

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Hydraulique**

Spécialité : **Technologies de Traitement des Eaux**

Par :

BENSAHLA TANI Sarra

&

ZIANI KERARTI Imene

Caractérisations, classification et statistique multivariable des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya (NW algérien)

Soutenu publiquement, le / 06 / 2017, devant le jury composé de :

M BENMANSOUR A	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme BABA HAMED K	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Directrice de mémoire
M BOUANANI A	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Mme LALLAM F	Maître Assistante A	Univ. Tlemcen	Examinatrice
M CHIBOUB FELLAH A	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur

2016 - 2017

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant pour la volonté, le courage, et la santé qu'il nous a données durant toutes ces années d'études.

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier et d'adresser toute notre gratitude à nos encadreurs Madame **BABA-HAMED Kamila**, Maître de conférences classe A et au Professeur **BOUANANI Abderrazak**, de l'université de Tlemcen, pour leur rigueur scientifique, leur disponibilité, leurs conseils et remarques avisés, leur attention, leur patience et surtout leur simplicité. Merci à vous deux pour votre soutien au quotidien et vos qualités humaines.

C'est un honneur pour nous d'avoir le Professeur **BENMANSOUR Abdelhalim** de l'université de Tlemcen, dans la composante de notre jury en qualité de président. Nous ne saurions lui exprimer à travers ces quelques lignes notre sincère reconnaissance.

Nos vifs remerciements vont aussi à madame **LALLAM Faiza** Maître assistante A et au Professeur **CHIBOUB FELLAH** de l'université de Tlemcen, pour nous avoir fait l'honneur d'apprécier et d'examiner notre travail.

Nos remerciements à tous nos enseignants du Département d'Hydraulique de l'Université de Tlemcen.

Nous tenons à remercier également Professeur Monsieur **M. BENSALAH**, Directeur du laboratoire de recherche n°25 de l'université de Tlemcen qui nous a permis de travailler au sein du laboratoire.

Monsieur **HAMMOUDA** Ingénieur du laboratoire de Recherche n°25, pour son aide inestimable et sa disponibilité.

Nos remerciements vont aussi à mademoiselle **L. BENDJEMA** doctorante au département d'Hydraulique, pour avoir pris de son temps pour nous apprendre à utiliser le logiciel Arcgis, pour sa générosité et sa sympathie.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenues de près ou de loin.

DEDICACES

*Tout d'abord, je dédie ce modeste travail à la personne
qui me portetoujours dans ses yeux.
À la magnifique maman de l'univers*

*Je le dédie aussi avec toute affection à mon père
Qui m'a toujours mené le sentiment de la fierté
et n'aJamais hésité de me supporter moralement.*

*Je dédie de tout mon cœur mon travail à toute ma
famille BENSATLA TANI*

*A mes amis,
Je dédie ce travail.*

BENSATLA TANI SARRA

Je dédie ce modeste travail à :

✓ *Mes très chers parents, ma sœur, mes frères et toute la famille*

ZIANI

✓ *Mon cher mari, et ma belle-famille.*

✓ *Mes amies et toute la promotion hydraulique 2016-2017*

✓ *Et à tous ceux qui me réservent une place dans leurs cœurs.*

ZIANI KERARTI IMANE

ملخص

من أجل فهم آليات تعمدن المياه الجوفية في سهل الحناية فإن الهدف من هذا العمل هو تطبيق بعض المعالجات الإحصائية للبيانات الهيدرولوجية للمياه الجوفية إضافة إلى ذلك دراسة بعض القوانين الخاصة بالري.

سهل الحناية يقع في الشمال الغربي للجزائر. المتأثر بمناخها شبه القاحل تتميز مياهه الجوفية بملء سلسلة متواصلة من الرواسب ذات الحقة الزمنية ميو- بليو- كواترنار حيث يتم تغذيته جانبيا عبر السلاسل الجبلية لتلمسان. التي تأثر على الخصائص الفيزيائية و الكيميائية .

لقد تبين بان مياه سهل الحناية تحتوي علي عناصر كيميائية تتميز بتركيز عالي و منها الكالسيوم ةالمغنيزيومو ذلك في السنة 1981 حيث تتجاوز معيار صلاحية الشرب

مخطط صندوق هو ترجمة من صندوق وشعرات مؤامرة، هو اختراع توكي (1977) تمثل الخطوط العريضة لتوزيع يمكن أن يكون وسيلة للاقتراب من المفاهيم المجردة من الإحصاءات.

تجميع الهرمي (AHC) هي طريقة لتحليل لغرض تشغيل فئات متجانسة في مجموعات من مجموعة من الأفراد. تشبه قدر الإمكان بينما الطبقات هي كما تختلف (بين الطبقة التجانس).

تحليل المكونات الأساسية (PCA) هو أسلوب التحليل الإحصائي، على اثنين على الأقل من المتغيرات، والسماح لتمثيل بياني للعلاقة بين المتغيرات ن والمواقف الفردية النسبية لناقلات هذه المتغيرات.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية – الري - الاحصاءيات - مخطط صندوق تجميع الهرمي - تحليل المكونات الاساسية

Résumé

Par souci de comprendre les mécanismes de minéralisation des eaux souterraines de la plaine d'Hennaya, l'objectif de ce travail, concerne l'application de quelques traitements statistiques aux données hydrochimiques des eaux souterraines de la plaine, qui se situe dans la partie Nord-ouest de l'Algérie. Cette région est influencée par un climat semi-aride.

La nappe alluviale de la plaine d'Hennaya est caractérisée par un remplissage des dépôts d'une série continue de sédiments mio-plio-quaternaires, elle est alimentée latéralement par les monts de Tlemcen, le sens d'écoulement est orienté SW- NE.

Les eaux souterraines de la plaine d'étude, présentent des concentrations assez élevées pour quelques éléments chimiques analysés tels que le Calcium, le Magnésium, les Chlorures et les Bicarbonates, et dépassent parfois largement les normes de potabilité algériennes, par ailleurs pour la qualité des eaux à des fins d'irrigation, les indices (%Na⁺, SAR) utilisés ont montré que ces eaux sont bonnes pour l'irrigation. Les eaux présentent quatre faciès : bicarbonatécalcique, bicarbonaté magnésien, chlorurécalcique et chloruré magnésien

Les diagrammes en boîtes ont mis en évidence la dominance du faciès bicarbonaté calcique. La classification ascendante hiérarchique (CAH) a opéré pour regrouper les points d'eau en classes les plus semblables possibles (homogènes) et en intraclasse dissemblables (hétérogénéité).

L'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a mis en évidence une représentation graphique des liens entre variables (ions) et des positions des individus (points d'eau).

Mots clés : Plaine d'Hennaya - Faciès chimique – Statistiques – Diagrammes en boîtes – CAH – ACP.

Abstarct

In order to understand the mechanisms of groundwater mineralization in the Hennaya Plain, the objective of this work is to apply some statistical treatments to the hydrochemical data of groundwater in the plain, which is located in the northern part West of Algeria. This region is influenced by a semi-arid climate.

The alluvial water table of the Hennaya Plain is characterized by filling the deposits of a continuous series of mio-plio-quaternary sediments, it is fed laterally by the Tlemcen mountains, the direction of flow is oriented SW-NE.

The groundwater of the study plains shows relatively high concentrations for some analyzed chemical elements such as Calcium, Magnesium, Chlorides and Bicarbonates, and sometimes exceed Algerian potable standards, Water for irrigation purposes, the indices (% Na +, SAR) used showed that these waters are good for irrigation. The waters present four facies: calcium bicarbonate, magnesium bicarbonate, calcium chloride and magnesium chloride

The boxed diagrams showed the dominance of the calcium bicarbonate facies.

Hierarchical ascending classification (HAC) has been used to group water points into the most similar (homogeneous) and dissectable (heterogeneous) classes.

The use of Principal Component Analysis (PCA) has shown a graphical representation of the links between variables (ions) and the positions of individuals (water points).

Key words: Groundwater, Irrigation, Statistiques, Mustache box ,CAH,ACP.

Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Résumés	
Table des matières	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I : présentation de la zone d'étude	
I.1. Situation géographique	2
I.2. Cadre Morphologique et Hydrographique	2
I.3. Géologie de la zone d'étude	3
I.3.I. Analyse litho stratigraphique	4
a- Helvétien	
b- Tortonien	
c- Pliocène	
d- Quaternaire	
I.3.2. Tectonique	5
I.4. Contexte hydrogéologique	5
I.4.1. Les formations aquifères	5
a. Les grès tortoniens	
b. Conglomérats de la plaine d'Hennaya	
c. Travertins	
d. Gravier et graviers argileux	
I.4.2. Géométrie de l'aquifère	7
I.4.3. Piézométrie	8
Conclusion	11
Chapitre II : Etude climatologique	
Introduction	12
II.1. Etude des précipitations	12
II.1.1. Variation annuelle des précipitations	12
II.1.2. Variation mensuelle des précipitations	14
II.1.3. Variation des précipitations saisonnières	14
II.2. Etude des Températures	15
II.2.1. Températures annuelles	15
II.2.2. Températures mensuelles	16
II.3. Étude du climat	17
II.3.1. Méthode de visualisation (méthode graphique)	17
II.3.2. Indice d'aridité annuel de Martonne	18
II.4. Conclusion	19
Chapitre III : Etude hydrochimique	
Introduction	20
III.1. Contrôle des analyses par la balance ionique	20
III.2. Caractéristiques de l'eau	21
III.2.1. Paramètres organoleptiques	21
III.2.1.1. La couleur	21
III.2.1.2. Le goût	22

III.2.1.3. L'odeur.....	22
III.2.1.4. La turbidité.....	22
III.2.2. Paramètres physico-chimiques.....	22
III.2.2.1. Conductivité électrique	22
III.2.2.2. Potentiel d'hydrogène.....	23
III.2.2.3. Température	24
III.2.2.4. Minéralisation globale de l'eau.....	24
III.2.2.5. Degré ou titre hydrotimétrique	25
III.2.2.6. Eléments majeurs.....	26
a)-Cations	
Le Calcium (Ca^{2+})	
Le Magnésium (Mg^{+2})	
Le Sodium (Na^+)	
b)-Anions	
Les Bicarbonates (HCO_3^-)	
Les Chlorure (Cl^-)	
Les sulfates (SO_4^{-2})	
III.3. Cartographie hydrochimique	29
a- Pour les cations	
b- Pour les anions	
III.4. Classification des eaux selon leur faciès.....	33
III.4.1. Classification par utilisation des formules caractéristiques	33
III.4.2. Représentation graphique des analyses d'eau	34
III.4.2.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff	34
III.4.2.2. Diagramme de Piper	38
III.5. Aptitude des eaux à l'irrigation	41
III.5.1. Classification des eaux par la méthode de Wilcox	41
III.5.2. Sodium Absorption Ratio (SAR)	44
Conclusion	46
Chapitre IV : Application des tests statistiques aux données hydrochimiques	
Introduction	47
IV.1. Diagrammes en boîtes	47
IV.1.1.Principe.....	47
IV.1.2. Représentation graphique des diagrammes en boîtes.....	47
IV.1.3.Application des diagrammes en boîtes aux eaux de la plaine alluvionnaire d'Hennaya	48
IV.1.3.1. Représentation de l'ensemble des échantillons	48
IV.1.3.2. Représentation des eaux en fonction des faciès	49
a)- Faciès chloruré magnésien	
b)- Faciès chloruré calcique	
c)- Faciès bicarbonaté calcique	
d)- Faciès bicarbonaté magnésien	
IV.2. Classification ascendante hiérarchique (CAH)	54
IV.2.1. Définition	54
IV.2.2. Principe	54
IV.2.3. Présentation de l'algorithme de la C.A.H.....	55
IV.2.4. Choix de l'indice de dissimilarité entre les individus	56
IV.2.5. Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique	56
IV.2.6. Mesure de proximité pour la Classification Ascendante Hiérarchique	57

IV.2.7. Application de la méthode C.A.H. aux données de la plaine d'Hennaya.....	57
IV.2.7.1. Statistiques des nœuds	58
IV.2.7.2- Dendrogramme	59
IV.3. Analyse en Composantes Principales	63
IV.3.1. Principe de l'A.C.P	63
IV.3.2. Analyse statistique multi-variables	63
IV.3.3. Analyse factorielle	63
IV.3.4. Cercle de corrélations	64
IV.3.5. Interprétation des résultats	64
IV.3.6. Application et résultats	64
IV.3.7. Application de l'A.C.P sur les paramètres physico-chimiques de la plaine d'Hennaya (campagne, 1981)	65
IV.3.8. Analyse graphique	67
IV.3.8.1. Espace des variables	67
IV.3.8.2. Espace des individus	69
IV.4. Comparaison entre CAH et ACP	71
IV.5. Conclusion	74
Conclusion générale.....	75
Références bibliographiques.....	77
Annexes.....	79

Liste des abréviations

ACP :Analyse en composantes principales.
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
B.I : Balance Ionique
Ca²⁺ : Ion Calcium
C.A.H :Classification Ascendante Hiérarchique.
CMA : concentration maximale admissible.
D.R.E : Direction des Ressources en Eau
°C : Degré Celsius
°F : Degré Français
Fact : Facteur
Cl⁻ : Ions chlorures
HCO₃⁻ : Bicarbonates
I: Indice
Km : Kilomètre
KR : Ration de Kelly
Mg/L : Milligramme par litre
Mg²⁺ : Ion magnésium
Na⁺ : Ion sodium
meq/L : Milliéquivalent par litre
Min : Minéralisation
M : mètre
Mm : millimètre
μS/cm : Micro Siemens par centimètre
OMS : Organisation Mondiale de Santé.
P : Précipitations
Pmoy : Précipitations moyennes
pH : Potentiel d'Hydrogène.
r : Quantité en réaction en meq/L.
s : seconde
S.A.R. : Sodium Adsorption Ratio ou Pouvoir Alcalinisant.
Σ : Sigma (Somme)
TH :Titre Hydrotimétrique
Tmoy : Température moyenne
T(an) : Température annuelle
T_M: Moyennes mensuelles des températures maximales (°C).
T_m: Moyennes mensuelles des températures minimales (°C).
T_{moy}: Températures moyennes mensuelles (°C).
UE : Union Européenne,

Liste des figures

Figure I.1: Situation géographique de la plaine d'Hennaya.....	2
Figure I.2 : Carte géologique de la plaine d'Hennaya.....	3
Figure I.3: Conglomérat au niveau de la source d'Ain Hallilifa.....	4.
Figure I.4: Coupe schématique du plateau d'Hennaya.....	5
Figure I.5 : Log hydrogéologique de la plaine d'Hennaya.....	7
Figure I.6: Coupe géologique à travers la plaine d'après Hayane S.M. 1983 reprise par Benmoussset A. 2014.....	8
Figure I.7 : Répartition des points d'eau de la plaine d'Hennaya (Campagne Mai, 1981 de Hayane S.M., 1983).....	9
Figure I.8 : Carte piézométrique de la plaine d'Hennaya. (Campagne Mars, 1981 de Hayane S.M., 1983).....	10
Figure II.1 : Variation des précipitations annuelles à la station de Zenâta.(1980/1981-2015/2016).....	13
Figure II.2 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016).....	14
Figure II.3: Variations saisonnières des précipitations (1980/1981-2015/2016).....	15
Figure II.4 : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Zenâta.(1980/1981-2015/2016).....	16
Figure II.5. Variation des températures moyennes, minimales et maximales mensuelles à la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016).....	17
Figure II.6: Courbe pluviothermique de la station de Zenâta.(1980/1981-2015/2016).....	18
Figure II.7 : Abaque de De Martonne.....	19
Figure III.1 : Corrélation entre les anions et les cations.....	21
Figure III.2: Variation de la conductivité électrique des eaux de la plaine d'Hennaya.....	22
Figure III.3: Carte d'iso-conductivité de la plaine d'Hennaya.....	23
Figure III.4: Variation du pH des eaux de la plaine d'Hennaya.....	24
Figure III.5: Variation de la minéralisation des eaux de la plaine d'Hennaya.....	24
Figure III.6: Variation de l'ion calcium des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya.....	26
Figure III.7: Variation de l'ion magnésium des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya.....	26
Figure III.8 : Variation de l'ion sodium des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya.....	27
Figure III.9 : Variation des bicarbonates des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya.....	27
Figure III.10 : Variation des chlorures des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya.....	28
Figure III.11 : Variation des sulfates des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya.....	28
Figure III.12: Carte iso-teneurs en Ca^{2+} (campagne, 1981).....	30
Figure III.13: Carte iso-teneurs en Mg^{2+} (campagne, 1981).....	30
Figure III.14: Carte d'iso-teneurs en (Na^+) (campagne, 1981).....	31
Figure III.15: Carte d'iso-teneurs en Cl^- (campagne, 1981).....	31

Liste des figures

Figure III.16: Carte d'iso-teneurs en HCO_3^- (campagne, 1981).....	32
Figure III.17: Carte d'iso-teneurs en SO_4^{2-} (campagne, 1981).....	32
Figure. III.18. (a): Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées magnésiennes ...	35
Figure III.18 (b): Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées magnésiennes	35
Figure III.18 (c): Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées magnésiennes	36
Figure III.19 : Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées Calciques.....	36
Figure III.20: Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux bicarbonatées calciques.....	37
Figure III.21: Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux bicarbonatées magnésiennes.....	37
Figure III.22 : Diagramme de Piper des points des eaux chlorurées magnésiennes	38
Figure III.23 : Diagramme de Piper des eaux chlorurées calciques	39
Figure III.24 :Diagramme de Piper des eaux bicarbonatées magnésiennes	39
Figure III.25:Diagramme de Piper des eaux bicarbonatées calciques.....	40
Figure III.26 :Diagramme de Piper des eaux de la plaine d'Hennaya.....	41
Figure III.27 : Diagramme de Wilcox appliqué aux eaux de la plaine d'Hennaya.....	43
Figure III.28:Diagramme du S.A.R appliqué aux eaux de la plaine d'Hennaya.....	45
Figure IV.1 : Exemple de représentation d'un diagramme en boîte.....	48
Figure IV.2 : Diagramme en boîte des eaux de la plaine d'Hennaya.....	49
Figure IV.3 : Représentation des eaux à faciès chloruré magnésien.....	50
Figure IV.4: Diagrammes en boîtes des eaux à faciès chloruré calcique.....	51
Figure IV.5 : Diagrammes en boîtes des eaux à faciès bicarbonaté calcique.....	52
Figure IV.6 : Diagrammes en boîtes des eaux à faciès bicarbonaté magnésien.....	53
Figure IV.7: Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).....	55
Figure IV.8: Etapes de la classification ascendante hiérarchique.....	56
Figure IV.9: Diagramme des niveaux.....	59
Figure IV.10 : Hiérarchie de partitions obtenues par C.A.H (dendrogramme).....	59
Figure IV.11: Hiérarchie de partitions (intra-classe et interclasse) obtenues par C.A.H.....	60
Figure IV.12: Diagramme en cônes des paramètres physico-chimiques de la plaine d'Hennaya (campagne, 1981).....	66
Figure IV.13 : Projection des variables sur le plan factoriel (F1-F2).....	68
Figure IV.14 : Projection des variables sur le plan factoriel (F1-F3).....	68
Figure IV.15 : Projection des points d'eau (individus) sur le plan factoriel (F1 – F2).....	69
Figure. III.16: Projection (individus) des points d'eau sur le plan factoriel (F1 – F3).....	70
Figure IV. 17: Comparaison entre la méthode CAH et ACP.....	72
Figure IV.18 : Confrontation CAH et ACP sur le plan factoriel (F1 – F2).....	73

Liste des tableaux

Tableau II.1: Caractéristiques de la station de mesure	12
Tableau II.2: Précipitations moyennes annuelles à la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016).....	13
Tableau II.3: Valeurs moyennes mensuelles des précipitations la station de Zenâta. (1980/1981-2015/2016).....	14
Tableau II.4: Répartition des précipitations saisonnières.....	15
Tableau II.5: Température moyennes mensuelles à la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016).....	15
Tableau II.6: Valeurs des températures mensuelles moyennes, exprimées en °C de la station de Zenâta. (1980/1981-2015/2016)	16
Tableau II.7: Précipitations et températures moyennes mensuelles (1980/1981– 2015/2016).	17
Tableau II.8 : Indice d'aridité de Martonne.....	18
Tableau II.9 : Classification du climat suivant l'indice d'aridité annuel de Martonne.....	18
Tableau III.1: Résultats de la balance ionique.....	20
Tableau III.2: Classification des eaux selon le pH (in Y. Ali Belhadj & Chouaki, 2013).....	23
Tableau III.3: Classification des eaux en fonction de la dureté.....	25
Tableau III.4: Variation du degré hydrotimétrique au niveau des points d'eau	25
Tableau III.5: Classification des eaux souterraines des points d'eau selon leurs faciès chimiques.....	33
Tableau III.6: Classification des faciès selon Schoeller-Berkaloff	34
Tableau III.7: Valeurs des Na%	42
Tableau III.8: Classification des eaux de la plaine en fonction du pourcentage du Sodium..	42
Tableau III.9: Valeurs du S.A.R	44
Tableau III.10: Classification des eaux destinées à l'irrigation d'après le S.A.R	46
Tableau IV.1: Paramètres de position des eaux de l'aquifère alluvionnaires de la plaine d'Hennaya	48
Tableau IV.2 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées magnésiennes	49
Tableau IV.3 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées calciques.....	50
Tableau IV.4 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées calciques	51
Tableau IV.5 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées magnésiennes	52
Tableau IV.6 : Similarités / dis similarités d'une C.A.H. proposées par XLSTAT	57
Tableau IV.7: Nœuds successifs du dendrogramme	58
Tableau IV.8: Classes des individus par la C.A.H.....	60
Tableau IV.9: Classification des intra classes de la classe 1	61
Tableau IV.10: Classification des intra classes de la classe 2	61
Tableau IV.11: Classification des intra classes de la classe 3	61
Tableau IV.12: Classification des intra classes de la classe 4.....	61
Tableau IV.13: Classification des intra classes de la classe 5.....	61
Tableau IV.14: Classification des intra classes de la classe 6.....	62
Tableau IV.15: Classification des intra classes de la classe 7.....	62
Tableau IV.16: Classification des éléments (intra-classe et interclasse)	62

Liste des tableaux

Tableau IV.17: paramètres statistiques des eaux de la plaine d'Hennaya.....	65
Tableau IV.18: Valeurs propres.....	65
Tableau IV.19: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de la plaine d'Hennaya (campagne, 1981).....	66
Tableau IV.20: Vecteurs propres de la matrice de corrélation	67

Introduction générale

L'existence de toute sorte de vie est liée principalement à la présence de l'eau. Cette dernière est essentielle à la survie et au bien-être de l'homme (constitue plus de 60% de son corps) et est indispensable au fonctionnement de nombreux secteurs de l'économie.

En Algérie, les eaux souterraines sont les principales sources pour l'alimentation et l'irrigation, la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est essentielle pour le rendement des cultures et le maintien de la productivité du sol. Les pressions exercées sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, l'extension des terres agricoles irriguées et l'utilisation de techniques d'irrigation non économes, la diversification des produits agricoles, l'urbanisation, le développement industriel et le tourisme sont parmi les nombreux facteurs qui contribuent à augmenter la pression sur les ressources en eau, et sont aggravés par les effets incertains du changement climatique. Ce qui contraint véritablement à sa recherche, notamment, par l'exploitation des eaux souterraines et autres. Bien que cette difficulté soit préoccupante, il n'en demeure pas moins que la qualité de ces eaux présente, néanmoins, un intérêt majeur. [Senouci.M]

Cette étude est articulée sur plusieurs chapitres :

Le premier chapitre traite des généralités sur la plaine d'Hennaya (présentation de la zone d'étude, une description géologique et hydrogéologique.

Dans le deuxième chapitre, nous traiterons quelques paramètres climatiques pour faire ressortir le type de climat régnant dans la région.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude

hydrochimique pour caractériser les eaux et voir leur potabilité et leur aptitude à être utilisées pour l'irrigation.

Dans le dernier chapitre, il sera question d'appliquer quelques tests statistiques sur les ions majeurs de la minéralisation dans l'objectif de montrer l'apport de ces statistiques dans les études hydrochimiques.

Enfin, nous essayerons dans une conclusion générale de présenter les résultats trouvés pour en faire une synthèse qui servira peut être à émettre des recommandations.

I.1.Situation géographique

La plaine d'Hennaya couvre une surface de 28 Km², elle se situe au Nord de la commune d'Hennaya à une distance de 9.25km au Nord de la ville de Tlemcen (Fig. I.1), Elle est limitée au Nord par l'Oued Isser, au Sud par les terrains karstiques du Jurassique supérieur des Monts de Tlemcen, à l'Est par l'oued Sikkak et à l'Ouest par l'oued Khalouf.

La plaine d'Hennaya peut être localisée sur une carte au 1 /50 000 entre les coordonnées Lambert:126,0 < X < 132,0 Km
91,0 < Y < 201,0 Km

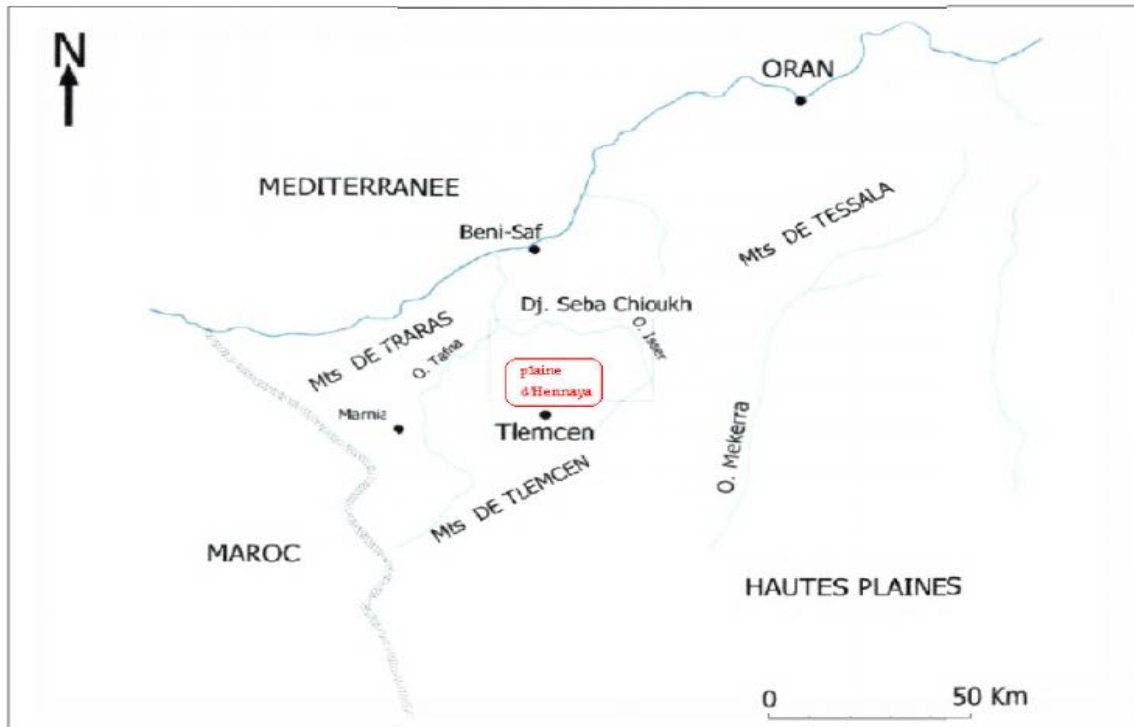


Figure I.1: Situation géographique de la plaine d'Hennaya. (SENOUCI M., 2015)

I.2. Cadre Morphologique et Hydrographique

La plaine d'Hennaya fait partie du bassin versant de Sikkak (moyenne Tafna) qui occupe une superficie de 463 km² (Hayane S.M. 1983), ce dernier est moyennement allongé, les cultures extensives occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant.

La plaine d'Hennaya est située aux débouchés de deux ravins :

- Le ravin d'Hennaya, appelé aussi ravin des sources occupant une superficie d'environ 14 km²,
- le ravin formé de Chabet Sidi Kannoun avec une superficie d'environ 8 km².

Dans sa partie aval, la plaine d'Hennaya compte une dépression assez vaste de 4 km².

Elle se prolonge, au Nord, par la plaine des Gossels et au Nord-Est par la plaine ou le plateau de Zenâta.

Le relief plat s'abaisse graduellement vers le Nord (de la côte 400 à 240 m).

La plaine est sillonnée par deux Oueds parallèles qui descendent vers le Nord-Est, tous tributaires de la Tafna (Fendi W, 1998).

I.3. Géologie de la zone d'étude

La plaine d'Hennaya (fig I.2) correspond à une dépression tectonique dont le remplissage est constitué par des formations plio-quaternaires (argiles, conglomérats et travertins) et des formations miocènes (grès tortoniens et marnes serravaliennes) reposant sur une assise jurassique (dolomie et calcaire).

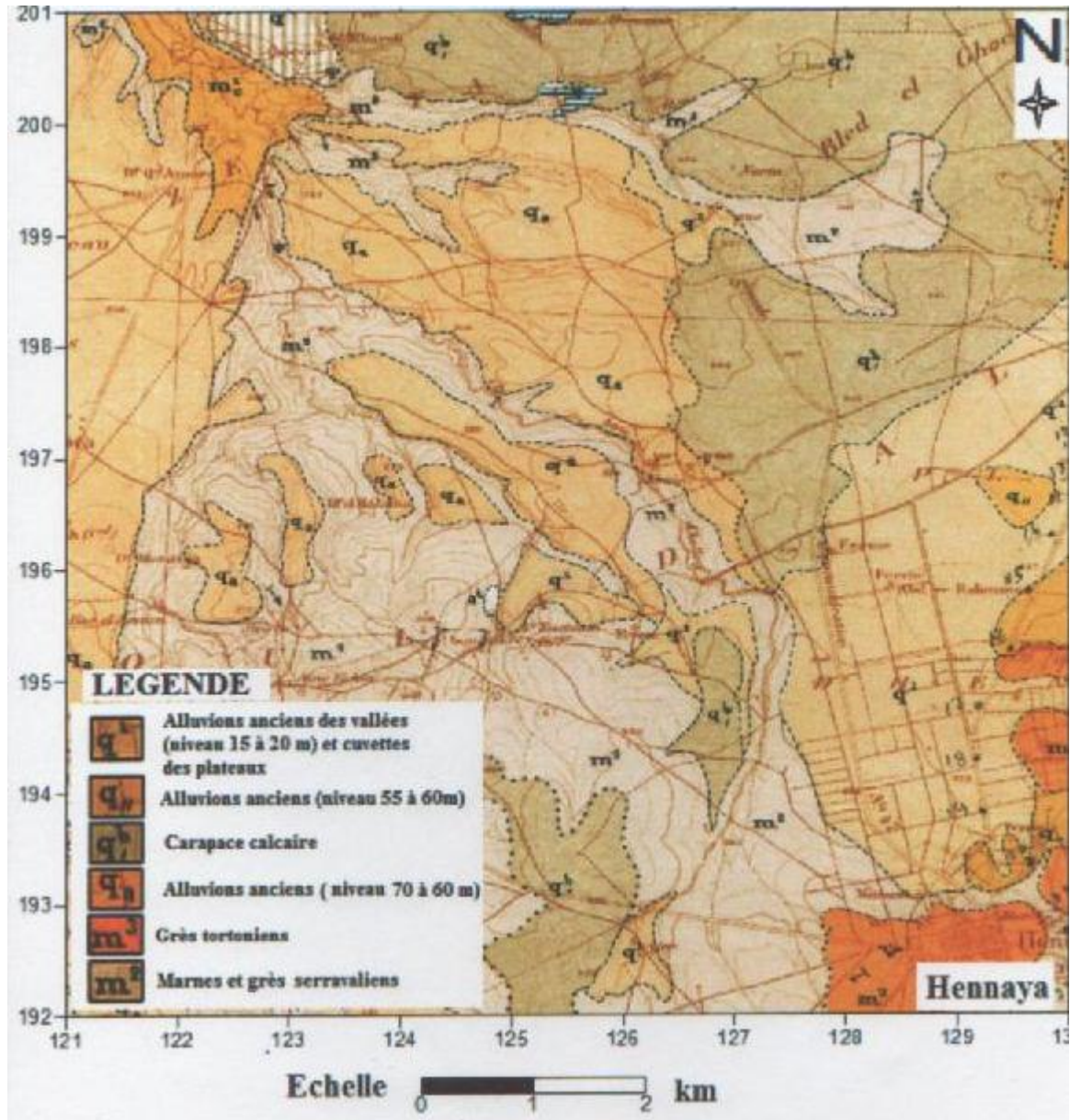


Figure I.2: Carte géologique de la plaine d'Hennaya (Doumergue M. ,1902 in Bourbaba L. & Torchi M., 2014)

I.3.I. Analyse litho stratigraphique

La série litho stratigraphique est composée comme suit:

a- Helvétien : représenté par les marnes qui forment le substratum imperméable de la nappe de la plaine (Yahiaoui F., 2007, Senouci M., 2015). Les marnes sont des séries grises ou bleutées, devenant ocres par altération, au sein de cette série s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grès jaunes (Hayane S.M., 1983).

b-Tortonien : représenté par des grès fissurés jaunes, les grès sont subhorizontaux et durs, parfois peu consolidés et mal lités, leur puissance est de l'ordre de 25m.

c- Pliocène : représenté par des conglomérats au niveau des exutoires de la nappe d'Hennaya (AinBoukoura, Ain Ouahab, Ain Halilifa et Ain El Kahla), où ils forment une bande continue qui va du Nord de l'agglomération d'Hennaya à Ain Halilifa (Bourbaba L.&Torchi M. , 2014).

