

## TABLE DE MATIERE

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Table de matière -----	1
INTRODUCTION GENERALE -----	5
CHAPITRE I : Généralités	
Introduction -----	8
I.1 Situation géographique -----	8
I.1.1 Situation géographique du bassin versant de la Tafna (fig I.1) -----	8
I.1.2 Bassin versant de l'Oued Sebdou (fig I.2) -----	9
I.2 Aperçu géologique (fig I.3) -----	9
I.2.1. Les séries anciennes -----	11
a. Les grès de Bou-Médine -----	11
b. Les calcaires de Zarifet -----	11
c. Les dolomies de Tlemcen -----	12
d. Les marno-calcaires de Raouraï -----	12
e. Les dolomies de Terny -----	12
f. Les marno-calcaires de Hariga -----	12
g. Les marno-calcaires d'Ouled Mimoun -----	12
h. Les argiles de Lamoricière -----	12
i. Les grès de Berthelot -----	12
I.2.2- Les séries récentes -----	13
a. Formation de Sebdou -----	13
b. Formation Quaternaire -----	13
c. Travertins -----	13
d. Les alluvions récentes -----	14
I.2.3 Reconstitution du Log Litho-stratigraphique (fig I.5) -----	14
I.2.4 Etude structurale (fig I.6), (fig I.7) -----	15
I.3 Hydrogéologie de la région d'étude -----	16
I.3.1. Principales formations lithologiques et leurs caractéristiques hydrogéologiques - -----	16
a)- Formations à fort potentiel aquifère -----	16
a1)- Dolomie de Tlemcen -----	16
a2)- Plio-Quaternaire -----	17
b)- Formations à faible potentiel aquifère -----	17
b1)- Grès de Bou-Médine -----	17
b2)- Marno-calcaires de Raourai, Hariga et d'Ouled Mimoun -----	17

1.3.2. Hydrodynamique de l'Aquifère alluvionnaire du fossé (fig I.8, I.9)-----	17
--	----

## CHAPITRE II : Climatologie

Introduction-----	21
II.1 Etude des précipitations -----	22
II.1.1 Précipitations annuelles (fig. II.2) -----	23
II.1.2 Précipitations mensuelles (fig. II.3) -----	24
II.1.3 Précipitations saisonnières (fig.II.4) -----	24
II.2 Etude des températures -----	25
II.2.1 Variation des températures mensuelles (fig.II.5) -----	25
II.3 Etude du climat-----	26
II.3.1 Méthode de visualisation (Méthode graphique de Gaussen et Bagnouls) (fig.II.6) -----	26
II.3.2 Indice d'aridité annuel de De Martonne (fig.II.7) -----	27
Conclusion -----	28

## CHAPITRE III : Hydrochimie

Introduction-----	30
III.1 Calcul de la balance ionique (fig III.1) -----	30
III.2 Corrélation entre les cations et les anions (fig.III.2) -----	32
III.3 Caractéristiques physico-chimiques des eaux-----	33
• Température (fig.III.3) -----	33
• L'ion Calcium $Ca^{+2}$ (fig.III.4) -----	33
• L'ion Magnésium $Mg^{+2}$ (fig.III. 5) -----	34
• L'ion Sodium $Na^{+}$ (fig.III. 6) -----	35
• L'ion Potassium $K^{+}$ (fig.III. 7) -----	35
• L'ion Bicarbonate $HCO_3^{-}$ (fig.III. 8) -----	36
• L'ion Chlorure $Cl^{-}$ (fig.III. 9) -----	36
• L'ion Sulfate $SO_4^{2-}$ (fig.III. 10) -----	36
• L'ion Nitrate $NO_3^{-}$ (fig.III. 11) -----	37
• Résidu sec (fig.III. 12) -----	38
• Minéralisation (fig.III. 13) -----	38
• Conductivité électrique (fig.III. 14) -----	38
• Etude du potentiel d'hydrogène pH (fig.III.15) -----	39
III.4 Détermination des faciès chimiques-----	40
III.4.1 Classification à partir des formules caractéristiques -----	41
III.4.2 Représentation graphique des faciès chimiques-----	41
III.4.2.1 Diagramme de Shoeller-Berkaloff (fig III.16 (a.b.c.d), III.17, III.18, III.19) -- -----	41
III.4.2.2 Diagramme de Piper (fig III.20, III.21, III.22, III.23) -----	45
III.5 Qualité des eaux liée à la consommation humaine et à des faims d'irrigation----- -----	48
III.5.1 Potabilité des eaux-----	48
III.5.2 Aptitude des eaux à l'irrigation -----	49
III.5.2.1 Indice de Kelly's Ration (K.R) (fig.III. 24) -----	50
III.5.2.2 Pourcentage de Sodium (% $Na^{+}$ ) (fig III.25, III.26) -----	50

III.5.2.3. Sodium Absorption Ratio (S.A.R.) ou Pouvoir Alcalinisant (fig.III. 27) -----	52
---	----

Conclusion-----	55
-----------------	----

#### CHAPITRE IV : Application des tests statistiques aux données hydrochimiques

Introduction -----	58
IV.1. Diagramme en boites à moustaches -----	58
IV.1.2. Définition-----	58
IV.1.3. Objectif -----	59
IV.1.4. Représentation des boites à moustaches-----	59
IV.1.4.1. Représentation de l'ensemble des points d'eau (figIV.1) -----	59
IV.1.4.2. Représentation des échantillons pris selon les faciès (figIV.2, IV.3, IV.4, IV.5) -----	60
IV.2. Classification Ascendante Hiérarchique -----	65
IV.2.1. Principe de la C.A.H (figIV.6) -----	65
IV.2.2. Présentation de l'algorithme de la C.A.H. (figIV.7) -----	66
IV.2.3. Choix de l'indice de dissimilarité entre les individus -----	67
IV.2.4. Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique (figIV.8) -----	67
IV.2.5. Mesure de proximité pour la Classification Ascendante Hiérarchique -----	68
IV.2.6. Application de la méthode C.A.H. aux données des eaux du fossé de Sebdu-----	69
IV.2.6.1- Statistiques des nœuds (figIV.9) -----	69
IV.2.6.2. Dendrogramme (figIV.10, IV.11) -----	71
IV.3. Analyse en composantes principales -----	74
IV.3.1. Objectifs -----	74
IV.3.2. Utilisation de l'ACP -----	75
IV.3.3. Principe de l'ACP -----	75
IV.3.4. Applications de l'A.C.P. sur les eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu (figIV.12, IV.13, IV.14 IV.15, IV.16) -----	75
IV.4. Comparaison entre CAH et ACP (figIV.17, IV.18) -----	83
IV.5. Conclusion -----	85
Conclusion générale-----	88
Références bibliographiques -----	91
Liste des figures -----	94
Liste des tableaux -----	96
Annexes -----	98





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'être vivant et est indispensable au fonctionnement de nombreux secteurs de l'économie.

Les ressources en eau sont inégalement réparties dans l'espace et souffrent des pressions anthropiques qui sont de plus en plus fortes, principalement en raison des activités humaines notamment l'urbanisation, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie, la concurrence croissante pour les ressources en eau et la pollution. De plus, le changement climatique et les variations des conditions naturelles viennent aggraver cette situation.

L'eau douce disponible (0,26 % du globe), seule ressource utilisable, est en quantité invariable alors que la population ne cesse d'augmenter et que la demande en eau est en pleine progression. Répondre à une demande continue et sans cesse croissante en eau requiert des efforts pour pallier la variabilité naturelle et améliorer la qualité et la quantité de l'eau disponible donc la gestion des ressources en eau devrait davantage veiller à accroître les ressources naturelles existantes et à réduire la demande et les pertes en eau.

Des technologies plus récentes, telles que le dessalement d'eau de mer et la réutilisation de l'eau, viennent aujourd'hui s'ajouter aux techniques traditionnelles comme la collecte des eaux de pluie et ceux pour augmenter l'approvisionnement en eau ( H. Aziz, 2014).

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets domestiques et industriels non contrôlés, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Ces derniers produisent une modification chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités.

Dans ce sens, ce travail constitue une contribution pour une meilleure connaissance de l'hydrochimie de la nappe de l'aquifère alluviale du fossé de Sebdou, l'appréciation de la qualité de l'eau et son aptitude à différents usages sont les principaux buts à atteindre. Nous nous sommes basées sur des données d'analyses chimiques réalisées au cours d'une campagne piézométrique réalisée en Mai 1990 par K. Baba Hamed et R. Kerzabi.

L'utilisation des diagrammes (Piper, Wilcos et Richards) et des méthodes statistiques (Diagrammes en boîtes, C.A.H et A.C.P) sur des données hydro-chimiques permet une visualisation des résultats plus complète, une classification plus aisée ainsi que de mettre en évidence l'apport des statistiques pour une meilleure interprétation dans le domaine de la chimie des eaux.

## Introduction générale

---

Le travail est réparti en 4 chapitres, comme suit :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités (situation géographique, géologie et hydrogéologie de la région d'étude).
- Le second chapitre étudie les caractéristiques climatiques (précipitations et températures) régnant sur la région d'étude.
- Le troisième chapitre est spécifié à l'hydrochimie des eaux de la nappe (détermination de la qualité des eaux et leurs aptitudes aux différentes utilisations).
- Le dernier chapitre se concentre sur l'utilisation des méthodes statistiques pour la caractérisation et la classification des eaux de la région d'étude.

Et enfin une conclusion générale dans laquelle nous exposerons les résultats obtenus et proposer quelques recommandations.

## Introduction

Le fossé de Sebdoou a fait l'objet de plusieurs travaux, pour cette raison, nous nous contentons dans ce chapitre de donner un aperçu général de la région. Les informations sont pour la majorité tirées des travaux de K. Baba Hamed et R. Kerzabi, 1991, K. Baba Hamed, 2001 et A. Megnounif, 2004.

### I.1. Situation géographique

#### I.1.1. Situation géographique du bassin versant de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna est comptabilisé parmi les plus grands bassins du Nord-ouest algérien (fig.I.1), il couvre une superficie de 7245 km<sup>2</sup>, dont moins d'un tiers se trouve sur le territoire marocain (A. Bouanani, 2004).

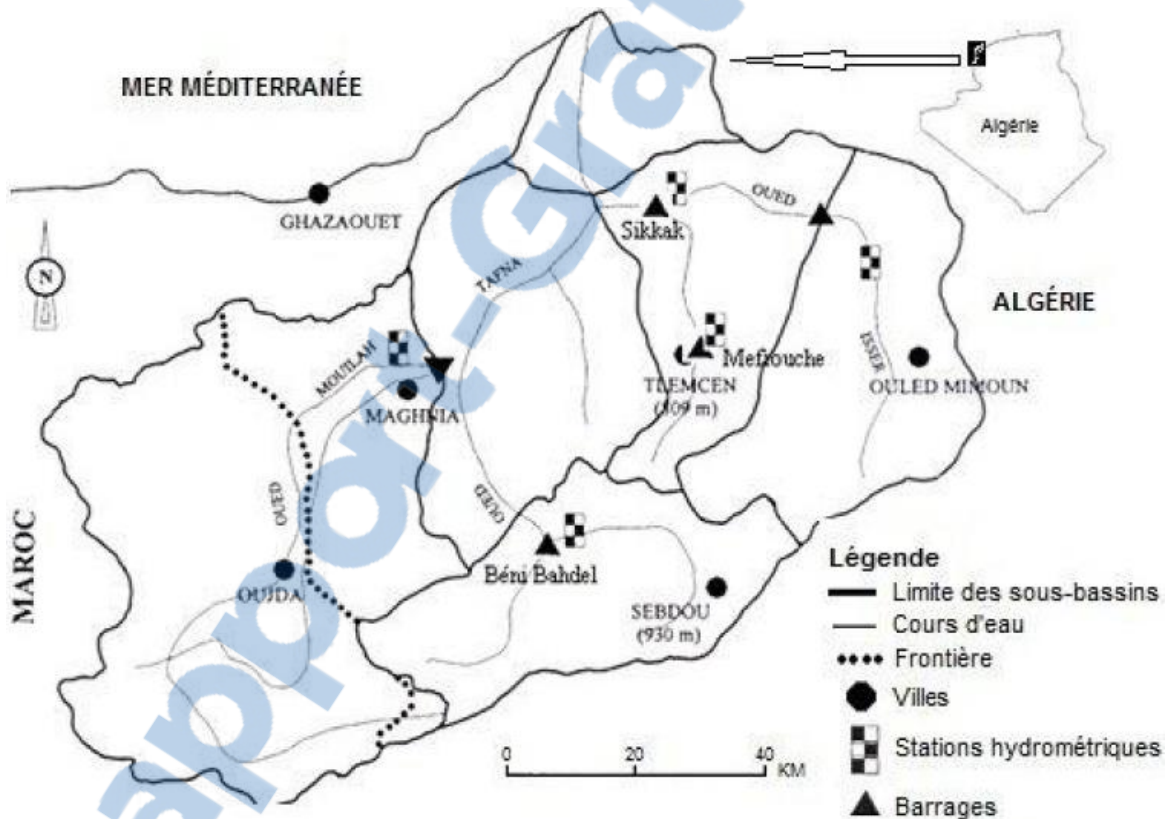


Figure I.1 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna  
(A. Bouanani et al, 2013)

Le bassin versant de la Tafna présente trois formations géologiques bien distinctes:

- Région du Nord, les massifs montagneux des monts des Beni-Snassen et des Traras,
- au Sud les massifs calcaires des Monts de Tlemcen,
- à l'Est, par les djebels Talet et Abiod,
- à l'Ouest par les djebels d'Ain-el-Hout et Hadid.

- Au centre : la dépression inter-montagneuse de la région de la plaine des Angadset de Maghnia causée par les dépôts marins du Miocène supérieur et inférieur ainsi que des alluvions de sable et de gravier.

### I.1.2. Bassin versant de l'oued Sebdou

Faisant partie du bassin versant de la HauteTafna, il s'étale sur une superficie de 695 km<sup>2</sup>, et se caractérise par un relief abrupt. 49% de la superficie du bassin présente des pentes supérieures à 25%, le couvert végétal est pauvre et discontinu. Le cours d'eau principal oued Sebdous'écoule sur une longueur de 27 km. LeNord et le Nord - Est du bassin versant correspondent à un horst jurassique principalement carbonaté. Au Sud et à l'Est, on trouve un graben rempli de sédiments plio-quaternaires représentant le Fossé de Sebdou (K. Baba-Hamed& R. Kerzabi, 1991) (fig. I.2).

