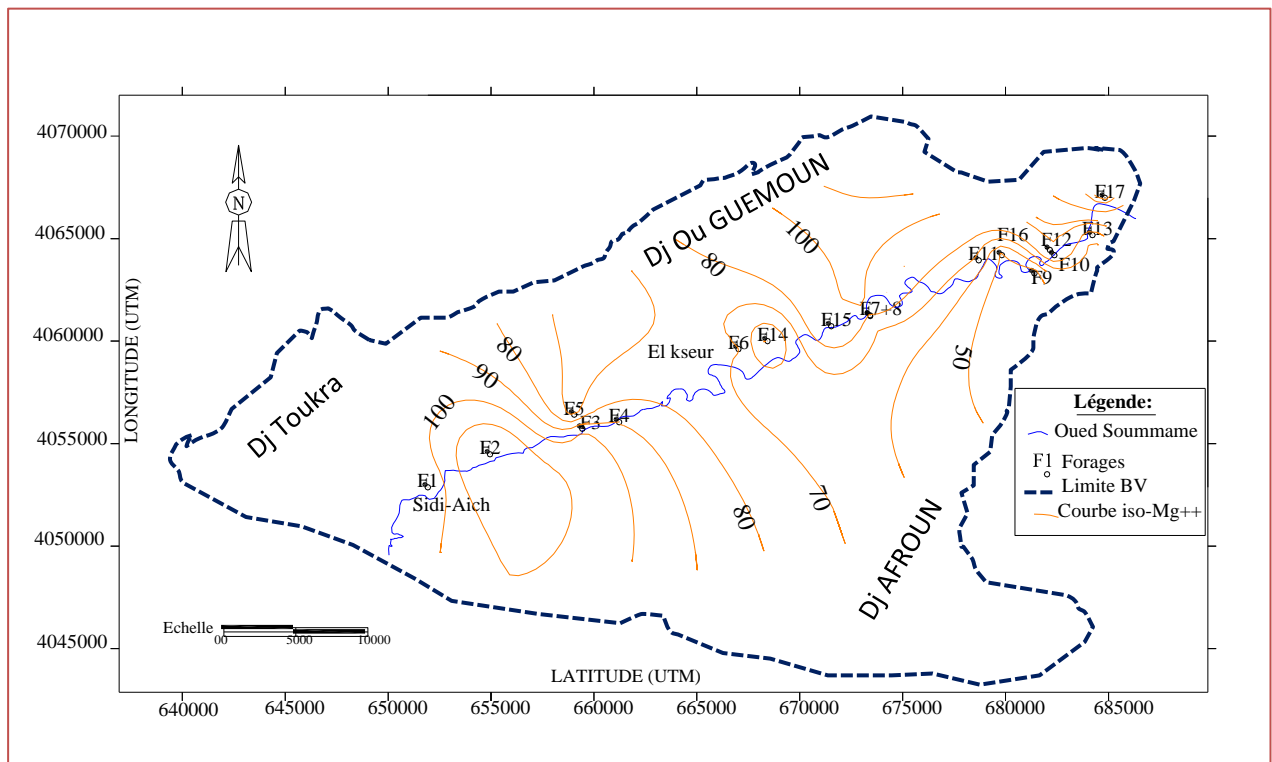


Fig.III.2 : Carte du magnésium.

III.4.3 Le sodium (Na⁺) :

Les teneurs élevées et dépassent la norme de l’OMS sont enregistrés au Nord et à l’Ouest de la zone d’étude. Les teneurs moyennes sont enregistrées au centre de plaine près d’EL Kseur.

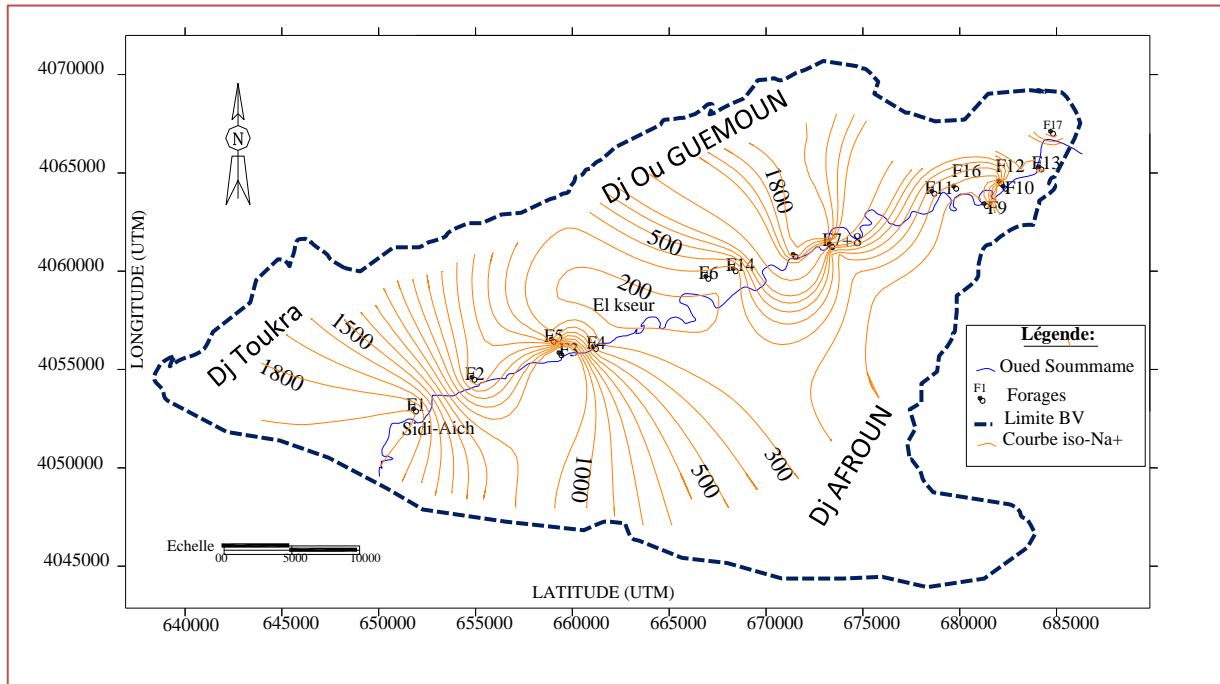


Fig.III.3 : Carte du sodium.

III.4.4 Le potassium (K⁺) :

La répartition du potassium dans la basse Soummam est totalement acceptable et dans les normes de potabilisation (20 mg/l).

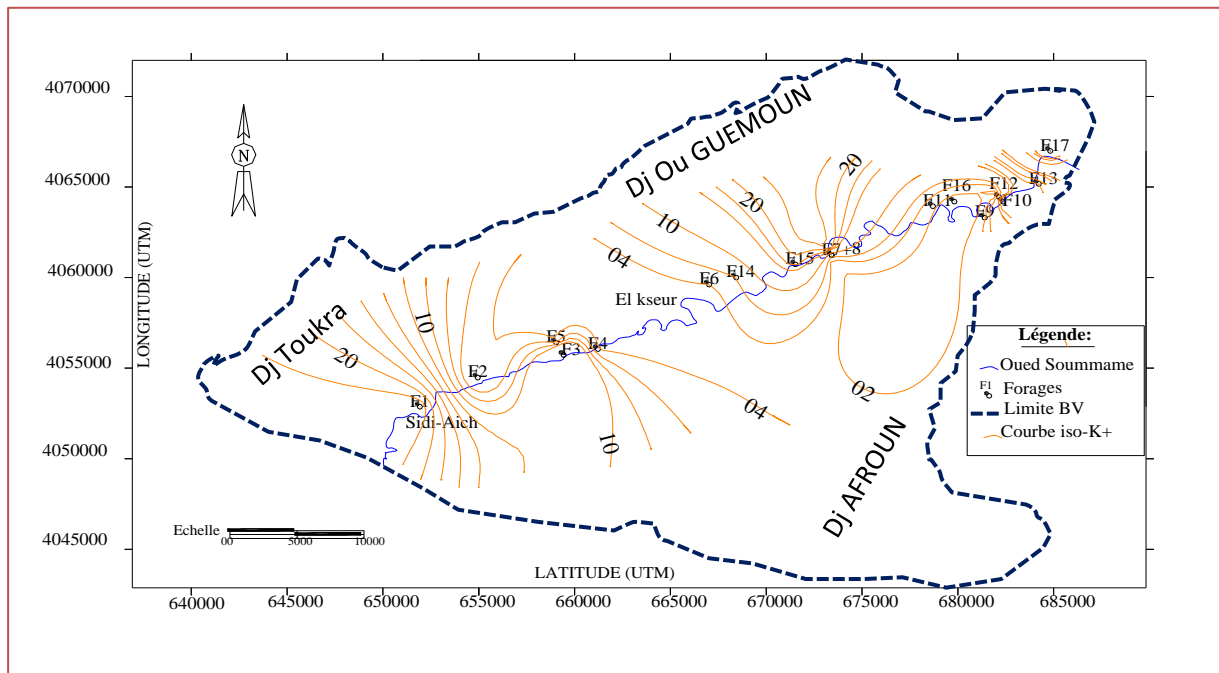


Fig.III.4 : Carte du potassium.

III.4.5 Les chlorures (Cl^-) :

Les valeurs (OMS) admissibles sont de 250 mg/l, au-delà des 600 mg/l ils deviennent dangereux pour les personnes présentant des troubles cardiovasculaires.

La plupart des eaux de la zone d'étude présentent des teneurs des chlorures qui dépassent la norme de l'OMS. Les teneurs élevées sont enregistrés à l'Ouest et au Nord. Cela confirme la source de salinité (eau de mer).

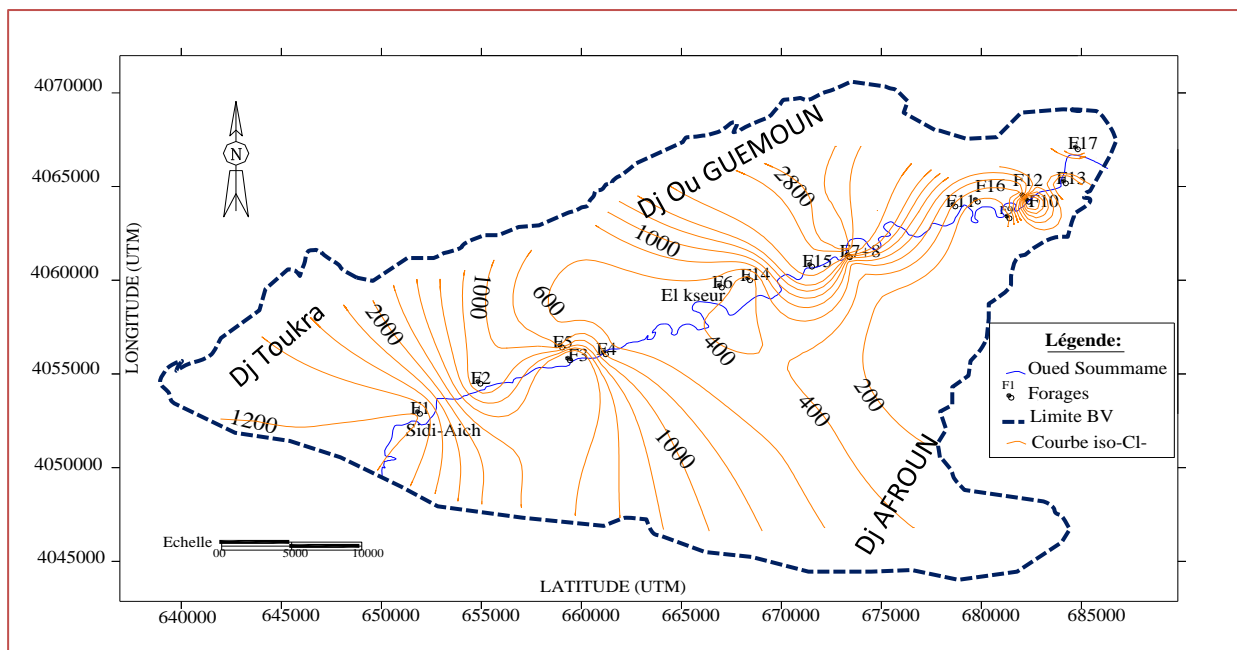


Fig.III.5 : Carte des chlorures.