Les conglomérats de la plaine d'Hennaya, sont soit immédiatement postérieures aux grès tortoniens, ils correspondraient donc à la phase régressive qui a terminé le Miocène, soit pliocènes (Hayane S.M., 1983).

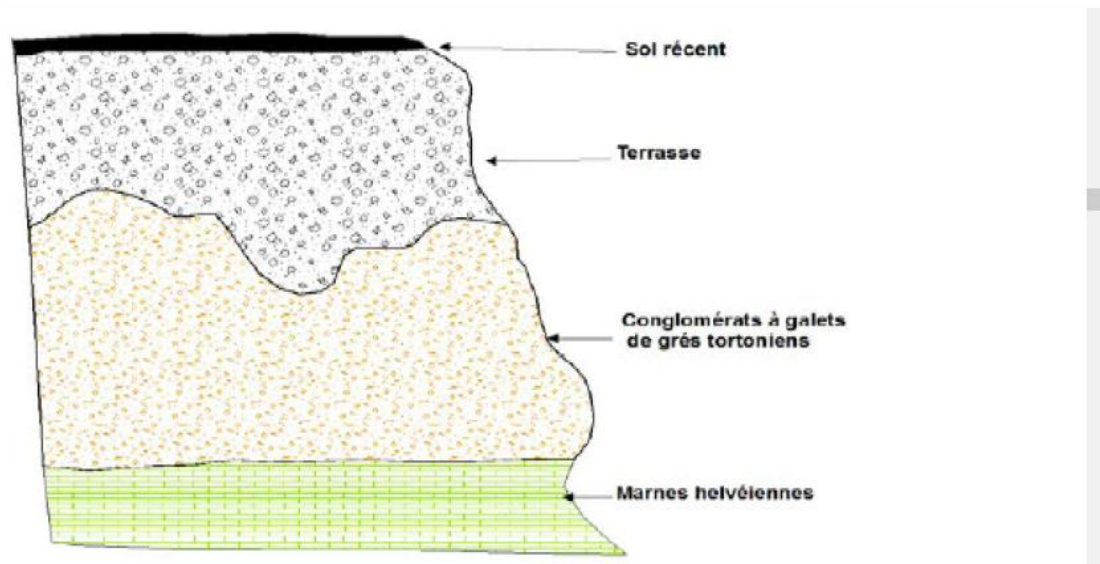


Figure I.3: Conglomérat au niveau de la source d'Ain Hallilifa (Hayane S.M., 1983)

d- Quaternaire : on y distingue:

- **Travertins** : les résurgences, issues des massifs jurassiques, sont soulignées par des travertins parfois consolidés. Au Nord, ils sont beaucoup moins minces.
- **Carapace calcaire** : cette carapace recouvre les formations du Miocène et forme l'entablement horizontal des plateaux.
- **Croûte calcaire** : cette petite croûte, est formée par l'encroûtement de teinte claire et des croûtes lamellaires. Cet encroûtement est bien marqué sur la plaine d'Hennaya où, il masque partiellement les grès tortoniens (Yahiaou., 2007).

I.3.2. Tectonique

Une coupe géologique schématique (fig.I.4) réalisée par Clair en 1973 et reprise par Fendi W. en 1998, montre la présence d'une faille qui a causé un contact entre les dolomies de Tlemcen et les grèstortonien. Cette faille est la source d'alimentation de la nappe d'Hennaya.

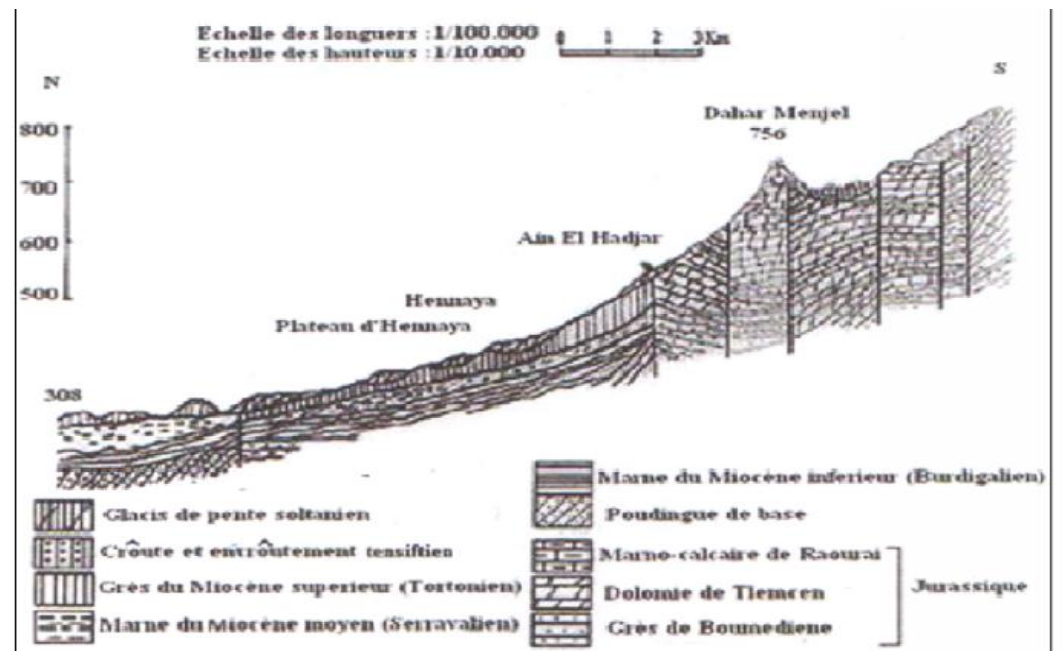


Figure I.4 : Coupe schématique du plateau d'Hennaya (Clair A. in Fendi W., 1998).

Les formations qui caractérisent notre secteur d'étude sont d'âge :

- helvétien représentées par les marnes qui forment le substratum imperméable,
- tortonien représentées par des grès fissurés jaunes,
- pliocène représentées par les conglomérats qui forment une bande continue,
- quaternaire où, l'on distingue des travertins, une carapace calcaire, et les croûtes calcaires.

Les formations qui constituent essentiellement l'aquifère de la plaine d'Hennaya sont les grès tortonien et les conglomérats.

I.4. Contexte hydrogéologique

La plaine d'Hennaya est caractérisée par des activités agricoles importantes qui annoncent une exploitation intense de la nappe par plusieurs puits. Dans cette partie, nous allons présenter en revue les formations susceptibles d'avoir un potentiel hydrique.

L'aquifère est principalement constitué par les grès tortonien et les sédiments quaternaires (Hayane S.M., 1983) (fig. I.5).

1.4.1. Formations aquifères

a. Grès tortonien

Situés à des dizaines de mètres de profondeur au Sud et disparaissent au Nord. Ils sont friables et fissurés et subhorizontaux. Ces grès forment un horizon, au Sud, tout autour de l'agglomération d'Hennaya, leur puissance déterminée par sondage est de l'ordre de 25 mètres (Hayane S.M., 1983).

b. Conglomérats de la plaine d'Hennaya

Représentent la couche la plus importante dont l'épaisseur décroît du Sud vers le Nord, au niveau des deux sources d'Ain Boukoura et d'Ain Ouahab.

c. Travertins

Affleurent au niveau de petites surfaces, ils sont surmontés par des graviers argileux, avec lesquels ils forment un horizon aquifère commun renfermant la nappe du Mio- Plio- Quaternaire.

d. Graviers et graviers argileux

Couvrent pratiquement tout l'aquifère. Situés au dessus des conglomérats, Ils sont recouverts d'argile et de croûte calcaire. Ces derniers sont plus importants au Sud. Les marnes helvétiques (serravaliennes) constituent le substratum imperméable de l'aquifère.

Formation	Epaisseur	Lithologie	Description	Perméabilité
Quaternaire	??		croûte carapace calcaire, argiles	peu perméable
Tortonien	25m		conglomérats grès jaune	perméable
Serravalien	100m		Argiles massives avec intercalation de bancs de grès	perméable
Miocène.inf	100m		Marnes grises à verdâtres avec intercalation de bancs de grès	imperméable
Eocène	50m		calcaire surmonté par une alternance de grès et de marnes	imperméable
Dolomie de Tlemcen	300m		Dolomies cristallines grises à patine rousse dans les quelles on observe des laminites stromatolitiques	forte perméabilité de fissure
Cal. de Zarifet	25m		calcaires bleus	
Grès de Boumediène	500m		Grès bruns en gros. Bancs séparés par des interlits argileux. Au sommet on trouve quelques passées marnieuses et calcaires	faible ou nulle

Figure I.5: Log hydrogéologique de la plaine d'Hennaya(Hayane S.M., 1983).

I.4.2. Géométrie de l'aquifère

L'aquifère est limité :

- Au Nord, par un horizon aquifère et est drainé vers la surface par des sources.
- Au Sud, par les terrains karstiques du Jurassique supérieur de Tlemcen.
- A L'Est et à l'Ouest, par les marnes helvétiques imperméables.

Une coupe SW- NE au niveau de la plaine (Fig. I.6) montre qu'au Sud, l'aquifère est constitué de grès, les graviers argileux recouvrent les conglomérats. Au Nord, les travertins viennent se déposer au-dessus des conglomérats. A l'Est et à l'Ouest les marnes helvétiques affleurent à la surface.

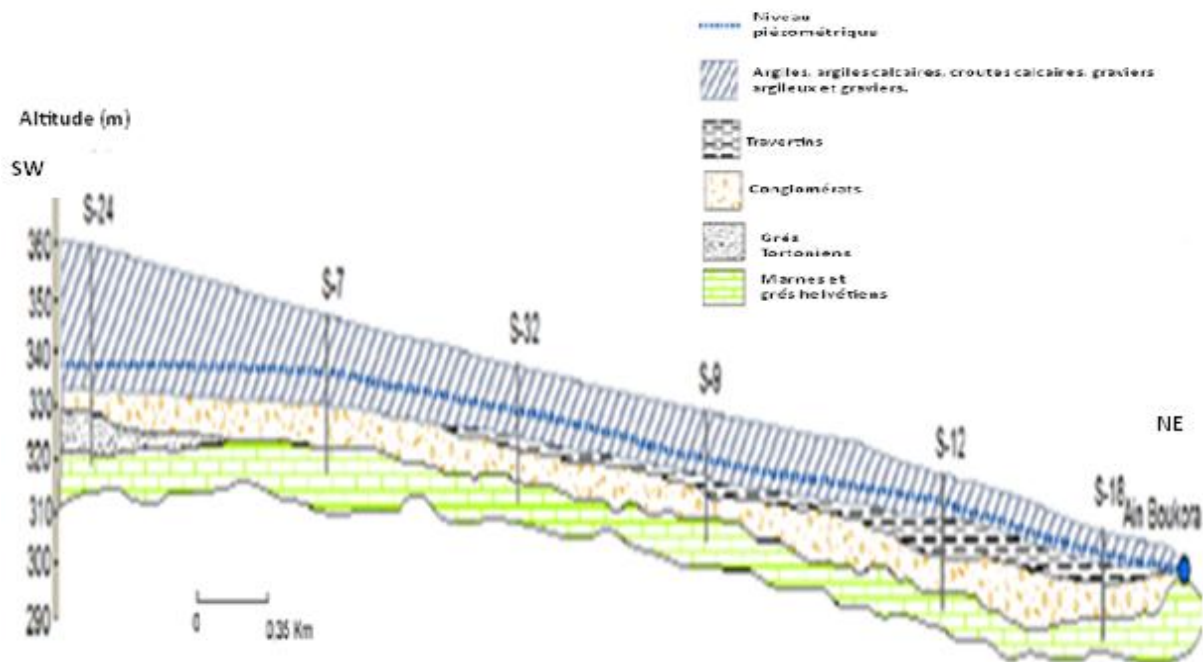


Figure I.6: Coupe géologique à travers la plaine d'Hennayad'après (Hayane S.M. 1983 reprise par Benmoussset A. 2014).

Les sources apparaissent dans les conglomérats en contact avec le substratum imperméable. A l'exception de la source d'Hennaya qui émerge au niveau des grès tortoniens. Les sources les plus importantes sont celles d'Ain Boukoura avec un débit moyen de (50L/s) et Ain Ouahab avec un débit moyen de (20L/s), ces débits ont été enregistrés en 1981, les nouveaux débits relevés en 2015 d'après l'ANRH sont respectivement 7 et 2,3 L/s. Ces sources sont considérées comme l'exutoire de la nappe d'Hennaya représentés plus loin sur la figure (1.7).

I.4.3. Piézométrie

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale en hydrogéologie. Le niveau des eaux souterraines de l'aquifère peut être utilisé pour plusieurs raisons, notamment pour la construction d'une carte piézométrique qui est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leur zone d'accumulation.

Dans ce travail, nous avons établi une carte piézométrique en se référant aux relevés piézométriques de la campagne de juin 1981 faite par Hayane S.M sur la base de 22 points d'eau (annexe) répartis sur toute la plaine (fig.I.8). (Annexe 1)

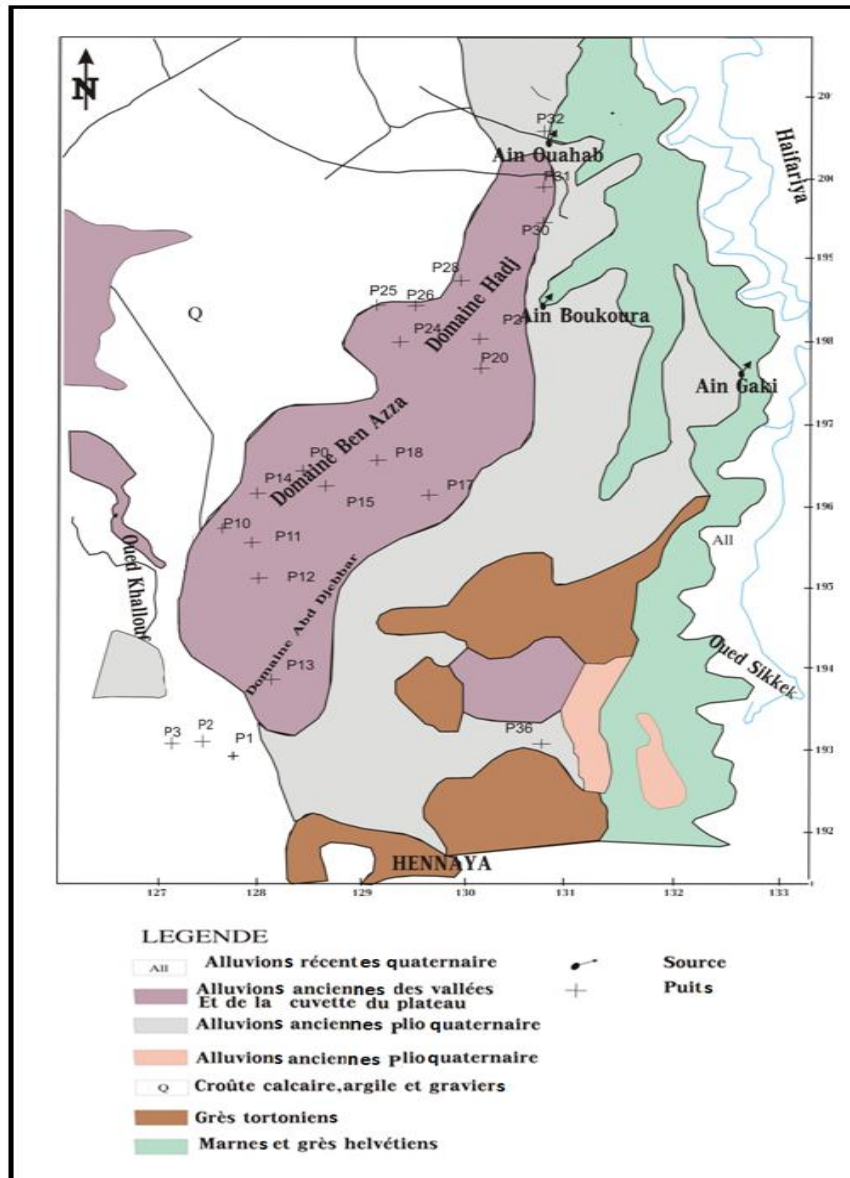


Figure I.7 : Répartition des points d'eau de la plaine d'Hennaya
(Campagne Mai, 1981 de Hayane S.M., 1983)

L'analyse de la carte piézométriques (figure I.9), montre que :

L'écoulement souterrain s'effectue principalement du Sud ouest vers le NordEst de la plaine d'Hennaya. Les courbes isopièzes sont plus espacées vers le Nord et plus rapprochées vers le Sud de la plaine d'Hennaya, et donc le gradient hydraulique n'est pas constant, sa variation pourrait s'expliquer probablement par l'hétérogénéité du terrain, il est faible au Nord à cause de la forte perméabilité des conglomérats, et fort au Sud à cause de la faible perméabilité des grès.

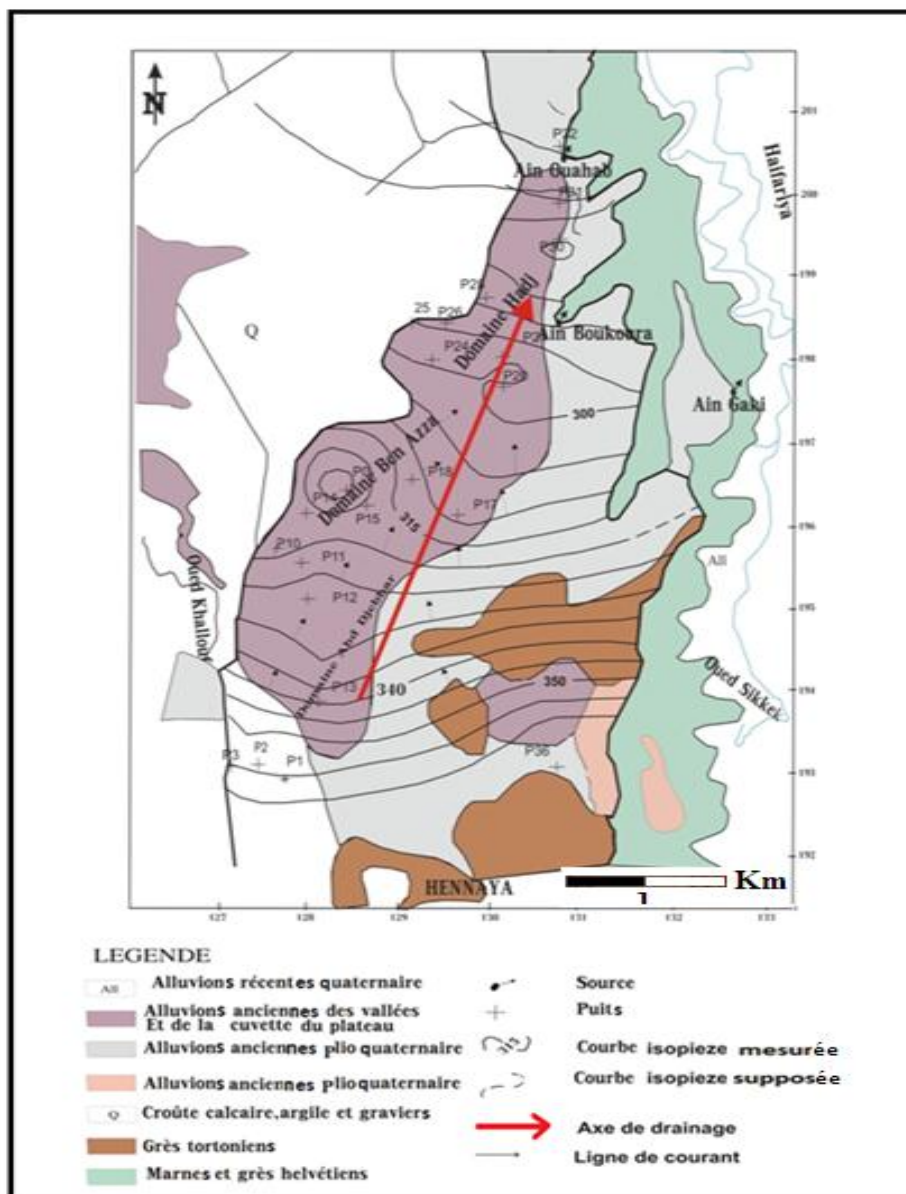


Figure I.9: Carte piézométrique de la plaine d'Hennaya.
(Campagne Mars, 1981 de Hayane S.M., 1983)

Conclusion

La plaine d'Hennaya renferme un aquifère alluvionnaire constitué de grès tortoniens au Sud et des conglomérats surmontés par les travertins et des graviers argileux au Nord, ils ont une épaisseur importante dans la partie centrale et plus faible en allant vers le Nord (Hayane S.M., 1983)

D'après l'étude hydrogéologique, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

La recharge de la nappe s'effectue par une alimentation latérale, par les dolomies de Tlemcen qui affleurent au Sud de la plaine d'Hennaya.

La majorité des sources émergent dans les conglomérats, à l'exception de la source d'Hennaya qui émerge au niveau des grès tortoniens. La source d'Ain Boukoura est le principal exutoire de la nappe.

D'après l'étude piézométrique, le sens de l'écoulement se fait de manière générale du Sud-Ouest vers le Nord-Est, et les courbes isopièzes sont plus espacées vers le Nord et plus rapprochées vers le Sud probablement lié à la perméabilité.

Introduction

Le climat et le temps sont deux notions différentes. Le temps, c'est l'état de l'atmosphère défini par les éléments météorologiques : la température, les précipitations (la pluie, la neige, etc.), l'humidité, l'ensoleillement et le vent à un endroit précis. (Khaldi A., 2005)

Il est déterminé par la situation géographique du lieu (latitude, altitude, éloignement par rapport à la mer) et par la circulation atmosphérique.

Le climat, c'est l'ensemble des phénomènes météorologiques observés dans le passé et qu'on s'attend d'observer encore sur une longue période. On peut le définir aussi comme « la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée. (Khaldi A., 2005)

Les conditions climatiques jouent un rôle important dans les comportements hydrologiques des cours d'eau et des conditions de recharge des aquifères.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux principaux facteurs, indispensables pour la détermination du type de climat tels que les précipitations et la température.

II.1. Etude des précipitations

Les précipitations d'une région sont intimement liées au climat. Les précipitations varient dans le temps et dans l'espace. Des régions sont plus arrosées que d'autres et des mois qui sont plus pluvieux que d'autres.

Nous nous intéresserons dans cette étude aux précipitations, qui constituent le facteur important dans le comportement hydrologique de la région. Elles varient dans le temps et dans l'espace.

Pour ce faire, nous avons retenu la station de Zenâta dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Caractéristiques de la station de mesure.

Station	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Code de la station	Période d'observation
Zenâta	247	35°0'50"N	01°27'25"W	605310	1980/1987- 2015/2016

II.1.1. Variation annuelle des précipitations

La pluviométrie d'une année est définie par la somme de la hauteur des précipitations mensuelles. La mesure de la variabilité de la pluviométrie sur une période donnée peut être réalisée grâce à la moyenne interannuelle. Celle-ci est une donnée évolutive dans le temps, car elle est fonction des nouvelles observations. Elle schématise l'instabilité des hauteurs annuelles des précipitations. Sans traduire la réalité climatique, elle retient les aspects essentiels des paramètres climatiques.

La figure II.1, et le tableau II.2, traduisent l'évolution ou bien la variation de la pluviométrie annuelle sur une période de 36ans (1980/1981-2015/2016), où l'on remarque que le régime annuel est très irrégulier d'une année à une autre. Les hauteurs maximales des précipitations atteignent 418,4 mm observées durant l'année 2003/2004, tandis que les hauteurs minimales

de l'ordre de 131,3 mm ont été enregistrées à la station en 2013/2014, la moyenne des hauteurs est de 281,4mm.

Tableau II.2: Précipitations moyennes annuelles à la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016).

Années	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985	1985/1986	1986/1987
P (mm)	348,5	174,3	290,3	282,1	230,8	335,0	373,7
Années	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1992/1993	1993/1994
P (mm)	305,7	306,6	293,0	336,0	320,6	268,3	355,6
Années	1994/1995	1995/1996	1996/1997	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001
P (mm)	166,9	314,3	284,0	346,0	301,0	228,7	307,9
Années	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008
P (mm)	266,7	335,5	418,4	301,8	194,5	243,4	244,8
Années	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
P (mm)	358,8	383,4	370,8	290,9	133,2	131,3	150,1
Années	2015/2016	P moy = 281,4 mm					
P (mm)	139,0						

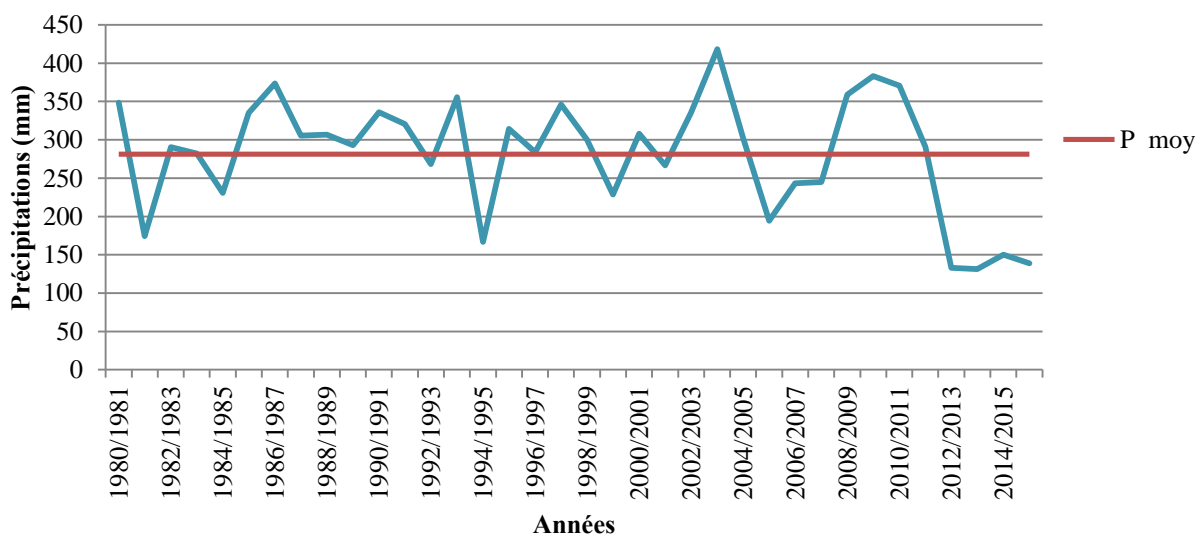


Figure II.1 : Variation des précipitations annuelles à la station de Zenâta. (1980/1981-2015/2016)

Nous remarquons que les précipitations annuelles varient d'une année à une autre. Cette étude des précipitations annuelles présente l'avantage de décrire et de caractériser leur distribution dans le temps.

II.1.2. Variation mensuelle des précipitations

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations enregistrées durant la période 1980/1981-2015/2016 sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.3: Valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Zenâta.
(1980/1981-2015/2016)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
P (mm)	15,7	26,0	38,5	31,5	36,1	34,2	33,5	32,1	24,5	5,2	1,1	3,0	281,4

La figure II.2. Montre que le mois de Novembre est le plus pluvieux avec une valeur de 38,5mm et le mois le plus sec est le mois de Juillet avec une valeur de 1,1mm.

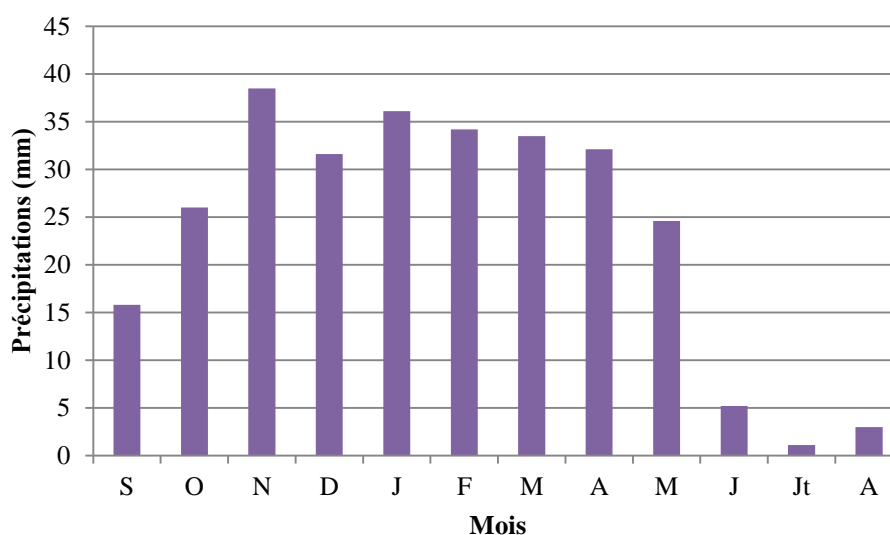


Figure II.2 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Zenâta.
(1980/1981-2015/2016)

L'analyse des précipitations mensuelles revêt une importance capitale dans la mesure où elle permet de saisir l'évolution de la pluviométrie au cours de l'année. En effet, la connaissance du début et de la fin de la saison des pluies constitue un fait majeur dans la planification du calendrier cultural. Cette opération consiste à aider les agriculteurs à mieux faire face aux caprices du climat notamment la déficience pluviométrique qui rend le plus souvent aléatoire les productions agricoles. (Senouci M. 2015)

II.1.3. Variation des précipitations saisonnières

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations influencent en grande partie l'écoulement saisonnier, ainsi les périodes humides et sèches durant l'année hydrologique seront facilement détectées suite à la contribution moyenne de chaque saison. (Bouguera S. 2014)

Tableau II.4: Répartition des précipitations saisonnières.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	80,2			101,8			90,1			9,3		

L'histogramme des précipitations saisonnières (Fig. II.3), indique que l'Hiver est la saison la plus humide suivi respectivement du Printemps et de l'Automne, par contre l'Eté est la saison la plus sèche.