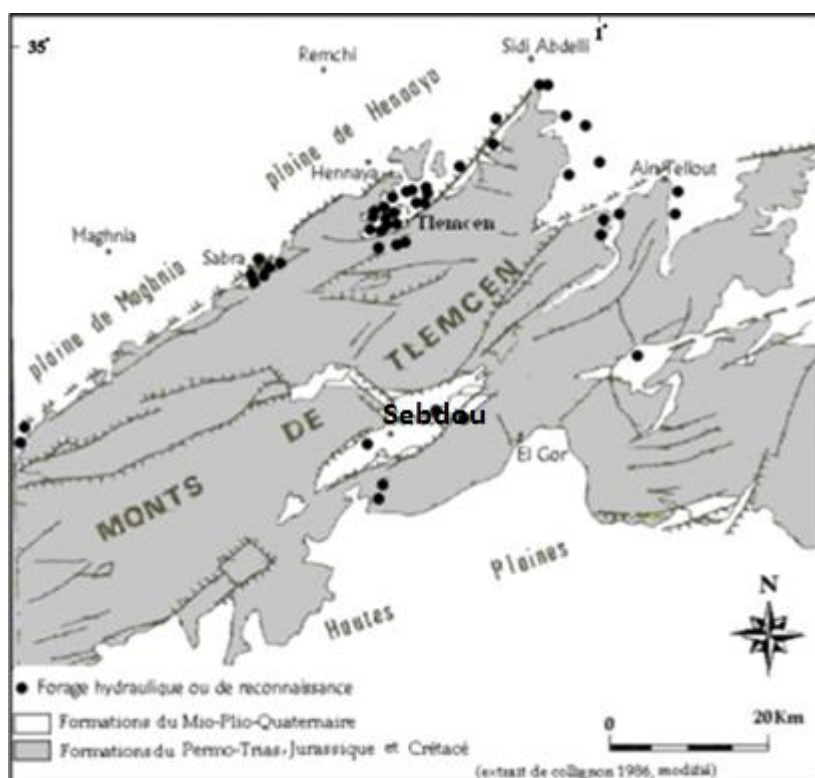


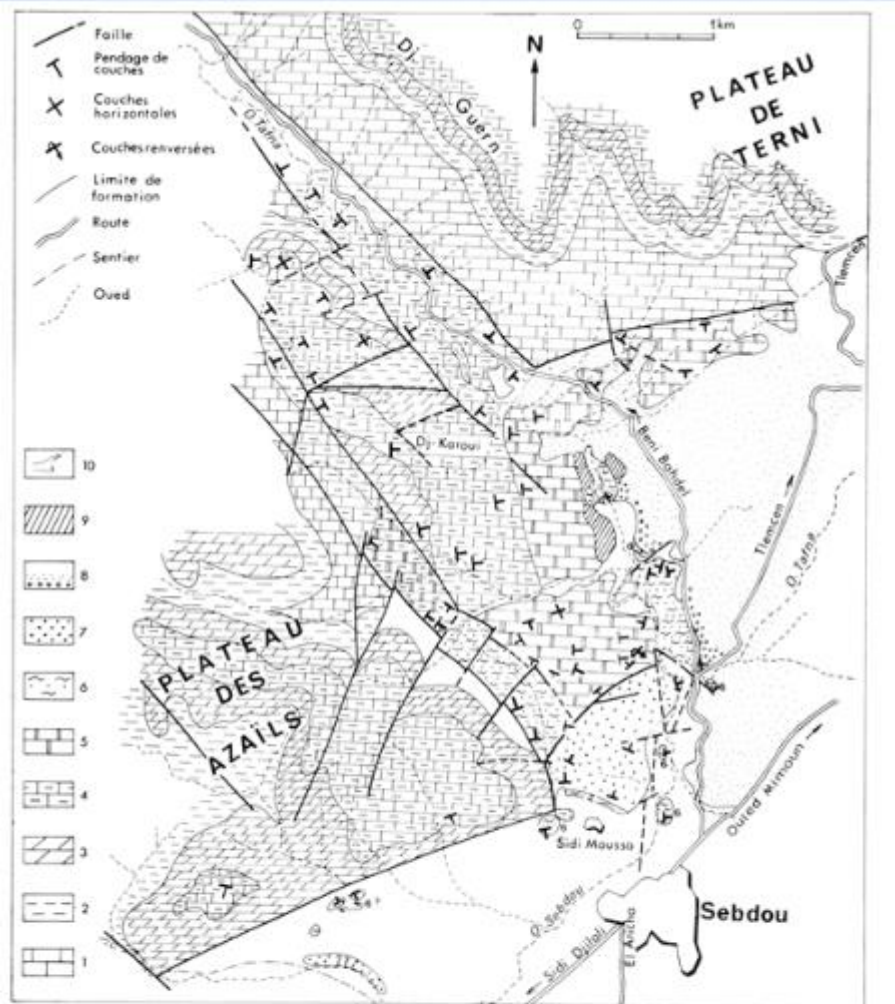
Figure I.2 : Carte illustrant l'étendue du fossé de Sebdou (F. Bensaoula, 2005)

## I.2. Aperçu géologique

La connaissance de la géologie du bassin versant est importante dans l'étude hydrochimique des eaux souterraines. Les caractères géologiques principaux à considérer sont : la lithologie (nature de la roche mère) et la structure tectonique du substratum. Les Monts de Tlemcen constituent un édifice régulier comportant essentiellement des terrains mésozoïques et cénozoïques. Les assises sédimentaires attribuées au Jurassique

supérieur et au Crétacé inférieur sont principalement formées de carbonates. Cet ensemble constitue la bordure méridionale des Monts de Tlemcen. (K. BabaHamed & R. Kerzabi, 1991).

La dépression de Sebdo se trouve entourée par des terrains appartenant essentiellement au Jurassique supérieur (fig. I.3 et I.4).



1. Calcaires de Zarifet, Dolomies de Tlemcen et Calcaires de Stah (Kimmeridgien supérieur p.p.)  
 2. Marno-calcaires de Raourai (Tithonique basal) ; 3. Calcaires de Lato et Dolomies de Terni ; 4. Marno-calcaires de Hariga (Tithonique inférieur) ; 5. Marno-calcaires d'Ouled Mimoun (Tithonique supérieur - Berriasien inférieur) ; 6. Argiles de Lamoricière (Berriasien moyen-Valanginien s.l.) ; 7. Grès de Berthelot (Valanginien supérieur-Hauterivien s.l.) ; 8. Formation de Sebdo (Pliocène ? continental) ; 9. Conglomérats quaternaires ; 10. Alluvions modernes (limons) et dépôts très récents indifférenciés, essentiellement dans les vallées et sur les pentes des reliefs.

Figure I.3 : Carte géologique du secteur Sebdo-Tafna à 1/25 000 (M. Benest, 1985)

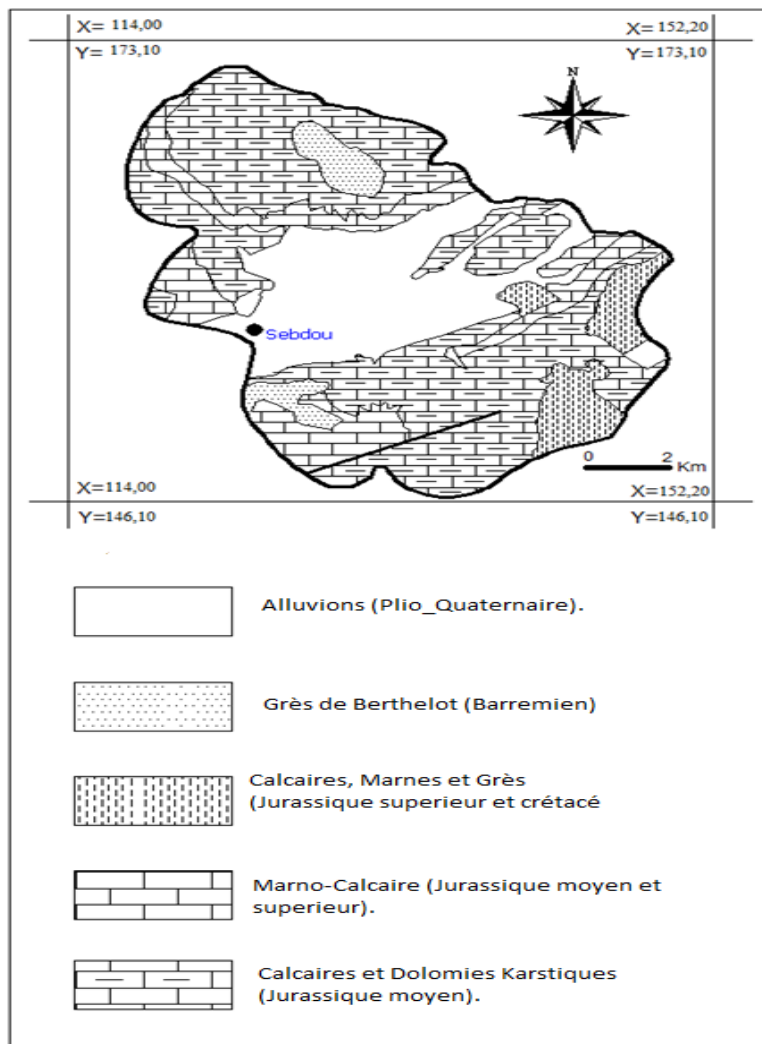


Figure I.4 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sebdou (K. Baba Hamed, 2001)

L'évolution verticale des terrains rencontrés va du Jurassique inférieur au Plio-Quaternaire, la coupe géologique montre deux grandes séries litho-stratigraphiques distinctes, qui sont décrites de bas en haut :

- Les séries anciennes (Oxfordien supérieur – Crétacé basal),
- Les séries récentes (Plio-Quaternaire).

### I.2.1.Séries anciennes

Sont représentées par les unités litho-stratigraphiques suivantes :

#### a)- Grès de Bou-Médiene

D'âge Oxfordien supérieur – Kimméridgien, d'après Benest (1974), il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse, avec des passées argileuses masquées, le plus souvent, par les éboulis ou la végétation.



**b)- Calcaires de Zarifet**

Surmontant les grès de Bou-Médine, il s'agit de calcaires à grandes géodes de calcite en bancs épais, séparés par de minces intercalations de calcaires marneux, écailleux, parfois quelques peu fossilifères, marquant presque partout la base très nette du Kimméridgien et reposant directement en concordance sur les grès séquaniens.

**c)- Dolomies de Tlemcen**

Cette formation définie par Doumergue (1910), apparaît le plus souvent en falaises, Elle est constituée par un ensemble de dolomies grises, macro-cristallines, gréseuses, noirâtres, à veinules de calcite.

**d)- Marno-calcaires de Raouraï**

Marnes grises, blanchâtres en surface, rognonneuses, esquilleuses, intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs, cette formation est limitée à sa base par les calcaires de Stah et au sommet par les calcaires de Lato ou les premières assises des dolomies de Terny. Benest (1982), lui donne un âge Tithonique inférieur (M. Benest *in* K.BabaHamed & Kerzabi, 1991).

**e)- Dolomies de Terny**

Elles correspondent à des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses Stratification soblifiques, et un aspect très massif, qui permet de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen. Benest (1982) lui donne un âge Tithonique inférieur (M. Benest *in* Baba Hamed & Kerzabi, 1991).

**f)- Marno-calcaires de Hariga**

Il s'agit d'une alternance de marnes et de marno-calcaires d'âge Tithonique inférieur, la limite inférieure est représentée par un niveau repère de calcaires à oncolithes surmontant les dolomies de Terny.

Les calcaires sont bien lités, souvent graveleux, à patine gris clair, avec quelques huîtres noires et des algues (Clypeinea) (Doumergue, 1910 *in* Baba-Hamed & Kerzabi, 1991).

Cette formation peu transmissive couvre de grandes étendues, en bordure du fossé de Sebdu, dans les Djebels Lato, El Arbi, El Guern et le fossé de la Tafna.

**g)- Marno-calcaires d'Ouled Mimoun**

Il s'agit de calcaires, marnes et grès de Merchiche. La limite inférieure se place à l'apparition des grès de Merchiche, sur le rebord sud du plateau de Terny, la limite supérieure de cette formation est matérialisée par une corniche de calcaire, souvent biodétritique, avec des stratifications obliques. Cette formation est peu développée au niveau du flanc Est du Djebel Karaoui, au Nord de Sidi Moussa et au Djebel el Arbi.

**h)- Argiles de Lamoricière**

Elles correspondent à l'Eocrétacé, à dominante argilo-gréseuse, nettement calcaire au sommet.

**i)- Grès de Berthelot**

Caractérisés par une légère récurrence de la smectite et surtout par l'apparition de la chlorite (10 à 15%) (Benest, 1985). La base est riche en stratifications obliques, elle est marquée par un banc de dolomie pulvérulente. Notons que cette formation est peu développée au Sud de Sebdou, Benest (1982) lui donne un âge barrémien.

**I.2.2. Séries récentes**

Elles comportent de bas en haut :

**a)- Formation de Sebdou**

Attribuée au Plio-Quaternaire, elle occupe tout le fossé de Sebdou et correspond à une série à éléments hétérométriques et hétérogènes, formant des couches redressées. Ce sont des dépôts conglomératiques, des calcaires blancs et vacuolaires, qui recouvrent la plupart des terrains anciens, ces dépôts ne sont pas consolidés et forment parfois des sols arables (K. Baba Hamed & R. Kerzabi, 1991).

**b)- Formation quaternaire**

On considère ici aussi bien les alluvions anciennes formées le long des oueds que les terrasses, les formations de pentes et les croûtes calcaires du Quaternaire ancien.

Ce sont des dépôts continentaux formant la bordure des massifs secondaires, soulignée par des éboulis de piémont plus ou moins encroûtés. Ces dépôts comprennent des éléments roulés, centimétriques ou décimétriques plus rarement métriques, au sein d'un ciment calcaire ou dolomitique ferrugineux.

Bien que leur épaisseur soit généralement faible, ces formations ont une extension spatiale considérable, ce qui permet l'existence de nappes phréatiques plus ou moins continues et facilement exploitables. Elles sont d'une grande extension dans le fossé de Sebdou, paradoxalement là où les précipitations sont les plus faibles (K. Baba-Hamed & R. Kerzabi, 1991).