III.4.6 Les sulfates (SO_4^{2-}):

La norme de l'OMS tolérable pour les sulfates est de 250 mg/l. Les teneurs élevées provoquent des troubles digestifs chez l'enfant. Les fortes concentrations sont localisées au Nord et l'Ouest de la zone d'étude (480, 520mg/l), d'autre part les teneurs moyennes sont marqués au centre de la plaine près d'El Kseur.

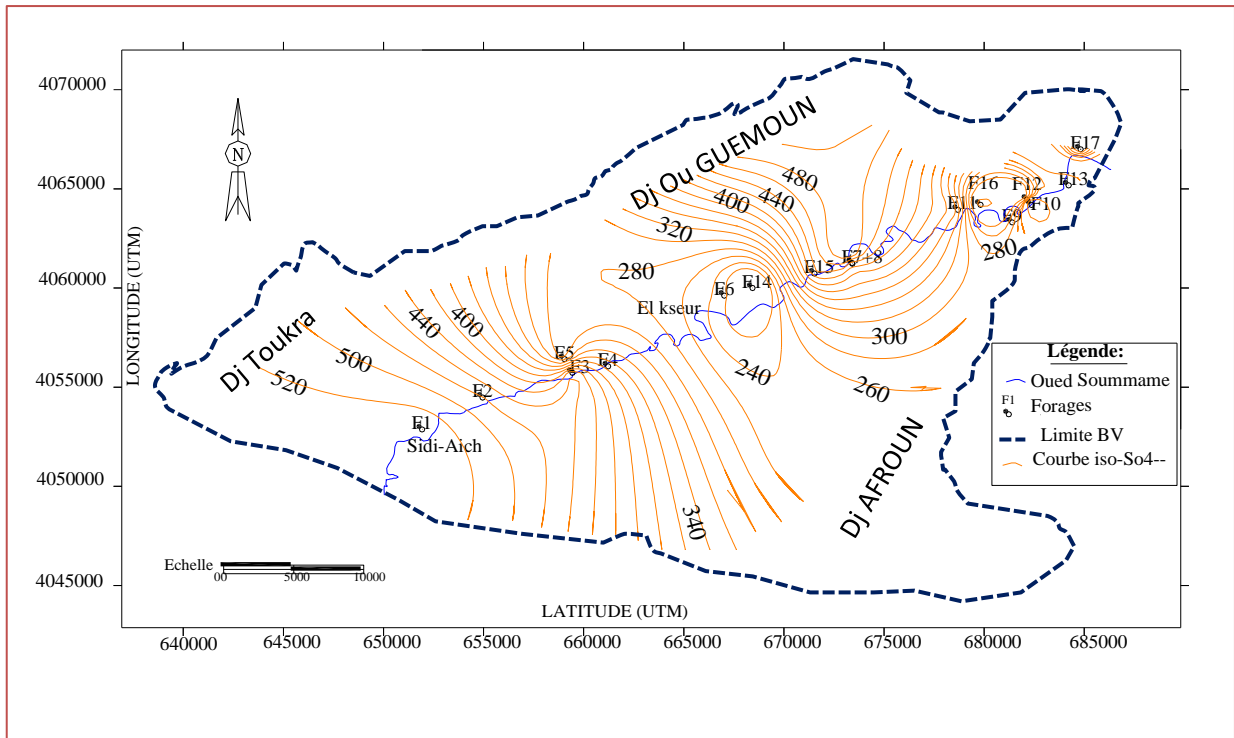


Fig.III.6 : Carte des Sulfates.

III.4.7 Les bicarbonates (HCO₃):

Les carbonates et les bicarbonates donnent un gout agréable à l'eau et ne présentent aucun risque pour la santé humaine. Les fortes teneurs en bicarbonates dépassent 1000 mg/l au centre de plaine.

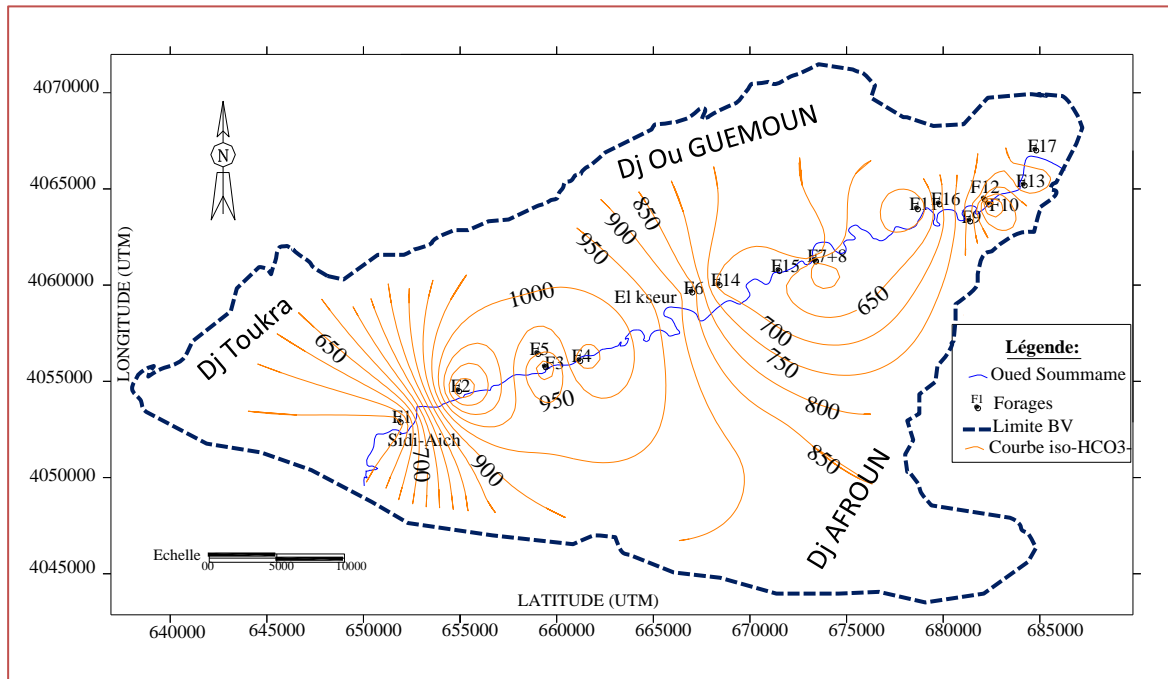


Fig.III.7 : Carte des Bicarbonates.

III.4.8 Les nitrates (NO₃⁻):

Les concentrations élevées sont localisées au Sud, mais elles vérifiées la norme de l’OMS de 50mg/l.

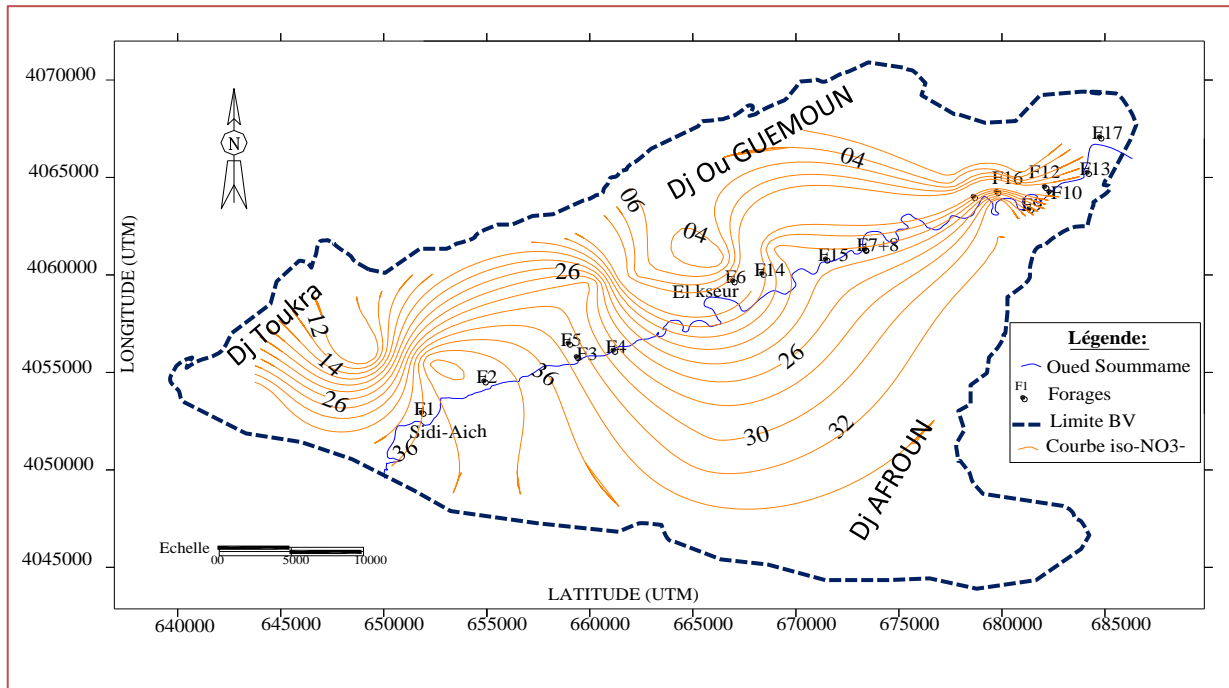


Fig.III.8 : Carte des Nitrates.

III .5_ Qualité chimique des eaux:

Pour la détermination de la qualité chimique des eaux on a utilisé d’une part des normes fixées par l’organisation mondiale de la santé (O.M.S) et d’autre part par le degré hydrométrique.

III.5.1 Potabilité des eaux:

La potabilité des eaux souterraines est défini en se basant sur deux types de normes. Ceux de l’O.M.S et ceux basées sur le D.H.T.

III.5.1.1_ Selon l’O.M.S :

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (**Tableau .III.3**) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

- ✓ Une concentration maximale acceptable à partir de laquelle une eau provoque une certaine réticence chez le consommateur ;
- ✓ Une concentration maximale admissible qui correspond à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse à la santé .Les échantillons analysés ont des teneurs en chlorures et inférieures à la norme maximale admissible pour les deux périodes. Pour les nitrates, on a 100 % d'échantillons dont la teneur est inférieure à la norme. Les sulfates ne représentent que 52.94% < à la norme.
- ✓ Pour le calcium on a 23.53% des eaux qui ont des teneurs inférieures à la norme. Et pour le magnésium on a 94.12% , qui ont des teneurs < à la norme

Tableau .III.3 : Normes de potabilité de l'O.M.S.

Eléments Chimiques	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration Maximale admissible (mg/l)	Pourcentage des échantillons ayant une concentration inférieure à la concentration maximale admissible(%)
Calcium	75	200	23.53
Magnésium	50	150	94.12
Sulfates	200	400	52.94
Chlorures	200	600	47.06
Nitrates	50	100	100

III.5.1.2_Degré hydrotimétrique total (D.H.T) :

Le degré hydrométrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des .Concentrations en calcium et en magnésium.

$$DHT = rCa^{++} + rMg^{++} \quad (\text{en méq/l})$$

$$DHT = (rCa^{++} + rMg^{++}) \times 5 \quad (\text{en degré Français } ^{\circ}F)$$

Le tableau (III.4) montre que la majorité des eaux analysées sont très dure avec un D.H.T supérieur à 54 0F

Tableau.III.4 : Dureté des eaux en (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969).

D.H.T (en °F)		0 – 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau		Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Pourcentage des points	Mars 2011	0	0	0	0	100

III.5.2 Aptitude à l'irrigation:

III.5.2.1_Salinité :

Selon R. S. AYERS et D. W. WESTCOT (1988) quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation montrent que :

- ✓ Si, la salinité exprimée par la conductivité électrique en $\mu\text{S} / \text{cm}$ est inférieure à 700, il n'y a aucune restriction pour l'irrigation ;
- ✓ Si, la conductivité électrique varie entre 700 et 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- ✓ Et si, elle est supérieure à 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est forte

Tableau. III .5 : classification de conductivité.

classe de salinité	CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Pourcentage des échantillons (%)
		Mars 2010
C1	< 250	0
C2	250-750	0
C3	750-2250	47,06
C4	2250-5000	17,65
C5	5000-10000	35,29

III.5.2.2_ Eaux à forte teneur en sodium :

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer une destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988). Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l et les résultats de calcul}$$

sont enregistrés dans le tableau (III .6)

Tableau .III.6 : calcul de SAR.