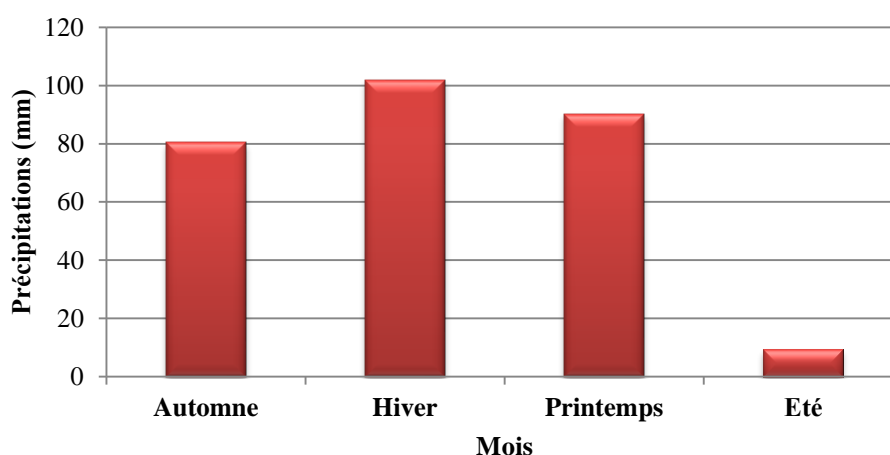


Figure II.3: Variations saisonnières des précipitations (1980/1981-2015/2016)

II.2. Etude des Températures

Les températures moyennes annuelles et mensuelles régissant directement le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques, permettent avec les précipitations le calcul du déficit d'écoulement et les indices climatiques.

II .2.1.Températures annuelles

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations enregistrées durant la période 1980/1981-2015/2016 sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.5:Température moyennes mensuelles à la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016).

Années	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985	1985/1986	1986/1987
T (°C)	16,2	17,9	16,6	17,0	17,3	17,4	17,3
Années	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1992/1993	1993/1994
T (°C)	17,9	17,6	18,4	17,3	16,9	17,0	17,7
Années	1994/1995	1995/1996	1996/1997	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001
T (°C)	18,5	18,1	17,6	18,2	17,7	17,9	18,3
Années	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008
T (°C)	17,7	18,2	17,6	17,2	18,0	17,9	17,8
Années	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
T (°C)	18,0	18,6	18,2	17,6	17,1	18,3	18,4
Années	2015/2016	T moy = 17,7 °C					
T (°C)	18,3						

La figure II.4, montre que les températures moyennes annuelles sont irrégulières, elles ont tendance à augmenter d'une année à l'autre. En effet, on y enregistre une variation importante avec un minimum de 16,2°C enregistré en 1980-1981 et un maximum de 18,6°C enregistré en 2009-2010.

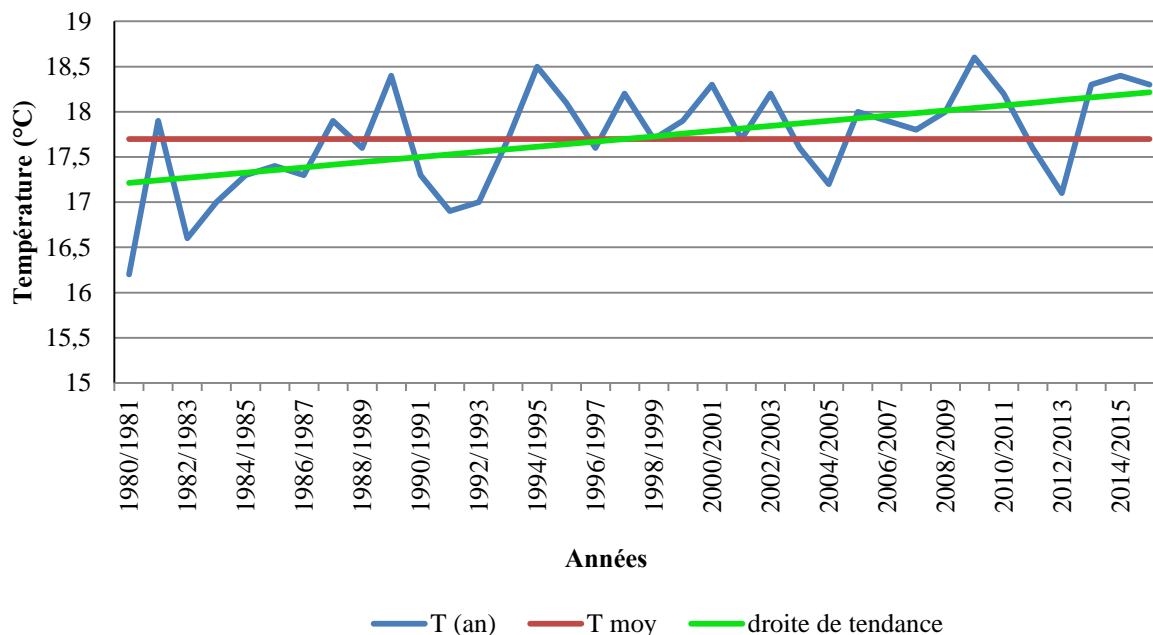


Figure II.4 : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Zenâta.

(1980/1981-2015/2016)

II .2.2. Températures mensuelles

Dans cette étude, nous nous sommes basées sur les données des températures mensuelles recueillies à partir de la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016), et qui sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.6: Valeurs des températures mensuelles moyennes, exprimées en °C de la station de Zenâta. (1980/1981-2015/2016)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
Tmoy (°C)	23,1	19,4	14,8	11,5	10,4	11,3	13,5	15,4	18,5	22,7	25,7	26,2	17,7

Cette représentation permet de considérer le mois de Janvier comme le plus froid (de l'ordre de 10°C) et le mois d'Août comme le plus chaud de l'année (>26°C). La température moyenne mensuelle caractérisant la région le long de cette période est de 17,7 °C

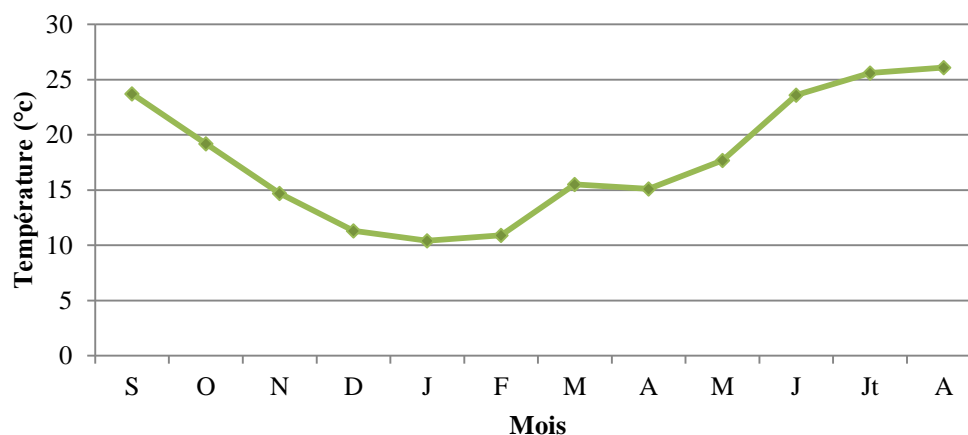


Fig. II.5. Variation des températures moyennes, minimales et maximales mensuelles à la station de Zenâta(1980/1981-2015/2016)

II.3. Étude du climat

L'étude du climat nous permet de déterminer les périodes sèches et humides, et on se basant sur plusieurs indices, elle permet de déterminer le type du climat de la région à partir des précipitations et des températures.

Tableau II.7: Précipitations et températures moyennes mensuelles (1980/1981– 2015/2016).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
P moy (mm)	15,7	26,0	38,5	31,5	36,1	34,2	33,5	32,1	24,5	5,2	1,1	3,0	281,4
Tmoy (°C)	23,1	19,4	14,8	11,5	10,4	11,3	13,5	15,4	18,5	22,7	25,7	26,2	17,7

II.3.1. Méthode de visualisation (méthode graphique)

Cette méthode est basée sur une visualisation graphique. On trace les deux courbes des précipitations et des températures moyennes mensuelles sur un graphe avec deux échelles différentes ($P = 2T$).

- Pour Gaussen et Bagnouls, un mois humide est celui où le total moyen des précipitations (mm) est supérieur au double des températures moyennes (°C) ($P > 2T$). Par contre, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur au double des températures moyennes (°C) ($P < 2T$).
- Si la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations, on dit que la période est déficitaire. Dans le cas inverse, la période est dite excédentaire.

La courbe pluviothermique (fig. II. 6) permet de visualiser :

- *- Une période humide qui s'étend depuis Novembre jusqu'à la mi-Avril.
- *- Une période sèche qui s'étend sur le reste des mois de l'année.

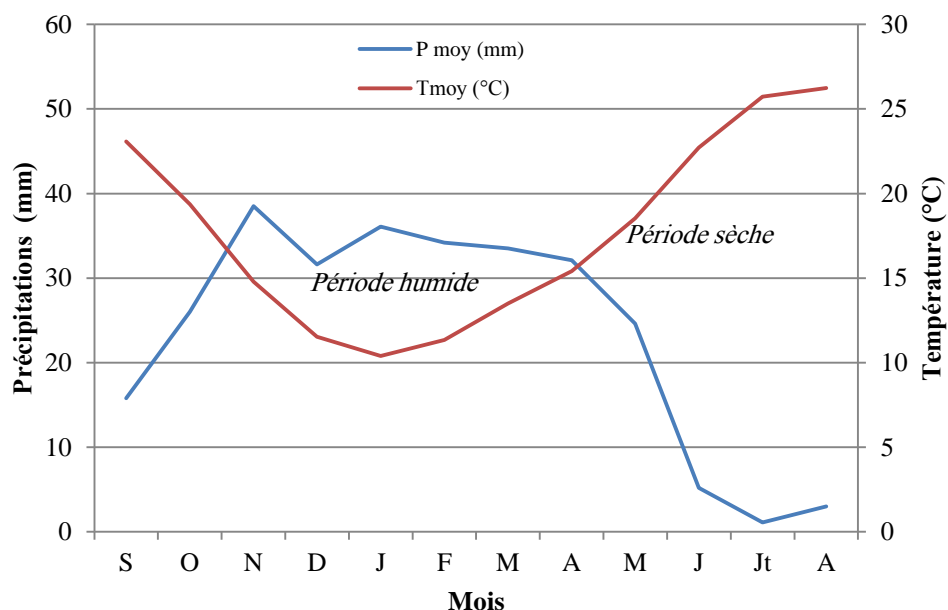


Figure II.6: Courbe pluviothermique de la station de Zenâta.
(1980/1981-2015/2016)

II .3.2.Indice d'aridité annuel de Martonne

Cet indice est fonction des températures et des précipitations moyennes annuelles, il est calculé par la relation suivante :

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

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

I : indice d'aridité.

Tab.II.8: Indice d'aridité de Martonne.

P (mm)	T (°C)	I
281,4	17,7	10,1

Selon le calcul du coefficient d'aridité annuel de De Martonne pour la station de Zenâta (1980/1981-2015/2016) (tableau II.8) et selon la figure II.6 et le tableau II.8, la région d'étude jouit d'un climat semi-aride avec un écoulement temporaire.

Tableau. II.9 : Classification du climat suivant l'indice d'aridité annuel de De Martonne.

Indice d'aridité	Type de climat
$I < 5$	Climat hyperaride
$5 < I < 7,5$	Climat désertique
$7,5 < I < 10$	climat steppique
$10 < I < 20$	climat semi-aride
$20 < I < 30$	climat tempéré.

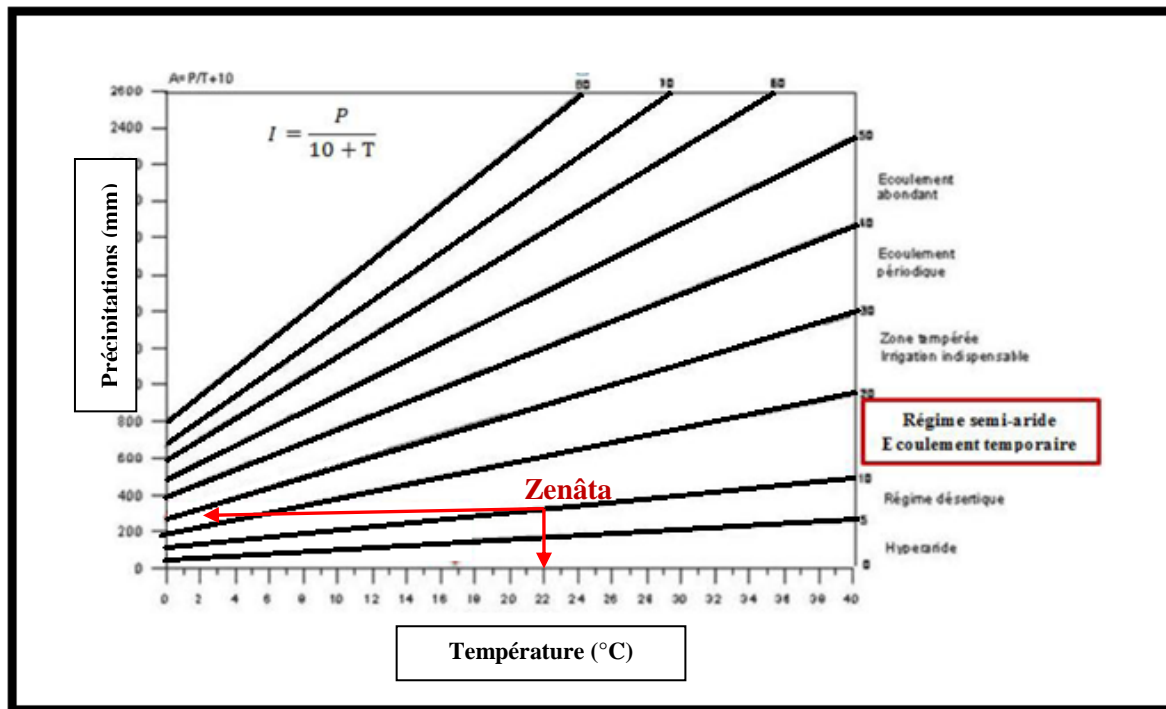


Fig. II.7. Abaque de De Martonne

II.4. Conclusion

L'étude climatique effectuée sur la région d'Hennaya au cours d'une période de 36ans allant de 1980/1981 jusqu'à 2015/2016 à partir des deux principaux paramètres (précipitations et températures) mesurés dans la station de Zenata, montre que le climat de la région d'étude est de type semi-aride, avec une température moyenne annuelle de 17.7C et des précipitations moyennes annuelles d'environ 281,4mm.

On y distingue deux périodes : une humide s'étalant de la mi-octobre à la mi-avril, et une autre sèche occupant le reste des mois de l'année.

Introduction

L'étude hydrochimique des eaux souterraines permet d'une part de confirmer les résultats de la prospection hydrogéologique et d'autre part de connaître la qualité des eaux.

Notons que l'hétérogénéité lithologique d'un aquifère joue un rôle très important sur les variations des caractères chimiques de ces eaux.

Cette étude a porté sur des échantillons prélevés au niveau des différents points d'eau captant l'aquifère du Plio-Quaternaire au niveau de la plaine d'Hennaya (campagne réalisée par S.M Hayaneen Mars 1981(annexe2).

Les points d'eau sont répartis sur presque toute la plaine voir la figure I.7 ayant servi à l'établissement de la carte piézométrique au chapitre I).

III.1. Contrôle des analyses par la balance ionique

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

$$BI = \frac{|\Sigma r^+ - \Sigma \bar{r}|}{\Sigma r^+ + \Sigma \bar{r}} \times 100$$

Avec :

r: quantité en réaction

Cette relation permet de définir trois classes comme suit :

Si :

- ❖ $BI < 2$ bonne analyse
- ❖ $2 < BI < 5$ analyse acceptable
- ❖ $SI BI > 5$ mauvaise analyse

Les résultats de contrôle des analyses sont reportés dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Résultats de la balance ionique

Points d'eau	Somme des cations	Somme des anions	Balance ionique %	Résultat d'analyse
p12	15,38	15,43	0,162	Bonne
p11	14,63	14,46	0,584	Bonne
p10	18,53	18,34	0,515	Bonne
P3	17,23	19,22	5,460	Mauvaise
P21	16,39	16,31	0,245	Bonne
P17	15,78	10,76	9,128	Mauvaise
P20	15,93	13,89	6,841	Mauvaise
P13	12,78	13,66	3,328	acceptable
P15	14,4	14,91	1,740	Bonne
P2	15,69	16,24	1,723	Bonne
P30	14,67	14,49	0,617	Bonne
P26	20,13	20,9	1,877	Bonne
P24	15,61	15,53	0,257	Bonne
P25	16,26	16,08	0,557	Bonne
P18	14,17	14,49	1,117	Bonne
P28	15,95	14,96	3,203	Acceptable

P32	14,58	14,64	0,205	Bonne
P1	14,95	15,71	2,479	Acceptable
P31	21,71	14,44	1,668	Bonne
P14	14,43	15,79	4,500	Acceptable
P36	17,65	17,1	1,583	Bonne
A. Ouahab	14,57	13,7	3,077	Acceptable
A. Boukoura	16,27	15,62	2,038	Acceptable

Les valeurs de la balance ionique des eaux de notre plaine sont en général inférieures à 2% ce qui dénote de la bonne qualité des analyses au niveau de points d'eau (p12, p11, p10, p21, p15, p2, p30, p26, p24, p25, p18, p32, p31, p36),

Par contre, au niveau des puits (p13, p28, p1, p14, Ain Ouahab, Ain Boukoura) les valeurs sont comprise entre 2% et 5% ,la qualité des analyses est donc acceptable.

Au niveau des puits (p3, p17, p20) la balance est supérieure à 5%, indiquant une mauvaise analyse.

Pour confirmer la qualité de nos analyses nous avons essayé de trouver une relation entre la somme des cations et celle des anions dont les résultats apparaissent sur la figure III.1. En effet, les points apparaissent dans la majeure partie proche de la droite $y = x$ exception faite pour les deux points P31 et P17.

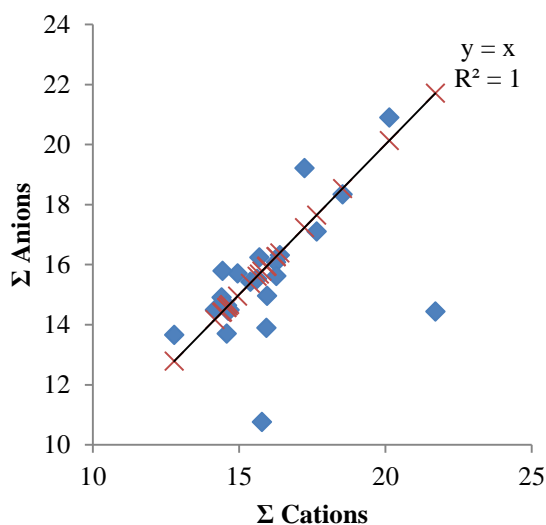


Figure III.1: Corrélation entre les anions et les cations

III.2. Caractéristiques de l'eau

III.2.1. Paramètres organoleptiques

III.2.1.1. La couleur

Une eau colorée n'est pas agréable pour les usages domestiques et en particulier pour la boisson, car elle provoque toujours un doute sur sa potabilité.

Dans la plupart des points d'eaux étudiées nos eaux sont selon Hayane, 1983 incolores et limpides. Ceci indique l'absence d'ions métalliques qui changent la couleur de l'eau.

III.2.1.2. Le goût

Les principaux corps pouvant donné à l'eau une saveur désagréable sont : le fer et le manganèse, le chlore actif, et le phénol, tous les points d'eaux étudiées ne présentent aucune saveur caractéristique.

III.2.1.3. L'odeur

L'odeur peut être définie comme :

- L'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles,
 - La qualité de cette sensation particulière provoquée par chacune de ces substances.
- Nos eaux ne présentent aucune odeur caractéristique (HayaneS. M., 1983).

III.2.1.4. La turbidité

C'est la réduction de la transparence de l'eau due à la présence de matière non dissoute. C'est le premier paramètre perçu par le consommateur. Les points d'eaux sont caractérisés par l'absence des matières non dissoutes capables de rendre l'eau trouble.

III.2.2. Paramètres physico-chimiques

III.2.2.1. Conductivité électrique

Elle est fonction de la température de l'eau, et est proportionnelle à sa minéralisation. Elle varie entre 490 $\mu\text{s}/\text{cm}$ au niveau du p17 et 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ au niveau du p26. Au niveau d'Ain Boukoura et d'Ain Ouahab, elle est égale à environ 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (fig.III.2).

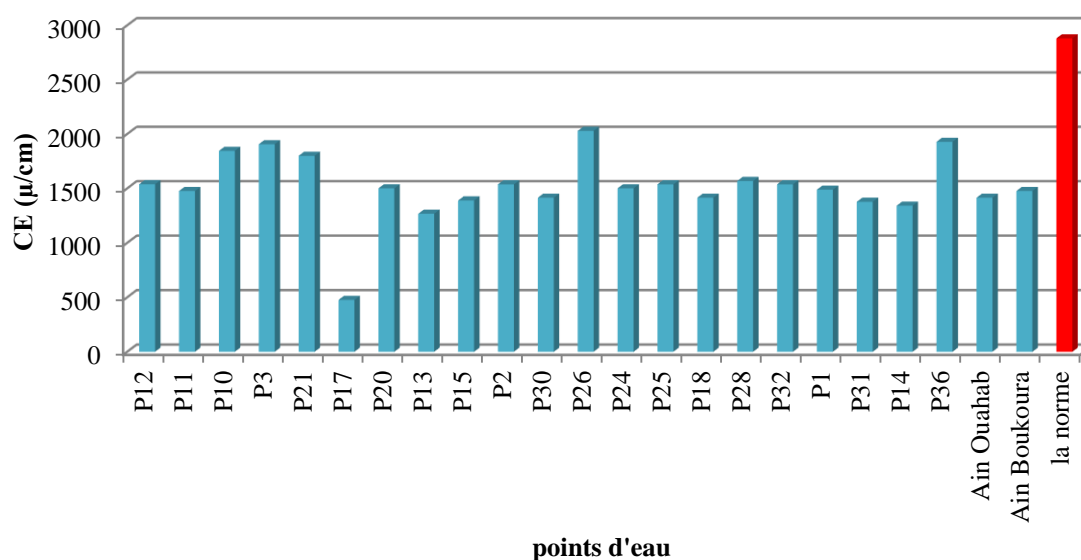


Figure III.2: Variation de la conductivité électrique des eaux de la plaine d'Hennaya.

La cartographie par l'utilisation du logiciel Surfer 8 (fig.III.3.) montre que les eaux se trouvant en aval de la nappe ont des conductivités plus élevées. Ceci est dû au long trajet parcouru par les eaux et où l'évaporation qui favorise leur minéralisation.

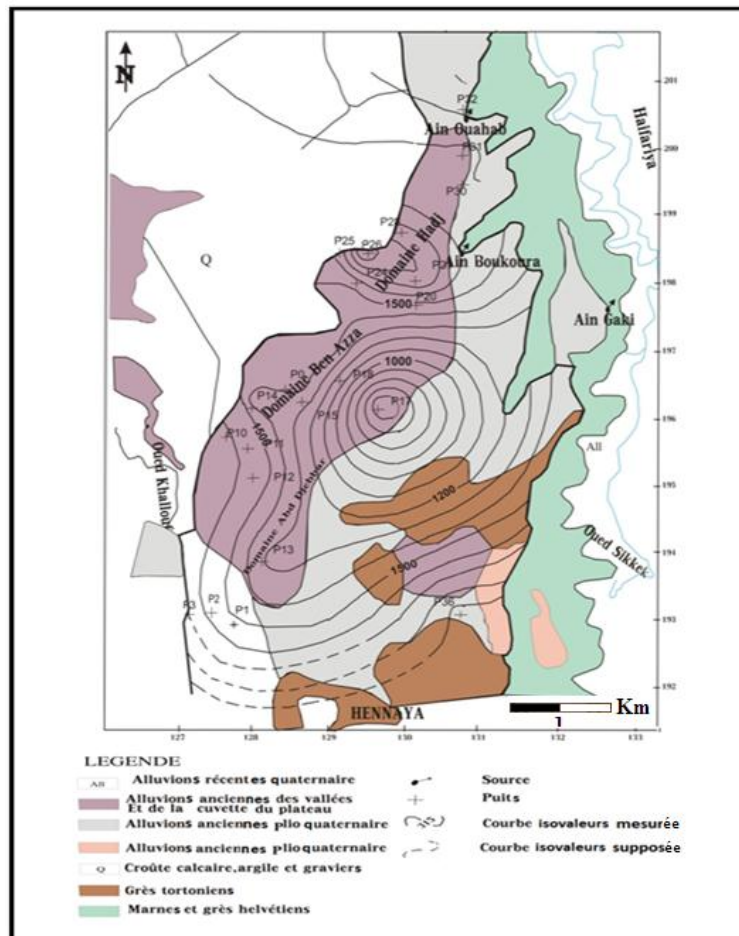


Figure III.3: Carte d'iso-conductivité de la plaine d'Hennaya

III.2.2.2. Potentiel d'hydrogène

Le pH d'une eau représente son acidité, son alcalinité ou sa neutralité (tableau III.2). Dans la zone étudiée, le pH varie entre 6,24 à 7,70. La plupart des eaux montrent un pH voisin de 7 (fig. III.4).

Tableau III.2: Classification des eaux selon le pH (Rodier, 2009)

pH	Possibilités d'utilisation
pH < 5	Acidité forte
pH = 7	Neutralité (eau pure)
pH de 7 à 8	Neutralité rapprochée (eau de surface)
pH > 8	Alcalinité, évaporation intense
pH de 5,5 à 8	Majorité des eaux souterraines

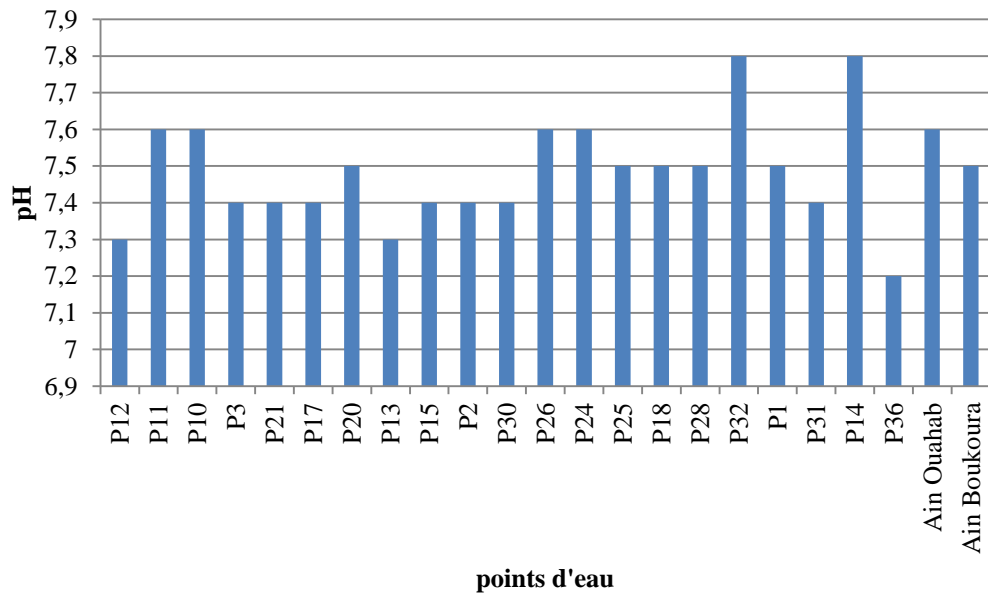


Figure III.4: Variation du pH des eaux de la plaine d'Hennaya.

III.2.2.3. Température

La température joue un rôle dans la solubilité des sels et des gaz dans la détermination du pH des de la zone étudiée, elle présente une remarquable stabilité spatiale, ce qui nous indique que ces eaux circulent dans la zone d'homothermie.

III.2.2.4. Minéralisation globale de l'eau

Les valeurs de la minéralisation sont comprises entre les valeurs 962 mg/L (P13) et 1539 mg/L (P26) (fig.III.5).les fortes minéralisations sont situées au Sud ; ce sont donc les formations jurassiques des monts de Tlemcen qui en sont les causes.

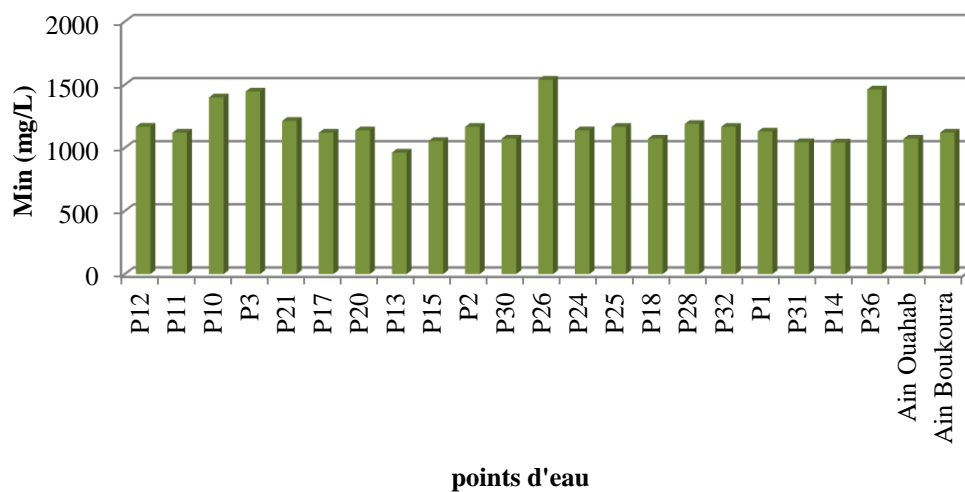


Figure III.5: Variation de la minéralisation des eaux de la plaine d'Hennaya.

III.2.2.5. Degré ou titre hydrotimétrique

Ce paramètre a un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés. Il indique la dureté totale de l'eau et correspond à la somme des teneurs en calcium et en magnésium. Il est donné en degré français. Les valeurs de TH pour les eaux sont comprises entre (52,95°F et 82,65°F), elles expriment une eau très dure selon le tableau III.3.

Avec $TH = r (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \text{ meq/L}$

Tableau III.3: Classification des eaux en fonction de la dureté (Rodier, 2009).

TH (°F)	0 - 7	7 - 15	15 - 30	30 - 40	+ 40
Eau	Très douce	douce	Moyennement douce	dure	Très dure

Tableau III.4: Variation du degré hydrotimétrique au niveau des points d'eau

Points d'eau	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	TH (°F)
p12	5,25	6,33	57,9
p11	4,6	6,08	53,4
p10	7	7,81	74,05
p3	6,5	5,67	60,85
p21	5,5	7,31	64,05
pp17	6,3	6,16	62,3
p20	5,6	6,82	62,1
p13	4,6	5,51	50,55
p15	5,1	6,08	55,9
p2	5,9	5,34	56,2
p30	5	6,57	57,85
p26	7,7	8,83	82,65
p24	5,35	6,49	59,2
p25	5,7	7,07	63,85
p18	4,3	6,99	56,45
p28	5,3	6,9	61
p32	5,4	5,51	54,55
p1	5,5	5,09	52,95
p31	5,3	6,66	59,8
p14	4,75	6,08	54,15
p36	8,55	3,61	60,8
AinOuahab	5,2	5,92	55,6
Ain Boukoura	5,25	7,31	62,8

III.2.2.6. Eléments majeurs

a) Cations

- **Le Calcium (Ca^{2+})** : la présence des ions Ca^{2+} dans les eaux de la nappe du Plio-Quaternaire de la plaine d'Hennaya est liée principalement à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) au Sud ainsi que les formations gypseuses (Trias) (CaSO_4) au Sud Est. Les teneurs de l'ion Ca^{2+} sont comprises entre 86 mg/L et 171 mg/L, 100% des eaux ont une teneur inférieure à la concentration maximale admissible (C.M.A) (200 mg/L) (comparaison aux normes algériennes données en (annexe 3).