**c)- Travertins**

Anciens et récents, constituent de puissants dépôts disposés en masse et s'avancant en hautes falaises à pic, aux abords des grandes sources disparues ou actuelles, originaires du Kimméridgien.



**d)- Alluvions récentes**

Constituées par des dépôts récents indifférenciés, essentiellement dans les vallées et sur les pentes des reliefs, ce sont des limons qui occupent les fonds des oueds.

**I.2.3.Reconstitution du Log Litho-stratigraphique**

Le log stratigraphique synthétise les formations géologiques rencontrées sur le terrain d'étude(fig. I.5) :

Age	Colonne lithologique	Formations rencontrées	Description
Quaternaire		Formation conglomératique	Alluvions, croûte calcaires et dépôts continentaux avec au sommet des couches marneuses
Plio-Quaternaire		Formation de Sebdou	Dépôts de conglomérats redressés Calcaires lacustres vacuolaires
Barremien		Grès de Berthelot	Grès avec de la chlorite
Berriasien supérieur		Argiles de Lamoricière	Argiles avec des passées gréseuses
Tithonique supérieur Berriasien inférieur		Marno-calcaires d'Ouled Mimoun Grès de Merchiche	Grès, calcaires et marnes souvent biodétritiques
Kimmeridgien		Marno-calcaires de Hariga	Alternance de marnes et calcaires
		Dolomies de Terny	Dolomies vacuolaires à patine rousse avec des stratifications obliques
		Calcaire de Lato Marno-calcaire de Raourai Calcaires de Stah	Micrite et pelmicrite, alternance de marnes grises verdâtres et de calcaires
		Dolomies de Tlemcen	Dolomies cristallines grises à patine rousse, dans les dolomies on observe des lentilles stromatolitiques
		Calcaires de Zarifet	Calcaires bleus
Oxfordien supérieur		Grès de Boumédine	Grès bruns en gros bancs séparés par des interlits argileux Au sommet, on trouve quelques passées marneuses et calcaires

Figure I.5 : Log stratigraphique des Monts de Tlemcen (Baba-Hamed & Kerzabi, 1991).

I.2.4. Etude structurale

L'étude structurale des monts de Tlemcen et celle du fossé de Sebdo en particulier, met en évidence la présence de deux systèmes de décrochements, parfois conjugués (fig.I.6 et fig.I.7) :

- L'un senestre, sensiblement N.S, lié à de nombreux chevauchements vers le NW.
- L'autre dextre, en moyenne E.W. (N 50° - N110°), fréquemment impliqué dans le rejeu des failles les plus récentes (Plio-Quaternaire) Auclair et Biehler, 1967).

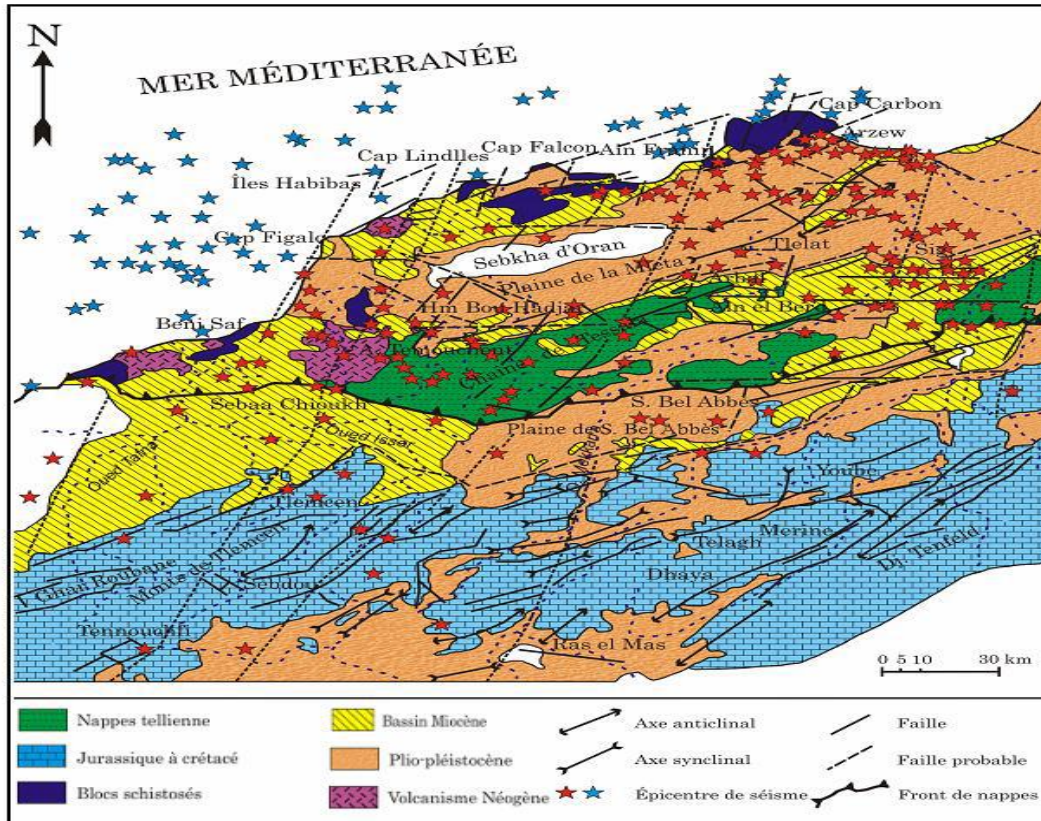


Figure I.6 : Carte structurale de l'Oranie nord-occidentale (Thomas, 1985).

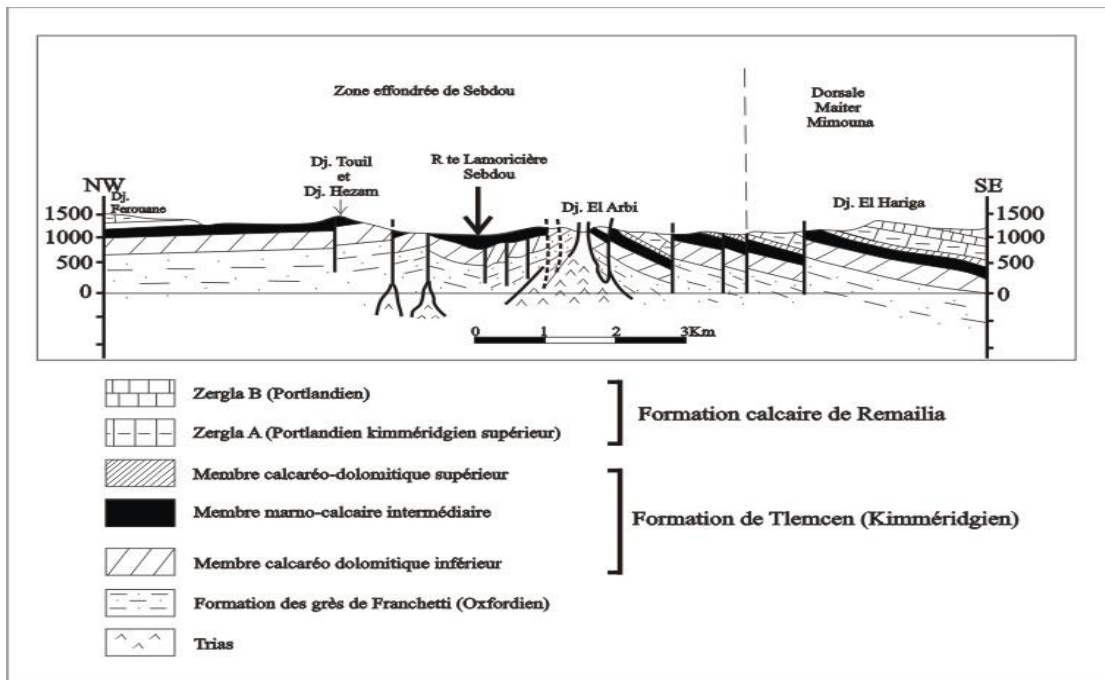


Figure I.7 : Coupe structurale au niveau du Fossé d'effondrement de Seb dou  
(Auclair et Biehler, 1967)

### I.3. Hydrogéologie de la zone d'étude

Nous examinerons dans cette partie, les caractéristiques hydrogéologiques des Formations occupant le bassin de Seb dou, dans l'intention d'en déterminer les potentialités aquifères.

Nous serons donc amenés à décrire les principales formations lithologiques et à préciser leur rôle au niveau de l'hydrodynamique souterraine. Pour ce faire, il nous a paru intéressant de regrouper ces formations en deux grands ensembles lithologiques et hydrogéologiques tenant compte aussi bien de la perméabilité d'interstices que celle de fissures ou de chenaux et prenant en compte l'extension des différents faciès.

#### I.3.1. Principales formations lithologiques et leurs caractéristiques hydrogéologiques

##### a)- Formations à fort potentiel aquifère

Ce sont les formations calcaréo-dolomitiques (dolomie de Tlemcen et de Terny), les formations gréseuses (grès de Merchiche) et les formations du Plio-Quaternaire. Il s'agit d'ensembles lithologiques forts tant en ce qui concerne leur structure physique, que leur composition chimique, mais ils ont pour caractère commun une capacité d'accumulation en eau élevée.

##### a1)- Dolomie de Tlemcen

Avec leur base les calcaires de Zarifet, affleurent en grande partie vers le Nord-Ouest et le Nord-Est du Bassin.

**a2)- Plio-Quaternaire**

Bien que leur épaisseur soit généralement faible, ces formations ont une extension spatiale considérable, ce qui favorise l'extension d'une nappe phréatique plus ou moins continue et facilement exploitable.

**b)- Formations à faible potentiel aquifère**

Cet ensemble regroupe un ensemble de formations de nature lithologique très variée, mais où les séries à dominance argileuse ou marneuse occupent une place prépondérante. L'ensemble des formations concernées présente une faible perméabilité d'interstices ou de fissures, il n'y existe donc pas d'aquifères notables.

**b1)- Grès de Bou-Médiene**

Ces grès présentent une perméabilité généralement faible ou nulle, sauf cependant pour les bancs de grès puissants qui s'intercalent dans les marnes, montrant une augmentation de perméabilité grâce aux diaclases qu'ils présentent et au rôle aquifère des lentilles calcaires qui y sont incluses. Le rôle principal de ces grès est de maintenir, grâce aux formations marneuses intercalées le niveau aquifère des dolomies de Tlemcen.

**b2)- Marno-calcaires de Raourai, Hariga et d'Ouled Mimoun**

Même si les niveaux calcaires présentent une certaine perméabilité, ils sont imperméables dans le sens vertical.

**1.3.2. Hydrodynamique de l'Aquifère alluvionnaire du fossé**

Cette partie est consacrée à l'étude hydrodynamique souterraine de la nappe alluviale du fossé de Sebdu. La carte piézométrique a été établie à partir de données de la campagne piézométrique réalisée au mois de Mai 1990 basée sur un inventaire de 24 points d'eau dont les données sont reportées en annexe.1.

Concernant la répartition des points d'eau, nous remarquons qu'ils couvrent globalement la totalité de la nappe ce qui donne une certaine fidélité de représentation (fig.1.8).



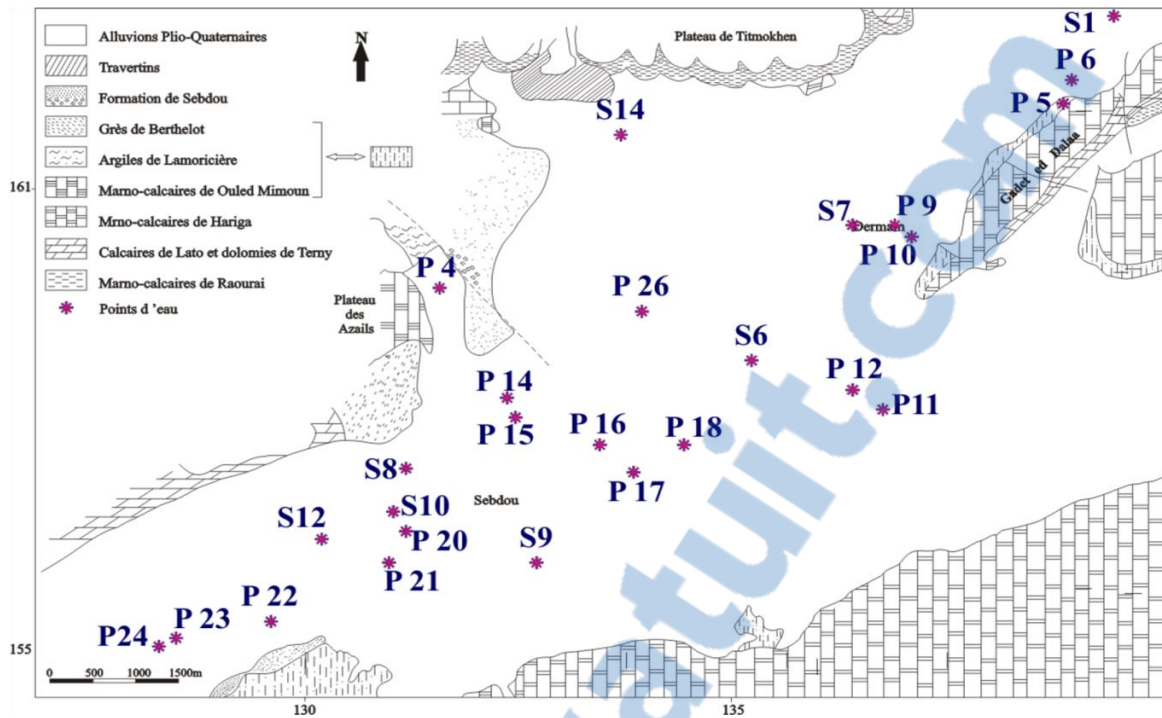


Figure 1.8 : Répartition des points d'eau au niveau du fossé de Sebdou

L'analyse de la figure I.9 montre globalement un sens d'écoulement des eaux vers le plateau de Titmokhen situé au Nord-ouest et qui constitue l'exutoire de la nappe..

La zone Nord-Est est caractérisée par des courbes isopièzes presque régulières plus ou moins espacées, et plus nous allons vers l'Ouest les courbes deviennent serrées.