Classes	SAR	pourcentage
S1	<13	64,7
S2	13-23	11,76
S3	>23	23,53

III.5.2.3_ Classification de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sels saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par formule ci-après :

$$\% Na^+ = \frac{Na^+}{Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+} \times 100, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l}$$

Ces éléments chimiques sont utilisés en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau .Le report des valeurs du SAR en fonction de la conductivité électrique sur le diagramme de Richard

(Fig.III.9) nous a parmi de dire que les eaux souterraines de la région, appartiennent à deux classes dominantes. Il s'agit de C4-S2 de qualité médiocre et C5-S4 de qualité mauvaise.

Donc on peut dire que les eaux souterraines de la région d'étude ne convenant directement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisé sous certaines condition sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

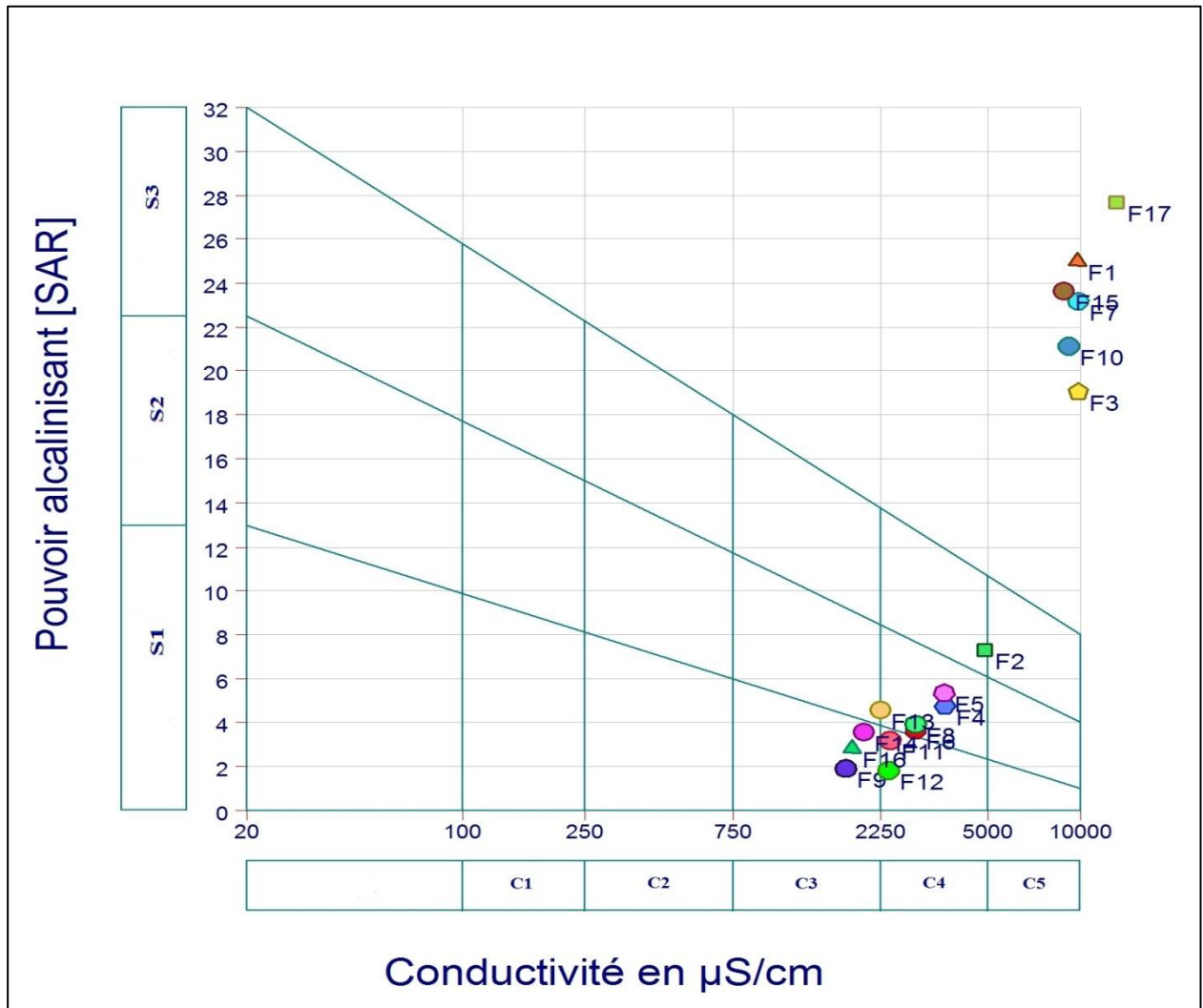


Fig.III.9: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR.

III.6_ Classification chimiques des eaux souterraines :

III.6.1 Classification des eaux souterraines selon PIPER :

Le diagramme de Piper est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations respectivement, et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques

La représentation des résultats chimiques des eaux prélevées de nappe souterraine de la basse vallée de la Soummam sur le diagramme de Piper (**Fig.III.10**) montre que:

le chimisme des eaux analysées est caractérisé par deux faciès chimique

- chlorurée sodique et potassique
- bicarbonate calcique magnésienne

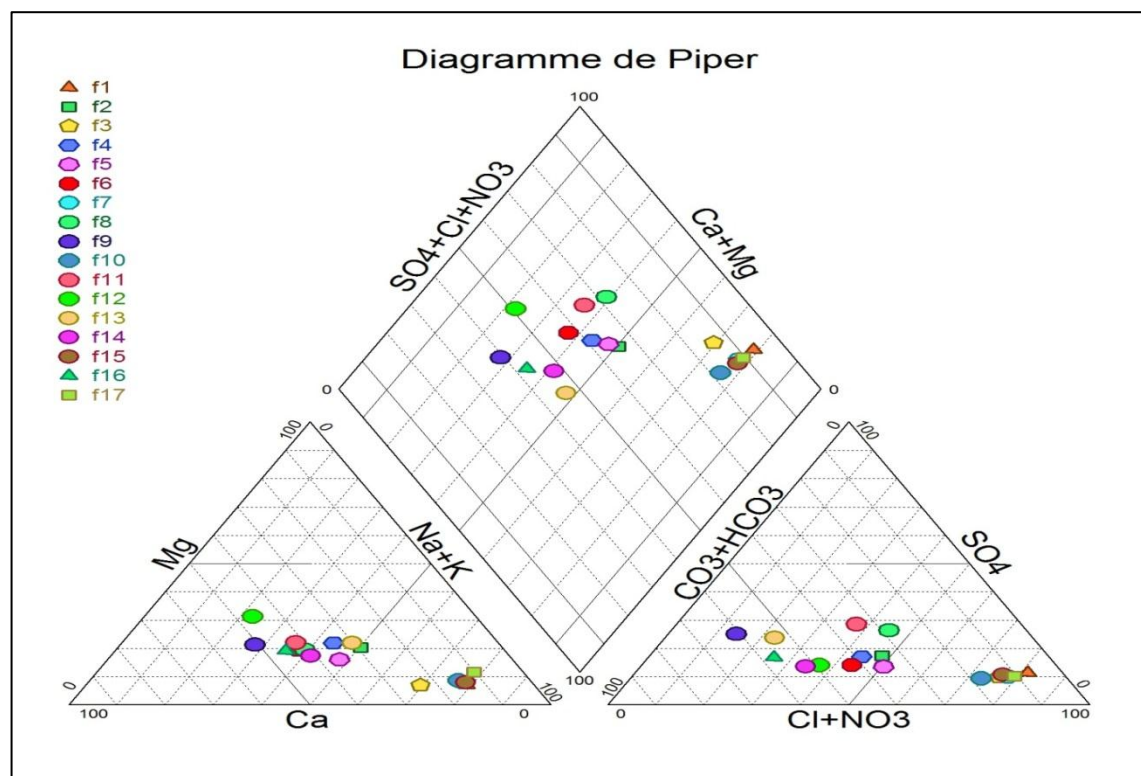


Fig.III.10: Représentation des eaux souterraines sur le diagramme de PIPER.

III.6.2 Classification des eaux souterraines selon Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée.

La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique.

La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.

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

L'analyse des diagrammes de SCHOELLER – BERKALOFF (**Fig.III.11** et **Fig.III.12**) que la majorité des eaux de la zone d'étude donnent des faciès chimique ; Chloruré sodi potassique et bicarbonaté calcique magnésienne

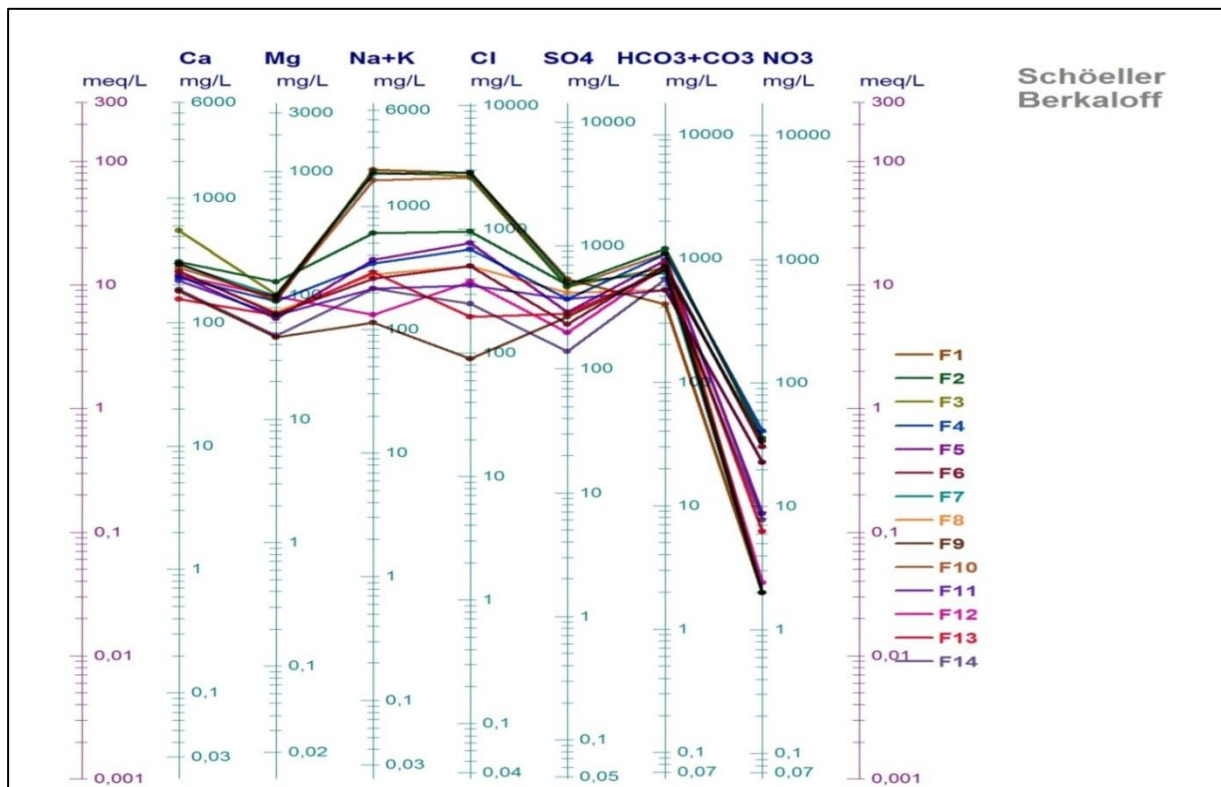


Fig.III.11: Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff.