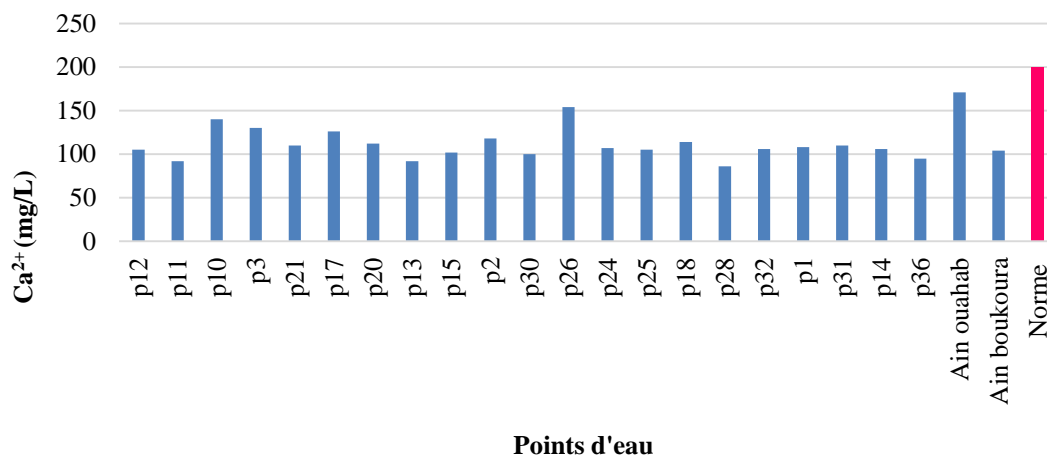


Figure III.6 : Variation de l'ion calcium des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya

- **Le Magnésium (Mg^{2+})** : Les normes fixent sa concentration maximale à 150 mg/L valeur au-delà de laquelle il confère à l'eau une saveur désagréable. Dans notre étude la teneur de cet élément est comprise entre 44 et 106 mg/L, aucun point ne dépasse la CMA (fig. III.7).

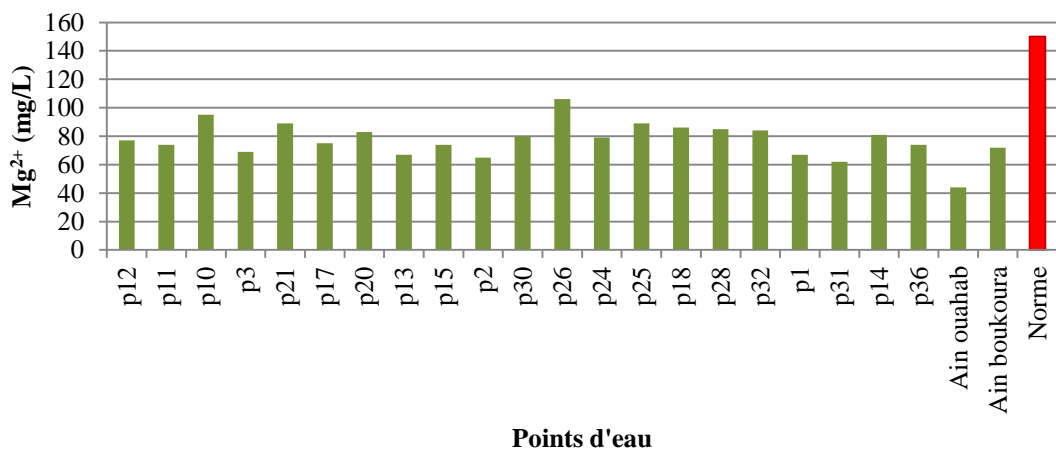


Figure III.7 : Variation de l'ion magnésium des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'Hennaya

- **Le Sodium (Na⁺)** : La teneur de l'ion Sodium est toujours inférieure à la CMA (200 mg/L) dans les eaux analysées, Ain Ouahab (127mg/L) représente la plus forte valeur , la concentration est comprise entre 57 et 127 mg/L (fig.III.8).

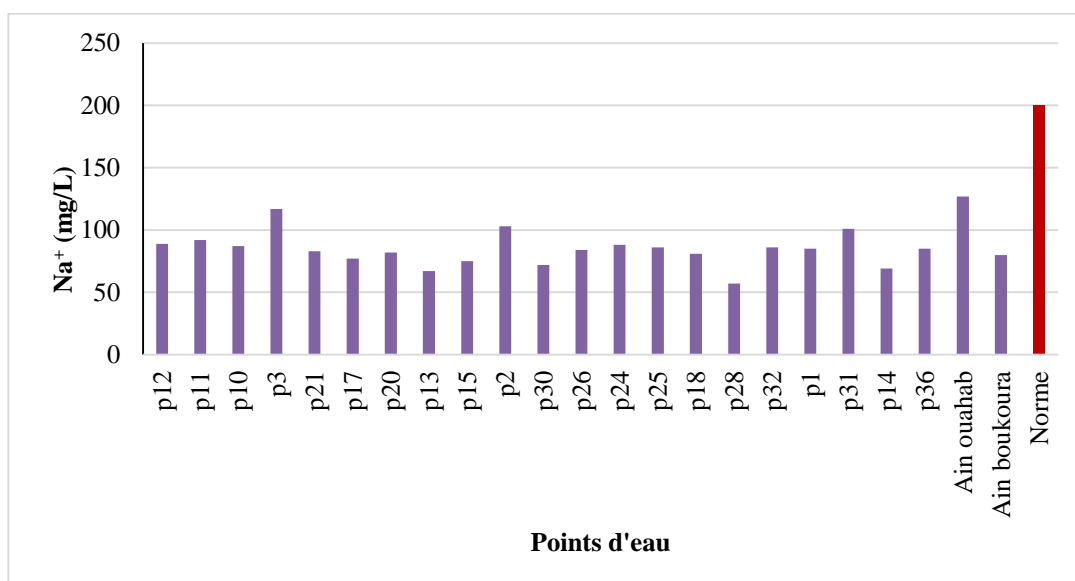
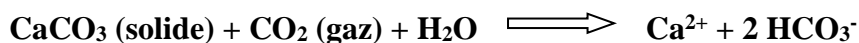


Figure III.8 : Variation de l'ion sodium des eaux de l'aquifère alluvionnaire De la plaine d'Hennaya

b)-Anions

- **Les Bicarbonates (HCO₃⁻)** : Se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux météoriques qui se chargent en CO₂ libre lors de leur percolation à travers le sol (Castany, 2000).



Dans les eaux de la nappe les concentrations varient entre 280 et 470 mg/L (fig.III.9).

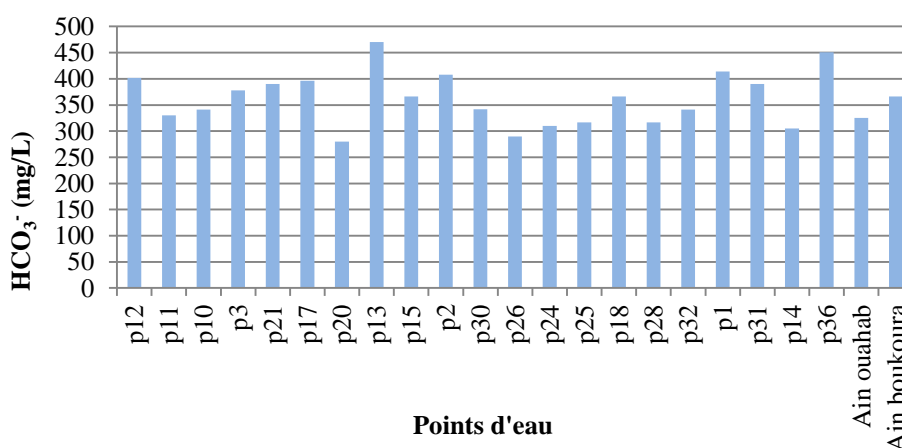


Figure III.9 : Variation des bicarbonates des eaux de l'aquifère alluvionnaire De la plaine d'Hennaya

- Les Chlorure (Cl⁻)** : dans les aquifères libres la concentration en Cl⁻ est directement liée à la teneur en chlorures des précipitations. Les normes fixent sa concentration maximale à 500 mg/L. Dans les eaux de la nappe alluvionnaire d'Hennayales concentrations moyennes en ions chlorures observées varient entre 170 à 525 mg/L. c'est le puits P26 qui présente la valeur la plus élevée (fig.III.10).

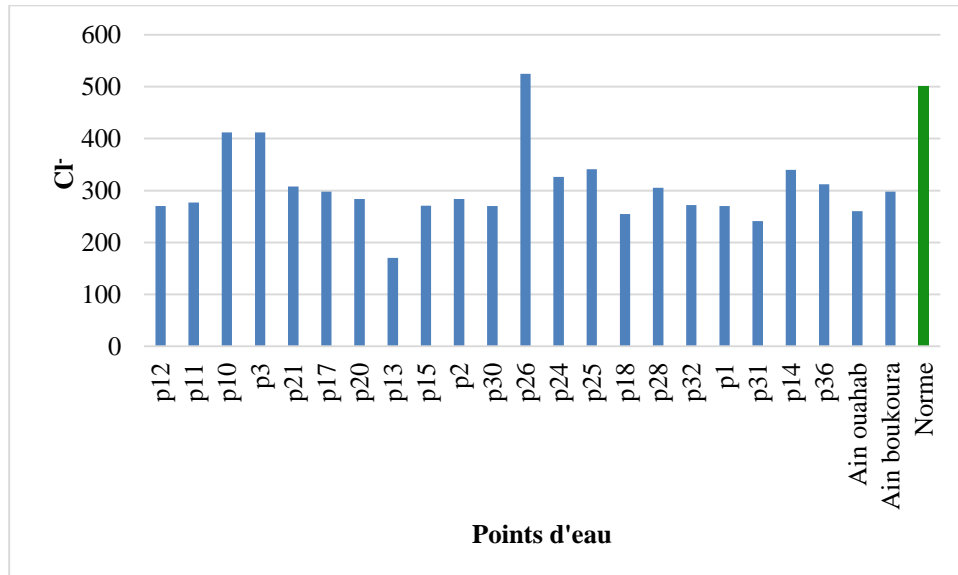


Figure III.10 : Variation des chlorures des eaux de l'aquifère alluvionnaire De la plaine d'Hennaya

Les sulfates (SO₄²⁻) : La concentration en ions sulfates des eaux naturelles est très variable.). Les normes fixent 200 mg/L comme CMA. Dans la région d'Hennaya leur teneur est conforme avec les normes allant de 43 à 70 mg/L (fig.III.11).

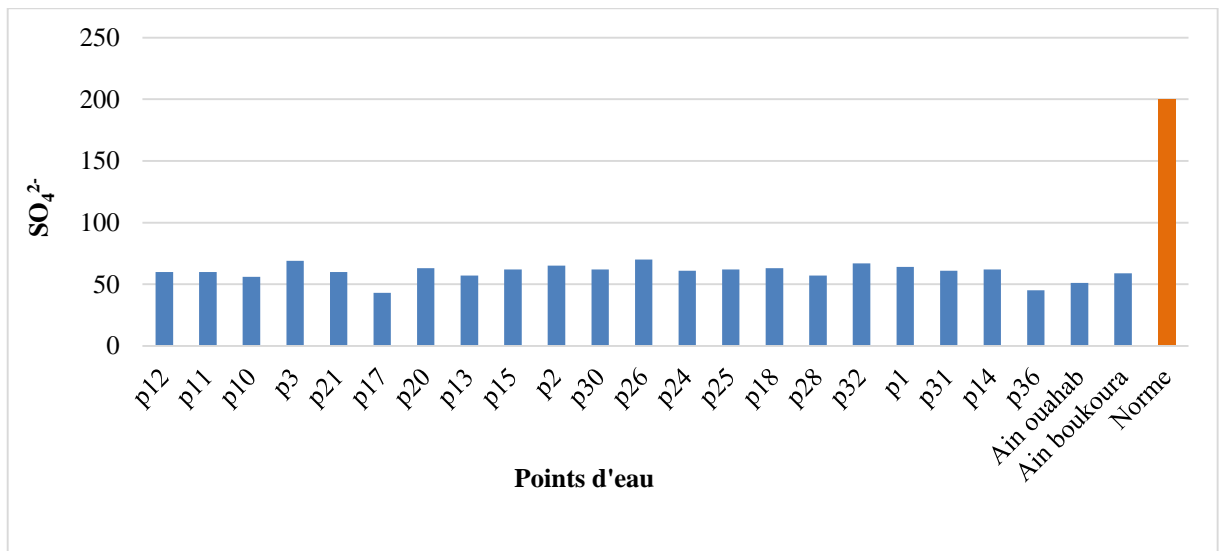


Figure III.11 : Variation des sulfates des eaux de l'aquifère alluvionnaire De la plaine d'Hennaya

III.3. Cartographie hydrochimique

Les eaux souterraines constituent un milieu complexe. Si leurs compositions sont en relation directe avec les constituants des sols et des couches géologiques traversées, la qualité des eaux est largement affectée par le couvert végétal et les pratiques agricoles.

Dans notre présente étude, nous avons tenté de comprendre, à travers la représentation graphique (en cartes d'iso teneurs) des éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques qui présentent une influence sur la qualité des eaux et qui montrent une évolution significative durant la période d'observation (campagne 1981).

Les éléments chimiques cartographiés concernent :

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

L'analyse de la répartition spatiale des éléments chimiques (cations et anions) sont représentées sur les figures qui suivent:

c- Pour les cations

les eaux du grès tortoniens sont plus chargées en Ca^{2+} , en Mg^{2+} et en (Na^{+}), que les eaux des conglomérats.

Les concentrations suivent une évolution allant de l'amont vers l'aval faisant penser au sens d'écoulement. En effet les teneurs des éléments chimiques (cations) sont plus importantes en amont qu'en aval (fig.III.12, 13 et 14)

d- Pour les anions

Pour les eaux des grès tortoniens, nous notons qu'elles sont riches en ions HCO_3^{-} avec des valeurs qui tournent en moyenne au tour de 400mg/L, celles des chlorures le sont aussi (élevées), par contre les teneurs en sulfates SO_4^{-2} sont modérées (ne dépassant pas les 69mg/L. Il en est pareil pour les eaux des conglomérats le même scénario se répète, elles montrent des teneurs en HCO_3^{-} comprises entre 300 et 400 mg/L, peu sulfatées mais un peu plus que les précédentes, les chlorures par contre, restent élevés (fig.III. 15, 16 et 18).

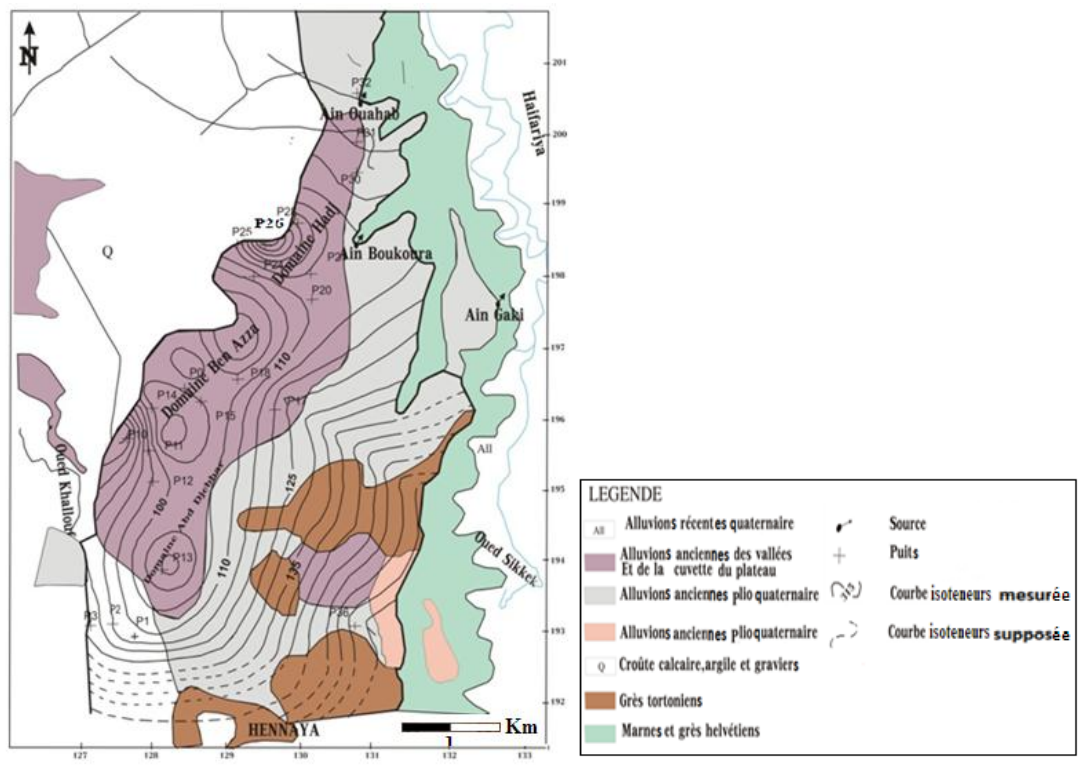


Figure III.12: Carte iso-teneurs en Ca^{2+} (campagne, 1981).

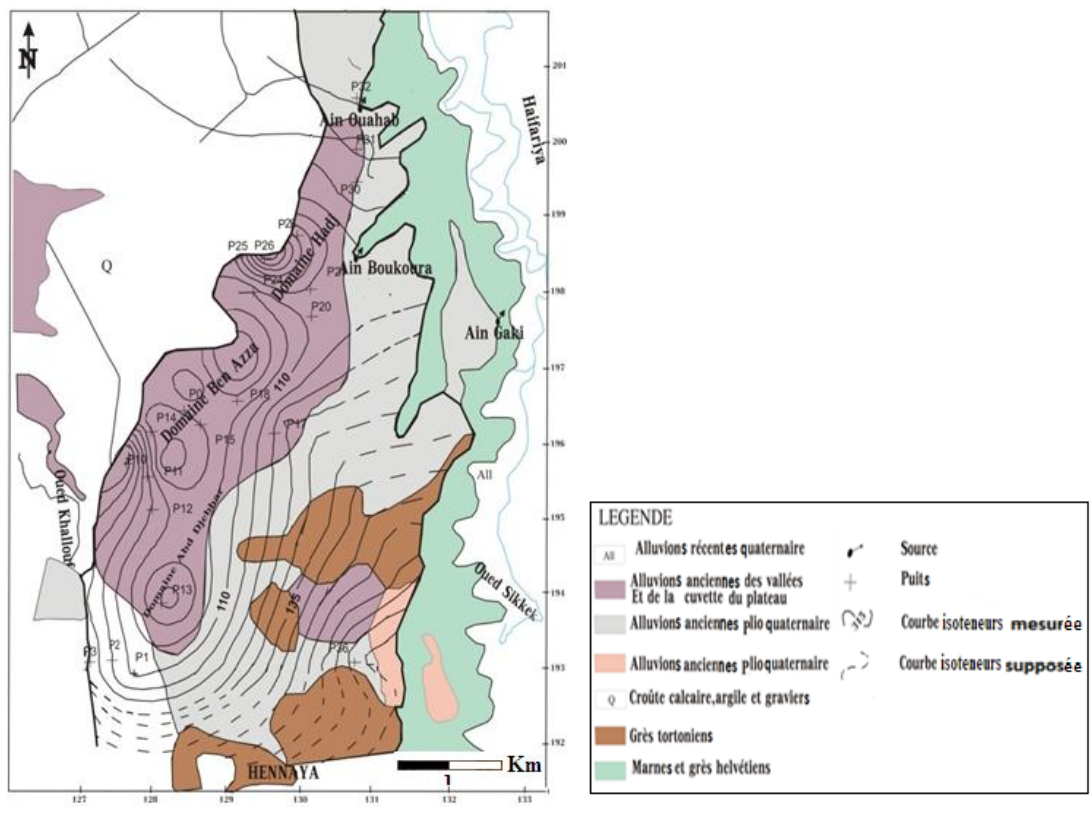


Figure III.13: Carte iso-teneurs en Mg^{2+} (campagne, 1981).

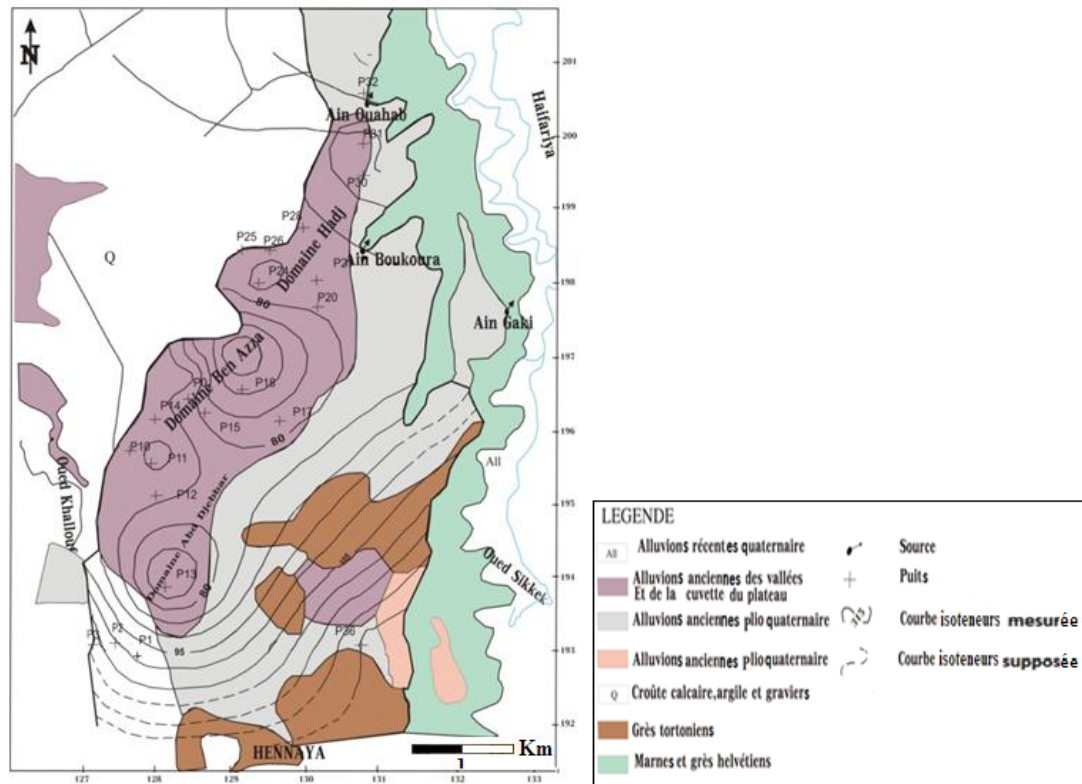


Figure III.14: Carte d'iso-teneurs en (Na^+) (campagne, 1981).

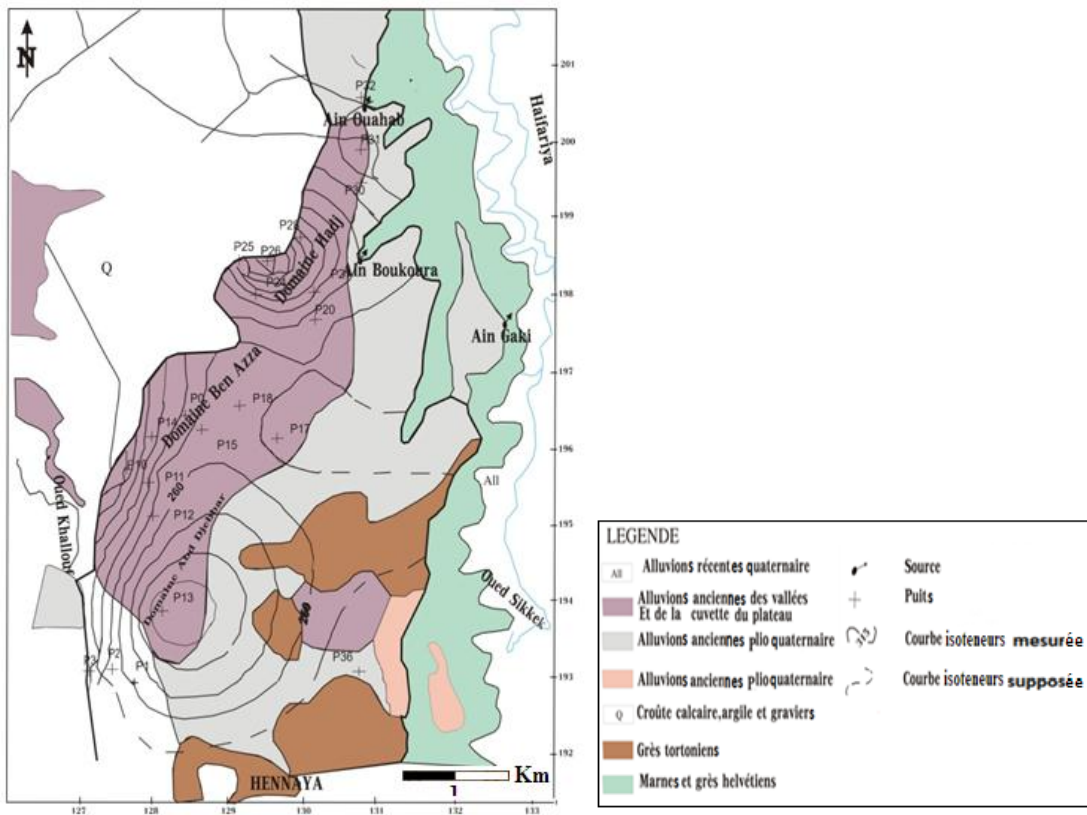


Figure III.15: Carte d'iso-teneurs en Cl^- (campagne, 1981).

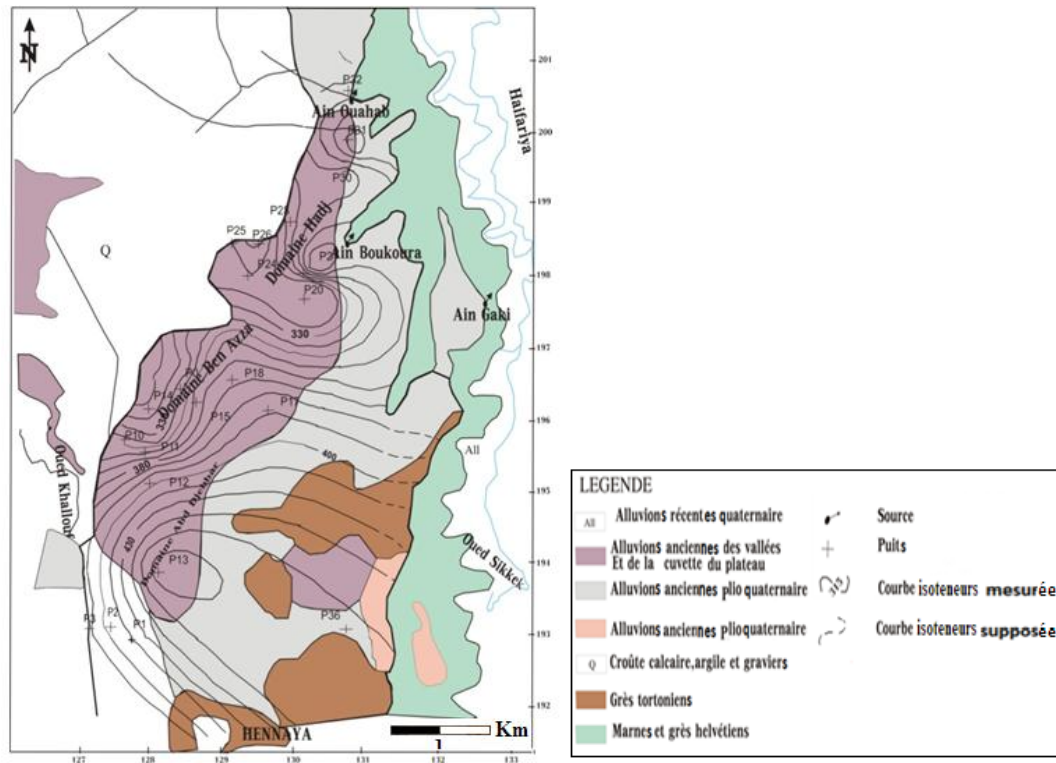


Figure III.16: Carte d'iso-teneurs en HCO_3^- (campagne, 1981).

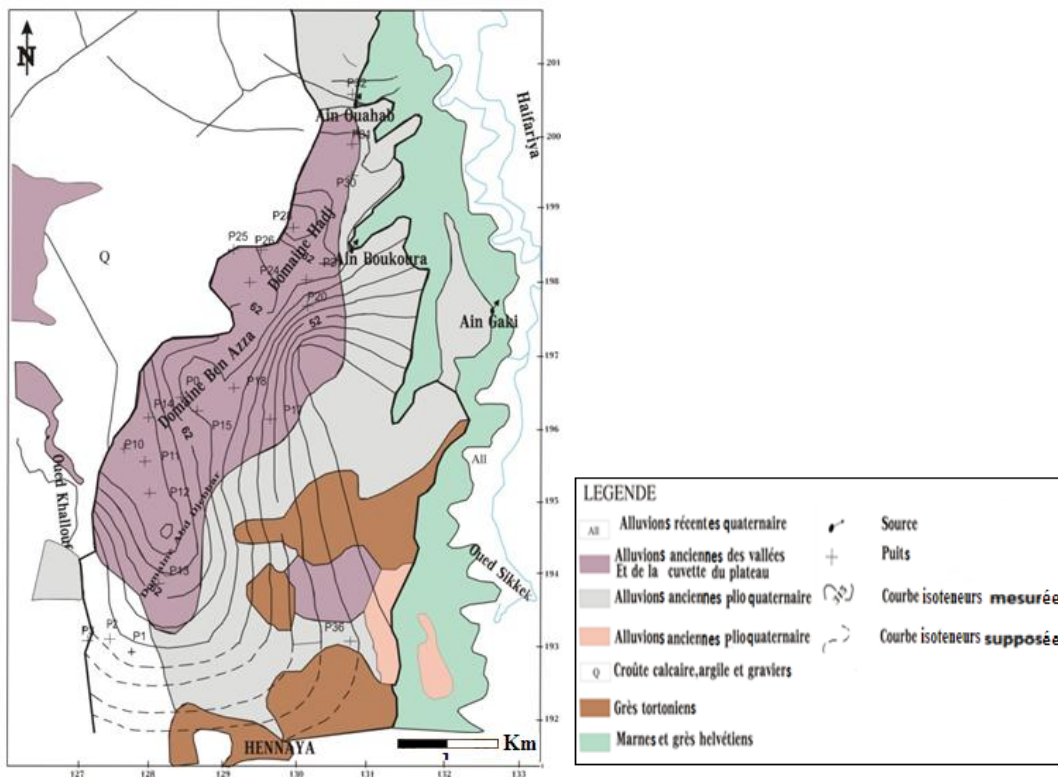


Figure III.17: Carte d'iso-teneurs en SO_4^{-2} (campagne, 1981).