Au centre, nous remarquons une légère convexité dans le sens d'écoulement témoignant éventuellement d'une drainage de la nappe ou d'une élévation du substratum de l'aquifère.

La nappe du Plio-quaternaire reçoit des quantités d'eau appréciables, selon deux processus différents :

- Directement sur son impluvium, en quantités variables suivant l'intensité de la pluviométrie de l'année hydrologique.
- Latéralement, par communication hydraulique directe le long des marges en contact avec les réservoirs jurassiques.

En effet, la carte piézométrique met en évidence des apports, venant de l'Est (Gaâdet el Dalaâ) et du Sud (Djebel El Ahmer, Lato).

L'alimentation de la nappe du Plio-qaternaire serait plus importante vers le Sud, vue l'extensionlatérale importante des reliefs sud du bassin.

La faille majeure limitrophe du fossé vers le Nord constitue une limite étanche, la carte montre en effet des lignes de courants presque parallèles à cette limite ( K. Baba Hamed & Kerzabi R., 1991).

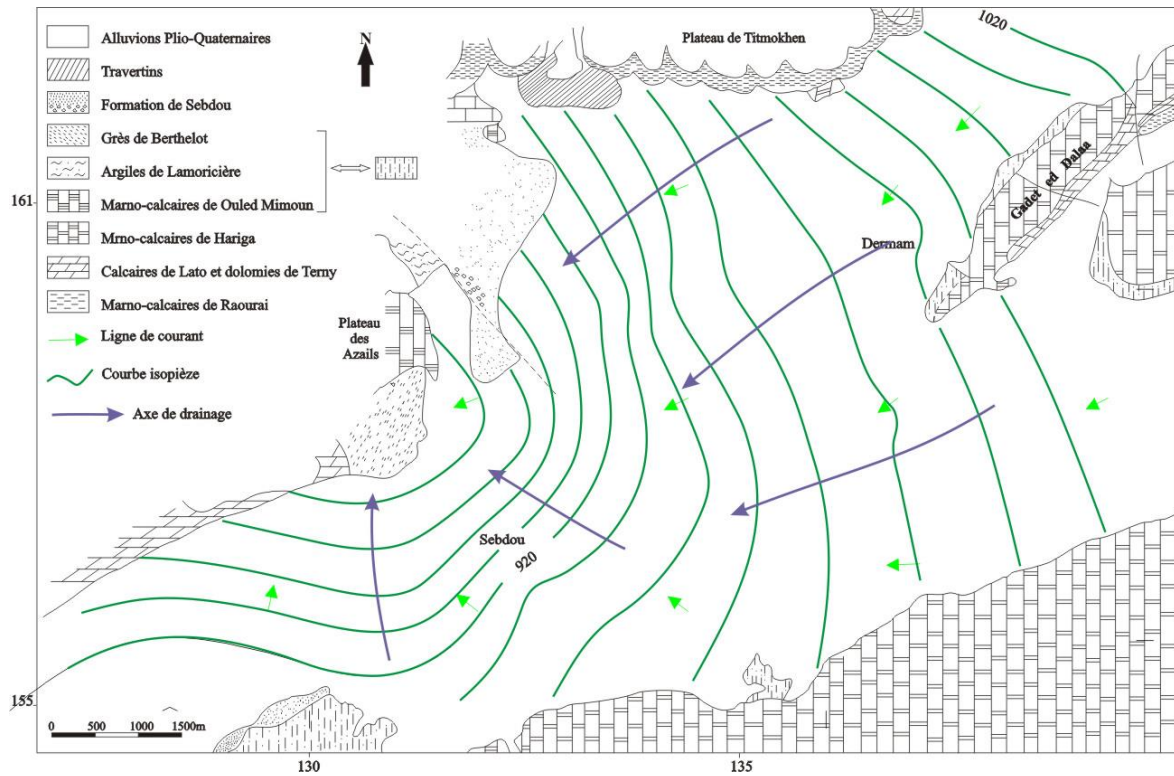


Figure 1.9 : Carte piézométrique de la nappe du Fossé de Sebdou (Mai, 1990)

## Introduction

On définit le climat comme étant « *la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée* » (Gibbs, 1987).

On peut le définir aussi comme l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'atmosphère et son évolution en un lieu donné. Il est déterminé par la situation géographique du lieu (latitude, altitude, éloignement par rapport à la mer) et par la circulation atmosphérique. Les conditions climatiques jouent un rôle important dans les comportements hydrologiques des cours d'eau et des conditions de recharge des aquifères (Zennaki, A. 2015).

Le comportement hydrologique des cours d'eau d'un bassin versant dépend dans une grande partie du climat. Pour définir un climat donné, on ne peut se dissocier de la mesure d'un ensemble de valeurs sur une échelle temporelle, qui peut être quotidienne, mensuelle, annuelle ou décennale. Ces facteurs climatiques peuvent être essentiels et de base comme les précipitations (éléments générateurs des ressources en eau), les températures, évaporation, et ou plus complexes ou assez difficiles à mesurer et qui peuvent générer d'autres détails sur l'aspect climatique pour la modélisation ou toute autre fin (Bensoua, A. 2016).

L'Afrique du Nord est soumise au climat méditerranéen qui se caractérise par des hivers doux et pluvieux et des étés secs et chauds avec des taux élevés de rayonnement solaire et d'évaporation. Leisz (1982) a donné de l'écosystème du type méditerranéen la description suivante : « *il est influencé par le climat méditerranéen* », c'est-à-dire qu'il se situe dans une zone ayant :

- ✓ des étés chauds et des hivers doux,
- ✓ un apport modéré d'air marin toute l'année,
- ✓ des précipitations moyennes concentrées dans les mois d'hiver avec des étés très secs.
- ✓ de longues périodes ensoleillées avec quelques nuages, notamment en été.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux principaux facteurs, indispensables pour l'établissement du bilan hydrique, tels que, les précipitations, la température au niveau de la station de Sebdou. Cette étude a pour objet de déterminer le type de climat qui prédomine sur la région d'étude.

Pour avoir une idée sommaire sur le climat du bassin versant de Sebdou, nous avons eu recours à exploiter les données des deux stations climatiques. Il s'agit de la station climatique de Béni Bahdel pour les températures et celle de Sebdou pour l'étude des précipitations (tableau.II.1) et (fig. II.1).

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

Station	Code	Coordonnées Lambert		
		X (Km)	Y (Km)	Altitude (m)
Sebdou	160406	131,250	158,550	875
Béni Bahdel	160407	115,000	164,600	666

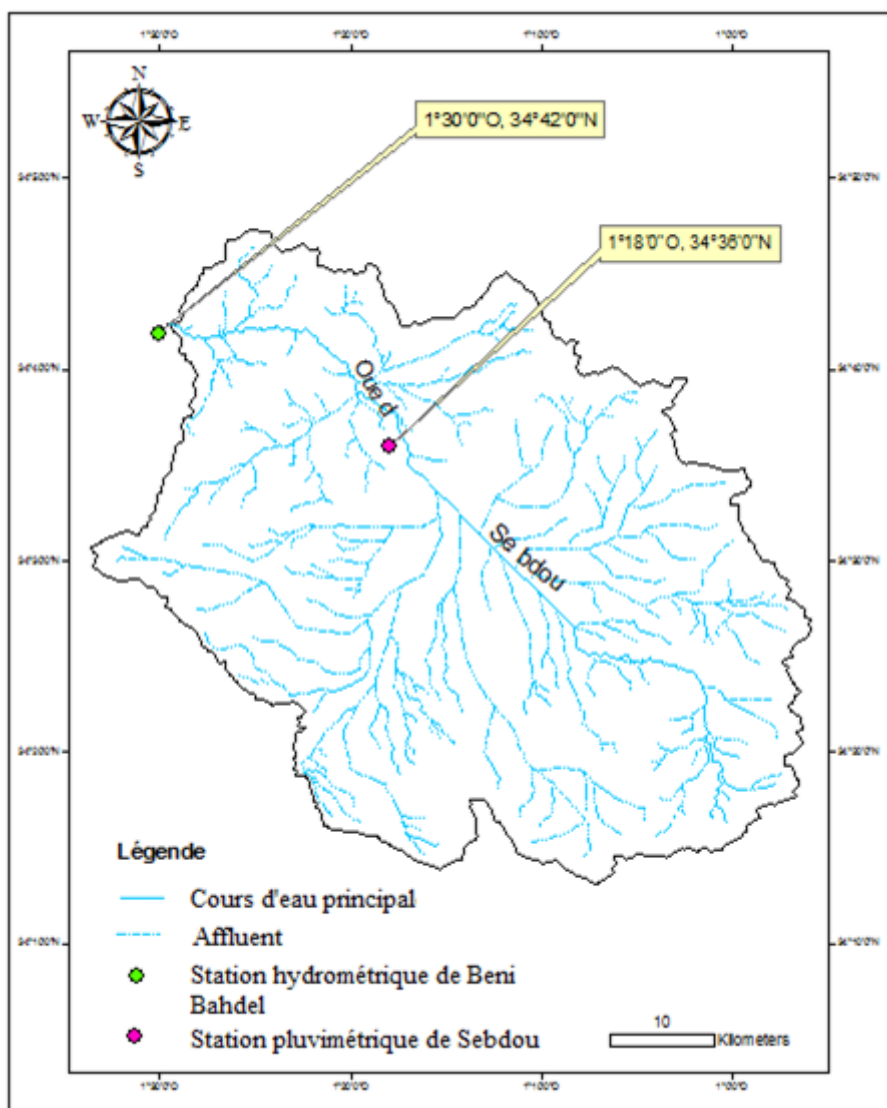


Figure II.1 : Situation géographique des stations de mesure des paramètres climatiques

Les données météorologiques utilisées dans ce chapitre ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H, Tlemcen).

### II.1. Etude des précipitations

Les précipitations sont toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre sous forme liquide (bruine, pluie, averse) ou sous forme solide (neige, grésil, grêle) ou autres formes de condensation. Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

L'analyse de la variabilité des précipitations est réalisée sur la base des données de la station de Sebdou.



### II.1.1. Précipitations annuelles

Le tableau II.2 représente les données des précipitations annuelles moyennes sur une période allant de 1983/1984 jusqu'au 2014/2015.

Tableau II.2 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Sebduou  
(1983/1984-2014/2015)

Années	1983/1984	1984/1985	1985/1986	1986/1987			
P (mm)	329,1	404,2	430,7	231,5			
Années	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1992/1993	1993/1994
P (mm)	337,8	265,7	451,8	477,3	225,1	286,9	351,1
Années	1994/1995	1995/1996	1996/1997	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001
P (mm)	694,0	222,2	342,8	247,8	198,0	411,4	433,3
Années	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008
P (mm)	463,1	351,1	222,3	394,5	327,0	272,4	668,9
Années	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
P (mm)	389,2	360,9	360,9	293,7	548,3	397,2	402,3
<b>P moyenne = 368,5 mm</b>							

L'analyse du tableau ci-dessus montre que la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée sur une série de 32ans est de 368,5mm. Toutefois, la pluviométrie annuelle est très variable d'une année à l'autre (fig. II.2). En effet, la valeur maximale des précipitations dépassent largement la moyenne avec 694 mm enregistrée en 1994/1995 et le minimum accuse une valeur de 198 mm enregistrée en 1998/1999.

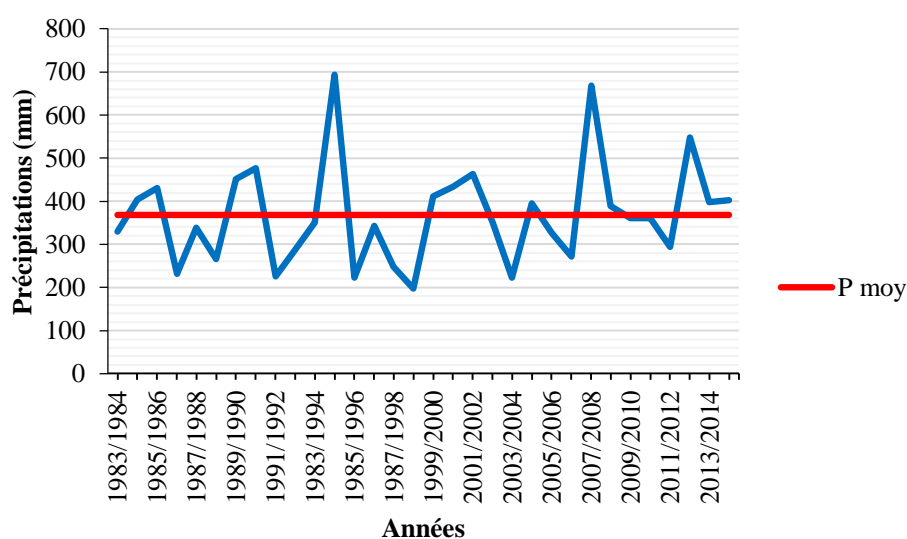


Figure II.2. Variations interannuelles des précipitations à la station de Sebduou  
(1983/1984-2014/2015)

### II.1.2. Précipitations mensuelles

Le tableau II.3, regroupe les précipitations moyennes mensuelles mesurées au niveau de la station de Sebdu sur la période (1983/1984-2014/2015).

Tableau II.3 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sebdu (1983/1984-2014/2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
P (mm)	23,7	31,3	43,0	41,6	53,0	44,3	41,5	36,0	28,7	10,8	5,4	9,3	368,5

Ce tableau montre que le mois le plus pluvieux est celui de Janvier avec 53,0 mm alors que le mois le plus sec est celui de Juillet avec 5,4 mm.