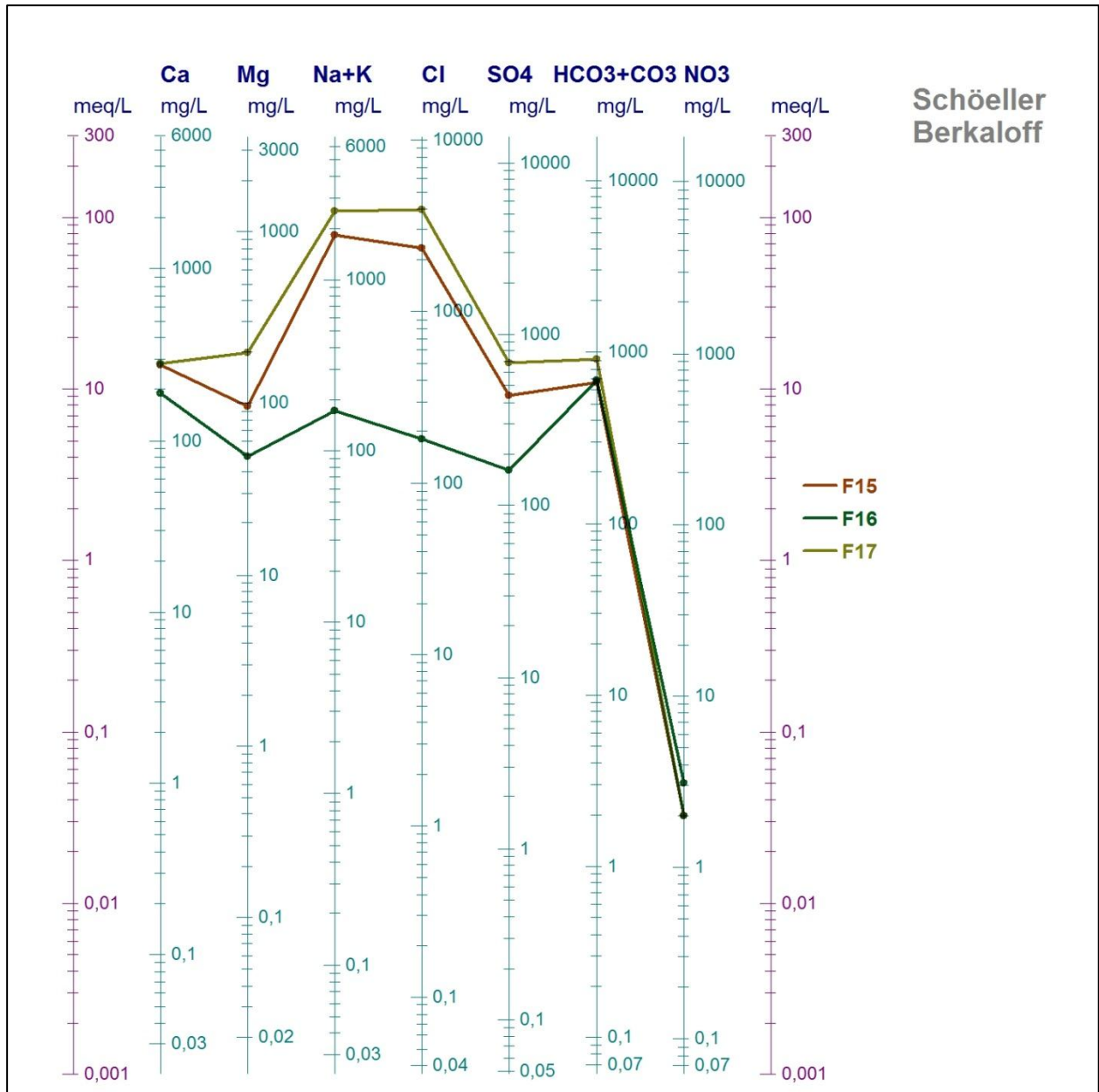


Fig.III.12: Représentation des résultats d’analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff (suite).

III.7_Etude statistique des données hydrochimiques :

III.7.1 Statistique descriptive :

L’analyse statistique des données hydrochimiques est basée sur la description quantitative (le minimum, le maximum, la moyenne, l’écart -type et le coefficient de variation).

- **Le minimum et le maximum :**

Ils représentent la plus grande et la plus petite valeur de l'échantillon.

- **La moyenne arithmétique :**

La moyenne arithmétique d'une série quantitative est définie par la somme des valeurs observées, divisée par l'effectif total.

- **L'écart-type :**

L'écart-type observé correspond à la racine carrée de la variance observée.

- **Le coefficient de variation (CV) :**

Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart -type et la moyenne.

Les résultats statistiques des variables chimiques des eaux souterraines de la basse Soummam sont reportés dans le Tableau (III.7) et comparés aux normes algériennes.

$$cv = \frac{ecart-type}{moyenne} * 100$$

Tableau .III.7 : Résultats statistiques des variables chimiques des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam.

Variable	norme algérienne	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Cv (%)
Ca ⁺⁺	200	155,3	549	260,5	84,6	0,32
Mg ⁺⁺	150	45,4	197,5	87,2	72,3	0,83
Na ⁺	200	110,6	2472,7	846	806,8	0,95
K ⁺	20	0,2	53,4	12,2	13,4	1,1
Cl ⁻	500	89,6	3960,2	1306	1224,4	0,94
SO ₄ ⁻⁻	500	138,4	688,1	369,8	144,9	0,39
NO ₃ ⁻	50	2	40,8	13,3	13,8	1,04
HCO ₃	—	423	1208	811,9	201,5	0,25

D'après le tableau (III.7) les valeurs maximales des paramètres chimiques (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻ et SO₄⁻), ainsi que les valeurs moyennes de (Ca⁺⁺, Na⁺ et Cl⁻) dépassent les normes Algériennes de potabilité.

- **Corrélation entre les variables :**

La matrice de corrélation est une matrice carrée caractérisée par un coefficient de corrélation qui peut être utilisé pour distinguer la relation entre deux paramètres (Wuensch, 2001).

Les différentes relations entre les paramètres chimiques par l'estimation du coefficient de corrélation peuvent être déterminées sur la base du coefficient critique théorique (r_c) tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre de couples mis en jeu. (**Tableau .III.8**) Sur cette base le coefficient critique r_c est égal à 0.549.

Tableau .III.8: Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson.

v / e	0.10	0.05	0.02	v / e	0.10	0.05	0.02
1	0.9877	0.9969	0.9995	17	0.3887	0.4555	0.5285
2	0.9000	0.9500	0.980	18	0.3783	0.4438	0.5155
3	0.8054	0.8783	0.9343	19	0.3687	0.4329	0.5034
4	0.7293	0.8114	0.8822	20	0.3598	0.4227	0.4921
5	0.6694	0.7545	0.8329	25	0.3233	0.3809	0.4451
6	0.6215	0.7067	0.7887	30	0.2960	0.3494	0.4093
7	0.5822	0.6664	0.7498	35	0.2746	0.3246	0.3810
8	0.5494	0.6319	0.7155	40	0.2573	0.3044	0.3578
9	0.5214	0.6021	0.6851	45	0.2428	0.2875	0.3384
10	0.4973	0.5750	0.6581	50	0.2306	0.2732	0.3218
11	0.4762	0.5529	0.6339	60	0.2108	0.2500	0.2948
12	0.4575	0.5324	0.6120	70	0.1954	0.2319	0.2737
13	0.4409	0.5139	0.5923	80	0.1829	0.2172	0.2565
14	0.4259	0.4973	0.5742	90	0.1726	0.2050	0.2422
15	0.4124	0.4821	0.5577	100	0.1638	0.1946	0.2301
16	0.4000	0.4683	0.5425				

Avec :

v: le degré de liberté. $v = n - p - 1$ avec n: le nombre d'observations,

p: le nombre de variables explicatives. e : le risque d'erreur.

Les résultats des coefficients de corrélation entre les variables sont résumés dans le Tableau (.III.9)

Tableau .III.9:Matrice de corrélation (Pearson (n)).

Variabes	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃
Ca ⁺⁺	1							
Mg ⁺⁺	0,42	1						
Na ⁺	0,61	0,70	1					
K ⁺	0,38	0,75	0,88	1				
Cl ⁻	0,61	0,74	0,99	0,88	1			
SO ₄ ⁻	0,53	0,81	0,84	0,76	0,86	1		
NO ₃ ⁻	-0,22	-0,18	-0,55	-0,54	-0,52	-0,15	1	
HCO ₃	0,12	0,35	-0,04	-0,03	0,03	0,08	0,32	1

Le Tableau **III.9** (matrice de corrélation) et leurs origine des éléments chimique des paramètres physico-chimiques montre que :

- le calcium Ca⁺⁺ possède une bonne corrélation avec Na⁺ et Cl⁻ (R=0.61), .La présence des ions Ca²⁺ dans l'eau est liée principalement à une origine naturelle : la dissolution des roches évaporitiques.
- le magnésium Mg⁺ possède une fort corrélation avec les sulfates (R = 0.81) ce qui indique l'origine d'existence d'epsomite (MgSO₄) d'une roche évaporite .cela revient la formation schisteuse de la région, Outre une bonne corrélation avec le potassium K⁺ (R=0.75) et chlorure(R=0.74) et sodium(R=0.70)
- Le sodium Na⁺ parfaitement colorée avec le Cl⁻(R=0.99) .cela indique l'existence de halite(NaCl) d'origine évaporitiques.
- Le potassium colère avec le chlore et sulfate de même que le chlore avec le sulfate. Ce qui confirme l'origine de potassium est les roches évaporitiques.

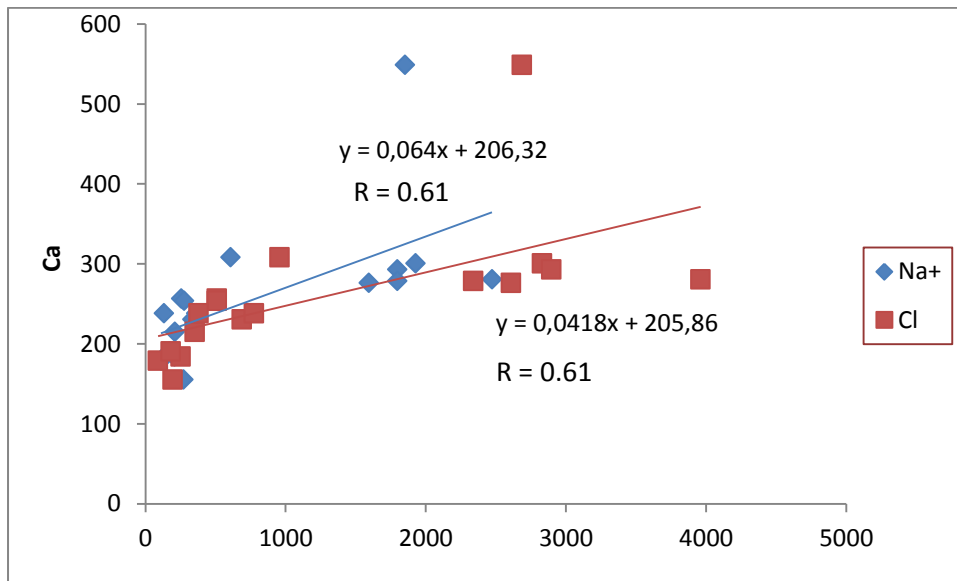


Fig.III.13: Droites des régressions de calcium en fonction de (Na⁺⁺) et (Cl⁻).

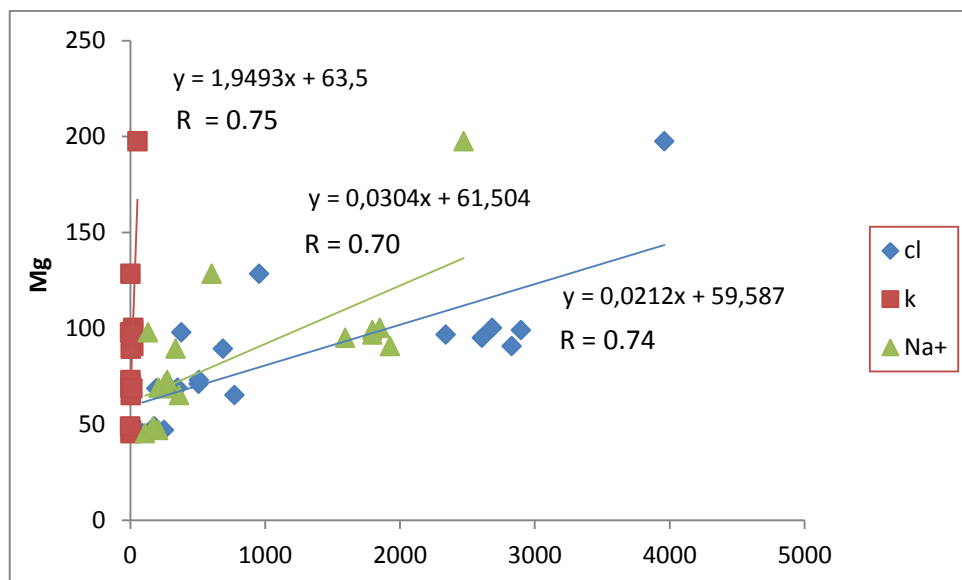


Fig.III.14: Droites des régressions de magnésium en fonction de (Cl⁻), (K⁺) et (Na⁺).