III.4. Classification des eaux selon leur faciès

III.4.1. Classification par utilisation des formules caractéristiques

Tableau III.5: Classification des eaux souterraines des points d'eau selon leurs faciès chimiques

Points d'eau	Cations	Anions	Faciès
P12 - P11 - P10 - P21 P20 - P30 - P26 - P24 P25 - P18 - P28 - P32 P15 - P31 - P14 – AinOuahab AinBoukoura	$r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+$	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}$	ChloruréMagnésien
P3 - P2 - P1	$r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Na}^+$	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}$	Chlorurécalcique
P36	$r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+}$	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}$	
P17	$r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Na}^+$	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}$	Bicarbonaté calcique
P13	$r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+$	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}$	Bicarbonaté magnésien

La composition chimique permet de reconnaître sur le bassin de l'oued Hennaya 04 familles de faciès :

- Famille des eaux à faciès chloruré magnésien :
 $r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}$ Et $r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+$
- Famille des eaux à faciès chloruré calcique :
 $r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}$ Et $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+}$
- Famille des eaux à faciès bicarbonaté calcique :
 $r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}$ Et $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Na}^+$
- Famille des eaux à faciès bicarbonaté magnésien :
 $r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}$ Et $r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+$

Nous pouvons dire que dans la plaine d'Hennaya, il y a prédominance des eaux à faciès chloruré magnésien.

- La forte teneur en chlorures est due principalement à l'action de l'évaporation qui a affecté le pliocène congломératique, en effet les sels en dissolution peuvent par précipitation formé des croûtes calcaires où la concentration en chlorures est très importante.
- La présence du Magnésium est due à la dissolution et l'altération des reliefs jurassiques.

III.4.2. Représentation graphique des analyses d'eau

III.4.2.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

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

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique des échantillons d'eau. 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 qui représentent les différents éléments chimiques. Un groupe d'eau de minéralisation 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.

Le report des analyses sur les diagrammes de Schoeller-Berkaloff (figure. III.18 a, b, et c, III. 19, III.20 et III.21), nous permet de distinguer quatre familles de faciès résumés sur le tableau III.6 :

Tableau III.6: Classification des faciès selon Schoeller-Berkaloff

Faciès	Points d'eau
Chloruré magnésien	p12, p11, p10, p21, p15, p30, p26, p24, p25, p18, p28, p32, p31, p14, p20, Ain Ouahab, Ain Boukoura.
Chloruré Calcique	p2, p1, p36, p3
Bicarbonaté magnésien	p13
Bicarbonaté calcique	p17

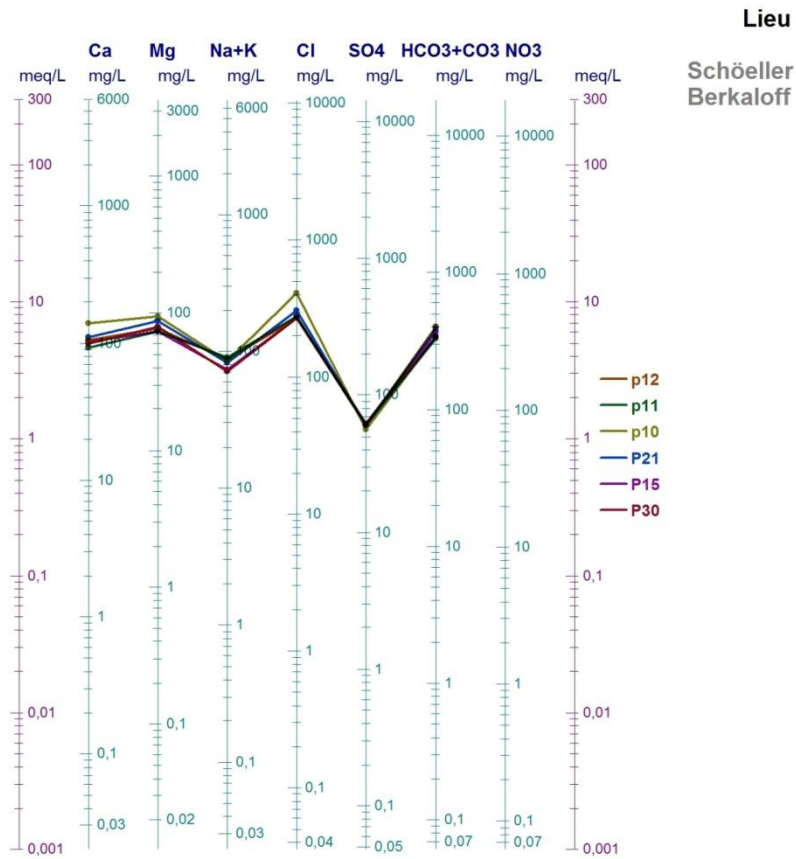


Figure.III.18. (a): Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées magnésiennes

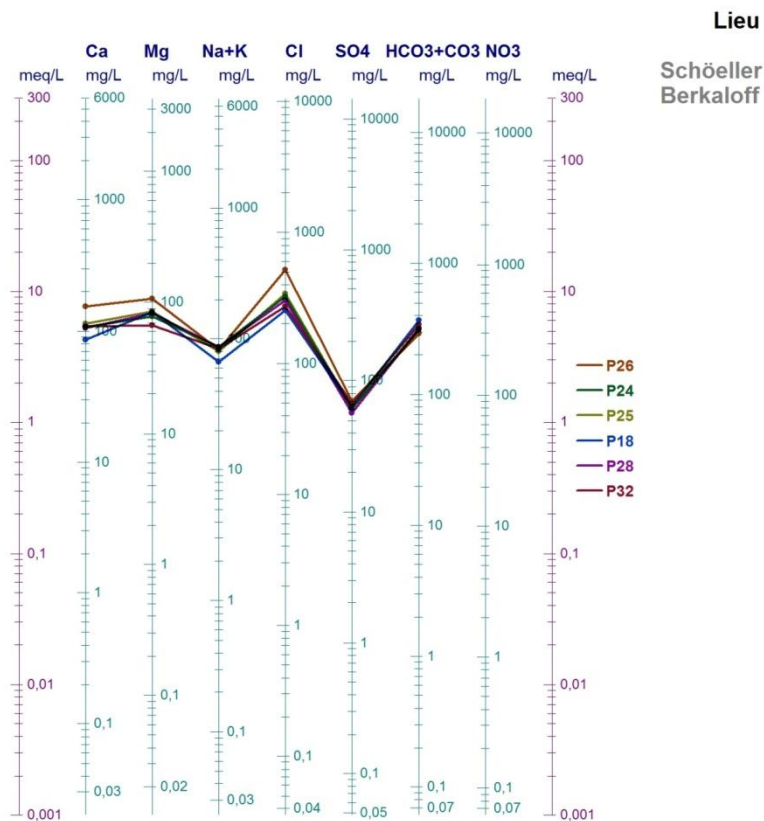


Figure III.18 (b): Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées magnésiennes

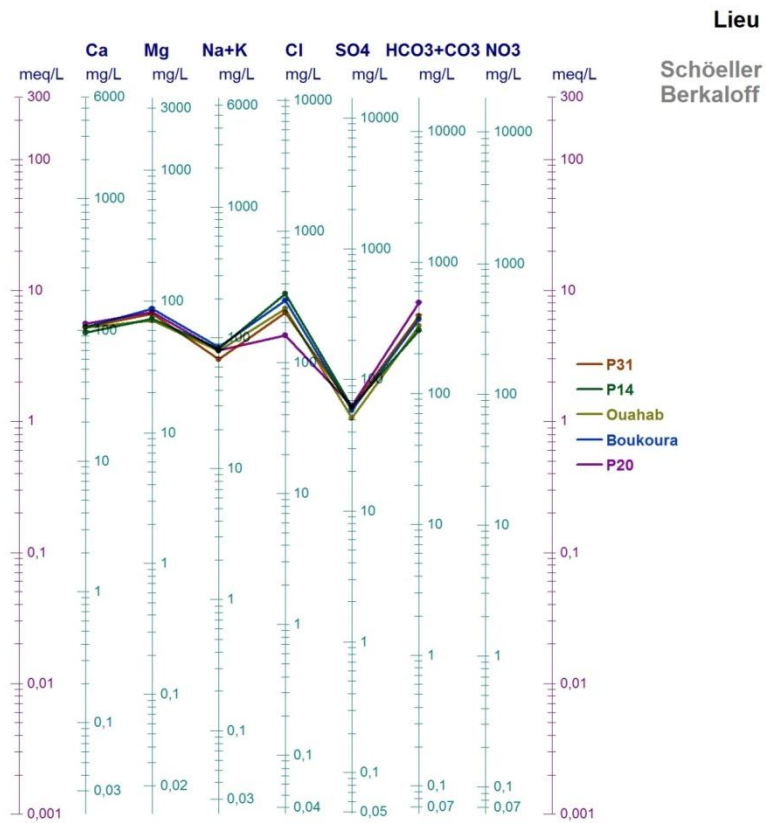


Figure III.18 (c): Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées magnésiennes

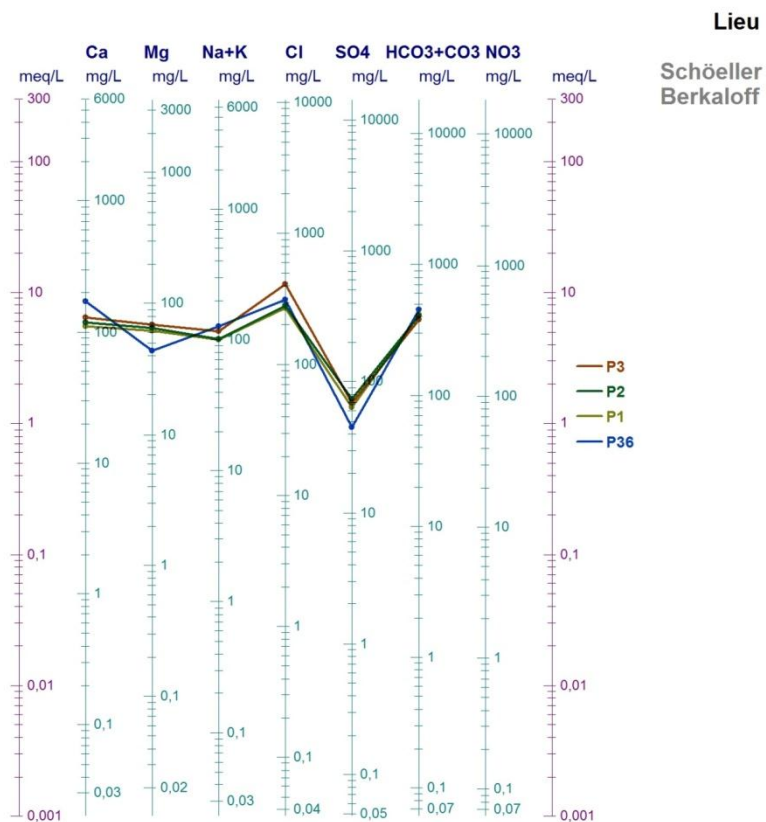


Figure III.19 : Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux Chlorurées Calciques

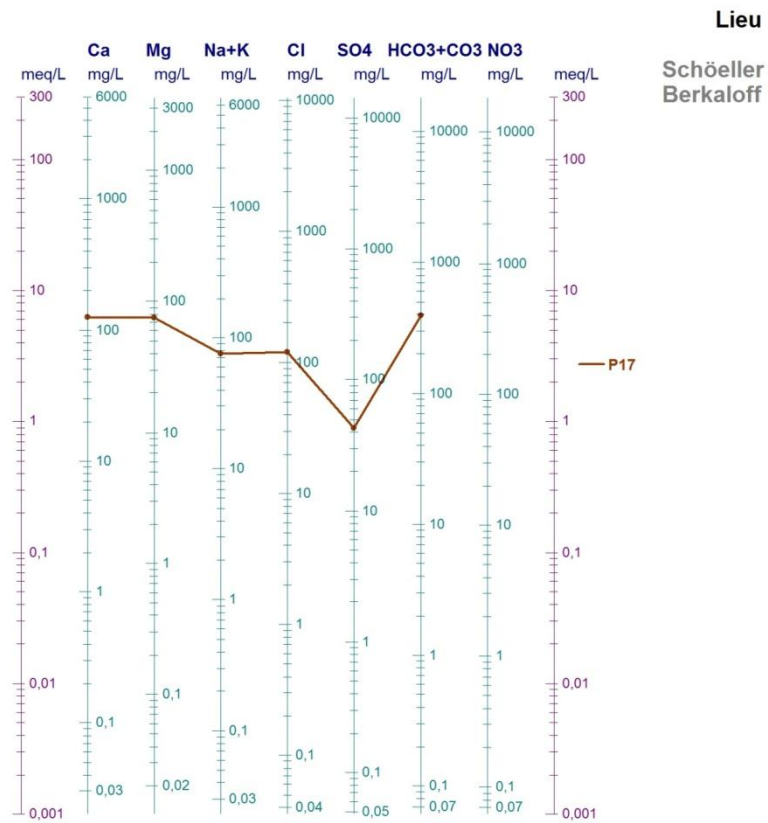


Figure III.20: Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux bicarbonatées calciques

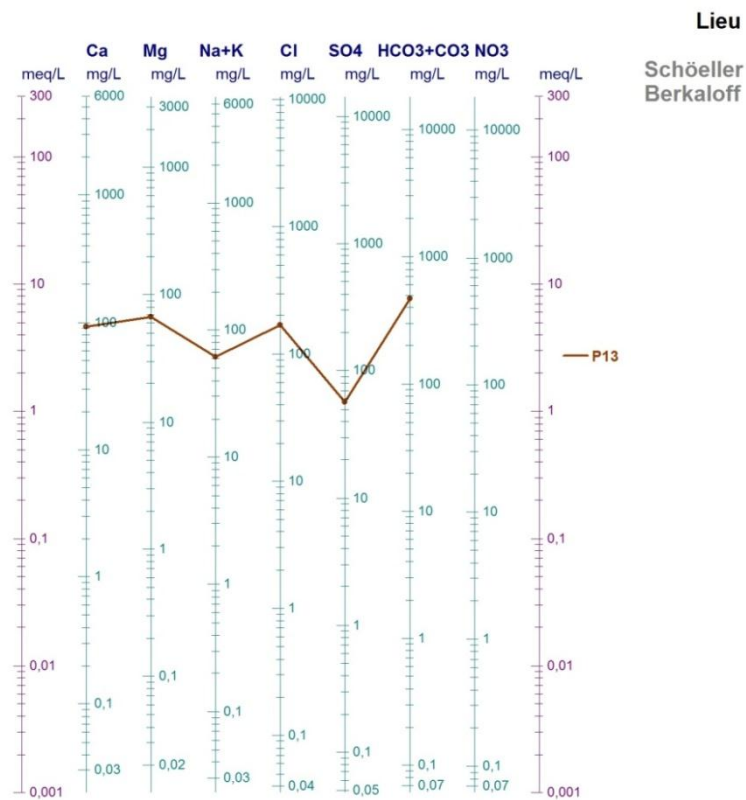


Figure III.21: Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux bicarbonatées magnésiennes

Nous pouvons conclure que cette classification confirme les résultats trouvés par les formules caractéristiques.

III.4.2.2. Diagramme de Piper

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet d’avoir une approche de la composition chimique d’une eau. Ce diagramme est établi à partir des quantités en réaction en pourcentage par la formule suivante:

Pour les anions : $r \% = \frac{r \times 100}{\sum r \text{ anions}}$

Pour les cations : $r \% = \frac{r \times 100}{\sum r \text{ cations}}$

Là encore, nous distinguons deux grands groupes :

- Groupe des eaux chlorurées calciques et magnésiennes (fig.III.22 et III.23),
- Groupe des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (fig.III.24 et fig.III.25).

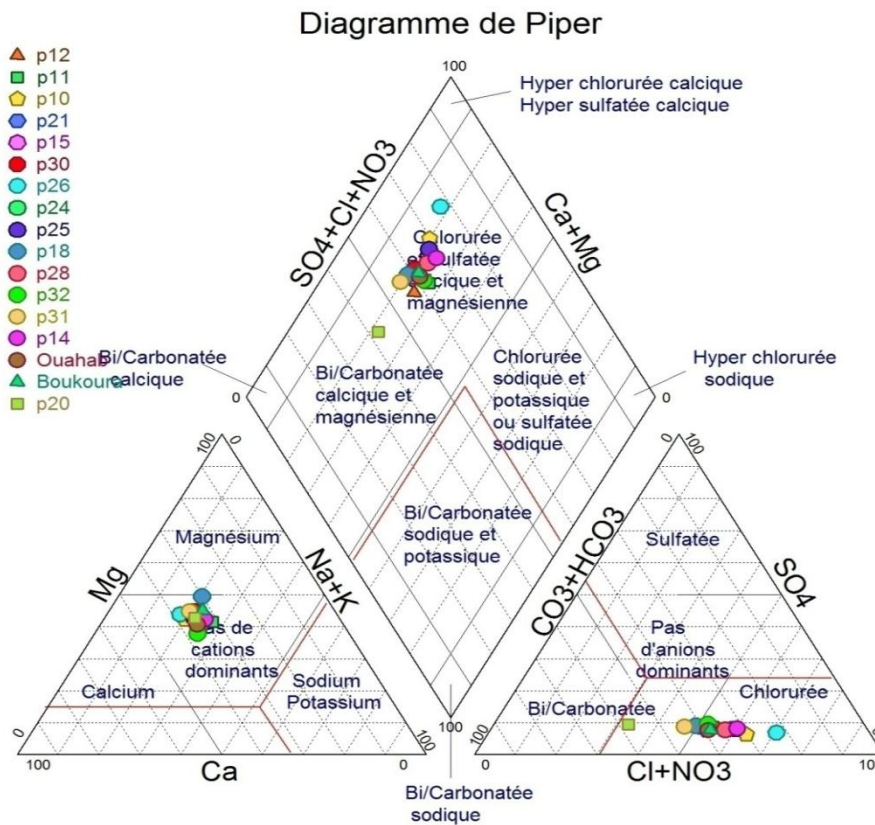


Figure III.22 : Diagramme de Piper des points des eaux chlorurées magnésiennes

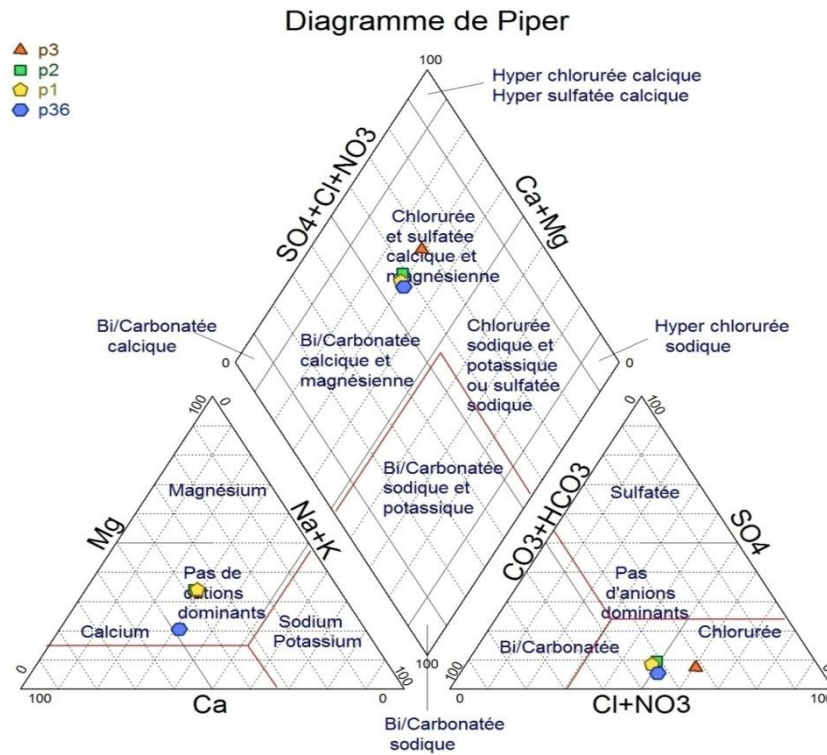


Figure III.23 : Diagramme de Piper des eaux chlorurées calciques

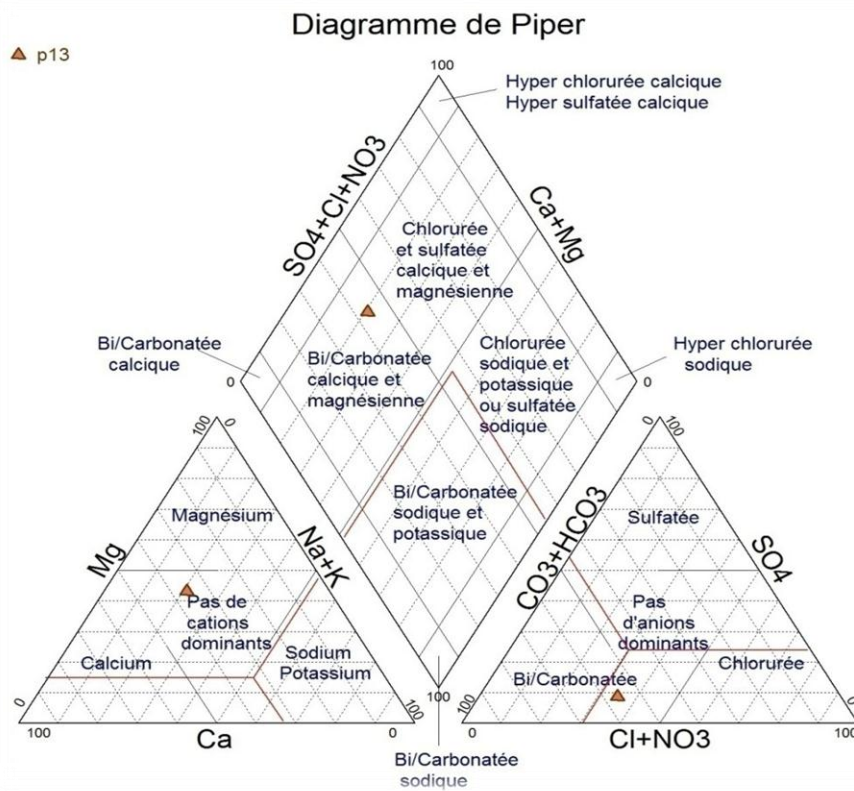


Figure III.24 : Diagramme de Piper des eaux bicarbonatées magnésiennes

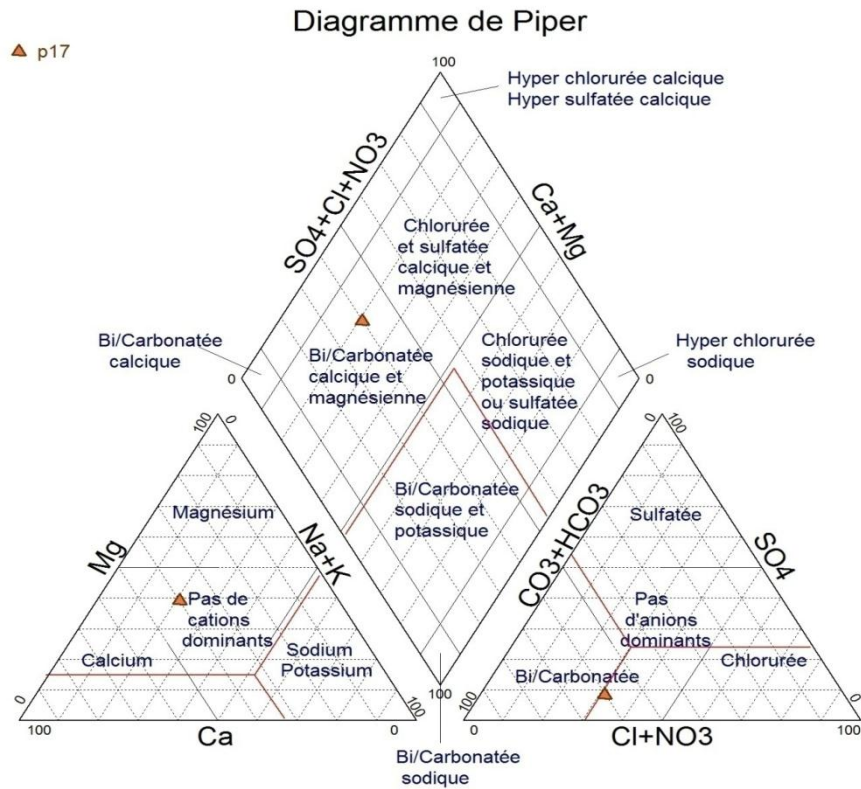
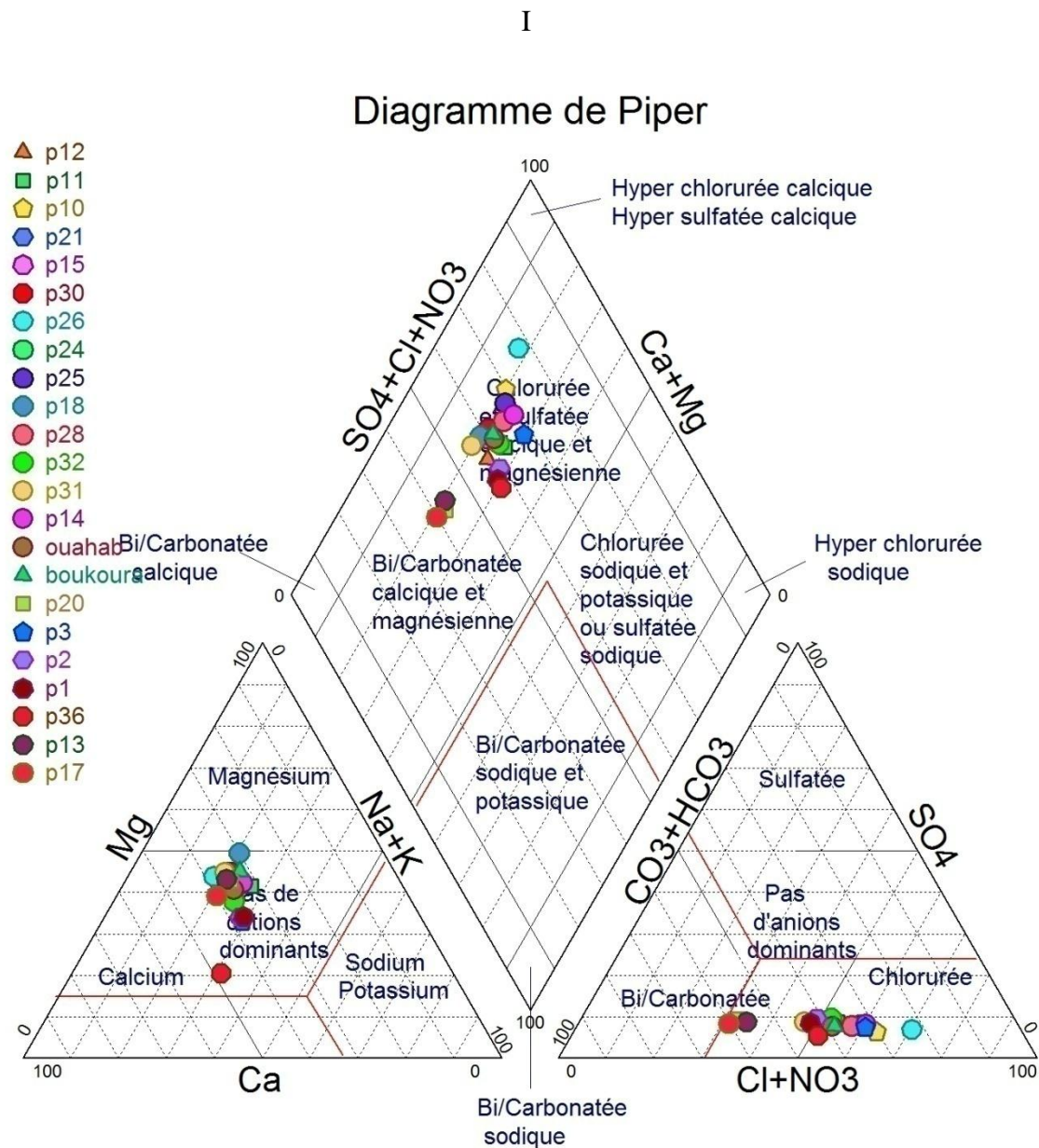


Figure III.25:Diagramme de Piper des eaux bicarbonatées calciques

Pour récapituler ces faciès, nous avons essayé de représenter la totalité des échantillons sur le même diagramme (fig.III.26).



III.5. Aptitude des eaux à l'irrigation

III.5.1. Classification des eaux par la méthode de Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en Sodium. Pour cette étude, nous avons utilisé le pourcentage de Sodium (% Na).

Le pourcentage du sodium (% Na) de l'eau est un paramètre utilisé dans l'évolution de l'aptitude des eaux à l'irrigation (Wilcox L.V., 1948, Tiwari T.N. et Manzoor A, 1988 in Y. Ali Belhadj & Chouaki, 2013).

Ce pourcentage peut être calculé par la relation suivante :

$$\% Na^+ = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$$

Avec : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (meq/L).

Tableau III.7: Valeurs des Na%

Points d'eau	Na%
p12	24,71
p11	27,00
p10	20,08
P3	29,37
P21	21,84
P13	20,89
P17	21,04
P20	22,03
P15	22,36
P2	28,36
P30	21,13
P26	17,88
P24	24,15
P25	21,46
P18	20,32
P28	23,51
P32	25,17
P1	29,16
P31	19,89
P14	24,95
P36	31,10
Ouahab	23,68
Boukoura	22,80

En prenant en considération le % de Sodium, nous pouvons déduire deux classes d'eau pour notre région d'étude (tableau III.8): la classe 1 (très bonne) regroupant le point 26 et le point 31, et la classe 2 (Bonne) associant les autres points d'eau.

Tableau III.8: Classification des eaux de la plaine en fonction du pourcentage du Sodium

Paramètre	Classe 1 Très bonne	Classe 2 Bonne	Classe 3 Admissible	Classe 4 Médiocre	Classe 5 Mauvaise
% Na	<20	20-40	40-60	60-80	>80
Points d'eau	P26 - P31	P12 – P11 – P10 –P3- P21 – P13- P17-P20-P15-P2- P30-P24-P25-P18- P28-P32-P1-P14- P36- A.OUAHAB – A. BOUKOURA			

La classification de Wilcox est basée sur la conductivité électrique et la teneur en Sodium dans l'eau exprimée en pourcentage.

Le report des valeurs des pourcentages en Sodium en fonction de celles de la conductivité sur le diagramme de Wilcox (Figure III.27) permet de voir une autre classification des eaux souterraines concernant leur aptitude à l'irrigation.

Le diagramme (Figure III.27) Couvrant toute la série d'échantillonnage, montre que les eaux souterraines de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire, sont généralement bonnes pour être utilisées en agriculture, le point d'eau 23 est d'excellente qualité. Par contre, le point 7 semble relativement médiocre.