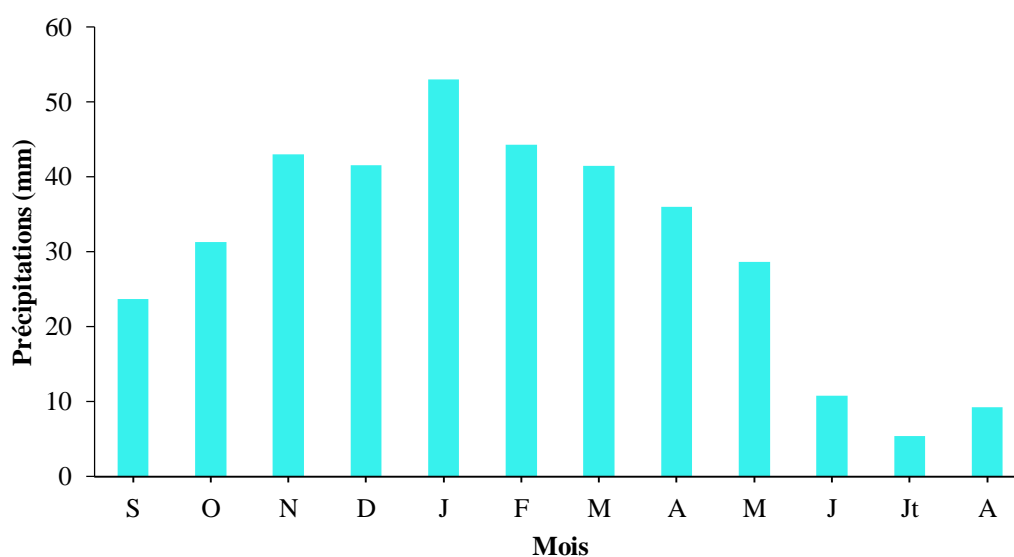


Figure II.3 : Variations des précipitations mensuelles à la station de Sebdu (1983/1984-2014/2015)

### II.1.3. Précipitations saisonnières

Les précipitations saisonnières sont consignées au tableau II.4.

Tableau II.4 : Précipitations saisonnières à la station de Sebdu (1983/1984-2014/2015)

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Mois correspondants	Septembre Octobre Novembre	Décembre Janvier Février	Mars Avril Mai	Juin Juillet Aout
P (mm)	98,1	138,9	106,1	25,5

La figure II.4 montre la distribution saisonnière des précipitations où, l'Hiver représente la saison la plus humide et l'Eté la plus sèche.

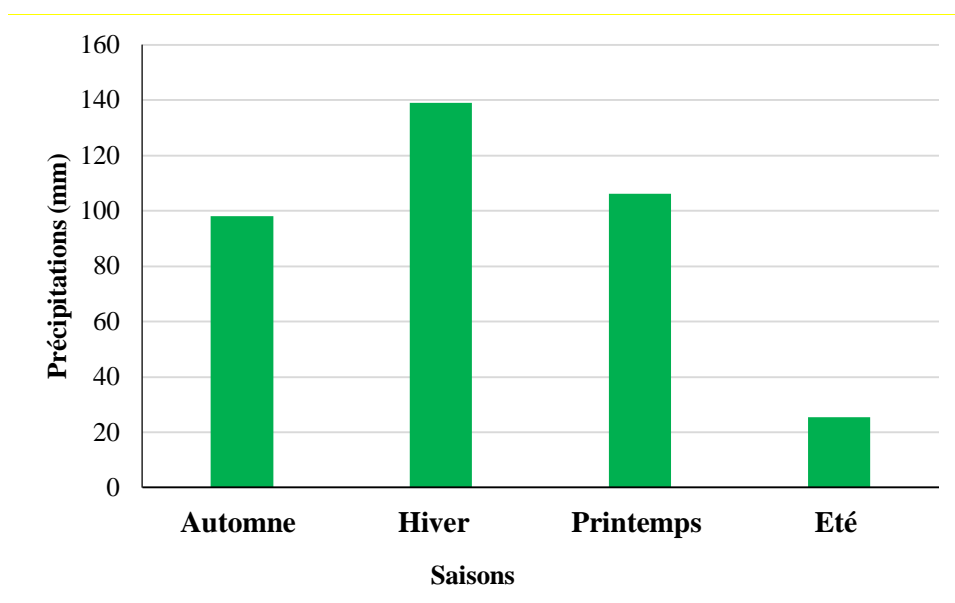


Figure II.4 : Répartition des précipitations saisonnières à la station de Sebdu (1983/1984-2014/2015)

## II.2. Étude des températures

La température est un facteur très important régissant les facteurs climatiques et intervenant dans l'estimation du bilan hydrologique.

Pour l'étude des températures nous disposons des données de températures à la station de Béni Bahdel sur la période (1983/1984-2014/2015).

### II.2.1. Variation des températures mensuelles

Tableau II.6. Valeurs des températures moyennes mensuelles à la station de Béni Bahdel (1983-1984/2014-2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Moy
$T_m$	14.01	11.35	4.39	2.41	2.63	2.79	4.52	7.74	11.12	15.11	18.82	18.64	9.46
$T_M$	33.51	29.57	22.93	19.53	18.95	19.97	24.11	25.85	29.95	34.94	38.25	37.79	27.95
$T_{moy}$	23.76	20.46	13.66	10.97	10.79	11.38	14.31	16.79	20.53	25.02	28.53	28.21	18.70

- $T_M$  : Moyennes mensuelles des températures maximales (°C).
- $T_m$ : Moyennes mensuelles des températures minimales (°C).
- $T_{moy} = (M+m)/2$ : Températures moyennes mensuelles (°C).

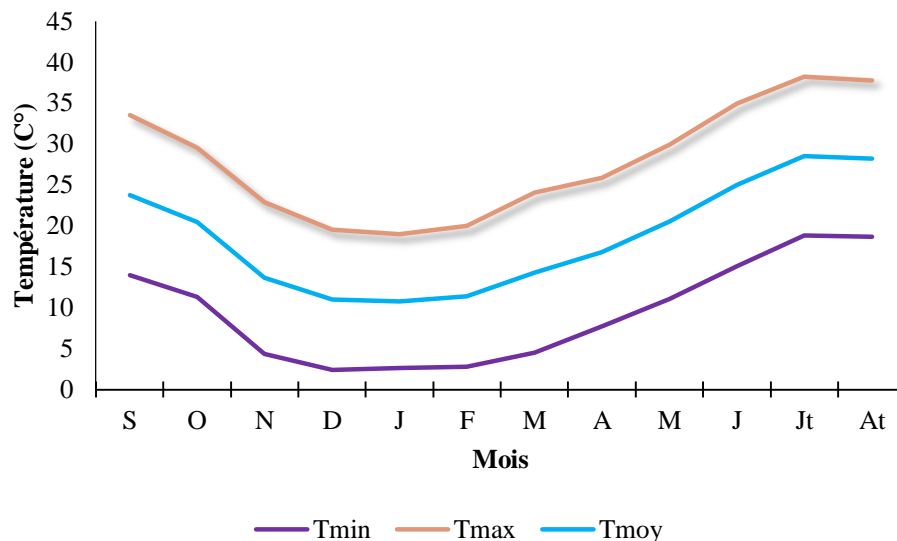


Figure II.5 : Variations des températures moyennes mensuelles, minimales et maximales à la station de Béni Bahdel (1980-1981/2014-2015).

La température moyenne mensuelle caractérisant la région le long de la période étudiée est de 18,70 °C, le maximum est de 28,53 °C au mois de Juillet, tandis que le minimum est de 10,79 °C enregistré en mois de Janvier.

### II.3. Etude du climat

La partie nord de l'Algérie est caractérisée par un climat méditerranéen avec un hiver relativement froid et pluvieux et un été chaud et sec (H. Meddi & M. Meddi, 2009).

Pour déterminer le type climatique dominant dans la région d'étude, nous avons utilisé deux méthodes à partir de la moyenne annuelle des précipitations et de température comme suit :

- La méthode de visualisation (méthode graphique de Gaussen et Bagnouls).
- Calcul de l'indice d'aridité annuelle de De Martonne.

#### II.3.1. Méthode de visualisation (méthode graphique de Gaussen et Bagnouls)

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) ( $P < 2T$ ), c'est ce qui nous amène à déduire deux périodes :

- Pour la période sèche, la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations.
- Pour la période humide, la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures.

Le tableau suivant nous a permis de tracer le diagramme pluviothermique caractérisant la station de Sebdu

Tableau II.7. Précipitations et températures moyennes mensuelles (1980-1981/2014-2015).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
P (mm)	23,7	31,3	43,0	41,6	53,0	44,3	41,5	36,0	28,7	10,8	5,4	9,3
T <sub>moy</sub>	23.76	20.46	13.66	10.97	10.79	11.38	14.31	16.79	20.53	25.02	28.53	28.21

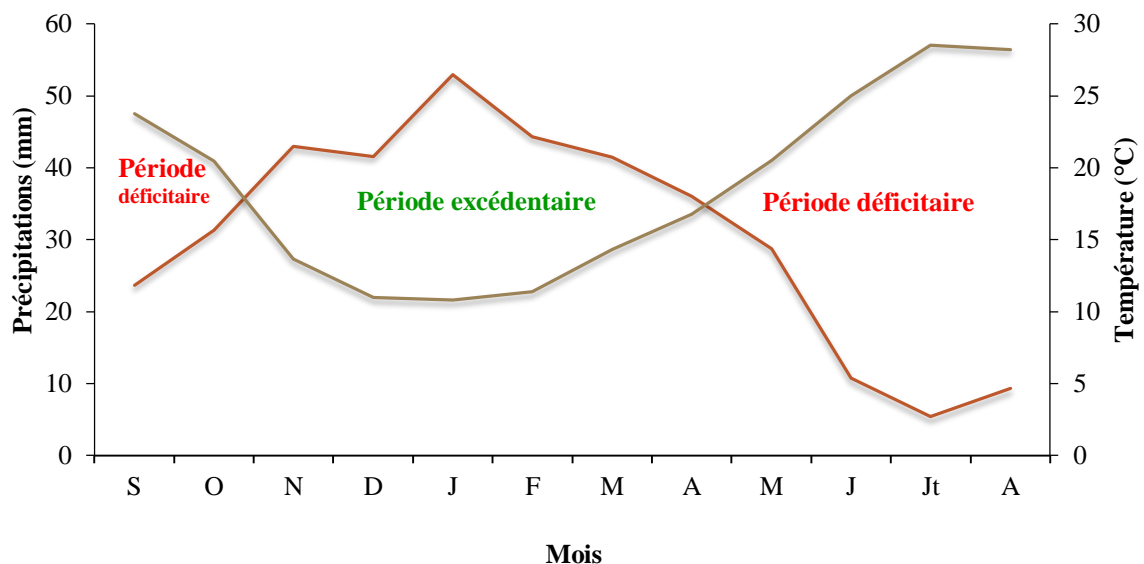


Figure II.6 : Diagramme Pluviothermique dans la zone d'étude.

Cette figure nous permet de discriminer deux périodes très distinctes : une période pluvieuse (humide) s'étendant de la fin du mois d'Octobre jusqu'à la mi-avril, et une période sèche occupant le reste des mois de l'année.

### II.3.2. Indice d'aridité annuel de De Martonne

De. Martonne (1923) a défini un indice appelé indice d'aridité annuel « I » donné par :

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

P : Précipitations moyennes annuelles = 368,5mm

T : Température moyenne annuelle = 18,70°C

Donc : **I = 12,84**

De. Martonne propose la classification suivante :

- $I < 5$  : Climat hyperaride.
- $5 < I < 10$  : Climat désertique.
- $10 < I < 20$  : Climat semi-aride.
- $I > 20$  : Climat humide.

Le calcul du coefficient d'aridité annuel de De Martonne pour la station de Sebdou montre que la région jouit d'un climat *semi-aride*.

Le résultat du calcul de l'indice de De Martonne confirme le résultat de la classification précédente pour la zone à *climat semi-aride* caractérisée par un écoulement temporaire.

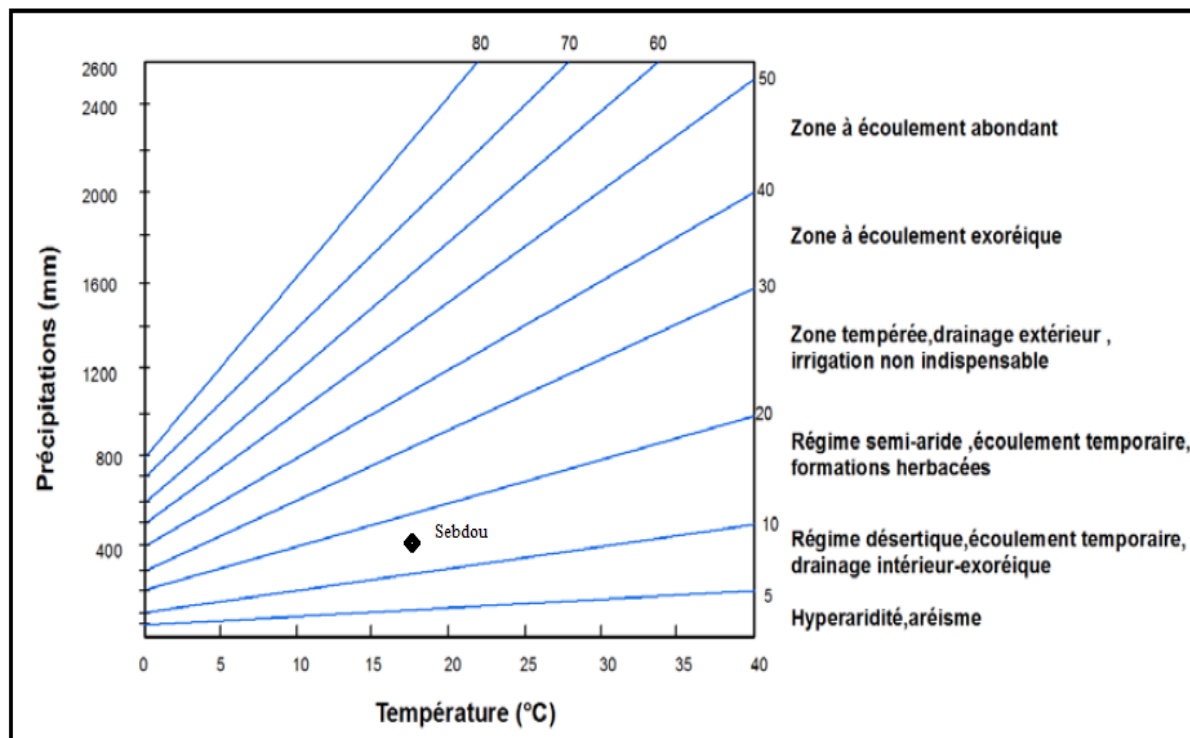


Figure II.7 : Abaque de De Martonne

#### II.4. Conclusion

L'étude climatique effectuée sur la région de Sebdou au cours d'une période de 32ans allant de 1983/1984 jusqu'à 2014/2015 à partir des deux principaux paramètres (précipitations et températures) mesurés au niveau des stations de Sebdou et Beni-Bahdel a caractérisé la région par un climat semi-aride avec un Hiver relativement froid et pluvieux et un été chaud et sec.