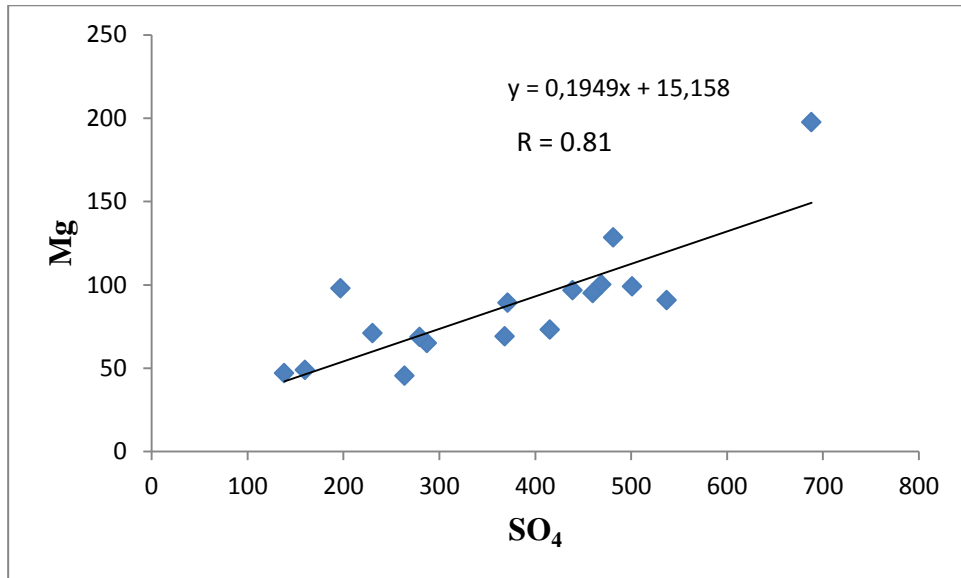


Fig.III.15: Droite de régression de magnésium en fonction de (SO₄²⁻).

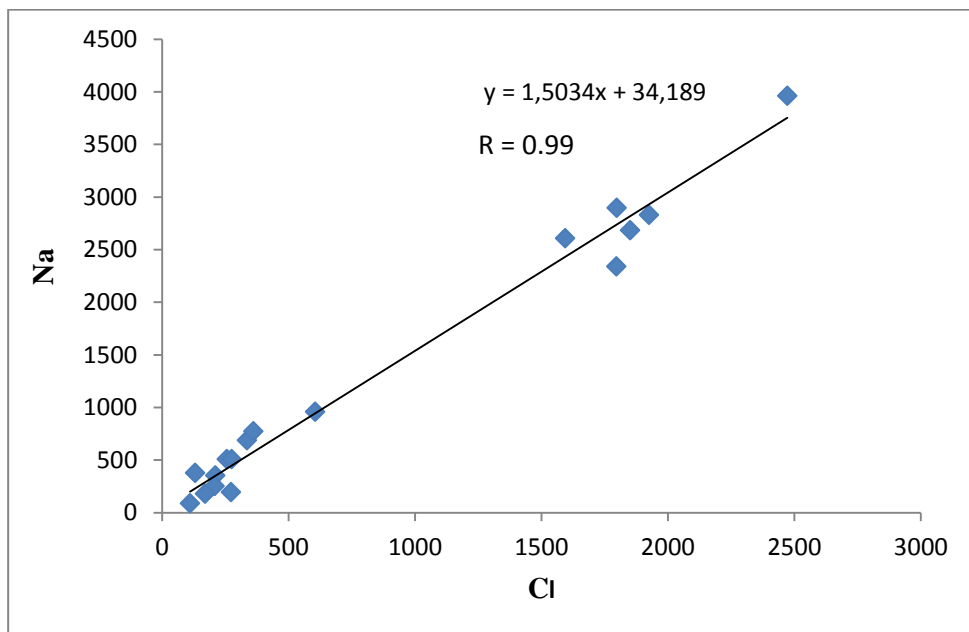


Fig.III.16:Droite de régression de sodium en fonction de (Cl⁻).

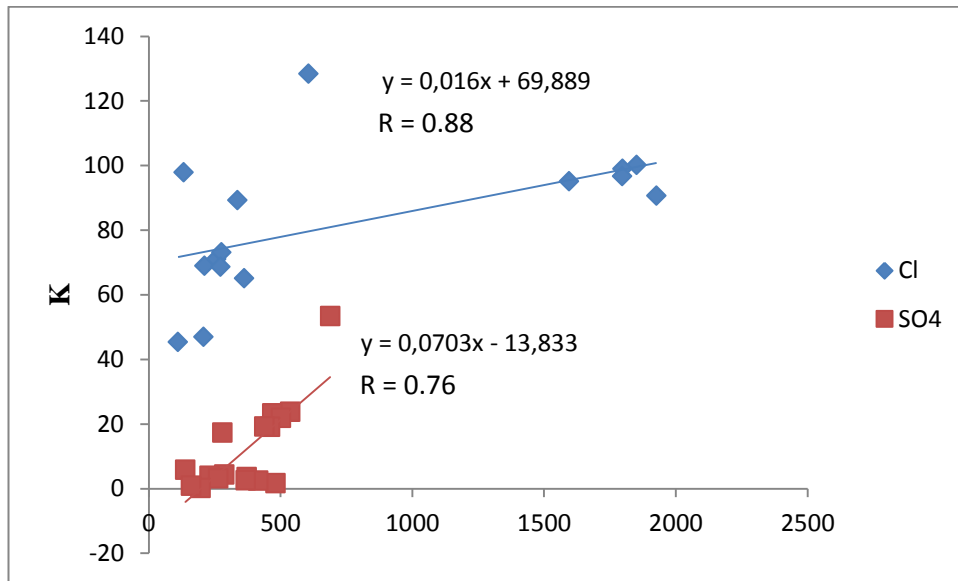


Fig.III.17: Droite de régression de potassium en fonction de (SO₄²⁻) et (Cl).

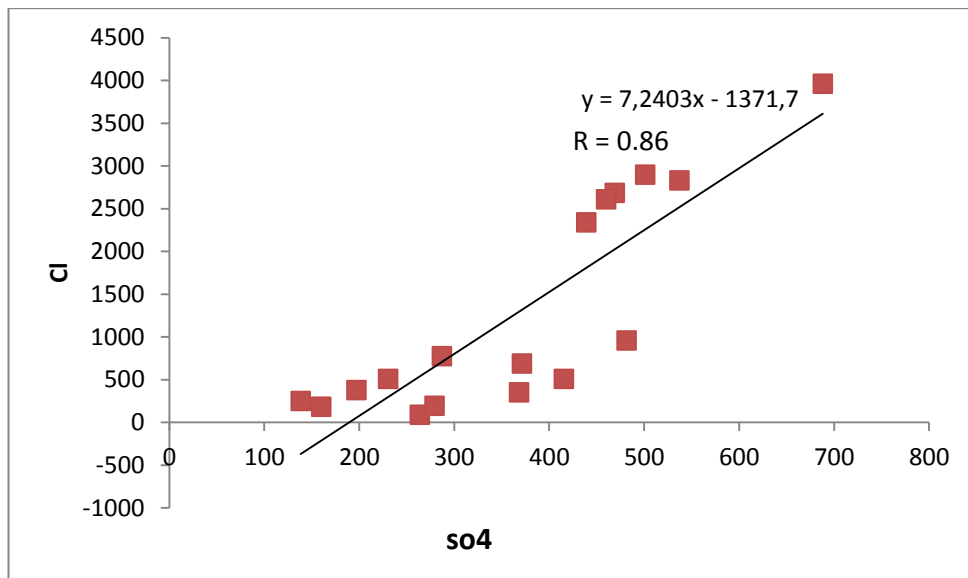


Fig.III.18: Droite de régression de potassium en fonction de (SO₄²⁻).

III.7.2 étude des rapports caractéristiques:

Un autre moyen pour mieux apprécier l'origine des faciès caractéristiques des eaux de la région est l'étude des rapports caractéristiques: (Ca⁺⁺/Mg) & (SO₄⁻/HCO₃), (Ca⁺⁺/Mg⁺) & (SO₄⁻/Cl), afin d'avoir une idée sur la répartition et l'évolution des faciès chimiques. L'examen des deux relations des rapports caractéristiques nous a permis de révéler la dominance des ions sulfatés,

chlorures et bicarbonatés avec le pôle cationique calcique, (Fig.III.19). Ce qui confirme deux facies chimique dominantes bicarbonaté calcique et chloruré calcique.

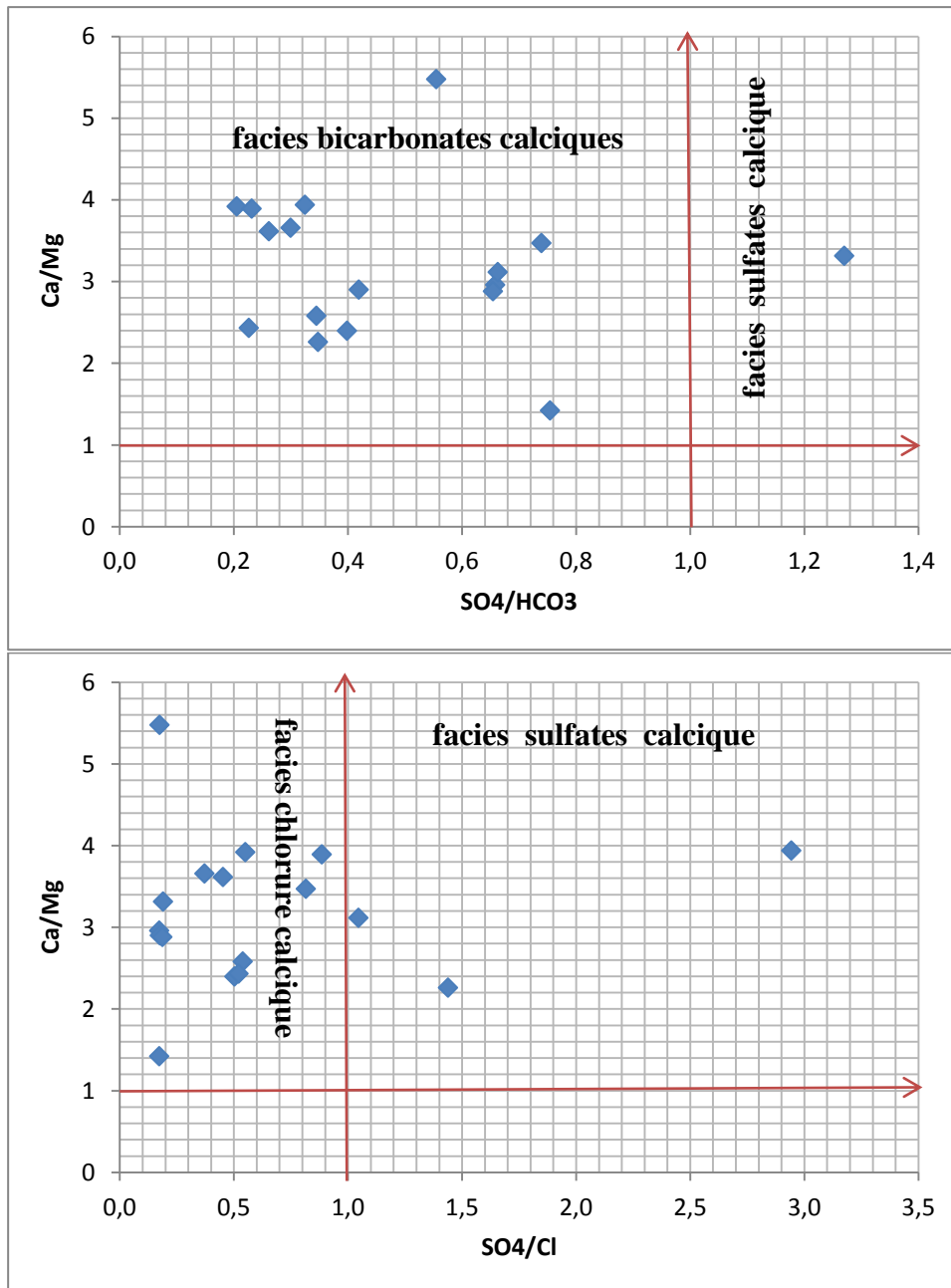


Fig.III.19: Répartition des facies chimiques selon les rapports caractéristiques.