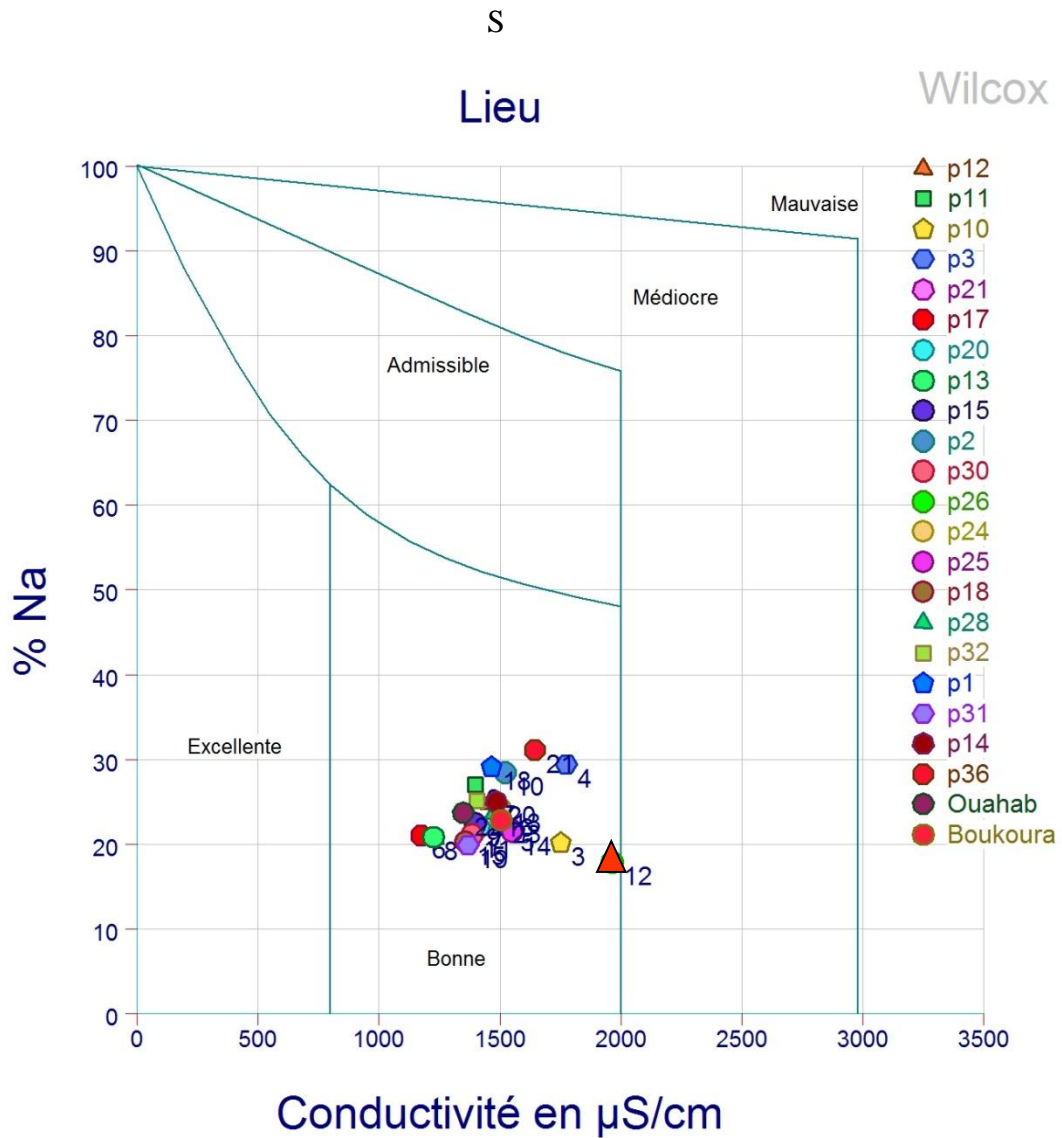


Figure III.27 : Diagramme de Wilcox appliqué aux eaux de la plaine d'Hennaya

III.5.2. Sodium Absorption Ratio(SAR)

Le S.A.R (Sodium Alcalinity Ratio) est utilisé comme mesure pour estimer la convenance d'une eau à l'irrigation.

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

Avec : Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} (meq/L).

- SAR < 10 =>Eaux Excellentes.
- $10 \leq SAR \leq 18$ =>Eaux Bonnes.
- $18 < SAR \leq 26$ =>Eaux convenables.
- SAR > 26 => Eaux Médiocres.

Selon ces normes, la qualité des eaux rencontrées sur la plaine d'Hennaya est excellente (tableau III.9).

Tableau III.9: Valeurs du S.A.R

Nom du point d'eau	Cond (μ/cm)	S.A.R
p12	1538	0,153
p11	1476	0,146
p10	1845	0,1853
P3	1906	0,1723
P17	476	0,1578
P20	1500	0,1593
P21	1799	0,1639
P13	1267	0,1278
P15	1389	0,144
P2	1537	0,1569
P30	1414	0,1467
P26	2029	0,2013
P24	1500	0,1561
P25	1537	0,1626
P18	1414	0,1417
P28	1568	0,1595
P32	1537	0,1458
P1	1488	0,1495
P31	1377	0,1493
P14	1341	0,1443
P36	1928	0,1765
Ouahab	1414	0,1457
Boukoura	1476	0,1627

Le report des valeurs du S.A.R en fonction de la conductivité (salinité-sodicité) (figure III.30), montre la présence d'une seule catégorie des eaux souterraines quant à leur utilisation à des fins d'irrigation).

Les eaux appartiennent à la classe (C3-S1). Cette dernière exprime une qualité admissible. En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au selsur des sols bien drainés, toutefois, il faudra contrôler la salinité.

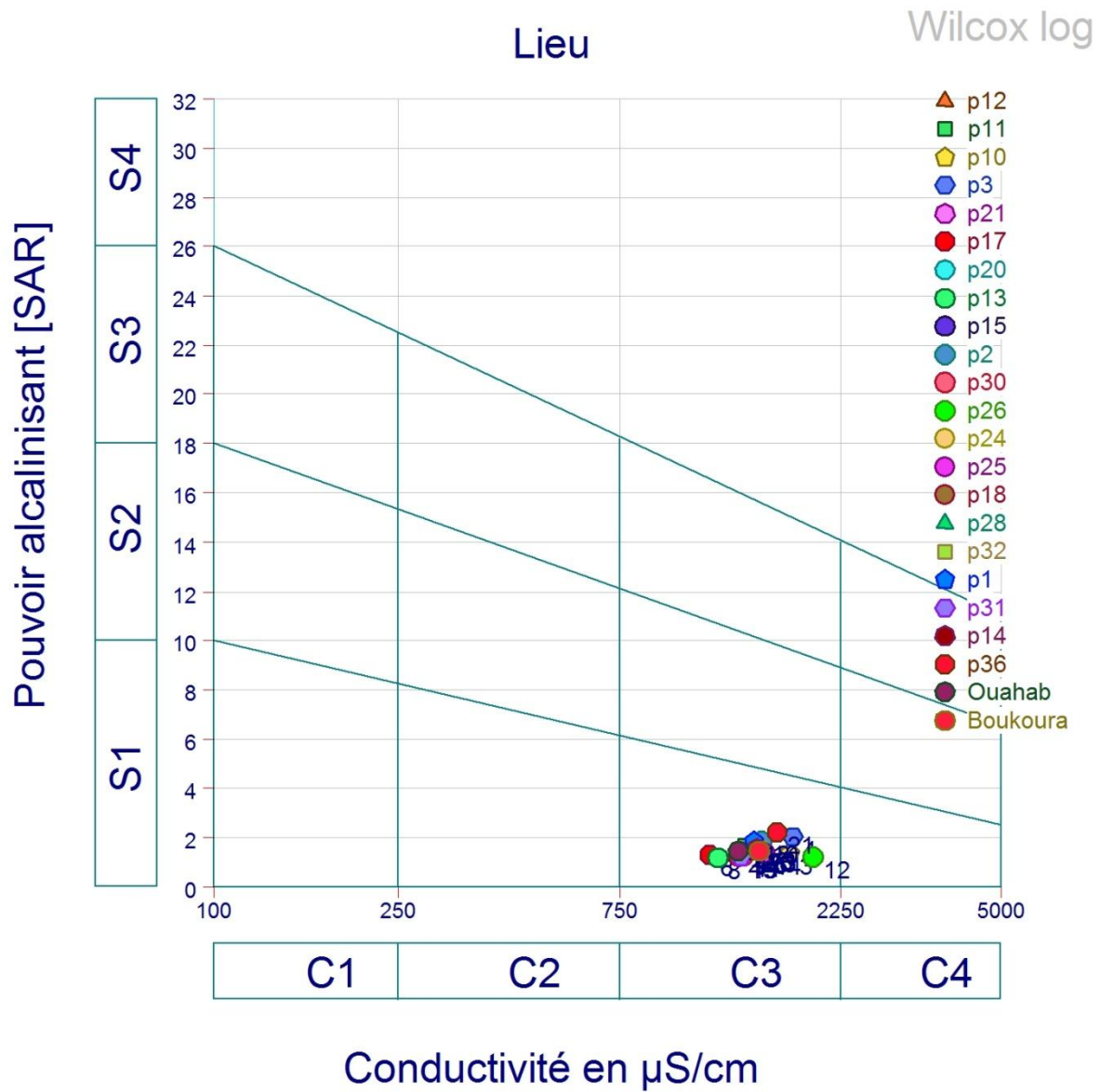


Figure III.28:Diagramme du S.A.R appliqué aux eaux de la plaine d'Hennaya

Tableau III.10: Classification des eaux destinées à l'irrigation d'après le S.A.R

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

Conclusion

D'après cette étude réalisée sur 23 points d'eau au niveau de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine d'Hennaya, nous pouvons dire que ces eaux ont :

- une conductivité élevée (1014 à 2030 $\mu\text{S}/\text{cm}$), d'où une minéralisation importante,

- les diagrammes Scholler-Berkaloff et Piper permettent de distinguer 4 familles de faciès :

- Bicarbonaté magnésien
- Chloruré calcique
- Chloruré magnésien
- Bicarbonaté calcique

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation par l'utilisation de quelques indices tels que % Na et le S.A.R montrent que les puits et les deux exutoires de la plaine d'Hennaya sont admissibles pour l'irrigation.

Introduction

Dans ce chapitre nous allons utiliser une approche statistique pour faciliter le traitement des données hydrochimiques et les rendre compréhensibles par utilisation de graphiques et de matrices de corrélation rendant la comparaison entre plusieurs séries de données visuellement possible.

L'approche statistique est basée sur l'utilisation des diagrammes en boîtes, de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux, le regroupement des eaux et identifier les facteurs responsables de ces regroupements.

IV.1. Diagrammes en boîtes

Un diagramme en boîtes (aussi appelé boîte à moustaches, « boîte de Tukey » ou « box plot ») est une traduction de Box & Whiskers Plot. C'est une invention de Tukey en 1977 pour représenter schématiquement la distribution d'une variable. Cette représentation graphique peut être un moyen pour approcher les concepts abstraits de la statistique, si l'on pratique son usage sur différents jeux de données.

IV.1.1.Principe

Le diagramme en boîtes résume seulement quelques caractéristiques de position du caractère étudié (médiane, quartiles, minimum, maximum ou déciles). Ce diagramme est utilisé principalement pour comparer un même caractère dans deux séries ou plus.

Il s'agit de tracer un rectangle allant du premier quartile au troisième quartile et coupé par la médiane. Ce rectangle suffit pour le diagramme en boîte. On ajoute alors des segments aux extrémités menant jusqu'aux valeurs extrêmes.

IV.1.2. Représentation graphique des diagrammes en boîtes

Ces boîtes utilisent 5 valeurs (figure IV.1) qui résument des données : le minimum, les 3 quartiles Q1, Q2 (médiane), Q3, et le maximum, il en existe plusieurs versions, mais une telle boîte comprend le plus souvent :

- Une échelle des valeurs présente sur l'axe vertical,
- La valeur du premier quartile (Q1) qui est le trait inférieur de la boîte,
- La valeur du troisième (Q3) qui est le trait supérieur de la boîte,
- La valeur de second quartile (Q2 qui est donc la médiane) représentée par un trait horizontal au sein de la boîte.
- Les moustaches inférieure et supérieure représentées par des petits rectangles verticaux de chaque côté de la boîte.
- La moyenne est parfois présente et représentée par un +.
- Les valeurs maximum et minimum sont parfois représentées de même que certaines valeurs atypiques.

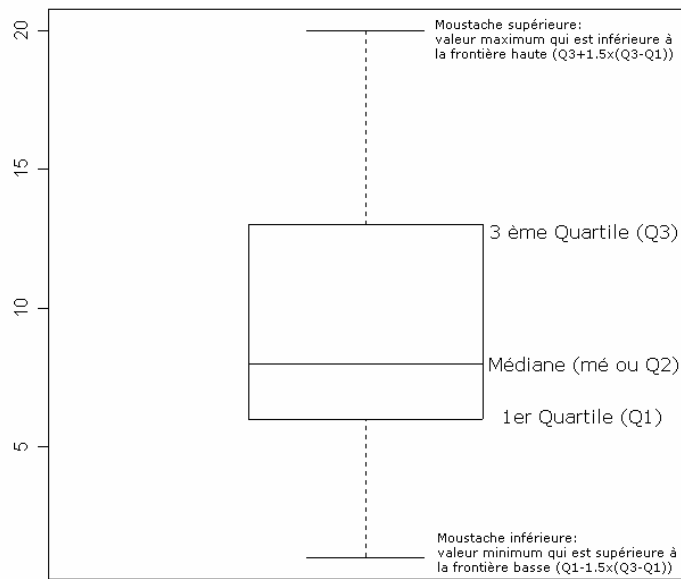


Figure IV.1 : Exemple de représentation d’un diagramme en boîte

Plus l’étendue de la moustache est grande, plus les valeurs sont dispersées. A l’inverse, plus elle est petite, plus les valeurs sont homogènes. Aussi, plus la boîte se trouve en haut et plus les valeurs sont élevées. A l’inverse, plus elle est en bas et plus les valeurs sont faibles.

IV.1.3. Application des diagrammes en boîtes aux eaux de la plaine alluvionnaire d’Hennaya

IV.1.3.1. Représentation de l’ensemble des échantillons

Le tableau IV.1, représente les paramètres statistiques des séries de données hydrochimiques, ayant servi à la réalisation du diagramme en boîte (fig.IV.2). Les teneurs sont traduites en quantité en réactions c'est-à-dire en meq/L.

Tableau IV.1: Paramètres de position des eaux de l’aquifère alluvionnaire de la plaine d’Hennaya (meq/L)

Paramètres statistiques	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
1 ^{er} Quartile	5,8	4,72	4,4275	7,9	6,565	1,23
minimum	5,5	3,61	4,36	7,6	6,19	0,93
Médiane	6,2	5,215	4,755	8,39	6,735	1,38
maximum	8,55	5,67	5,49	11,6	7,39	1,55
3ème Quartile	7,01	5,42	5,17	9,49	6,93	1,46

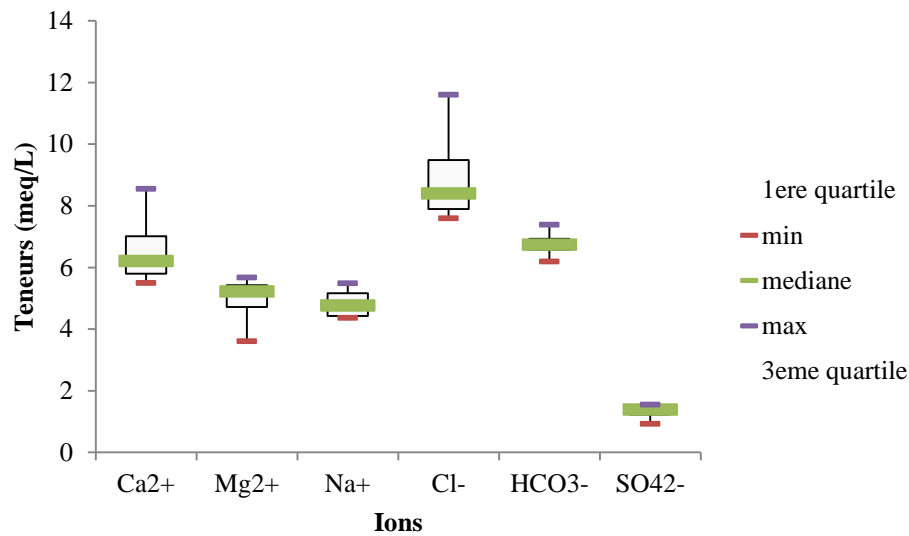


Figure IV.2 : Diagramme en boîte des eaux de la plaine d'Hennaya

D'un simple coup d'œil, nous visualisons le niveau moyen des groupes, la répartition des éléments montre que plus l'étendue de la moustache est grande, plus les valeurs sont dispersées (cas du Cl⁻). A l'inverse, plus elle est petite, plus les valeurs sont homogènes (cas du SO₄²⁻ et des bicarbonates), les médianes sont très différentes. Nous remarquons donc que la comparaison est aisée et c'est ainsi, que nous pourrions confirmer que le faciès chloruré magnésien domine spatialement dans l'aquifère alluvionnaire (résultat déjà trouvé au chapitre précédent).

1V.1.3.1. Représentation des eaux en fonction des faciès

Pour mieux cerner cet apport des statistiques en hydrochimie, nous avons tracé les boîtes à moustaches pour les familles des faciès des eaux déjà identifiés dans le chapitre précédent.

a)- Faciès chloruré magnésien

Spatialement les chlorures sont relativement les plus dispersés suivis du magnésium et des bicarbonates. Au contraire, le calcium, le sodium et les sulfates semblent homogènes, dans ce groupe aussi, nous remarquons des médianes différentes. Les échantillons concernés sont: P12 - P11 - P10 - P21-P20 - P30 - P26 - P24-P25 - P18 - P28 - P32-P15 - P31 - P14 –Ain Ouahab et Ain Boukoura

Tableau IV.2 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées magnésiennes (meq/L)

Paramètres statistiques	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Minimum	5,1	6,08	3,45	7,6	5,19	1,25
Maximum	4,3	5,51	2,88	6,78	4,58	1,06
1er Quartile	5,3	6,66	3,6	8	5,58	1,27
Médiane	7,7	8,83	3,95	14,7	6,58	1,45
3ème Quartile	5,5	7,07	3,72	9,18	6	1,29

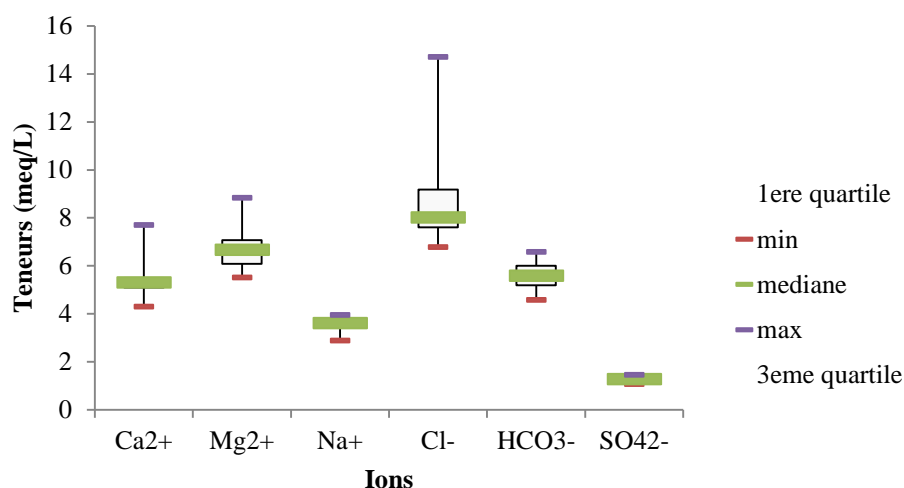


Figure IV.3: Diagrammes en boîtes des eaux à faciès chloruré magnésien

b)- Faciès chloruré calcique

Tableau IV.3 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées calciques(meq/L)

Paramètres statistiques	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Minimum	5,8	4,72	4,42	7,9	6,56	1,23
Maximum	5,5	3,61	4,36	7,6	6,19	0,93
1er Quartile	6,2	5,21	4,75	8,39	6,73	1,38
Médiane	8,55	5,67	5,49	11,6	7,39	1,55
3ème Quartile	7,01	5,42	5,17	9,49	6,93	1,46

La dispersion des chlorures est ici remarquable par rapport aux autres minéraux, les bicarbonates et les sulfates sont assez homogènes, ils présentent des médianes nettement différents (fig.IV.4)

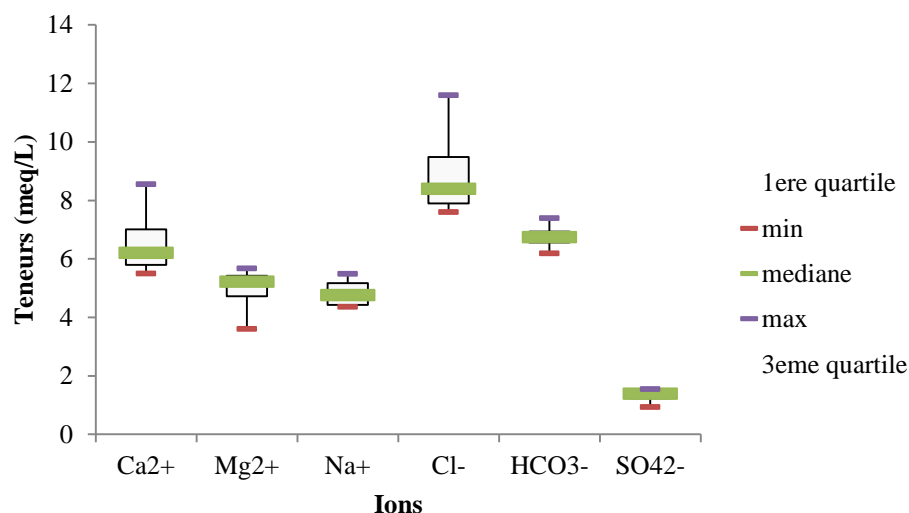


Figure IV.4: Diagrammes en boîtes des eaux à faciès chloruré calcique

c)- Faciès bicarbonaté calcique

Tableau IV.4 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées calciques (meq/L)

Paramètres statistiques	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Minimum	6,3	6,16	3,32	3,39	6,48	0,89
Maximum	6,3	6,16	3,32	3,39	6,48	0,89
1er Quartile	6,3	6,16	3,32	3,39	6,48	0,89
Médiane	6,3	6,16	3,32	3,39	6,48	0,89
3ème Quartile	6,3	6,16	3,32	3,39	6,48	0,89

Nous remarquons sur la figure IV.5 que les boîtes sont écrasées car elles ne comprennent qu'un seul échantillon (puits 17) et donc nous ne pourrions distinguer le maximum, le minimum et les quartiles, la médiane est confondue avec la moyenne. Toutefois, la distinction élevée des bicarbonates et du calcium est bien claire qualifiant ce groupe de bicarbonaté calcique.

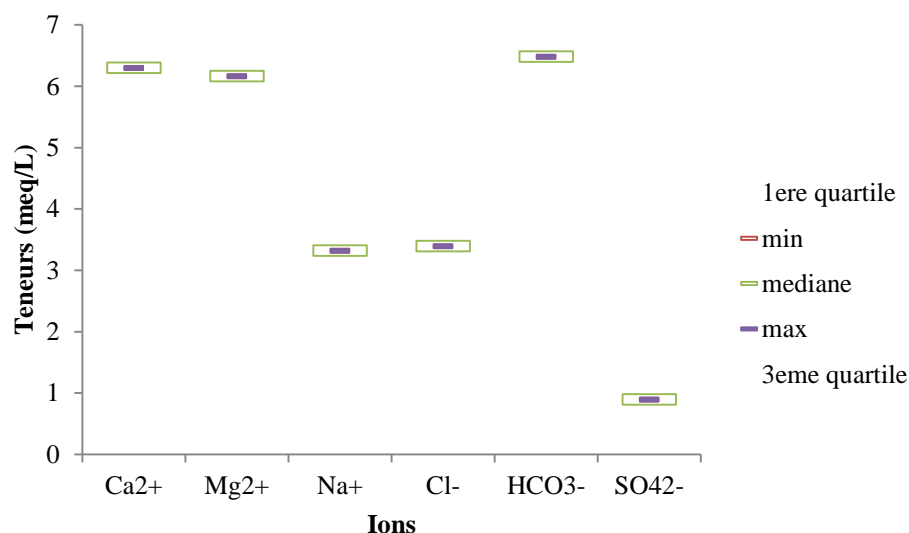


Figure IV.5 : Diagrammes en boîtes des eaux à faciès bicarbonaté calcique

d)- Faciès bicarbonaté magnésien

Tableau IV.5 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées magnésiennes(meq/L)

Paramètres statistiques	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Minimum	4,6	5,51	2,67	4,78	7,7	1,18
Maximum	4,6	5,51	2,67	4,78	7,7	1,18
1er Quartile	4,6	5,51	2,67	4,78	7,7	1,18
Médiane	4,6	5,51	2,67	4,78	7,7	1,18
3ème Quartile	4,6	5,51	2,67	4,78	7,7	1,18

Là aussi, les boîtes sont étroites à cause du nombre très restreint d'échantillons dans le groupe (P13), la figure IV.6 met en évidence le faciès bicarbonaté magnésien.

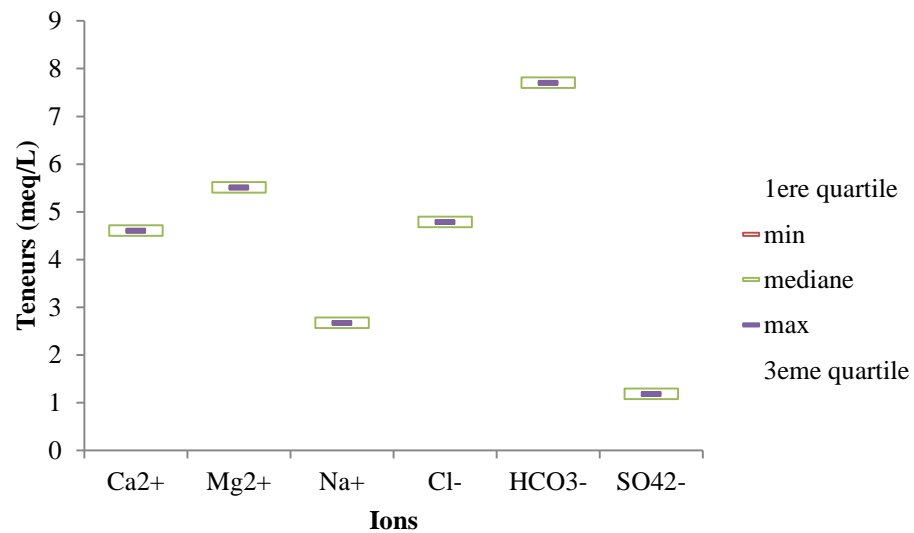


Figure IV.6 : Diagrammes en boites des eaux à faciès bicarbonaté magnésien

Ces statistiques représentées par les diagrammes en boites confirment clairement et aisément nos résultats trouvés au chapitre précédent. Il donne une idée plus simple de la dispersion des teneurs en éléments chimiques par une représentation plus aisée à analyser. Aussi cette méthode permet d'avoir une idée sur l'origine unique ou multiple des eaux.

IV.2. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La classification ascendante hiérarchique (CAH) est l'une d'entre elles. On cherche à ce que les individus regroupés au sein d'une même classe (homogénéité intra-classe) soient le plus semblables possibles tandis que les classes soient le plus dissemblables (hétérogénéité inter-classe).

IV.2.1. Définition

La classification hiérarchique ascendante permet de construire une hiérarchie entière des objets dans un ordre ascendant. On commençant par considérer chaque individu comme une classe et on essaye de fusionner deux ou plusieurs classes appropriées (selon la similarité) pour former une nouvelle classe. Le processus est itéré jusqu'à ce que tous les individus se trouvent dans une même classe. Cette classification génère un arbre que l'on peut couper à différents niveaux pour obtenir un nombre des classes plus ou moins grand. (Abdellaoui, 2014)

IV.2.2. Principe

Le principe de la CAH est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, exprimant la distance existant entre chaque individu pris deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification (fig. IV.7). La classification est ascendante car elle part des observations individuelles, elle est hiérarchique car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la partition désirée.

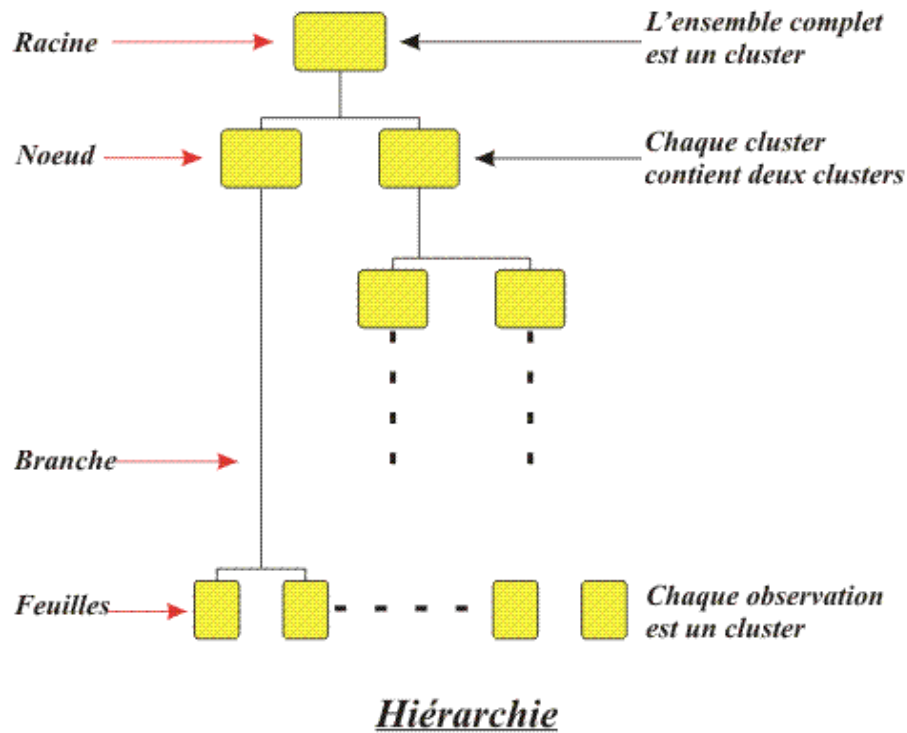
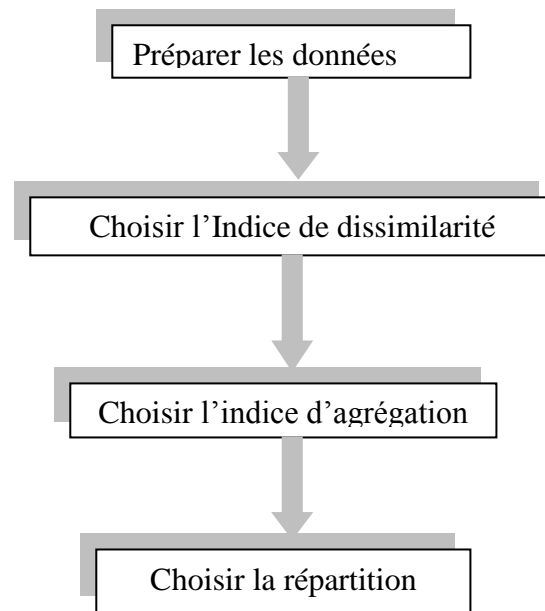


Figure IV.7: Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

IV.2.3. Présentation de l'algorithme de la C.A.H.

- *- 1^{ère} phase : Initialisation de l'algorithme
 - Les classes initiales = n singletons individus,
 - Calcul de la matrice des distances des individus 2 à 2.
- *- 2^{ième} phase : Itération des étapes suivantes
 - Regrouper les individus les plus proches au sens d'un critère choisi,
 - Mise à jour du tableau des distances en remplaçant les deux individus regroupés par le nouveau et en recalculant sa distance avec les autres classes.
- *- Fin de l'itération : agrégation de tous les individus en une seule classe.
- *- Réflexions pré-algorithme
 - Nécessité de définir une distance entre les individus,
 - Définir un critère de regroupement des individus à minimiser aussi appelé stratégie d'agrégation.
 - Stratégie pour définir la meilleure typologie finale.

Sur la figure (IV.8) nous avons résumé les étapes de la C.A.H.



FigureIV.8: Etapes de la classification ascendante hiérarchique

IV.2.4. Choix de l'indice de dissimilarité entre les individus

Le choix de la mesure de la distance entre individus dépend des données étudiées et des objectifs, nous pouvons citer les distances suivantes:

- Distance euclidienne : le type de distance le plus couramment utilisé. Il s'agit d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel, en effet la distance euclidienne de deux individus M_i et M_j est par définition :
- **Distance** $(M_i, M_j) = \sum_k [(x_{ik} - x_{jk})^2]^{1/2}$
- Distance euclidienne au carré : permet de sur-pondérer les individus atypiques (éloignés), en élevant la distance euclidienne au carré :
- **Distance** $(M_i, M_j) = \sum_k [(x_{ik} - x_{jk})^2]$
- Distance de City-block (Manhattan) : cette distance est simplement la somme des différences entre les dimensions :
- **Distance** $(M_i, M_j) = \sum_k | (x_{ik} - x_{jk}) |$

IV.2.5. Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique

Plusieurs méthodes d'agrégation sont disponibles, telles que celle de Ward (inertie), Ward (variance), lien complet, lien simple, lien flexible, lien moyen, lien proportionnel..... Etc. Mais la plus connue est celle de Ward.