La température moyenne annuelle est d'environ 18.70 °C. Les deux mois les plus chauds sont Juillet et Août, avec plus de 28 °C.

Le régime général des pluies est celui des zones semi-arides méditerranéennes de l'Afrique du Nord. Il est caractérisé par des précipitations d'hiver avec un maximum enregistré en mois de Janvier de 53 mm, et une période de sécheresse.

## Introduction

L'étude hydro-chimique des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec les faciès lithologiques et la piézométrie de la nappe.

La caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines est habituellement basée sur la disponibilité d'une grande quantité de données physico-chimiques. La chimie des eaux souterraines, dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature pétrographique, les composants chimique de divers types de roches, la qualité de l'eau de recharge et des diverses sources d'alimentation des formations aquifères.

Nous exposons dans ce chapitre les caractéristiques physico-chimiques de la nappe de l'aquifère alluvionnaire au niveau du fossé de Sebdou et nous allons faire une interprétation des résultats des compositions chimiques.

Notre travail est basé sur des données physico-chimiques de 26 points d'eau prélevés au niveau de la nappe alluviale du fossé de Sebdou (campagne 1990 réalisée par K. Baba Hamed et R. Kerzabi, 1991) (Annexe.2). Ces données concernent les éléments majeurs : cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) et anions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ), le pH, la température, la conductivité électrique et la minéralisation.

### III.1. Calcul de la balance ionique

Avant de traiter et d'interpréter les résultats d'analyses des eaux prélevées, il faut analyser leur fiabilité. La méthode utilisée est la Balance Ionique (B.I.).

$$B.I. = \frac{|\sum r^+ - \sum r^-|}{\sum r^+ + \sum r^-} \cdot 100$$

Avec :

$\Sigma r^+$ : somme des concentrations des cations en meq/L,

$\Sigma r^-$ : somme des concentrations des anions en meq/L.

Cette relation permet de définir trois classes comme suit :

- **B.I. < 2** : Bonne analyse.
- **2 < B.I. < 5** : Analyse acceptable.
- **5 < B.I.** : Mauvaise analyse.

Le calcul de cet indice (tableau III.1), nous a donné les résultats qui se résument comme suit : 11 bonnes analyses, 15 analyses acceptables et 08 mauvaises analyses. Donc, nous allons travailler avec seulement 26 points d'eau répartis sur presque la totalité du fossé comme le montre la figure III.1.

Tableau III.1 : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux du fossé de Sebdu

Nom des points d'eau	Somme des cations	Somme des anions	Balance ionique	Résultat d'analyse
S1	10.08	11.08	4.76	Acceptable
P4	12.35	12.10	1.03	Bonne
P5	11.42	11.06	1.59	Bonne
P6	9.40	9.66	1.37	Bonne
P9	12.73	13.69	3.66	Acceptable
P10	13.50	14.56	3.78	Acceptable
P12	33.62	34.27	0.95	Bonne
P14	8.68	9.46	4.31	Acceptable
P15	8.59	7.99	3.61	Acceptable
P16	11.92	12.91	4.02	Acceptable
P17	18.29	17.90	1.07	Bonne
P18	19.51	20.30	1.98	Bonne
P20	13.51	14.26	2.69	Acceptable
P21	10.29	10.73	2.08	Acceptable
P22	12.38	12.29	0.37	Bonne
P23	7.39	7.82	2.84	Acceptable
P26	6.06	8.57	17.19	Mauvaise
P11	14.10	15.56	4.94	Acceptable
P24	6.39	6.03	2.86	Acceptable
S6	5.95	5.78	1.46	Bonne
S7	8.74	9.52	4.27	Acceptable
S8	11.62	11.61	0.06	Bonne
S9	10.31	11.13	3.81	Acceptable
S10	12.10	13.18	4.30	Acceptable
S12	12.07	12.97	3.61	Acceptable
S14	11.88	11.82	0.27	Bonne



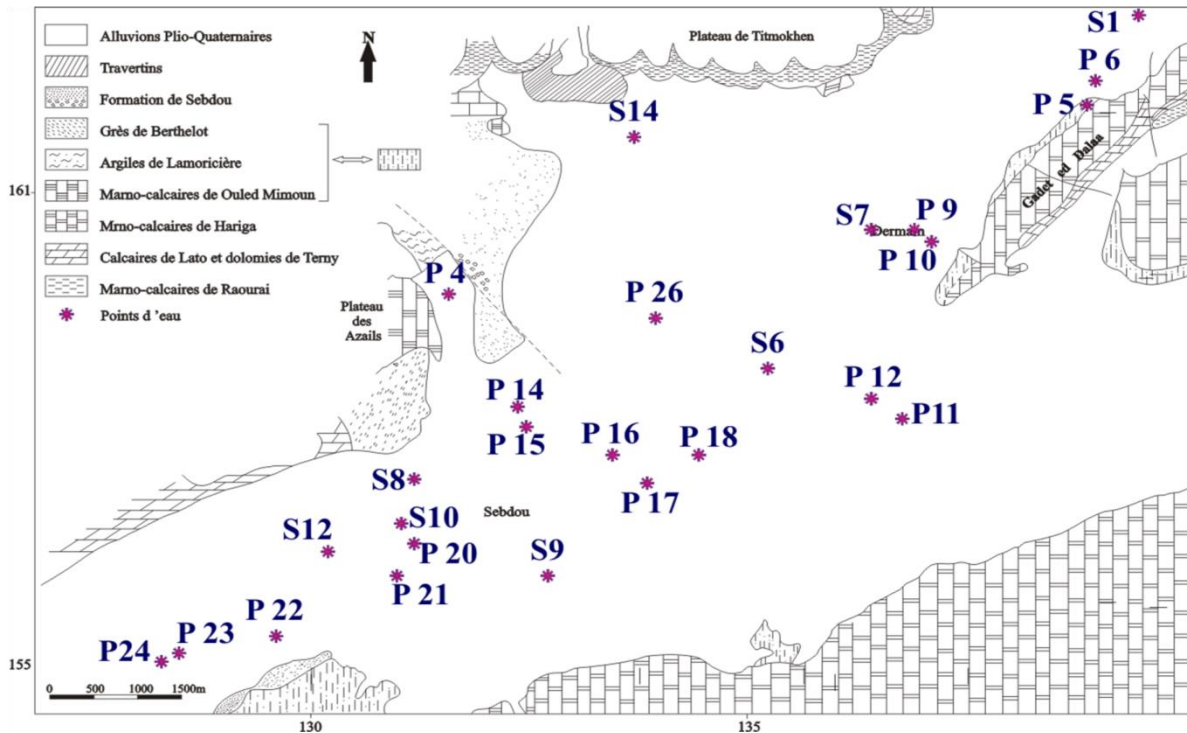


Figure. III.1 : Carte de répartition des points d'eau de la nappe du Plio-Quaternaire du fossé de Sebdu

### III.2. Corrélation entre les cations et les anions

Pour confirmer la fiabilité des analyses, nous avons soumis les données hydrochimiques à un test statistique pour mettre en évidence une corrélation linéaire qui existe entre la somme des cations et celle des anions.

La figure III.2 représente la corrélation entre la somme des cations et la somme des anions qui témoigne grosso modo de la bonne qualité des analyses chimiques de cette campagne d'échantionnage au niveau de la nappe alluvionnaire du fossé de Sebdu.

La corrélation entre la somme des cations et celle des anions met en évidence une droite linéaire de la forme  $y = ax + b$ , dont l'équation est :  $y = 1,002x + 0,480$  et un coefficient de corrélation  $R = 0,99$ . Ce coefficient de corrélation est proche de 1 et représente plus de 96% de fiabilité (dans le détail : 38.46% de bonnes analyses, 57.69% d'analyses acceptables et 03.85% qualifié de mauvaise analyse). Les 26 échantillons seront utilisés dans ce chapitre et le chapitre suivant.

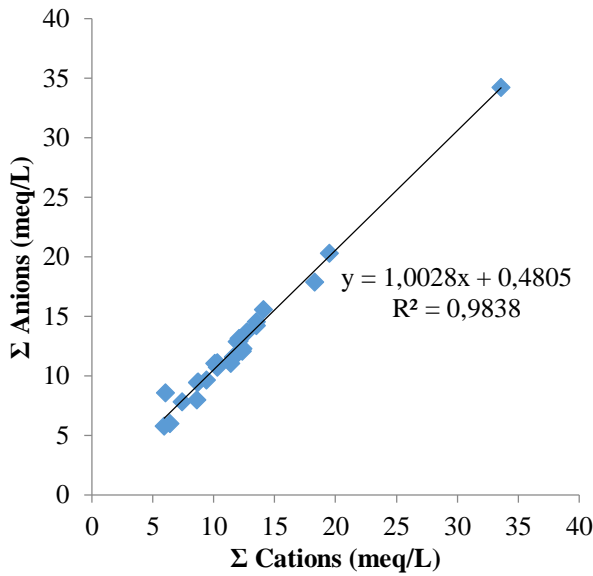


Figure III.2 : Corrélation entre les cations et les anions

### III.3. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

- Température** : Paramètre jouant un rôle très important dans la mobilité des sels et des gaz, donc sur la conductivité électrique, elle permet de différencier les eaux qui circulent en profondeur ou en surface. L'augmentation de la température est en fonction de la profondeur (1°C pour 33m) (Castany, 1982). Les eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu enregistre des températures oscillant entre 14,3 et 18,6 °C.

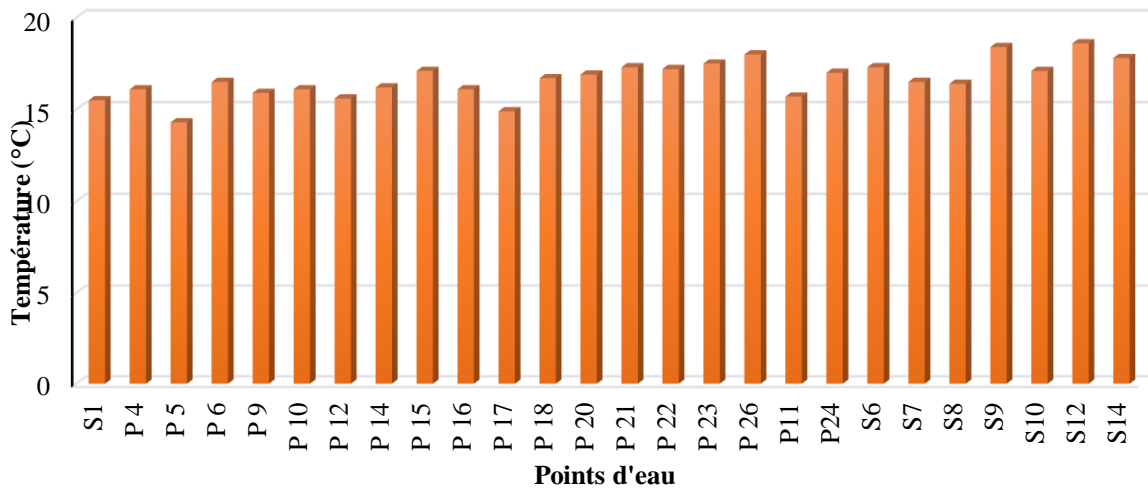


Figure III.3 : Variation de la température des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

- Le Calcium (Ca<sup>2+</sup>)** : la présence des ions Ca<sup>2+</sup> dans les eaux de la nappe du Plio-Quaternaire du fossé de Sebdu est liée principalement à la dissolution des formations carbonatées (CaCO<sub>3</sub>) ainsi que les formations gypseuses (Trias)

(CaSO<sub>4</sub>). Les teneurs de l'ion Ca<sup>+2</sup> sont comprises entre 58 mg/L comme valeur minimale et atteignent une valeur maximale de 421 mg/L, 84% des eaux ont une teneur inférieure à la concentration maximale admissible (C.M.A) (200 mg/L) (comparaison avec les normes algériennes données en annexe 3).

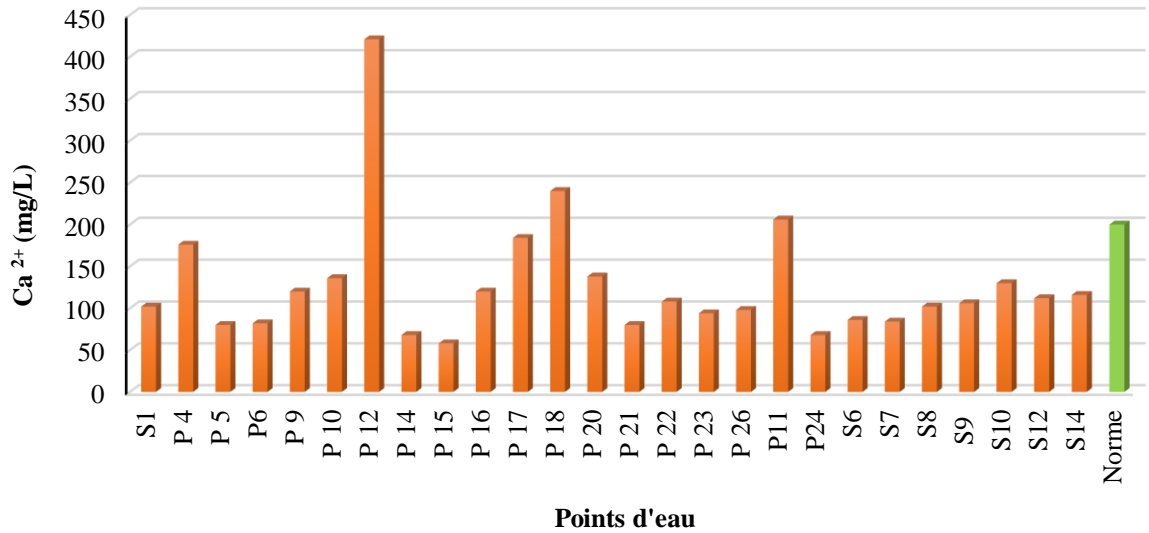


Figure III.4 : Variation de l'ion calcium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou

- **Le Magnésium (Mg<sup>+2</sup>)** : 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 3 et 68 mg/L, aucun point ne dépasse la CMA (fig. III.5).