III.7.3 L'indice d'échange de base au sein des aquifères (i.e.b):

L'indice d'échange (i.e.b) exprime les échanges cationiques qui peuvent avoir lieu dans un aquifère. En effet, la surface de la fraction fine de la matrice d'une nappe peut absorber

des Cations qui peuvent être substitués à d'autres en solution dans l'eau souterraine. Les Cations mis en jeu sont : le Calcium, le Magnésium, le Sodium et le Potassium. Le sens des

échanges cationique tend à établir l'équilibre entre l'eau et la fraction fine.

L'indice d'échange de base est donné par la formule:

$$i. e. b = \frac{[Cl^- - (Na^+ + K^+)]}{Cl^-}$$

Selon le signe de l' i.e.b, on peut distinguer d'après Schoeller (1969) :

- i.e.b<0 : le calcium de l'eau, est échangé contre le sodium (ou le potassium) du terrain.
- i.e.b >0 : il y a fixation du sodium (ou de potassium) et solubilisation du calcium.
- i.e.b=0 : il n'y a pas d'échange ionique entre la roche et l'eau (équilibre).

Dans le secteur d'étude, le tableau de l'i.e.b. montre pour 88% des eaux souterraines qui visualisent des valeurs positives .cela indique la solution du calcium et fixation du sodium(ou potassium). Sauf les eaux des forages F9 et F13 qui sont changés inversement.

Tableau III.10 : calcul d'IBE au différent forage.

forage	IBE
F1	0,31
F2	0,37
F3	0,30
F4	0,51
F5	0,53
F6	0,49
F7	0,37
F8	0,45
F9	-0,27
F10	0,38
F11	0,39
F12	0,65
F13	-0,49
F14	0,15
F15	0,22
F16	0,05
F17	0,36

III.7.4 Analyse en composantes principales (ACP) :

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique essentiellement descriptive, son objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum des informations contenues dans un tableau de données.

L'ACP sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles.

III.7.4.1_ Principe de l'ACP :

L'ACP consiste à déterminer la corrélation des variables et de regrouper ces variables en ensembles dans des familles de même origine . Ces ensembles des variables nouvelles, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales.

III.7.4.2_ Application de l'ACP :

L'ACP a été appliquée sur 17 échantillons d'eau et 8 variables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , et NO_3^-).cette analyse a été réalisée par le logiciel (XLstat 2014).

1 - Etude des valeurs propres :

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, met en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de variance totale ainsi que leur cumul.

Le premier axe principal a une valeur propre égale à 4.86, il explique 60,78 % de la variance totale, la seconde composante égale à 1,46 correspond à un pourcentage de 18,23%. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec 79,01% de la variance totale. Si on fait les trois facteurs (axes) , traduisent l'essentiel des informations recherchées et permettent de représenter de manière significative le nuage de points car la somme de la variance exprimée par ces facteurs est de l'ordre de 87.82 %. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus (**Tableau .III.11**).

Tableau .III.11: Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux

	F1	F2	F3
Valeur propre	4,86	1,46	0,71
Variabilité (%)	60,78	18,23	8,81
% cumulé	60,78	79,01	87,82

2 - Etude des variables :

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le Tableau (.III.12)

Tableau.III.12: Corrélations entre les variables et les facteurs.

	F1	F2	F3
Ca ⁺⁺	0,638	0,136	-0,747
Mg ⁺⁺	0,823	0,384	0,252
Na ⁺	0,973	-0,121	-0,036
K ⁺	0,911	-0,129	0,276
Cl ⁻	0,980	-0,060	-0,012
SO ₄ ⁻	0,888	0,204	0,052
NO ₃ ⁻	-0,501	0,686	-0,030
HCO ₃	0,063	0,863	0,052

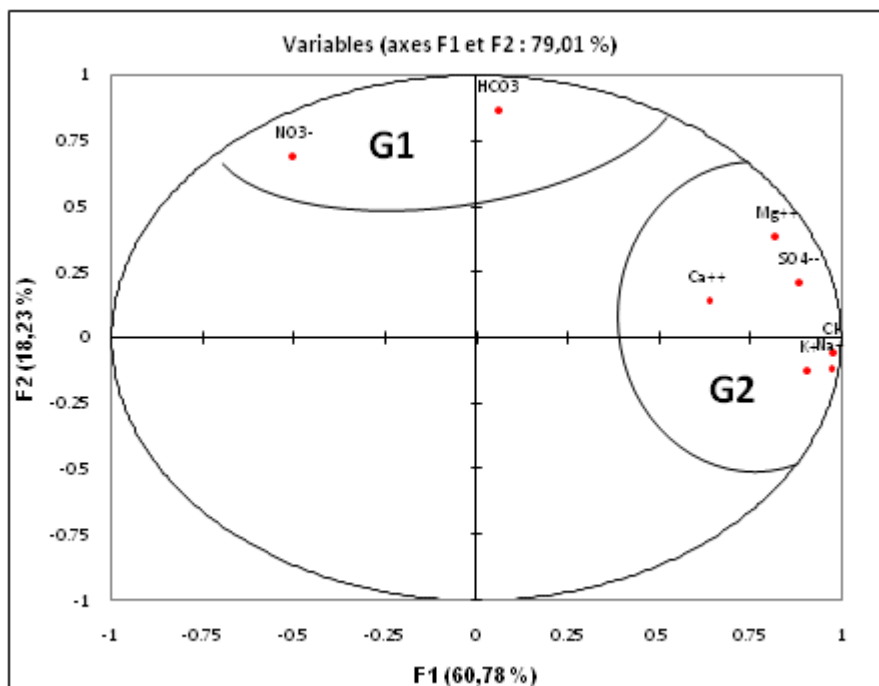


Fig.III.20: Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2).

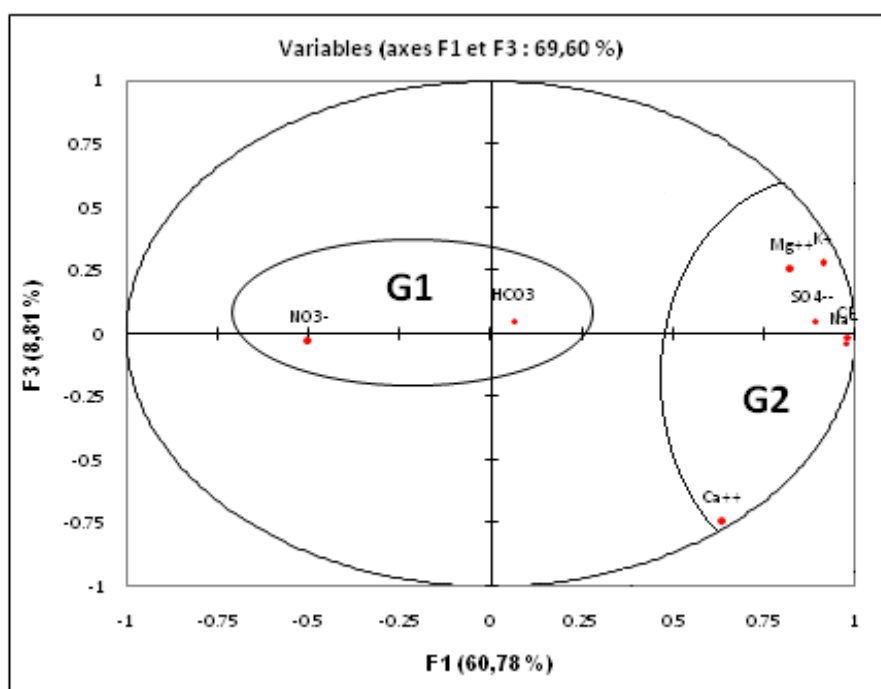


Fig.III.21: Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F3).

3 - Etude des individus :

Le Tableau.(III.13) présente les coordonnées des observations (forages) par rapport aux principaux plans (F1-F2) et (F1-F3)

Tableau.III.13: Coordonnées des observations.

Observation	F1	F2	F3
Obs1	2,272	-1,860	-0,203
Obs2	0,017	3,032	-0,276
Obs3	2,983	-0,001	-2,638
Obs4	-1,257	2,207	0,167
Obs5	-1,144	0,151	-0,092
Obs6	-1,709	0,807	-0,341
Obs7	2,178	-0,604	-0,006
Obs8	-1,134	-0,409	-0,331
Obs9	-2,474	0,442	0,235
Obs10	1,710	0,550	0,174
Obs11	-1,531	-0,560	0,027
Obs12	-1,350	-0,152	0,055
Obs13	-1,252	-0,655	1,094
Obs14	-2,185	-1,283	0,222
Obs15	1,633	-0,993	0,012
Obs16	-2,204	-1,318	0,081
Obs17	5,448	0,650	1,819

La projection de (Fig.III.20) et (Fig.III.21) sur la figure (III.22) au-dessous permet de distinguer les groupes d'eaux suivants :

- Un premier groupe (**G1**): chargé positivement sur l'axe F2 par les ions des bicarbonates (HCO_3^-) et les nitrates (NO_3^-) ce groupe est représenté par les forages F2, F4, F5 ,F6 ,F8, F9, F11,F12,F13,F14,F16. Cet axe représente les eaux carbonatées d'origine profonde.
- Un second groupe (**G2**) : chargé aussi positivement sur l'axe F1 par le magnésium (Mg), sodium(Na^+), potassium(K^+), le chlore(Cl^-), sulfate (SO_4^{--}) et le calcium (Ca^{++}) qui correspond aux forages F1,F3,F7, F10 ,F15,F17. Cet axe représente la minéralisation d'origine évaporitiques

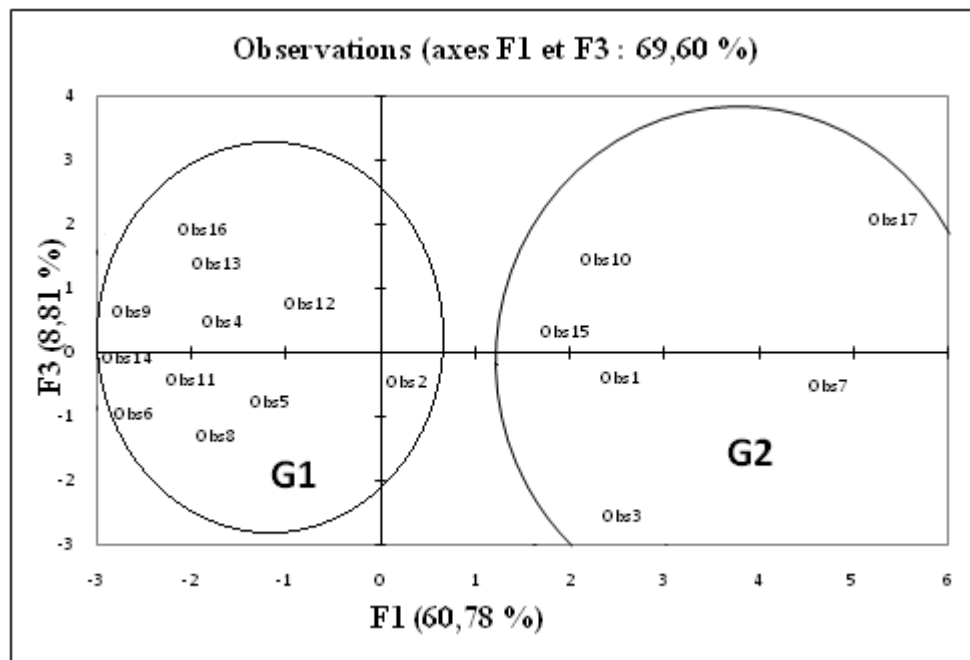


Fig.III.22: Répartition des individus dans le plan F1 – F3.

III.7.5 L'analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) :

III.7.5.1_ Principe de la méthode :

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple. On commence par le calcul de la dis-similarité des (N) objets. Puis on regroupe les deux objets dont le groupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.

On calcule ensuite la dis-similarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classe d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés en classe.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme). Ce dendrogramme est une représentation graphique sous forme d'arbre binaire, d'agrégations successives jusqu'à la réunion en une seule classe de tous les individus. La hauteur d'une branche est proportionnelle à la distance entre les deux objets regroupés. Dans le cas du saut de Ward, à la perte d'inertie interclasses. On coupe avant une forte perte d'inertie.