La méthode de Ward a pour objectif :

- Un gain minimum d'inertie intra-classe à chaque agrégation,
- Perte d'inertie interclasse due à cette agrégation.

Elle utilise dans son calcul une analyse de la variance approchée afin d'évaluer les distances entre les classes par:

- Minimisation de la somme des carrées (SC) de tous les couples hypothétiques de classes : agrégation.
- Les indices d'agrégation sont recalculés à l'aide de la règle suivante :

Si une classe *M* est obtenue en regroupant les classes *K* et *L*, sa distance à la classe *J* est donnée par la distance entre les barycentres de la classe *M* et de *J*. (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

On définit un ensemble de classes de l'ensemble des individus (fig. 1V.7), tel que :

- *- toute classe soit non vide,
- *- deux classes distinctes sont disjointes,
- *- tout individu appartient à une classe.

IV.2.6. Mesure de proximité pour la Classification Ascendante Hiérarchique

XLSTAT propose plusieurs [similarités et plusieurs dissimilarités](#) qui sont adaptées à un type de données particulier.

Tableau IV. 6: Similarités / dissimilarités d'une C.A.H. proposées par XLSTAT

	Similarités	Dissimilarités
Quantitative data	<ul style="list-style-type: none"> - Corrélation de Pearson, - Corrélation de Spearman - Corrélation de Kendall - Inertie - Covariance (n) - Covariance (n-1) - Similarité générale 	<ul style="list-style-type: none"> - Distance euclidienne - Distance du χ^2 - Distance de Manhattan - Dissimilarité de Pearson - Dissimilarité de Spearman - Dissimilarité de Kendall - Dissimilarité générale
Données binaires (0/1)	<p>Similarité/Dissimilarité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Indice de Jaccard - Indice de Dice - Indice de Sokal & Sneath - Indice de Rogers & Tanimoto - Indice de Sokal & Michener - Indice de Sokal & Sneath - Phi de Pearson - Indice d'Ochiai - Indice de Kulczinski 	<p>Similarité/Dissimilarité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Indice de Jaccard - Indice de Dice - Indice de Sokal & Sneath - Indice de Rogers & Tanimoto - Indice de Sokal & Michener - Indice de Sokal & Sneath - Phi de Pearson - Indice d'Ochiai - Indice de Kulczinski

Source : logiciel EXCEL STAT

IV.2.7. Application de la méthode C.A.H. aux données de la plaine d'Hennaya

Nous avons appliqué la C.A.H. aux données chimiques (cations et anions : éléments majeurs) des eaux de l'aquifère plio-quadernaire de la plaine d'Hennaya, pour essayer de rassembler ces eaux en un nombre limité de groupes (classes), ces derniers auront deux propriétés :

- L'homogénéisation dans chaque classe et disparité entre les classes,
- Classes non prédéfinies mais découvertes au cours de l'opération.

Pour ce faire, nous avons utilisé le code de calcul XLSTAT – 2016, afin de regrouper les puits ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 23 (21 puits et 02 sources) et les variables de 06 (ions majeurs : décrits au chapitre précédent).

La méthode du lien complet a été choisie pour cerner la plus grande distance entre deux groupes et pour la distance entre ces groupes c'est la distance euclidienne qui a été prise en considération vu sa fréquente utilisation dans ce genre de données.

On peut construire alors un arbre, appelé dendrogramme (voir dessin ci-dessus) de la façon suivante. On aligne sur l’axe horizontal des points représentant les différents individus et on les joint deux à deux, successivement, en suivant cet algorithme de classification hiérarchique ascendante (commençant par les plus proches, etc...). On poursuit ainsi jusqu’ à regroupement de tous les individus en une classe unique. Pour plus de lisibilité, on pourra disposer les individus dans l’ordre dans lequel les regroupements ont été effectués. Le niveau (hauteur) de chaque nœud de l’arbre est, par exemple, choisi proportionnel à la distance des deux classes regroupées. On cherche ensuite à couper le dendrogramme au niveau où cela crée la meilleure répartition des points du nuage en classes bien distinctes entre elles. On peut comprendre qu’il ne sera pas optimal de couper le dendrogramme à un niveau où le regroupement s’est fait entre deux classes assez proches mais qu’au contraire on cherche à couper là où les classes regroupées étaient les plus éloignées.

Les résultats de cette méthode sont comme suit:

IV.2.7.1. Statistiques des nœuds

Nous avons réuni dans le tableau IV.7, les résultats concernant les nœuds successifs et les pertes d’inertie lors du passage d’une classe à une autre classe.

Tableau IV.7: Nœuds successifs du dendrogramme

Nœud	Niveau	Poids
1	405,275	23
2	237,794	20
3	153,454	3
4	145,09	2
5	135,772	18
6	120,216	13
7	86,458	12
8	74,451	7
9	68,702	5
10	56,692	2
11	50,388	4
12	50,379	5
13	47,603	4
14	40,719	3
15	30,216	2
16	27,677	3
17	26,401	3
18	24,249	3
19	24,104	2
20	19,67	2
21	16,882	2
22	16,673	2

Il semble naturel d’accepter l’idée selon laquelle, la meilleure partition est celle où les dissimilarités entre individus d’une même classe sont les plus faibles et les dissimilarités entre individus de classes différentes sont les plus fortes. Dans ce contexte, l’indice de la hiérarchie va nous aider à déterminer la meilleure partition (fig. IV.9).

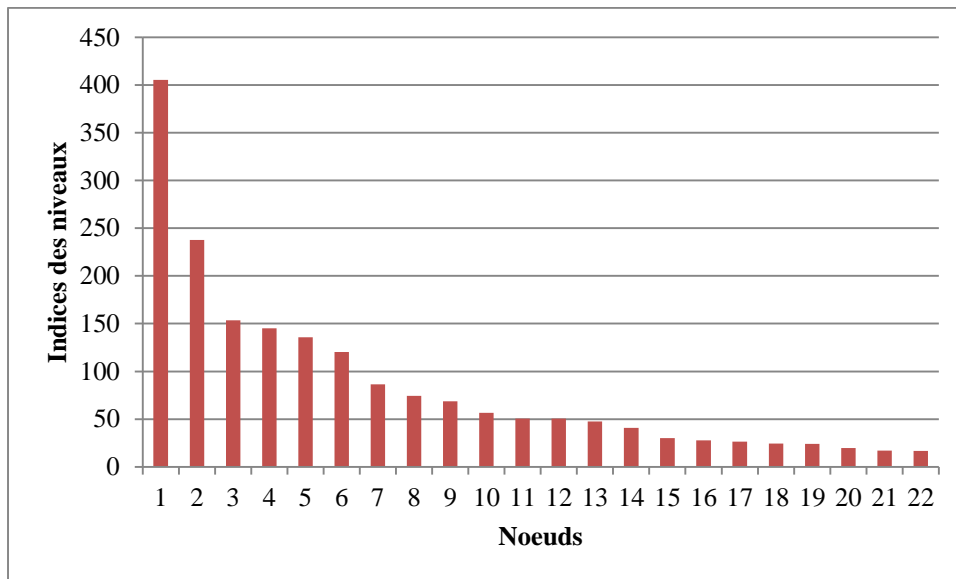


Figure IV.9: Diagramme des niveaux

IV.2.7.2- Dendrogramme

Le dendrogramme permet de visualiser le regroupement progressif des puits. Si une troncature a été demandée, un trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature, cette dernière permet de visualiser les classes.

Dans notre cas, nous distinguons sept classes (fig.IV.10 et IV.11) (selon leur dissimilarité en teneurs en ions majeurs) pour une troncature correspondant à une inertie de 86,458.

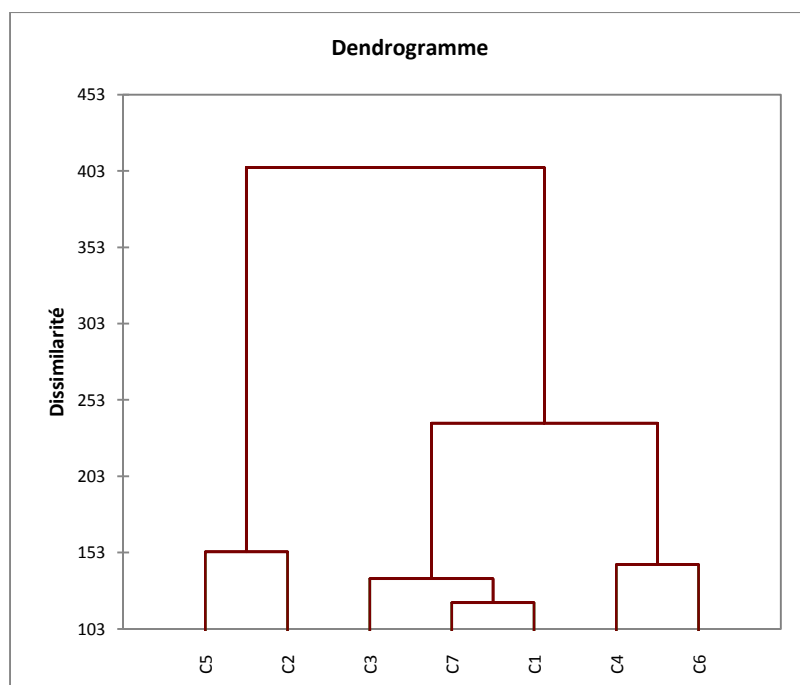


Figure IV.10 : Hiérarchie de partition obtenue par C.A.H (dendrogramme)

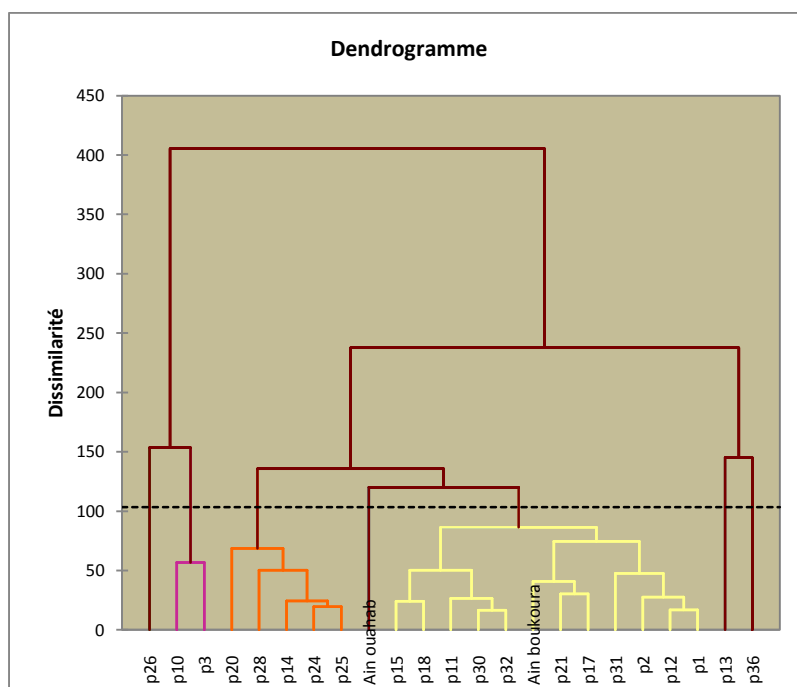


Figure IV.11: Hiérarchie de partition (intra-classe et inter-classe) obtenue par C.A.H

Nous avons essayé d'analyser le dendrogramme et extraire les différentes classes, pour ce faire, le tableau IV. 8 indique pour chaque puits sa classe d'affectation dans l'ordre initial des individus selon leurs teneurs en ions majeurs.

Tableau IV.8: Classes des individus par la C.A.H.

Classes	Individus (Points d'eau)
1	P1, P12, P2, P31, P17, P21, P32, P30, P11, P18, P15, Ain Boukoura
2	P10, P3
3	P20, P28, P14, P24, P25
4	P13
5	P26
6	P36
7	Ain Ouahab

Nous avons pu construire des tableaux de classification des intra-classes à partir du dendrogramme (Figure IV.11), de la façon suivante : On regroupe les points représentant les différents individus et on les joint deux à deux successivement, en suivant cet algorithme de classification hiérarchique ascendante (commençant par les plus proches, etc...). On poursuit ainsi jusqu'à regroupement de tous les individus en une classe unique. Les résultats apparaissent clairement dans les tableaux suivants :

Tableau IV.9: Classification des intra classes de la classe 1

Classe 1	
Intra-Classes	Points d'eau
1	P1,P12
2	P31
3	P2
4	P17, P21
5	Ain Boukoura
6	P32, P30
7	P11
8	P18,P15

Tableau IV.10: Classification des intra classes de la classe 2

Classe 2	
Intra-Classes	Points d'eau
1	P3
2	P10

Tableau IV.11: Classification des intra classes de la classe 3

Classe 3	
Intra-Classes	Points d'eau
1	P24, P25
2	P14
3	P28
4	P30

Tableau IV.12: Classification des intra classes de la classe 4

Classe 4	
Intra-Classes	Points d'eau
1	P13

Tableau IV.13: Classification des intra classes de la classe 5

Classe 5	
Intra-Classes	Points d'eau
1	P26

Tableau IV.14: Classification des intra classes de la classe 6

Classe 6	
Intra-Classes	Points d'eau
1	P36

Tableau IV.15: Classification des intra classes de la classe 7

Classe 7	
Intra-Classes	Points d'eau
1	Ain Ouahab

Nous résumons dans le tableau IV.16, les causes menant à la similarité des individus dans les classes et les intra-classes.

Tableau IV.16: Classification des éléments (intra-classe et interclasse)

Classes	Objets (Points d'eau) (Regroupés en intra-classes)	Caractéristiques chimiques (Similarités entre les Ions)	
		Dans les Intra-classes	Dans les classes
1	P1, P12	$Mg^{2+} - SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Na^+$	$HCO_3^- - Mg^{2+} - SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Cl^-$
	P31	Teneurs remarquables pour certains éléments	
	P2		
	P17, P21	$Cl^- - Mg^{2+} - Na^+ - HCO_3^-$	$SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Na^+ - Ca^{2+} - Cl^-$
	Ain Boukoura	Teneurs remarquables pour certains éléments	
2	P20	Teneurs remarquables pour certains éléments	$SO_4^{2-} - Cl^- - Mg^{2+}, Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^-$
	P28		
	P14		
	P24, P25	$SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^-$	
3	Ain Ouahab	Teneurs remarquables pour certains éléments	
4	P13	Teneurs remarquables pour certains éléments	
5	P26		$Na^+ - SO_4^{2-}$
	p10, P3	$Ca^{2+} - SO_4^{2-} - Cl^-$	
6	P36	Teneurs remarquables pour certains éléments	
7	P15, P18	$SO_4^{2-} - HCO_3^-$	$Mg^{2+} - Ca^{2+} - SO_4^{2-} - Cl^- - HCO_3^-$
	P11	Teneurs remarquables pour certains éléments	
	P30, P32	$SO_4^{2-} - Cl^- - HCO_3^-$	

La CAH a permis de trouver sept (07) classes, chaque classe regroupe les points qui possèdent une grande similarité entre leurs ions chimiques.

Citons comme exemple l'intra-classe regroupant les points (P24 et P25) dans la classe 03, qui ont presque les mêmes valeurs en ions SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} et HCO_3^- . Ces deux points d'eau vont s'associer avec l'intra-classe donnant le point P14 à cause des sulfates et du Sodium.

IV.3. Analyse en Composantes Principales

Pour l'interprétation significative de l'ensemble des données collectées de l'analyse chimique des eaux, nous avons utilisé la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (A.C.P) qui permet d'établir des corrélations entre les différentes variables et de préciser les relations entre les variables chimiques, les phénomènes à l'origine de ces relations ainsi que les relations communes ou spécifiques à chaque système.

IV.3.1. Principe de l'A.C.P

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses physico-chimiques).

Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation.

Au cours de ce travail, une analyse statistique(A.C.P) a été réalisée sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel STATISTICA version.7.

L'A.C.P est effectuée sur les données physico-chimiques sur les données des 23 points d'eau (campagne, 1981) déterminées dans le chapitre III. Six variables ont été traitées, à savoir (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}).

IV.3.2. Analyse statistique multi-variables

L'objectif de cette analyse étant de décrire ou de classer les données, pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydrochimique des aquifères. Une analyse en composantes principales a été réalisée dans le but d'apporter un complément à l'étude hydrochimique.

L'analyse en composantes principales (A.C.P) est une méthode de réduction du nombre de variables permettant leur représentation géométrique. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls(J.M Bouroche& G. Saporta, 1980).

IV.3.3. Analyse factorielle

L'analyse factorielle (A.F) est une méthode de synthèse qui permet de représenter un espace multidimensionnel par un espace de dimensions réduites qui soit une bonne Approximation de l'espace multidimensionnel (A. Stohmeier, 1977, J.C, 1986 et A. Saporta A, 1990).

Son objectif principal est d'extraire sous une forme condensée, la plus grande part de l'information contenue dans un lot de données numériques (Herbouch et Laffitte, 1970

*in*Gherissi R., 2008). Il s'agit d'expliquer les relations observées entre les fluctuations des teneurs des divers éléments dosés, en termes de relation plus simples et surtout plus fondamentales. Cette synthèse nécessite une série d'opérations mathématiques complexes, qui ont comme point de départ le tableau des coefficients de corrélation entre les variables.

Le but de notre étude, est de déterminer au moyen d'une approche statistique, les facteurs qui influencent sur la plus grande variabilité de ces éléments physico-chimiques.

IV.3.4. Cercle de corrélations

Ce cercle représente la corrélation entre les axes factoriels et les variables.

Chaque axe factoriel décrit une corrélation entre les variables analysées, les axes factoriels représentent les axes des éléments physico-chimiques.

Sur le plan factoriel, les analyses des données se distribuent avec de nouvelles coordonnées qui dépendent du comportement des variables (M. Bouregaa, 2008).

IV.3.5. Interprétation des résultats

L'A.C.P construit de nouvelles variables artificielles et des représentations graphiques permettant de visualiser des relations entre variables ainsi que l'existence éventuelle de groupes d'individus et de groupes de variables.

- Les corrélations sont synthétisées dans un cercle imaginaire à deux axes ou plus. Chaque axe représente une composante principale. On regarde la position des variables par rapport à cet axe.

- Si les variables sont proches de la direction positive de l'axe alors elles sont corrélées,

- Si les variables sont proches de la direction négative de l'axe alors elles sont anti-corrélées,

- Si les variables sont proches d'un autre axe, alors elles sont non corrélées,

- Pour comparer des points entre eux, on ne le fera que s'ils sont proches de la circonférence du cercle,

- Par contre, on ne peut rien dire quand les variables sont agglomérées au centre du cercle, ou de la sphère unité.

IV.3.6. Application et résultats

Les résultats d'analyses des principaux paramètres physico-chimiques Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-} , ont été traités.

Le programme de calcul nous donne :

-une matrice de corrélation des variables prises deux à deux,

-les valeurs propres (variance sur les axes principaux) et la contribution des axes choisis à la variance totale(en pourcentage),

-un tableau des coefficients de corrélation entre les variables et les axes factoriels.

-dans l'espace des individus, un tableau des coordonnées des individus sur les axes factoriels et les cosinus des angles individu-axe factoriels.

Le but de cette A.C.P est de tirer des conclusions concernant l'association des éléments physico-chimiques, géochimiques et de caractériser la répartition des individus.

IV.3.7. Application de l’A.C.P sur les paramètres physico-chimiques de la plaine d’Hennaya (campagne, 1981)

L’analyse des éléments chimiques majeurs montre une signature géochimique sans grande différence entre les eaux souterraines de la plaine. Le tableau IV.17 donne les paramètres statistiques descriptifs de position (la moyenne, le minimum (Min) et le maximum (Max)) et de la dispersion (l’écart-type), des cations et des anions majeurs des eaux souterraines de la plaine d’Hennaya retenues.

Tableau IV.17 : Paramètres statistiques des eaux de la plaine d’Hennaya (mg/L)

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca ²⁺	23	0	86,000	171,000	112,739	20,078
Mg ²⁺	23	0	44,000	106,000	77,261	12,592
Na ⁺	23	0	57,000	127,000	85,783	15,353
Cl ⁻	23	0	170,000	525,000	304,391	70,337
HCO ₃ ⁻	23	0	280,000	470,000	360,652	49,807
SO ₄ ²⁻	23	0	43,000	70,000	59,957	6,526

Le tableau des valeurs propres ci-dessous met en évidence le pourcentage de la proportion ainsi que les valeurs propres cumulatives.

Tableau IV.18: Valeurs propres

Numéro	Valeurs propres	Proportion %	Valeurs propres cumulatives	cumulatives %
1	2,34	38,94	2,34	38,94
2	1,88	31,28	4,21	70,22
3	0,88	14,70	5,09	84,92
4	0,57	9,54	5,67	94,46
5	0,21	3,53	5,88	97,98
6	0,12	2,02	6,00	100,00

La figure IV.12 extraite du tableau IV.18, présente une courbe décroissante du pourcentage de l’ensemble des facteurs, c’est une représentation graphique qui permet aussi de déceler le nombre de facteurs nécessaires pour mieux visualiser les résultats.

Les p axes factoriels sont définis séquentiellement :

- On détermine l’axe (premier axe factoriel) sur lequel le nuage se déforme le moins possible en projection,
- On cherche un second axe, sur lequel le nuage se déforme le moins en projection, après le premier axe, tout en étant orthogonal au premier,
- On réitère jusqu’à l’obtention de p axes.

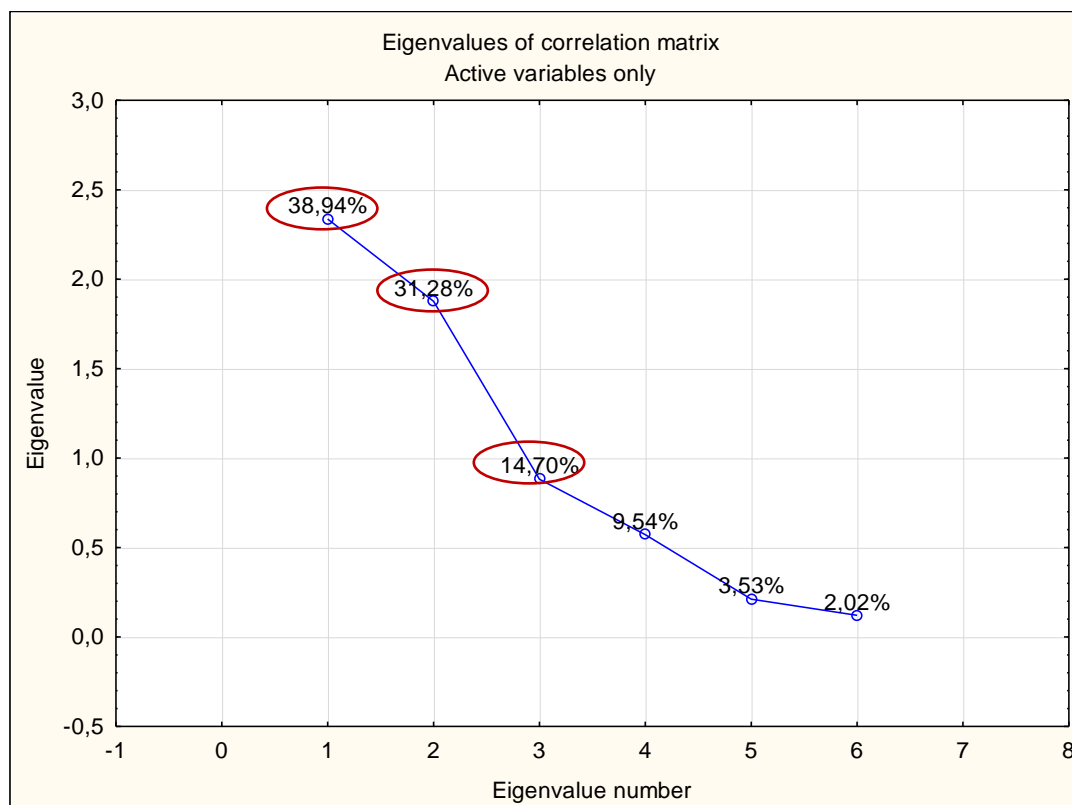


Figure IV.12: Diagramme en cônes des paramètres physico-chimiques de la plaine d’Hennaya (campagne, 1981).

On ne retient que les trois premiers axes principaux puisqu’ils expriment 84,92 % de la variance totale avec 38,94 % pour le premier facteur, 31,28% pour le second facteur et 14,70% pour le troisième facteur.

La matrice de corrélation (tableau IV.19) nous informe sur les relations entre les différents ions. En effet, le Calcium est relativement bien corrélé avec le sodium, mais il l’est moins avec les chlorures. Le magnésium est aussi corrélé positivement avec les chlorures mais négativement avec le sodium. Les autres corrélations sont faibles voir très faibles.

Tableau IV.19: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de la plaine d’Hennaya (campagne, 1981).

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Ca ²⁺	1					
Mg ²⁺	-0,08	1				
Na ⁺	0,63	-0,53	1			
Cl ⁻	0,49	0,61	0,12	1		
HCO ₃ ⁻	-0,27	-0,42	0,02	-0,47	1	
SO ₄ ²⁻	0,00	0,30	0,09	0,28	-0,35	1

- *Corrélation moyenne
- * Corrélation faible
- * Très faible corrélation

IV.3.8. Analyse graphique

IV.3.8.1. Espace des variables

Les vecteurs propres de la matrice (tableau IV.20) montre que :

- Le facteur 1 est très bien corrélé positivement et respectivement avec les chlorures et le magnésium et négativement avec les bicarbonates. Il est moins bien corrélé avec les sulfates.
- Le facteur 2 est aussi très bien corrélé positivement avec le sodium et le calcium, mais l'est moins et négativement avec le magnésium. On note aussi une corrélation négative juste moyenne avec le magnésium.
- Le facteur 3, par contre n'est bien corrélé que négativement avec les sulfates comme le montre les figures IV.13 et IV.14.

Tableau IV.20: Vecteurs propres de la matrice de corrélation.

Variables	Facteurs de coordination des variables		
	Fact1	Fact2	Fact3
Ca ²⁺	0,449033	0,789276	0,263574
Mg ²⁺	0,714092	-0,593718	0,204133
Na ⁺	0,033686	0,937437	-0,201654
Cl ⁻	0,869713	0,120560	0,271527
HCO ₃ ⁻	-0,757110	0,028493	0,073776
SO ₄ ²⁻	0,542478	-0,083506	-0,806713

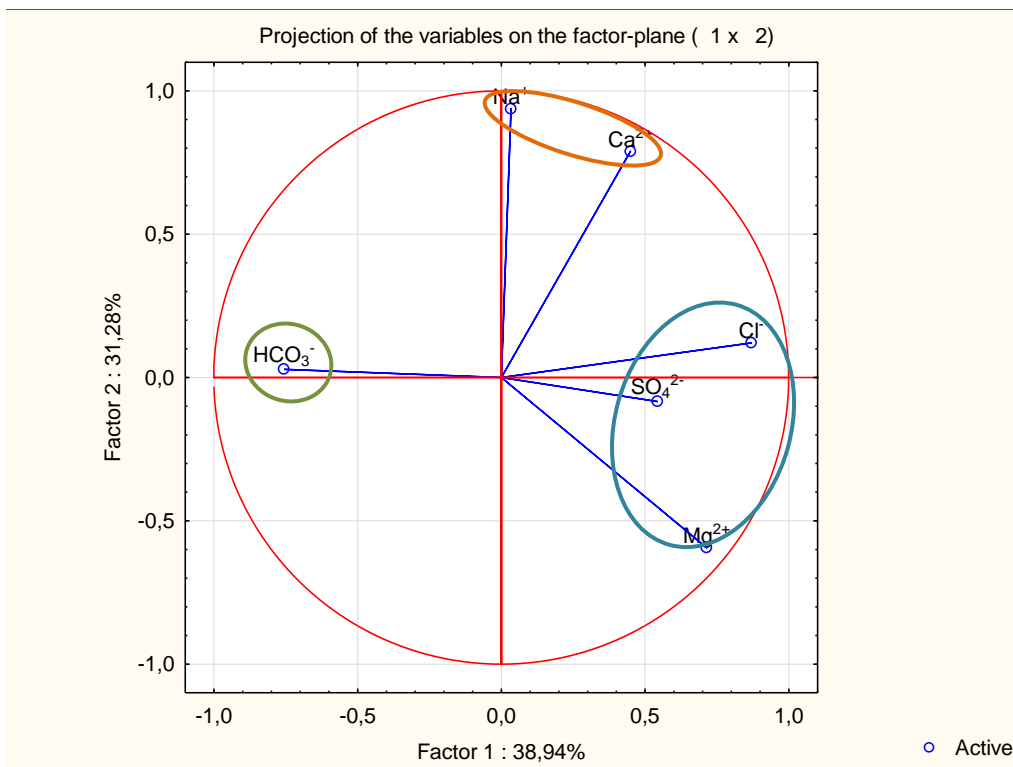


Figure IV.13 : Projection des variables sur le plan factoriel (F1-F2)

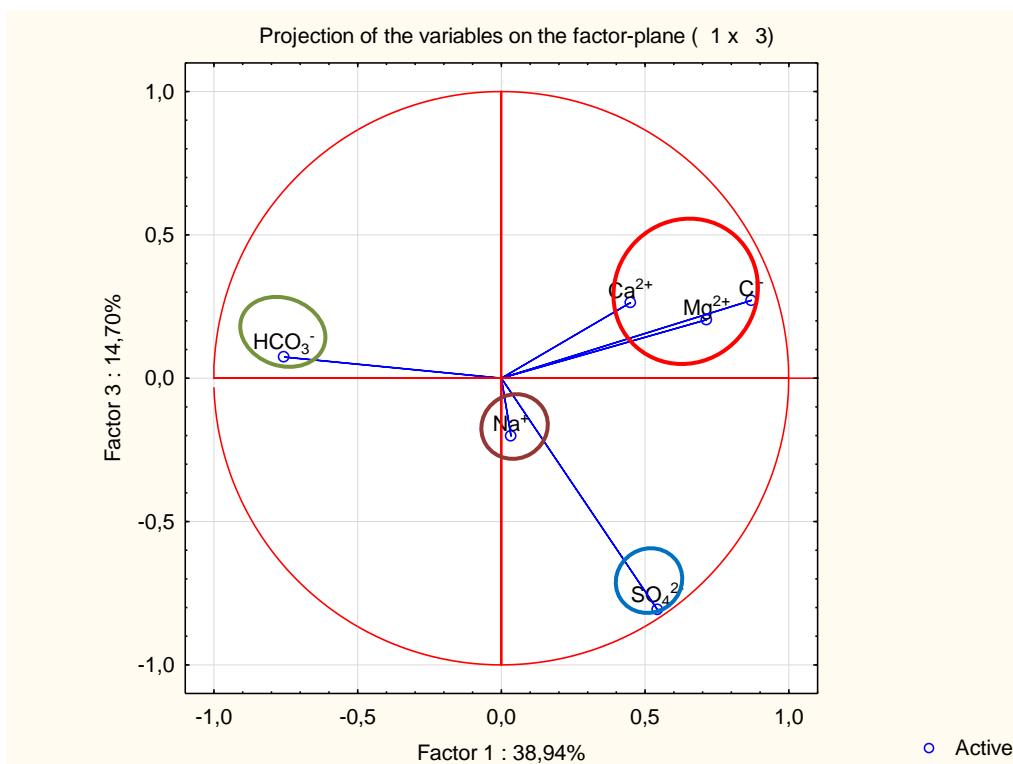


Figure IV.14 : Projection des variables sur le plan factoriel (F1-F3)

IV.3.8.2. Espace des individus

Les individus se répartissent en fonction de leurs proximités dans les domaines définis par l'espace des variables (fig. IV.14 & IV.15):

L'analyse de la projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2) montre que nous pouvons subdiviser les points de mesure en 4 groupes (fig. IV.14).