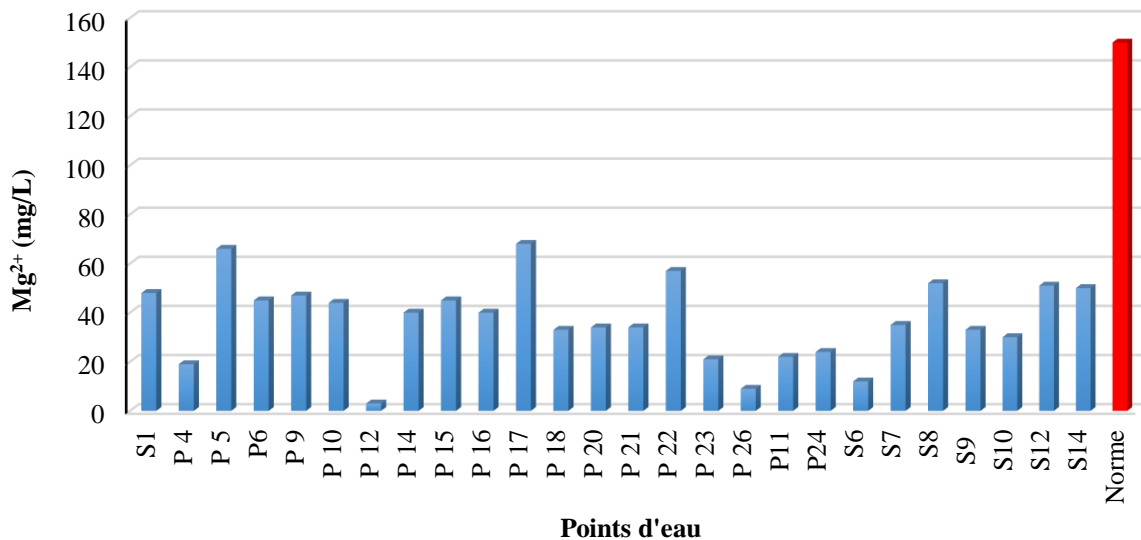


Figure III.5 : Variation de l'ion magnésium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou

- **Le Sodium (Na<sup>+</sup>)** : La teneur de l'ion Sodium est toujours inférieure à la CMA (200 mg/L) dans les eaux analysées sauf pour le point P12 (281mg/L) où elle dépasse la CMA, la concentration est comprise entre 9 et 108 mg/L (fig.III.6).

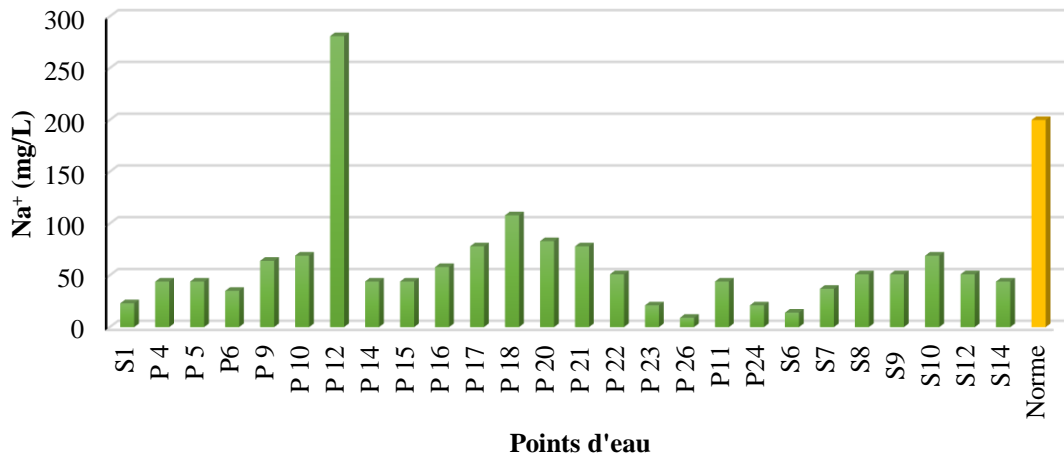


Figure III.6 : Variation de l'ion sodium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

- **Le Potassium (K<sup>+</sup>)** : Malgré son abondance dans certaines roches magmatiques et sédimentaires (Argile – Grès), l'ion Potassium est généralement peu concentré dans les eaux souterraines, sa teneur dans l'eau naturelle est constante et ne dépasse pas habituellement les 15mg/L, Les normes fixent sa concentration maximale à 20 mg/L. Les analyses montrent que les eaux de l'aquifère du fossé de Sebdu présentent des teneurs comprises entre 1 et 8 mg/L (fig.III.7).

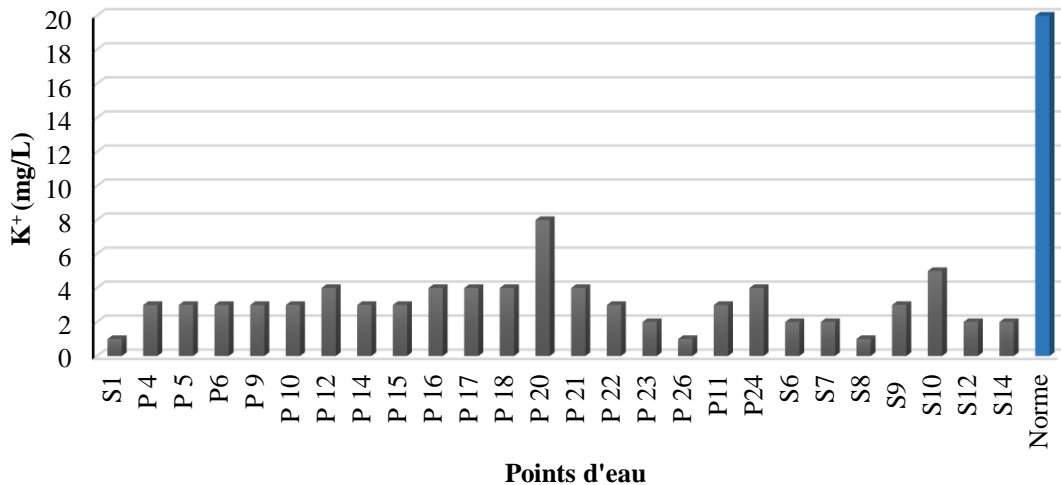
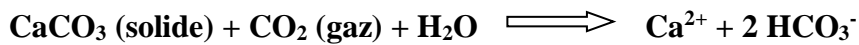


Figure III.7 : Variation de l'ion potassium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

- **Les Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)** : Se forme à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux météoriques qui se chargent en CO<sub>2</sub> libre lors de leur percolation à travers le sol (Castany, 1982).



Dans les eaux de la nappe les concentrations varient entre 197 et 458 mg/L (fig.III.8).

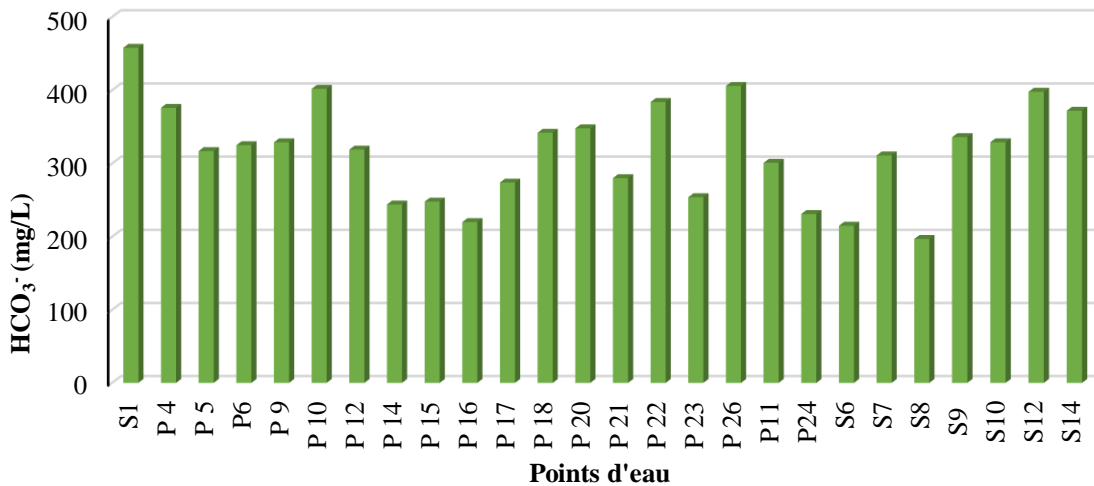


Figure III.8 : Variation des bicarbonates des eaux de l’aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

- **Les Chlorure (Cl<sup>-</sup>)** : dans les aquifères libres la concentration en Cl<sup>-</sup> est directement liée à la teneur en chlorures des précipitations. Les normes fixent sa concentration maximale à niveau guide 500mg/L. Dans les eaux de la nappe alluvionnaire de Sebdu les concentrations moyennes en ions chlorures observées sont de l’ordre 161,04 mg/L avec des teneurs très élevées (de 34 à 782 mg/L). c’est le puits P12 qui présente une valeur élevée (fig.III.9).

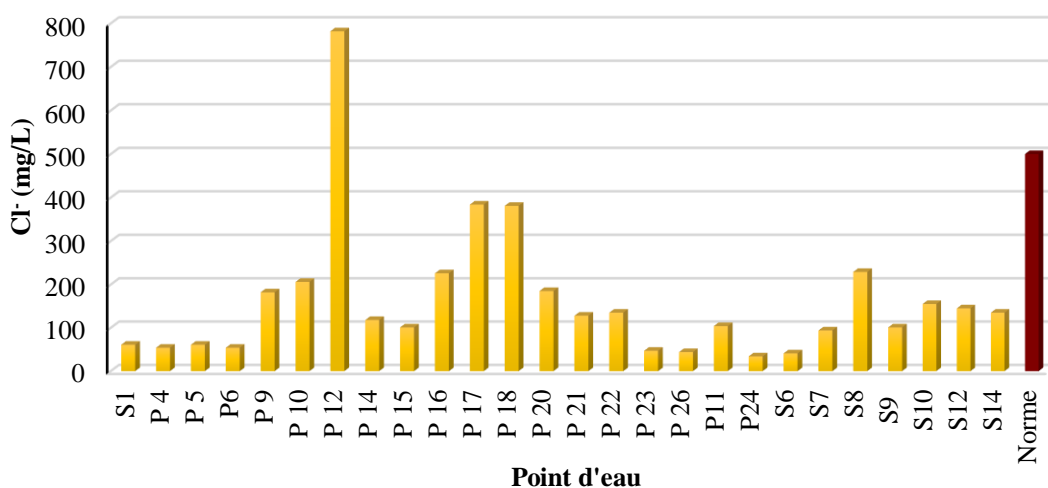


Figure III.9 : Variation des chlorures des eaux de l’aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

- **Les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>)** : La concentration en ions sulfates des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates,

elle peut atteindre 100 à 200 mg/L, mais ce chiffre peut être largement dépassé (jusqu'à 1000 mg/L) dans les zones contenant du Gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé (DahaliS., 2013). Les normes fixent 400 mg/L comme CMA. Dans la région de Sebdoou leur teneur est conforme avec les normes allant de 24 à 336 mg/L (fig.III.10).

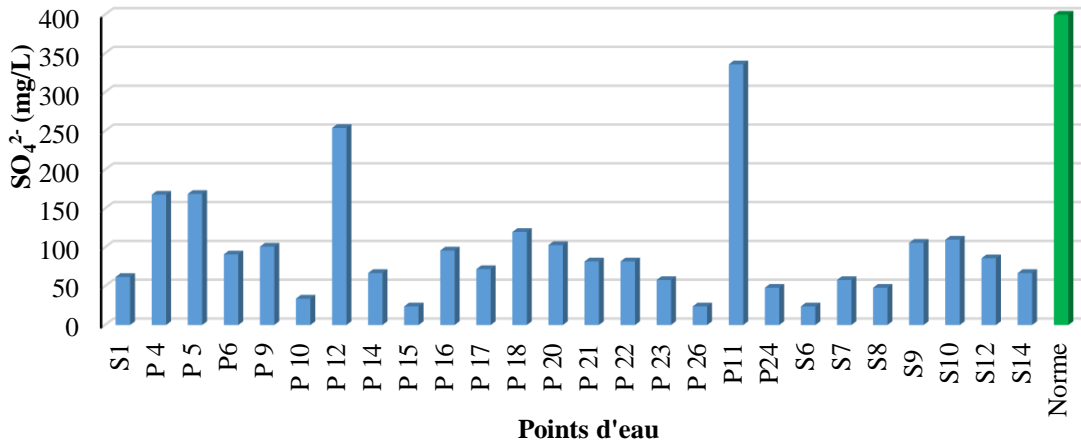


Figure III.10 : Variation des sulfates des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdoou

- Les Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>):** Représentent la forme la plus oxygénée de l'Azote, et c'est la forme la plus soluble de ce dernier. Les nitrates des eaux souterraines et des cours d'eau proviennent principalement d'origine agricole en raison du recours aux engrais azotés, en second lieu des rejets des stations d'épuration (transformation de la matière organique en nitrates). Certaines installations sont complétées par des traitements de dénitrification avant rejet dans le milieu naturel. Les teneurs en nitrates observées sont de l'ordre de 11 à 105 mg/L, cependant la moitié des échantillons ont des valeurs supérieures aux normes (50 mg/L) (fig. III.11).

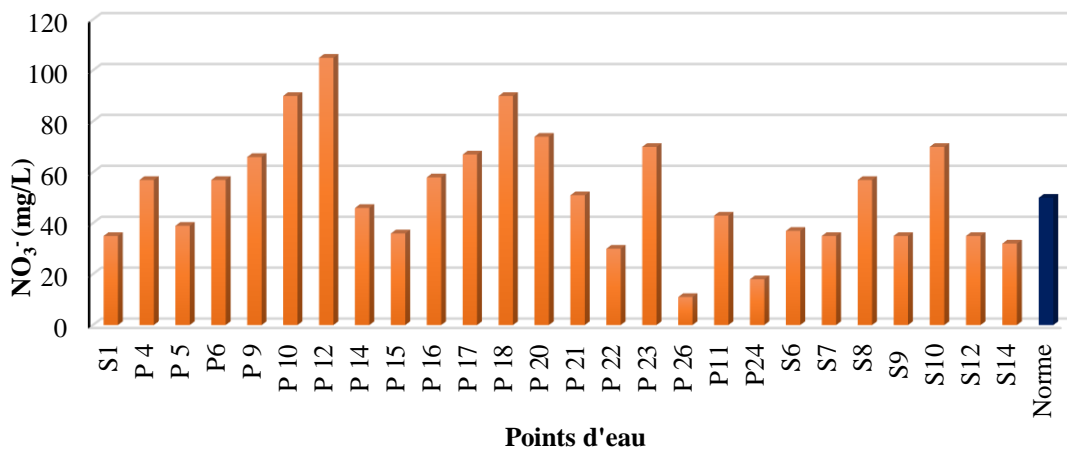


Figure III.11 : Variation des nitrates des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdoou

- **Le résidu sec** : il varie entre 420 à 2600 mg/L, il est fonction des teneurs des éléments chimiques contenus dans une eau.