III.7.5.2_ Avantages de la classification ascendante hiérarchique :

La méthode de classification hiérarchique (CAH) porte les avantages suivants :

On travaille à partir des dis-similarités entre les objets que l'on veut regrouper. Donc on peut choisir un type de dis-similarité adapté au sujet étudié et à la nature des données. L'un des résultats est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données.

On peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classe dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

III.7.5.3_ Application de CAH sur les résultats d'analyses de la basse soummam :

Dans la présente étude en CAH, a été utilisée pour classer les échantillons en groupes hydrochimiques distinctes par la méthode d'agrégation de Ward (Ward, 1963).

Un schéma (dendrogramme) de classification en utilisant la distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace c-dimensions défini par des variables c) pour la mesure de similarité, produit les groupes les plus distinctifs où chaque membre dans le groupe est plus similaire à ses membres que tout membre en dehors du groupe (Güler. 2002). L'analyse de faisceau du dendrogramme a été employée pour déterminer si les échantillons peuvent être groupés dans les groupes hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique.

Les comparaisons basées sur des paramètres multiples de différents échantillons ont été faites et les échantillons ont été groupés en fonction de leur 'similitude' entre eux.

Les huit variables hydrochimiques mesurées sont (Ca, Mg, HCO₃, Cl, Na, K, SO₄ et NO₃) ont été classées en CAH et le résultat est présenté comme un dendrogramme (**Fig.III.23**)

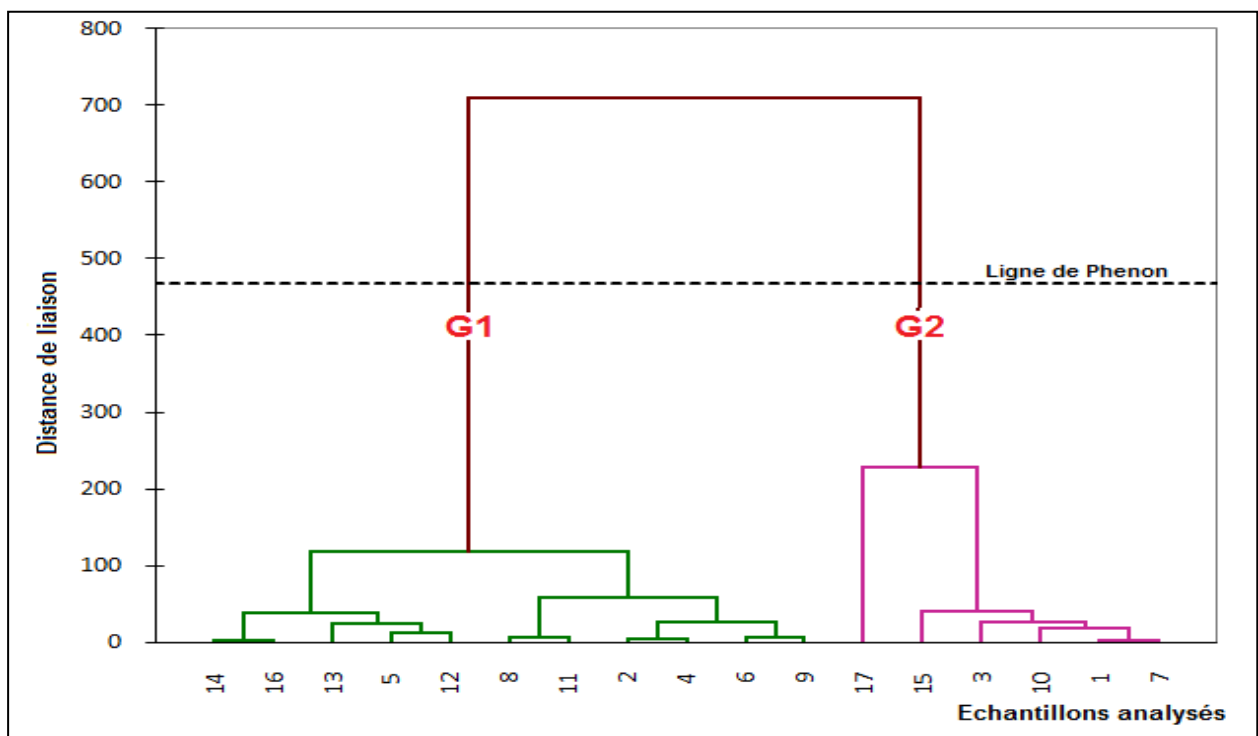
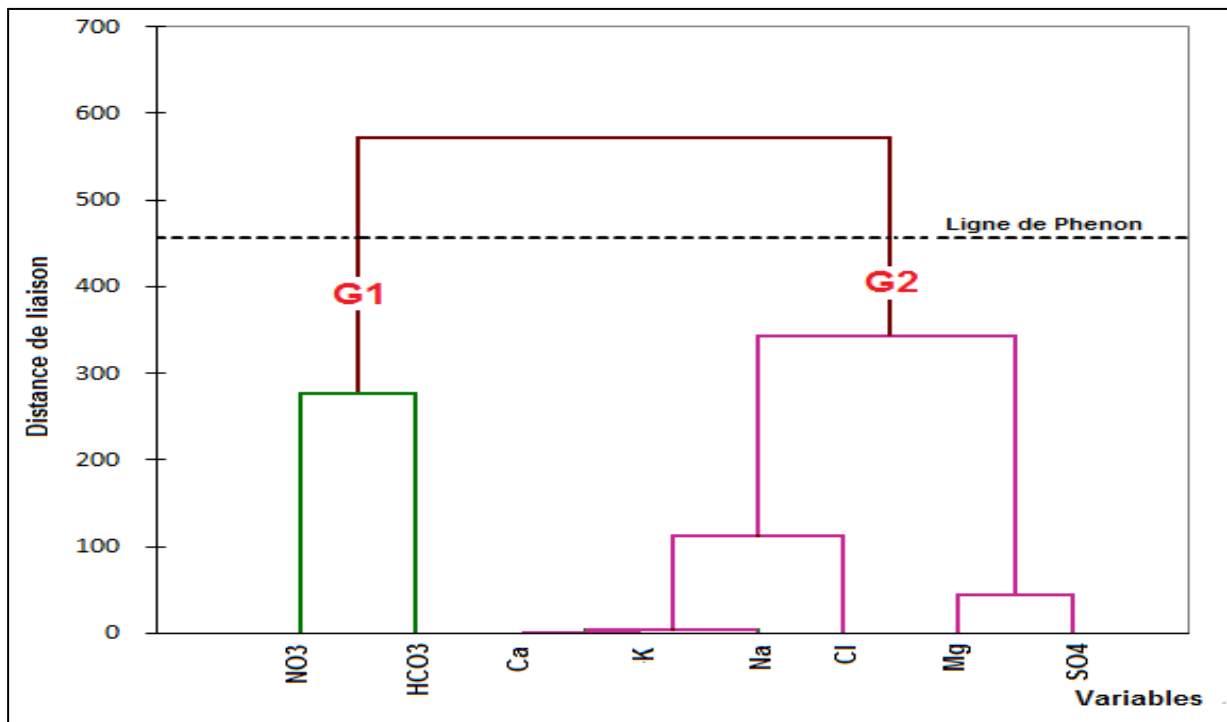


Fig.III.23: Dendrogrammes des faisceaux des variables et des échantillons analysés.

L'analyse de dendrogramme (Fig.III.23) au-dessus permet de voir que les forages peuvent être groupés en deux groupes :

Le groupe 1 : est représenté par les forages : F2, F4, F5, F6, F8, F9, F11, F12, F13, F14 et F16. Ce qui explique 64.71% des échantillons d'eau analysés. Ce groupe est caractérisé d'un faciès bicarbonaté, relié à des roches carbonatées d'une origine profonde. Comme il présente un signe de pollution nutritif (NO_3), du possiblement à l'utilisation des engrais et aux rejets des eaux usées.

Le groupe 2: est composé des forages : F1, F3, F7, F10, F15, F17, et concerne 35.29% des échantillons d'eau analysés. Ce groupe se caractérise d'une minéralisation (Ca, Mg, Cl, Na, K, et SO_4) avec une tendance chlorurée et sulfaté d'origine évaporitiques. Une intrusion des eaux des mers a la nappe est confirmé par les teneurs très élevée de Na et Cl au nord-est et à l'Ouest de la zone d'étude.

III.7.6 Analyse factorielle des correspondances (AFC) :

Les méthodes d'analyses factorielles ont été initialement développées en France par Jean-Paul Benzécri au début des années 1960 et dans les années. Notez que des techniques similaires ont été développées indépendamment dans différents pays, où elles sont plus connues sous les noms de graduation optimale, de moyennes réciproques, de scoring optimal, de méthode de quantification ou d'analyse d'homogénéité.

L'AFC est une analyse factorielle. Le terme « correspondances » signifie que sont étudiées les liaisons entre deux variables nominales, par opposition à la corrélation qui s'intéresse aux liens entre variables numériques. Les deux buts principaux d'une analyse factorielle sont d'une part de détecter des proximités et d'autre part de faire apparaître quelques variables synthétiques abstraites décarrelées entre elles (réduction de dimensionnalité). Ce second attrait ne constitue toutefois pas le but majeur de l'AFC

Le principe d'analyses factorielles des correspondants étudient l'inertie du nuage de points ayant pour coordonnées les valeurs présentes sur les lignes du tableau de données

Les objectifs de l'AFC sont similaires à ceux de l'ACP : obtenir une typologie des lignes et des colonnes et étudier le lien entre ces deux typologies.

Cependant, le concept de similarité entre les lignes et les colonnes est différent. Ici, la similarité entre deux lignes ou deux colonnes est complètement symétrique. Deux lignes (resp. colonnes) sont proches l'une de l'autre si elles s'associent aux colonnes (resp. lignes) de la même façon.

On recherche les lignes (resp. colonnes) dont la distribution est la plus différente de celle de la population. Celles qui semblent le plus ou le moins semblables. Chaque groupe de lignes (resp. colonnes) est caractérisé par les colonnes (resp. lignes) auxquelles il est particulièrement ou particulièrement peu associé.

1 - Le graphique symétrique :

Aussi appelés représentations barycentriques, ces graphiques utilisent exclusivement les coordonnées principales .un graphique symétrique mélangeant points-lignes et points-colonnes,. Le pourcentage d'inertie correspondant à chacun des axes concernés et le pourcentage d'inertie cumulée du graphique sont affichés. La proximité entre deux modalités sur le graphique est représentative de leur association.

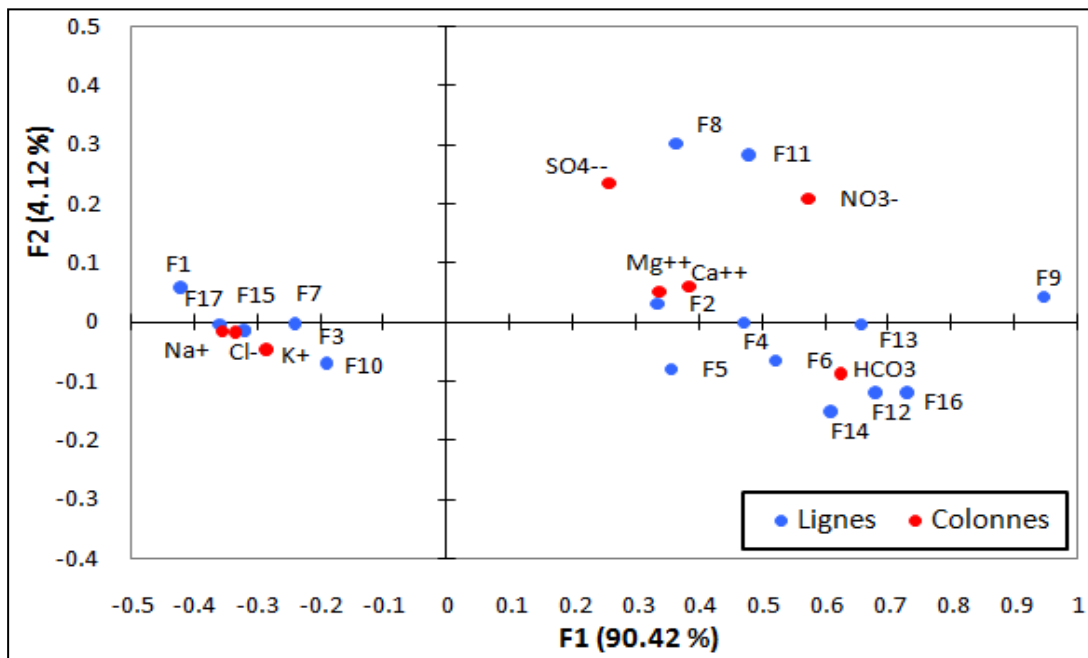


Fig.III.24 : graphique symétrique.