- **Groupe1:** P12, P11, P10, P3, P21, P17, P20, P15, P2, P30, P24, P25, P18, P28, P32, P1, P31, P14, P36 et AinBoukoura. Ce sont les puits marqués par des teneurs élevées en HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} et Na^+ .
- **Groupe 2 :** AinOuahab, se caractérise par les teneurs en Cl^- et HCO_3^- les plus élevés.
- **Groupe 3 :** P13 caractérisé par HCO_3^- , Ca^{2+} et Cl^- les plus élevés.
- **Groupe 4 :** P26, se caractérise par les teneurs les plus élevées du Cl^- , Mg^{2+} et HCO_3^- , il confirme ainsi son faciès chloruré magnésien (chapitre III).

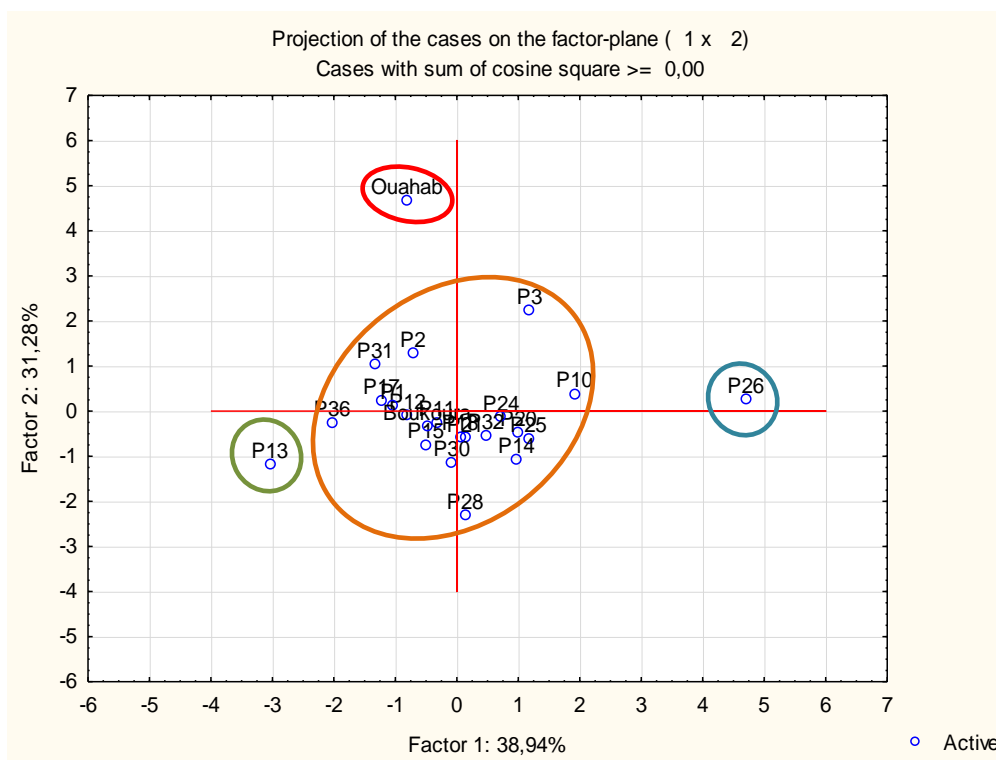


Figure IV.15:Projection des points d'eau (individus) sur le plan factoriel (F1 – F2)

La deuxième analyse de la projection des individus faite sur le plan factoriel (F1-F3) (fig. IV.15) montre une similitude avec la première projection concernant l'individualisation des points d'eau 13 et 26. Elle dissocie en plus les points d'eau 10, 17, 36 du premier groupe de la première répartition comme elle inclut Ain Ouahab dans le grand groupe 1. Les groupes obtenus des individus sont :

- **Groupe1 :** P12, P11, P3, P21, P20, P15, P2, P30, P24, P25, P18, P28, P32, P1, P31, P14, Ain Ouahab et Ain Boukoura Ce sont les puits caractérisés par des teneurs élevées en HCO_3^- et Cl^-

- **Groupe 2** :P17, P36.Ce sont les puits caractérisés avec des teneurs élevées en HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} et Na^+ .
- **Groupe 3** :P13, ce point d'eau est connu par sa teneur élevée en HCO_3^- , Ca^{2+} et Cl^- .
- **Groupe 4**: P26se caractérise par les teneurs les plus élevées du HCO_3^- , Cl^- et Mg^{2+} .
- **Groupe 5** : P10 se caractérise par HCO_3^- , Ca^{2+} et Cl^- les plus élevées.

Nous pouvons déduire que les eaux de la nappe alluviale d'Hennaya possèdent une concentration élevée en bicarbonates issus des formations du Sud des monts de Tlemcen.

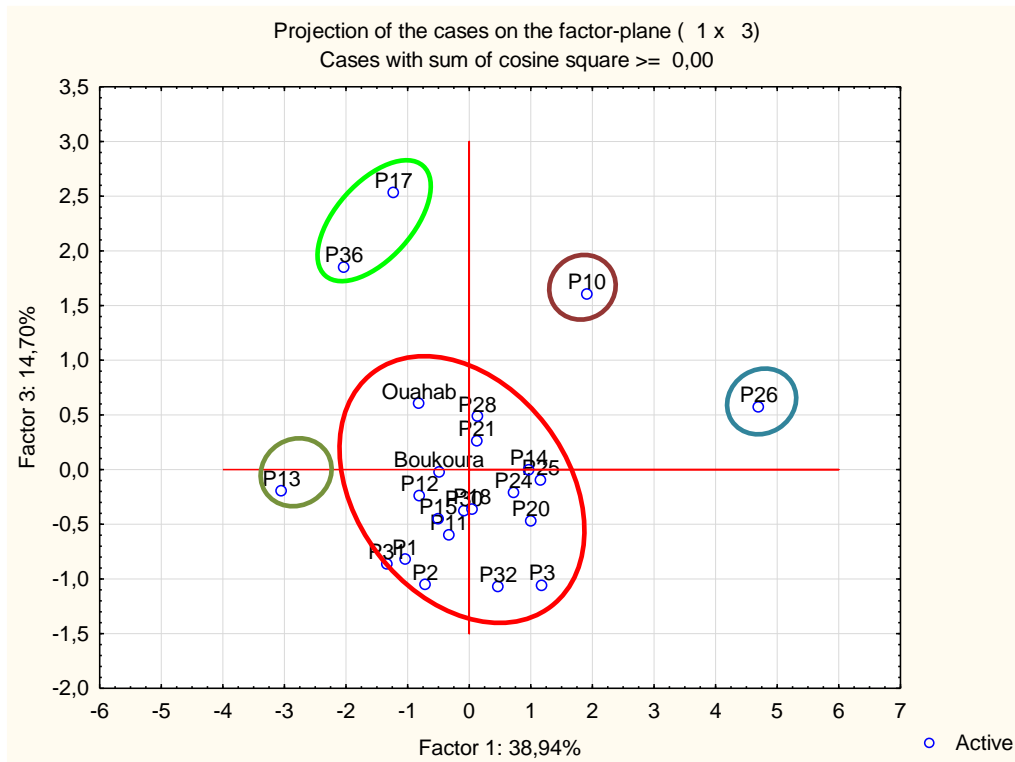


Figure III.16: Projection des (individus) points d'eau sur le plan factoriel (F1 – F3)

L'analyse en composantes principales, représentées par les matrices, les facteurs, et les cercles de corrélation, a confirmé le mode de minéralisation des eaux souterraines de la nappe alluviale de la plaine d'Hennaya car :

- Certains puits situés à l'extrême Sud-ouest (P10, P11 et P14) et au centre de la plaine, sont caractérisés par de très fortes teneurs en HCO_3^- , Cl^- et Ca^{2+} indiquant la probabilité d'une pollution chimique issue soit de l'utilisation excessive des pesticides pour l'irrigation, ou possibilité de contamination par les rejets qui proviennent des eaux usées de la commune d'Hennaya.
- D'autres puits situés au Sud et au Sud-Ouest (P13, P1, P2, P3) de la plaine, présentent des valeurs élevées en concentrations Ca^{2+} , HCO_3^- et SO_4^{2-} , ces éléments proviennent inévitablement de la dissolution des formations carbonatées.
- Le reste des points d'eaux répartis sur toute l'étendue de la plaine d'Hennaya, sont moyennement minéralisés avec une dominance des teneurs chlorurées.

IV.4. Comparaison entre CAH et ACP

La comparaison entre les résultats fournis par les deux méthodes CAH et ACP, montre une très grande similitude entre les deux tests (fig. IV.16), les puits sont regroupés presque dans les mêmes classes, exception faite pour les points d'eau P26 et Ain Ouahab qui sont éloignés des autres groupes vraisemblablement à cause de la minéralisation élevée (Ca^{2+} , Cl^- et HCO_3^-). Nous pouvons dire alors que l'ACP a fourni plus de détail que la CAH.

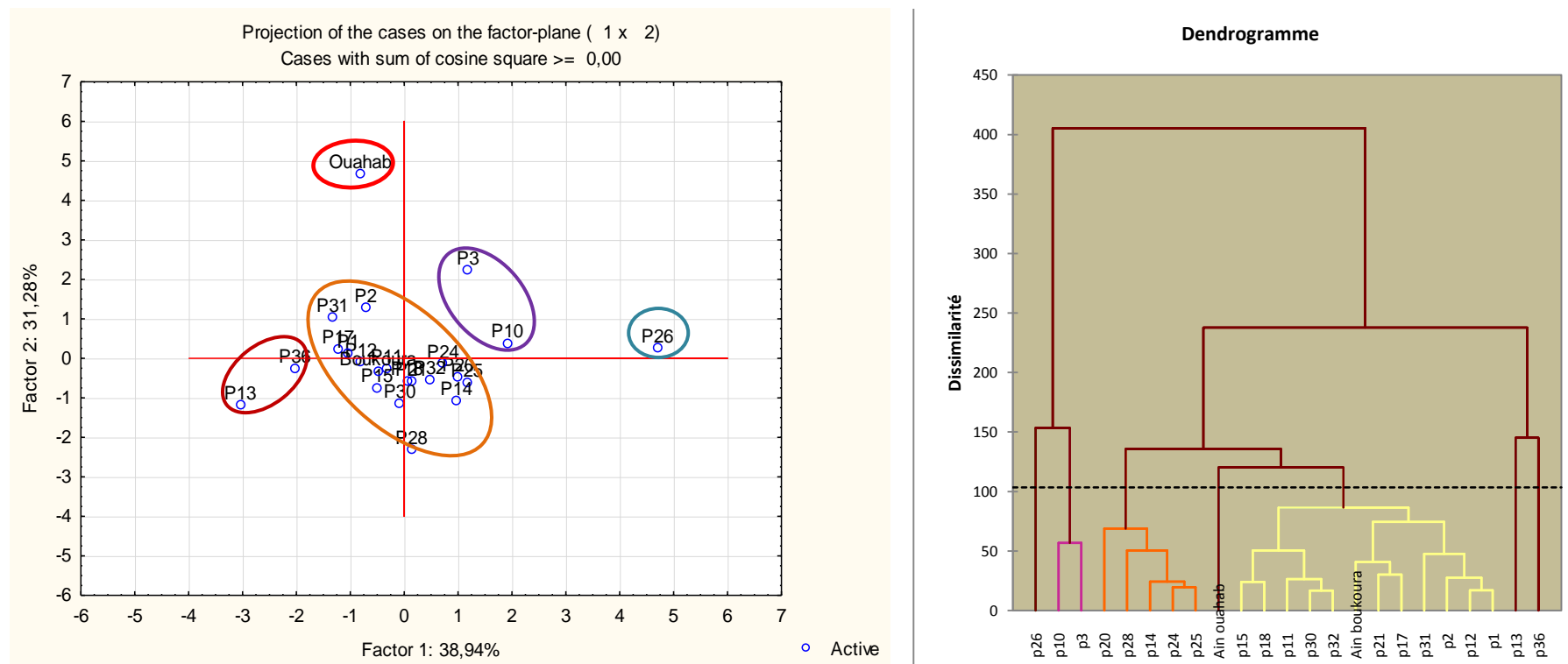


Figure IV. 17: Comparaison entre la méthode CAH et ACP

Pour terminer nous avons tenté une confrontation des résultats de la CAH avec l'ACP, pour ce faire, nous avons essayé de projeter les classes issues du dendrogramme sur la projection factorielle (F1 – F2) de l'A.C.P. (fig. IV.17). L'analyse de cette dernière figure met en évidence une certaine adéquation quand au nombre de classes, les puits P26, Ain Ouahab et P13 restent toujours isolés par rapport à l'ensemble. Toutefois, nous avons dissocié le P13 du P36, ce dernier a été intégré dans le grand groupe en effet ils présentent tous les deux des faciès différents car le P13 est bicarbonaté magnésien et le P36 chloruré calcique. Ces deux points se trouvent en aval mais dans deux formations différentes.

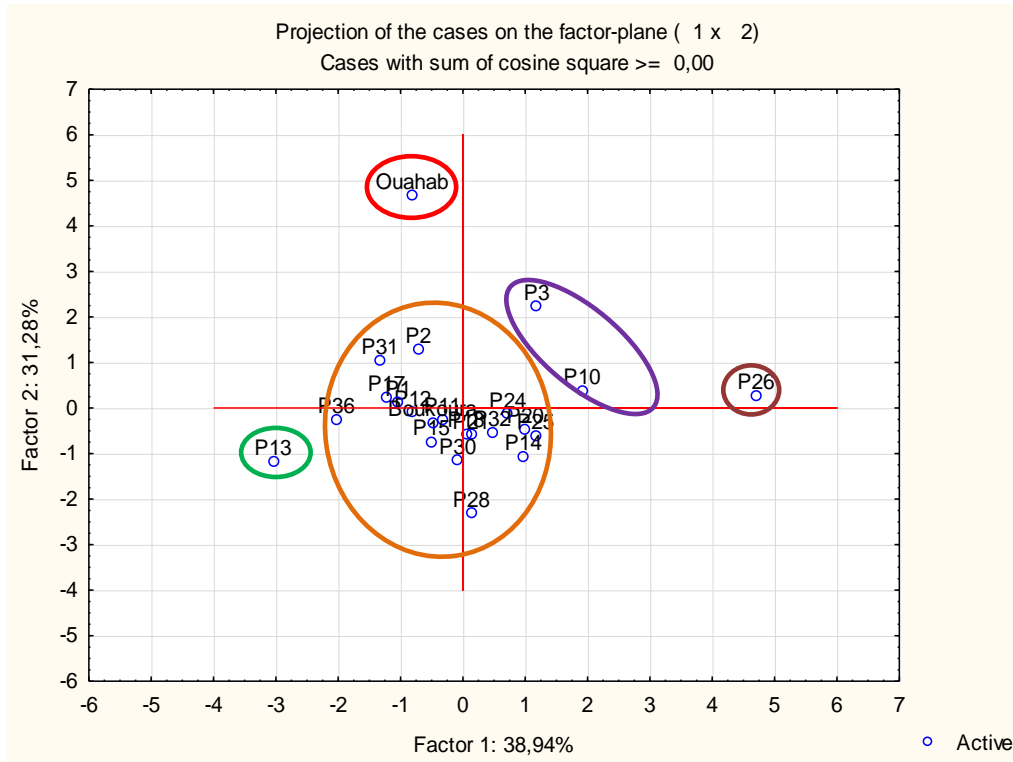


Figure IV.18 : Confrontation CAH et ACP sur le plan factoriel (F1 – F2)

IV.5. Conclusion

L'application de divers tests statistiques (Diagrammes en boîtes, CAH et ACP), a confirmé le mode de minéralisation des eaux souterraines de la nappe alluviale de la plaine d'Hennaya, et leurs teneurs en ions majeurs, ils permettent aussi de distinguer leurs similarité chimiques car :

*Les puits (P10, P11 et P14), sont caractérisés par de très fortes teneurs en HCO_3^- , Cl^- et Ca^{2+} situés à l'extrême Sud-ouest et au centre de la plaine

* puits (P13, P1, P2, P3) de la plaine, présentent des valeurs élevées en concentrations Ca^{2+} , HCO_3^- et SO_4^{2-} , situés au Sud et au Sud-Ouest.

* Le reste des points d'eaux répartis sur toute l'étendue de la plaine d'Hennaya, sont moyennement minéralisés.

* la forte minéralisation est issue des terrains karstiques du Jurassique supérieur des monts de Tlemcen.

Conclusion générale

La plaine d'Hennaya à vocation agricole, située au Nord de la ville de Tlemcen, correspond à une dépression mio-plio-quadernaire et occupe une superficie de 28 km².

Les terrains tertiaires qui occupent la dépression, sont représentés par des formations marneuses qui constituent le substratum de la nappe. Ces dernières sont surmontées par des grès tortoniens, des conglomérats et travertins plio-quadernaires.

La tectonique joue un rôle majeur dans l'hydrogéologie de la région étudiée. L'étude hydrogéologique montre que les formations constituant l'aquifère dans la région sont les grès tortoniens avec un paléo-oued constitué de conglomérats surmontés par des travertins et des graviers argileux.

L'étude piézométrique montre que l'axe de drainage passe au milieu de l'aquifère qui est occupé par les conglomérats. Le sens d'écoulement se fait d'une manière générale du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

L'étude climatique montre que la plaine d'Hennaya est caractérisée par un climat semi-aride, avec une température moyenne annuelle de 17.7°C et des précipitations moyennes annuelles d'environ 281,4 mm. On y distingue deux périodes : une humide s'étalant de la mi-octobre à la mi-avril, et une autre sèche occupant le reste des mois de l'année.

La chimie des eaux a mis en évidence plusieurs quatre faciès quatre de type : bicarbonatécalcique, bicarbonaté magnésien, chlorurécalcique et chloruré magnésien. Par ailleurs, l'utilisation des indices a montré que presque tous les puits sont aptes à être pour l'irrigation.

L'utilisation de différentes méthodes statistiques a renforcé les résultats de l'étude hydrochimique. En effet :

- Les boîtes de Tukey ont bien résumé sous la forme d'un graphique l'information fournie par l'étendue de la série de données. Leur usage a permis de visualiser la centralité et la dispersion. Elles sont donc particulièrement recommandées lorsqu'on veut comparer des séries statistiques. En effet, elles ont décrit par un simple graphe la dominance du faciès chimique de nos eaux qui est le chloruré magnésien.
- La classification hiérarchique ascendante a permis d'agréger nos points d'eau des plus semblables aux plus dissemblables.
Par le dendrogramme nous avons pu mettre en évidence non seulement les liaisons entre les classes qui sont dans notre cas de sept (07) mais aussi la hauteur des branches qui nous indique leur niveau de proximité. Il a permis d'établir un bon compromis entre dispersion intra et interclasses.
- L'utilisation de la méthode statistique A.C.P. sur nos données a permis de mettre graphiquement en évidence les liens entre les éléments chimiques et faciliter donc leur interprétation. Elle est venue aussi confirmer, à partir des matrices de corrélation, des diagrammes en cônes, des cercles de corrélations sur les différents plans et la projection des points d'eau sur ces plans factoriels, l'acquisition du faciès des eaux de la plaine. Nous avons donc retenu cinq groupes :

Conclusion générale

*- **Groupe 1** : englobant la majeure partie des points d'eau de la plaine avec les deux exutoires : Ain Ouahab et Ain Boukoura caractérisés par des teneurs élevées en HCO_3^- et en Cl^- provenant de leur trajet (sens d'écoulement).

*-**Groupe 2** : représenté par les deux puits P36, P17 localisés respectivement au Sud et au centre de la plaine (domaine Ben Azza), caractérisés avec des teneurs élevées en HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} et Na^+ dû probablement aux jurassiques des monts de Tlemcen au Sud et à la dissolutions des minéraux dans les alluvions.

*-**Groupe 3** : P13 (domaine Abou Djebbar), ce point d'eau est connu par sa teneur élevée en HCO_3^- , Ca^{2+} et Cl^- . L'acquisition de cette minéralisation est attribuée au temps de séjour de l'eau dans les formations carbonatées jurassiques des monts de Tlemcen au Sud de la plaine.

*-**Groupe 4** : P26 se caractérise par les teneurs les plus élevées du HCO_3^- , Cl^- et Mg^{2+} .

- *- **Groupe 5** : P10 localisé au SE de la plaine se caractérise par une minéralisation élevée en ions HCO_3^- , Ca^{2+} et Cl^- .

Au-delà de l'intérêt graphique, l'ACP nous a fourni des informations chiffrées sur la significativité des axes factoriels. Elle constitue donc l'étape préalable à une classification.

La confrontation des résultats fournis par la CAH et l'ACP a montré une certaine adéquation quand au nombre de classes, les puits P26, Ain Ouahab et P13 restent toujours isolés par rapport à l'ensemble. Toutefois, les puits P13 et P36 ont été dissociés, ce dernier a été intégré dans le grand groupe où sont rassemblés la plus part des eaux. Ces deux puits présentent tous les deux des faciès différents car le P13 est bicarbonaté magnésien et le chloruré calcique, ils sont localisés en aval dans deux formations différentes.

En guise de recommandations, nous proposons dans le prochain travail d'utiliser :

- des données plus récentes avec des chroniques spatiale et temporelle plus importantes pour mieux cerner l'évolution spatio-temporelle de la minéralisation dans la plaine de Hennaya.
- Une Anova (Analyse des variances) qui permettra de vérifier si les classes sont suffisamment individualisées.

Références Bibliographiques

- ALI BELHADJ Y. & CHOUAKI A., 2013:** Application de quelques traitements Statistiques aux données hydrochimiques des eaux de la nappe alluviale de la plaine de Maghnia (Nord-Ouest Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen. Algérie. 94p.
- BABA HAMED K., BOUANANI A., TERFOUS A., BEKKOUCHE A., 2006:** Modèle transitoire de la nappe des alluvions de la plaine d'Hennaya, (Tlemcen, NW Algérie). Journal de l'Eau et de l'Environnement N°6 . pp590 – 610.
- BEMMOUSSAT A., 2012 :** Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin versant de la Tafna. Mém. Magistère en Hydraulique. Univ. Tlemcen. Algérie. p 150.
- BERREZOUG N., 2016:** Hydrologie et modélisation Pluie-Débit de l'oued Boukiou (NW algérien), Mem de Master. Univ. Tlemcen. 112p.
- BOUGUERRA S., 2012 :** Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : Cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tlemcen). Mem. Magistère. Univ. Tlemcen. P192.
- BOURBABA L., TORCHI M., 2014:** Application de quelques traitements statistiques aux données hydrochimiques des eaux de la nappe alluviale de la plaine d'Hennaya (NW algérien). Mem. Ing. Univ. Tlemcen. p101.
- CASTANY G., 2000:** Hydrogéologie Principes et méthodes. 2e Cycle. Livre. Univ. Pierre et Marie Curie. Paris. France.
- CHEKOUKI Z., BELGUERNA A. 2012 :** Inventaire des points d'eau de l'Oued d'Hennaya et leurs qualités physico-chimiques (NW Algérie). Mém. Ing. Univ. Tlemcen. Algérie. 79p.
- CHEVALIER F. & LE BELLAC J., 2013 :** Classification 2. Fac. des Sci. Economiques. Univ. Rennes. 44p.
- FENDI W., 1999. :** Etude hydrologique des sous bassins de la Tafna (Isser, Sikkak, Lakhdar). Recherche d'un modèle pluie – débit. Mem. Ing. Univ. Tlemcen. P173.
- HAYANE S. M., 1983 .:** Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin Versant de l'Oued Sikkak (région de Tlemcen). Th. doc. 3 Cycle. Univ. Oran. Algérie. 194p.
- KHALDI A., 2005 :** Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida" 198p.
- LE GUEN M. 2001. :** La boîte à moustaches de TUKEY. Un outil pour initier à la Statistique Votre - SFDS, 2001, pp.1-3.
- RAKOTOMALA R., 2013 :** Analyses en composantes principales (ACP), principe et pratiques de l'ACP. Univ Lumière Lyon 2.

Références Bibliographiques

RODIER J., LEGUBE B., MERLET N., 2009 :L'analyse de l'eau. 9 ème édition, Ed Dunod, Paris, France.P 1824.

SENOUCI M., 2015 : Evaluation qualitative des eaux souterraines de la plaine d'Hennaya, à la consommation et à des fins d'irrigation (Nord- Ouest Algérien).Mem. Master. Univ. Tlemcen. p98

YAHIAOUI F., 2007 : L'utilisation de l'approche géostatistique dans l'étude hydrogéologique de la plaine d'Hennaya. Mém. Ing. Univ. Tlemcen. Algérie.p79.

YOUSFI S., 2004 : Essai de modélisation de l'approche géostatistique dans l'étude Hydrogéologique de la plaine d'Hennaya. Mém. Ing en géologie. Univ. Tlemcen. Algérie.

WEBOGRAPHIE

ADD3-MAB.PDF :interprétation d'une ACP ; choix du nombre d'axes, interprétation des axes, représentation graphique, Qualité de représentation, Synthèse

Cours-de-classification-exemple-de-cah-et-choix-du-nombre-de-classes-partie-24-mp4

Cours-de-classification-la-classification-ascendante-hiérarchique-partie-14.mp4

Exemple d'interprétation ACP.PDF :Exemples d'analyse en composantes principales

http://www.memoireonline.com/07/08/1185/m_impact-fluctuations-pluviometriques-production-agricole-thionck-essyl5.html

ANNEXES

Annexe 1 : Piézométrie de la plaine d'Hennaya (campagne, 1981).

puits	X (m)	Y (m)	N.P (m)
p1	127,7	193,1	354
p2	127,4	193,25	349,85
p3	127,1	193,35	354,62
p4	127,65	195,7	317,9
p5	128,125	195,65	321,2
p6	128,15	195,225	326,7
p7	128,2	194	331,15
p8	128	196,175	313
p9	128,65	196,3	318,18
p10	129,65	196,125	306,82
p11	129,05	196,85	309,78
p12	130,15	197,55	297,35
p13	130,175	197,835	302,3
p14	129,03	197,75	301,65
p15	129,075	198	299,92
p16	129,4	198,25	297,06
p17	129,3	198,5	297,02
p18	130,6	199,5	279,92
p19	130,65	199,4	278,45
p21	130,65	193,3	363,21
Ain boukoura	130,77	198,34	
Ain ouahab	130,85	200,15	

ANNEXES

Annexe 2 : Tableau des analyses physico-chimiques des points d'eau de la plaine d'Hennaya (campagne 1981)

	T l'eau (°C)	pH	Con (µ/cm)	Min (mg/L)	Ca ²⁺ mg/L meq/L	Mg ²⁺ mg/L meq/L	Na ⁺ mg/L meq/L	Cl ⁻ mg/L meq/L	HCO ₃ ⁻ mg/L meq/L	SO ₄ ²⁻ mg/L meq/L
P12	19	7,3	1538	1167	105 5,25	77 6,33	89 3,80	270 7,6	402 6,58	60 1,25
P11	19	7,6	1476	1120	92 4,6	74 6,08	92 3,95	277 7,8	330 5,41	60 1,25
P10	19	7,6	1845	1399	140 7	95 7,81	87 3,72	412 11,60	341 5,58	56 1,16
P3	19	7,4	1906	1446	130 6,5	69 5,67	117 5,06	412 11,60	378 6,19	69 1,43
P21	19,5	7,4	1799	1213	110 5,5	89 7,31	83 3,58	308 8,67	390 6,39	60 1,25
P17	18,5	7,4	476	1120	126 6,3	75 6,16	77 3,32	298 3,39	396 6,48	43 0,89
P20	18,5	7,5	1500	1138	112 5,6	83 6,82	82 3,51	284 8	280 4,58	63 1,31
P13	18,5	7,3	1267	962	92 4,6	67 5,51	67 2,67	170 4,78	470 7,7	57 1,18
P15	18,5	7,4	1389	1054	102 5,1	74 6,08	75 3,22	271 7,63	366 5,99	62 1,29
P2	18,5	7,4	1537	1166	118 5,9	65 5,34	103 4,45	284 8	408 6,69	65 1,55
P30	19	7,4	1414	1073	100 5	80 6,57	72 3,10	270 7,6	342 5,6	62 1,29
P26	19	7,6	2029	1539	154 7,7	106 8,83	84 3,60	525 14,7	290 4,75	70 1,45
P24	19	7,6	1500	1138	107 5,35	79 6,49	88 3,77	326 9,18	310 5,08	61 1,27

ANNEXES

P25	19	7,5	1537	1166	114 5,7	86 7,07	81 3,49	341 9,6	317 5,19	62 1,29
P18	19	7,5	1414	1073	86 4,3	85 6,99	57 2,88	255 7,18	366 6	63 1,31
P28	19	7,5	1568	1189	106 5,3	84 6,9	86 3,75	305 8,59	317 5,19	57 1,18
P32	18,5	7,8	1537	1166	108 5,40	67 5,51	85 3,67	272 7,66	341 5,59	67 1,39
P1	18,5	7,5	1488	1129	110 5,50	62 5,09	101 4,36	270 7,6	414 6,78	64 1,33
P31	19	7,4	1377	1044	106 5,30	81 6,66	69 2,97	241 6,78	390 6,39	61 1,27
P14	19	7,8	1341	1042	95 4,75	74 6,08	85 3,60	340 9,5	305 5	62 1,29
P36	19	7,2	1928	1462	171 8,55	44 3,61	127 5,49	312 8,78	451 7,39	45 0,93
Ain Ouahab	19	7,6	1414	1073	104 5,20	72 5,92	80 3,45	260 7,32	325 5,32	51 1,06
Ain Boukoura	19,5	7,5	1476	1120	105 5,25	89 7,31	86 3,71	298 8,4	366 6	59 1,22

ANNEXES

Annexe 3 : Normes de potabilité des eaux.

Paramètres	Unité de mesure	Normes Algériennes		Normes de la UE		Normes d'USEPA		Normes de l'OMS	
		Niveau guide	CMA	Niveau guide	CMA	Niveau guide	CMA	Niveau guide	CMA
Odeur	Nombres de dilution	-	4	-	-	-	3	-	3
Gout	Nombres de Dilution	-	4	-	-	-	-	-	3
Couleur	Pt/Co	-	25	1	20	15	-	5	20
Turbidité	NTU	-	5	1	10	-	-	-	5
Température	°C	-	25	12	25	-	-	-	-
pH	-	6,5 - 8,5	-	6,5 – 8,5	9,5	6,5 – 8,5	-	6,5 – 8,5	-
Conductivité	µS/cm	-	2880	400	-	-	-	-	1400
TDS	mg/L	500	-	-	1500	500	-	-	1500
TH	mg/L	-	500	-	-	-	-	-	500
Calcium	mg/L	75	200	-	100	-	-	75	200
Magnésium	mg/L	-	150	30	50	125	-	50	150
Potassium	mg/L	-	20	10	12	-	-	-	-
Sodium	mg/L	-	200	20	175	20	-	-	200
Chlorures	mg/L	200	500	25	200	-	250	200	600
Sulfates	mg/L	200	400	25	250	-	250	400	-
Nitrates	mg/L	-	50	25	50	30	-	10	50
Nitrites	mg/L	-	0,1	-	0,1	-	1,00	-	0,5
Alcalinité	mg/L	-	-	-	-	-	-	5 - 125	-
Chlore libre	mg/L	-	-	0,2	-	-	-	0,1 - 1	-
Bore	mg/L	-	-	-	1	-	-	0,3	1