L'utilisation de l'AFC permet de récapituler les échantillons d'eau comme suit :

- ✓ les forage F1, F3, F7 , F10,F15, F17 sont à conjonction avec les 'élément Na⁺, Cl⁻ et K⁺ présentent la minéralisation d'eau provient du contact avec les couche marines.
- ✓ les forage F2,F4,F5,F6,F8,F9, F11,F12,F13,F14,F16 sont à conjonction avec les élément HCO₃, Mg⁺ et Ca⁺⁺ présent la facies bicarbonaté calcique de l'eau qui provient de deux

source la dissolution des roches évaporitiques et pour le bicarbonate la dissolution des roches carbonatés.

III.8_comparaison de différentes méthodes statistiques :

L'utilisation des trois méthodes statistiques : ACP, CAH et AFC pour l'introspection de la qualité des eaux souterraines de la vallée de la basse Soummam ont donné :

- L'analyse en composant principale (ACP) permet de représenter les échantillons d'eau par 87.82% des informations à trois plans. Comme CAH, l'ACP a donnée deux groupes des éléments chimiques (carbonaté et évaporitiques).

- la classification hiérarchique ascendante a permet de classer les eaux en deux groupe le premier bicarbonaté et caractérise les eaux profondes en contact avec les roches carbonatés, marqué par la pollution des nitrates d'origine anthropique et le second groupe est celui de la minéralisation d'origine évaporitiques

Cependant, l'analyse factorielle de correspondance (AFC) permet de représenter les échantillons d'eau sur deux plans F1 et F2 par une signification de 94.54%, elle a donné la liaison entre les éléments chimiques qui indiquent leurs dominance ou bien évoluant les facies chimiques dans chaque groupe .Deux facies chimiques dominants sont présentés par l'AFC dont les facies chlorure sodique -potassique et bicarbonaté calcique–magnésien.

Le choix d'utilisation d'une méthode ou de l'autre dépend du cas à étudier, par conséquent les deux méthodes CAH et ACP montrent plus la qualité des eaux pour les principaux ensembles et donnent toutefois les mêmes groupes. Par contre l'AFC détient les mêmes objectifs que l'ACP, mais ne forme pas le but majeur de l'AFC et faire apparaître quelques variables synthétiques abstraites décarrelées entre elles (réduction de dimensionnalité), comme elle appui sur la symétrie entre lignes (observations) et colonnes (variables).

III.9_conclusion :

Les résultats obtenus de l'analyse chimique de l'eau souterraine de basse Soummam montrent l'évolution des principaux paramètres de qualité chimique tant du point de vue hydrologique (précipitations, infiltration) et géologique.

Les caractéristiques minérales des eaux de la région d'étude sont apparues globalement médiocres avec des valeurs non- conformes aux normes de potabilité Toutes les points d'eau ont une salinité et dureté très élevée.

Les méthodes statistiques multivariées ont été utilisées pour caractériser les systèmes d'eaux souterraines de la zone d'étude en fonction de leurs propriétés physico-chimiques. Ceci est utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans les eaux souterraines de la zone d'étude. En outre, les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff ont mis en évidence, ainsi que l'étude des rapports caractéristiques ont globalement déduit que la qualité des eaux est caractérisée par deux faciès chimiques dominants : chlorure sodique- potassique et bicarbonaté calcique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La présente étude, qui a porté sur la connaissance de qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de la Basse vallée de la Soummam, située à 230 km à l'Est d'Alger, et s'étend sur une superficie de 775.2 km². a abouti aux conclusions suivantes :

L'analyse des données climatiques de la Basse vallée de la Soummam, a mis en évidence un climat de type subhumide, avec des étés chauds et des hivers froids et humides. Les précipitations et les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 738 mm/an et 17.9°C respectivement.

Le bilan hydrique est dans son ensemble est déficitaire, avec une moyenne annuelle des précipitations d'ordre de 738 mm et température moyenne annuelle de 5.3 °C. L'évapotranspiration réelle représente 75.02% des précipitations, alors que l'infiltration est très faible et ne représente que 2.36% des précipitations

Du point de vue géologique la région étudiée est caractérisée par une formation de type sédimentaire dont la prédominance des affleurements correspond à des formations oligocène alboaptien. La description lithologique a montré une hétérogénéité dans les formations (alluvions, argiles, grès, calcaire, marne et schiste) caractérisant l'aquifère de la région de Basse Soummam, qui issue d'une eau fortement minéralisée.

L'étude hydrogéologique de la plaine alluviale, nous a permis de connaître le sens général d'écoulement de la nappe qui est de Sud-ouest vers le Nord-est conformément au sens d'écoulement des eaux superficielles. Le sens d'écoulement caractérise la circulation principale du bassin hydrogéologique du remplissage alluvial, de l'amont vers l'aval. Cette circulation traduit un écoulement qui se fait de la nappe vers la mer.

L'utilisation des différentes méthodes de classifications des eaux souterraines de la Basse Soummam telles que les classifications de Schoeller-Berkaloff et Piper montrent l'existence d'un faciès chimique dominant qui est le faciès chloruré sodique- potassique et bicarbonaté calcique et magnésien.

La composition en ions majeurs a identifié des corrélations fortes entre les éléments (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻).

L'étude des rapports caractéristiques permette de déterminer l'origine de ces eaux, ainsi que leur qualité, de même que les méthodes statistiques comme l'analyse en composant principale (ACP), classification ascendante hiérarchique (CAH) et l'analyse factorielle de correspondante (AFC). Ceux qui confirment la qualité d'eau en deux groupes:

- Groupe 1 : bicarbonaté d'une origine profonde en contact avec des roches carbonatées.
- Groupe 2 : minéralisé avec tendance Chloruré sodique- potassique.

D'une façon générale, les caractéristiques minérales des eaux de la partie Nord –est et Ouest de zone d'étude sont apparues globalement médiocres avec des valeurs non- conformes aux normes de potabilité.

Les classifications de Wilcox et le calcul du SAR montre que Les eaux souterraines de la Basse Soummam, présentent une qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation avec une salinité très élevés, et ne peuvent être utilisé pour l'AEP. Pour l'irrigation NE sont utilisées que pour un sol très perméable et pour les plantes tolérant très bien le sel avec un suivi périodique.

A partir de ces résultats obtenus, nous proposons deux recommandations :

- Eviter l'exploitation des eaux des forages où la salinité est très élevée près de littorale.
- Optimiser l'irrigation et installer un réseau de drainage pour éviter une salinisation secondaire du sol.

Enfin, il est souhaitable de poursuivre ce travail en faisant une extension spatiale de la zone d'étude, afin de mieux comprendre la variabilité spatiale de la salinité des eaux de la nappe souterraine de la Basse Soummam.

Tableau.III.14: classification de SAR.

N°	Ca ⁺⁺	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	conductivité	SAR	classes	qualité
		még/l							μS/cm	még/l		
1	14,99	7,47	83,77	0,610	6,93	5,59	79,82	/	6134	25,00	C5-S4	mauvaise
2	15,37	10,57	26,36	0,044	19,80	5,01	27,01	0,58	3727	7,32	C4-S3	mauvaise
3	27,38	8,25	80,49	0,597	13,85	4,88	75,74	/	6525	19,07	C5-S4	mauvaise
4	11,50	7,35	14,63	0,092	17,64	3,86	19,41	0,66	2836	4,77	C5-S4	mauvaise
5	11,88	5,36	15,73	0,113	15,70	2,99	21,80	0,14	2696	5,36	C4-S2	médiocre
6	12,80	5,84	11,14	0,103	14,44	2,40	14,34	0,49	2238	3,65	C4-S2	médiocre
7	14,62	8,15	78,16	0,562	12,48	5,21	81,72	/	6373	23,16	C5-S4	mauvaise
8	12,66	6,02	11,99	0,064	9,21	4,32	14,37	0,37	2115	3,92	C4-S2	médiocre
9	8,92	3,74	4,81	0,082	13,31	2,75	2,53	0,55	1537	1,91	C3-S1	admissible
10	13,77	7,83	69,33	0,490	18	4,79	73,58	/	6153	21,10	C5-S4	mauvaise
11	10,73	5,68	9,17	0,067	9,11	3,83	9,93	/	1797	3,20	C4-S1	médiocre
12	11,88	8,06	5,73	0,005	14,28	2,05	10,68	0,04	1917	1,82	C4-S1	médiocre
13	7,75	5,65	11,85	0,444	13,18	2,91	5,48	0,10	1798	4,58	C3-S2	admissible
14	9,19	3,87	9,05	0,151	11,05	1,44	7,10	0,13	1517	3,54	C3-S1	admissible
15	13,91	7,96	78,13	0,492	11,00	4,57	65,99	0,03	5643	23,63	C5-S4	mauvaise
16	9,50	4,02	7,41	0,023	11,33	1,66	5,09	0,05	1445	2,85	C3-S1	admissible
17	14	16,26	107,51	1,369	14,95	7,16	111,71	/	8567	27,64	C5-S4	mauvaise

*Références
bibliographiques*

Bibliographie

[01] MOUNI, Loufti. « Étude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie) », *sècheresse*, vol.20, n° 4, 2009, p.360 – 366.

[02] AiSSA, MOALL. *fiche descriptive ramser de la vallée de oued Soummam*, [en ligne]. Adresse URL :

<https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/DZ1898RIS.pdf>

[03] HAMENNI N . (2011) : étude des ressources en eau du bassin versant de la Soummam par l'utilisation du SIG.

Mémoire de magister en hydraulique agricole. ENSA. Alger.153 pages.

[04] BENNABI M. Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de l'oued sahel-SOUMMAM(ALGERIE).

Thèse de doctorat en hydrogeologie.Univ.Grounoble.France.96 page.

[05] MEBARKIA A^{bd}. (2011) : Etudes des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface, cas du barrage d'AIN ZADA WILAYA willaya de Bordj Bou Arreridj. (NORD-EST ALGÉRIEN).

Mémoire d'ingénieur d'état en hydrologie.Univ.annaba.228 page.

[06] BOUCHEK F et IKHLEF A . (2015) : Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale du bas isser (Boumerdes)

Mémoire de master en hydraulique agricole .Univ. AIN DEFLA .84 page.

[07] CASTANY G. (1982) : Principe et méthode de l'hydrogéologie. *Dunod édit. Paris. 236 pages.*

[08] KHEDIDJA A . (2016) : Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjnant _Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux Souterraines.

Thèse de doctorat en hydraulique agricole.Univ.Batna2.192pages.

[09] BEN YAZZA A^{bd}.(2014) :évaluation des facies hydro-chimique des eaux souterraines de la région d'in SALAH (willaya de Tamanrasset).

Mémoire d'ingénieur en hydraulique.Univ.ouargla.80 pages.

[10] ABOUBAKAR M^{ed}. (2012) : caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique.

Thèse de doctorat en terres solides et enveloppe superficielle.Univ.poitiers.France.239pages.

[11] MANSOURI F .(2011) : étude de la qualité des eaux souterraines de la région de chemora w. de Batna East Algérien.

Mémoire de master en ouvrage hydraulique et amenagemnt.Univ.M'sila.101 pages.

[12] HATTAB A. (2015) : étude hydrogéologique du bassin versant du Bordj Ghdir.

Mémoire de master en hydraulique urbaine. Univ.M'sila.90 pages.

[13] BEN ABBOU, M, et autres. « Détermination de la qualité des eaux souterraines des nappes de la Province de Taza (Maroc) », *larhyss*, n° 16, december2013, p.77 - 90.

[14] AYERS R.S., WESTCOT D.W ; La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin F.A.O. Irrigation Drainage, n°29, 97p. (1976).

[15] AGENCES DE L'EAU (France); Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines «Rapport de présentation», V-1, 75p. (2003)