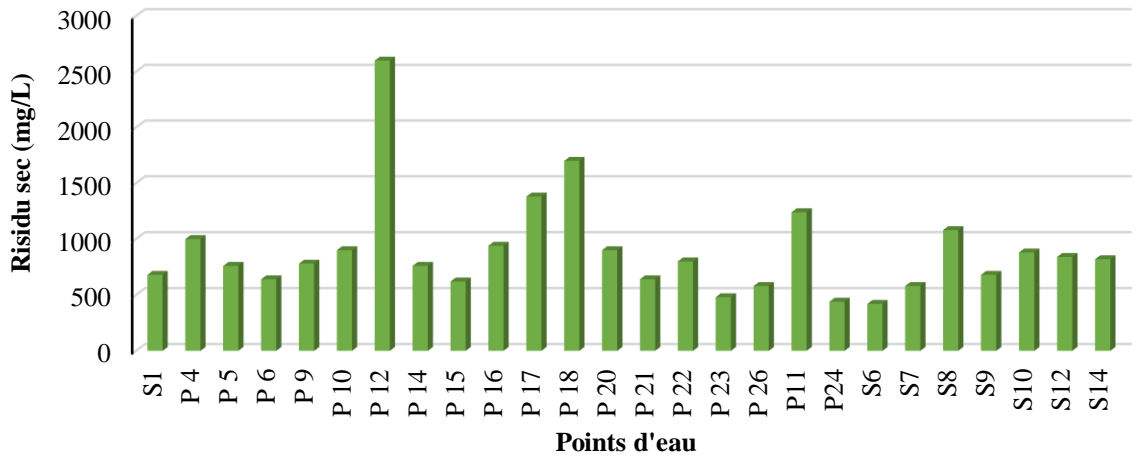


Figure III.12: Variation du résidu sec des eaux l’aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou

- **La minéralisation** : La minéralisation d’une eau évolue de la même manière que sa conductivité donc il y a une relation proportionnelle entre ces deux paramètres. La variation de ce paramètre au niveau des différents points d’eau de la nappe du fossé de Sebdou est illustrée sur la figure III.12, les valeurs varient entre 372 et 1736 mg/L.

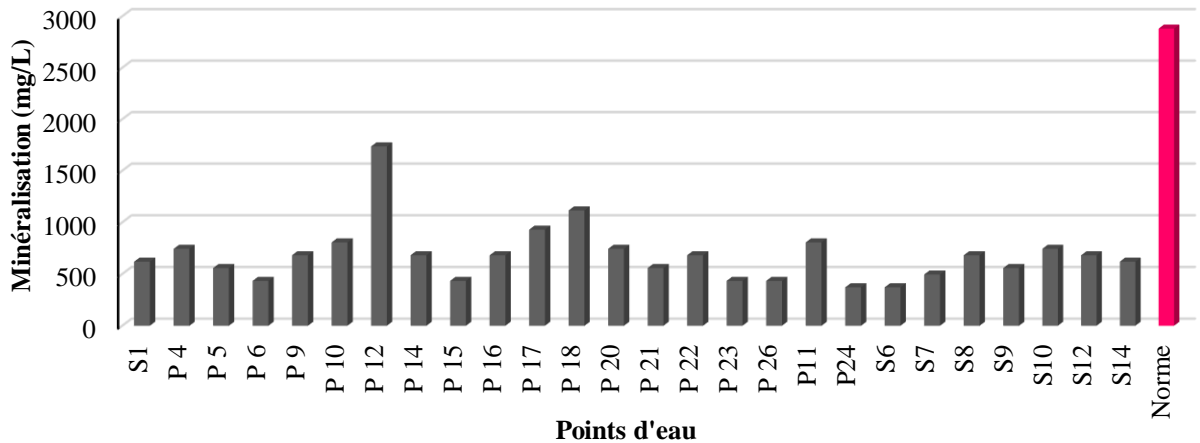


Figure III.13 : Variation de la minéralisation des eaux de l’aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou

- **La conductivité électrique** : c’est la conductance d’une colonne d’eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface et séparées l’une de l’autre de 1 cm. Elle est l’inverse de la résistivité électrique. (Rodier, 2009)  
La conductivité mesure l’aptitude de l’eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l’eau se trouvent sous forme

d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et par suite donner une idée sur la minéralisation totale d'une eau.

Le tableau suivant montre la gamme des conductivités électriques mesurées sur différents échantillons et leurs minéralisations correspondantes.

Tableau III.2: Classification d'une eau en fonction de sa conductivité électrique (Rodier,2009)

Conductivité électrique ( $\mu\text{S/cm}$ )	Correspondance
80 – 300	Eau peu minéralisée
300 - 500	Eau moyennement minéralisée
1000 - 3000	Eau saline
>3000	Eau de mer

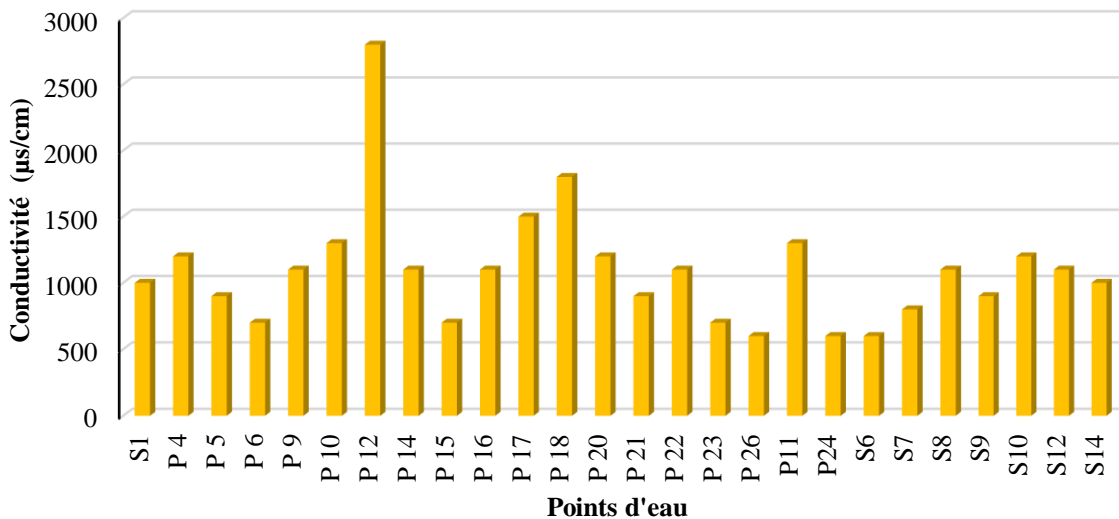


Figure III.14 : Variation de la conductivité électrique des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

En comparant les figures III.13 et III.14, nous remarquons bien un synchronisme entre la minéralisation et la conductivité remarque, les variations sont pratiquement les mêmes étant donné que le calcul de l'un dépend de l'autre.

• **Etude du potentiel d'hydrogène (pH) :** Le pH est en relation avec la concentration des ions hydrogène  $[\text{H}^+]$  présent dans l'eau ou les solutions. Ce paramètre donne le degré d'acidité d'alcalinité ou de neutralité d'une eau.  **$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ .**

Le pH mesure l'activité en ions  $\text{HO}_3^+$  de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14 (tableau III.3).

Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau.



L'eau des cours d'eaux avoisine en général la neutralité représentée par un pH de 7.

Tableau III.3 : Classification des eaux selon le pH (Rodier, 2009)

pH	Correspondance
$\text{pH} < 5$	Acidité forte
$\text{pH} = 7$	Neutralité (eau pure)
$7 < \text{pH} < 8$	Neutralité rapprochée (eau de surface)
$\text{pH} > 8$	Alcalinité, évaporation intense
$5.5 < \text{pH} < 8$	Majorité des eaux souterraines

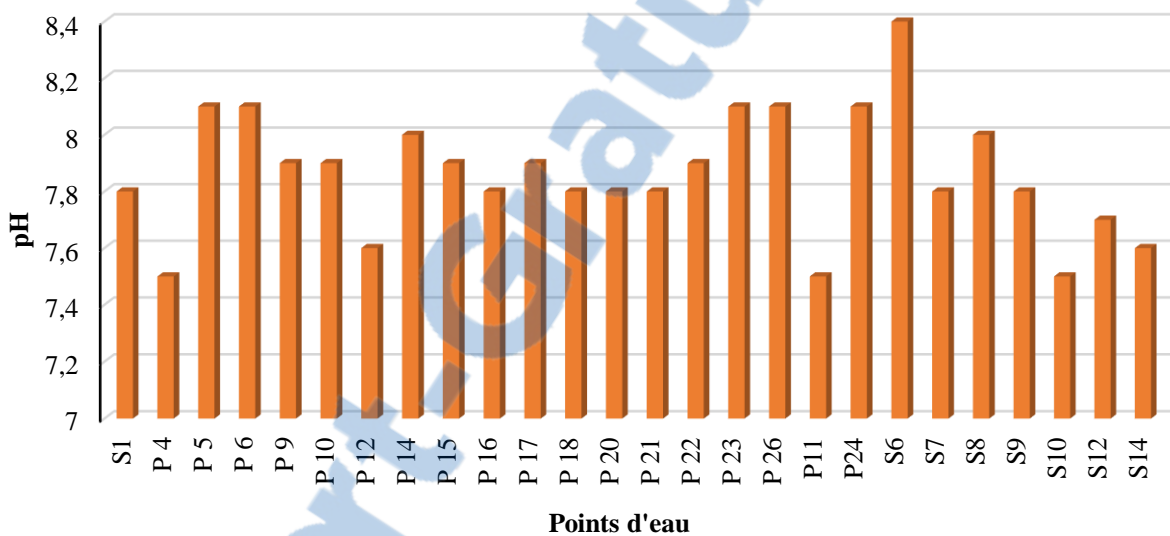


Figure III.15 : Variation du pH des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu

La plage des valeurs de pH est comprise entre 7,5 et 8,4 avec une moyenne de 7,86. Les variations du pH sont assez homogènes. Donc les eaux de la nappe du fossé de Sebdu sont rangées dans la gamme correspondante aux eaux souterraines et au même temps leur pH ressemble à celui des eaux de surface (tableau III.3) du fait de la faible profondeur de l'aquifère par endroits.

En général, les eaux sont alcalines. Ceci est lié à la nature des roches présentes dans la région et qui sont essentiellement constituées de roches sédimentaires à composante gréseuse carbonatée importante (cf. chapitre I).

#### III.4. Détermination des faciès chimiques

Au cours de leur long trajet, les eaux prennent des faciès très différents dont nous pouvons suivre l'évolution en classant les eaux en familles en fonction des teneurs décroissantes des anions et des cations et en utilisant les diagrammes de Schöeller-Berkaloff et de Piper.

### III.4.1. Classification à partir des formules caractéristiques

Les faciès hydrochimiques sont souvent utilisés en hydrogéologie afin d'avoir une idée sur la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction, qui sont exprimées par la formule caractéristique ou la formule ionique obtenue de la manière suivante :

Nous classons de gauche à droite par ordre croissant les quantités en réaction des anions ensuite des cations en se basant sur la prédominance de tel ou tel ion.

Les principaux faciès hydrochimiques rencontrés dans les eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdoou sont illustrés sur le tableau III.4.

Tableau III.4 : Classification des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdoou selon leurs faciès.

Faciès chimique	Formule caractéristique	Points d'eau
Bicarbonaté calcique	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	S1 ,P4 ,P6 ,P9 ,P10, P14 ,P20 ,P21 ,P22 ,P23 ,P26,P24 ,S6, S7 ,S9,S10 ,S12 ,S14.
Bicarbonaté magnésienn	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+} > r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	P5, P15.
Chloruré calcique	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	P12, P16, P17, P18, S8.
Sulfaté calcique	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	P11.

### III.4.2. Représentation graphique des faciès chimiques

Afin de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Schöeller-Berkaloff et à celui de Piper. La réalisation de ces diagrammes a été faite à l'aide du logiciel "**Diagrammes**" conçu par l'université d'Avignon en France.

#### III.4.2.1. Diagramme de SCHÖELLER-BERKALOFF

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.

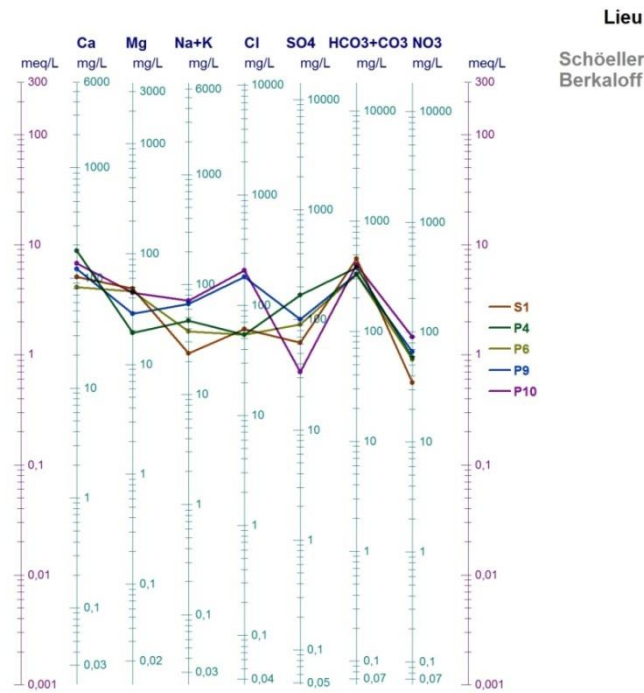


Figure III.16 (a) : Représentation du faciès Bicarbonaté calcique

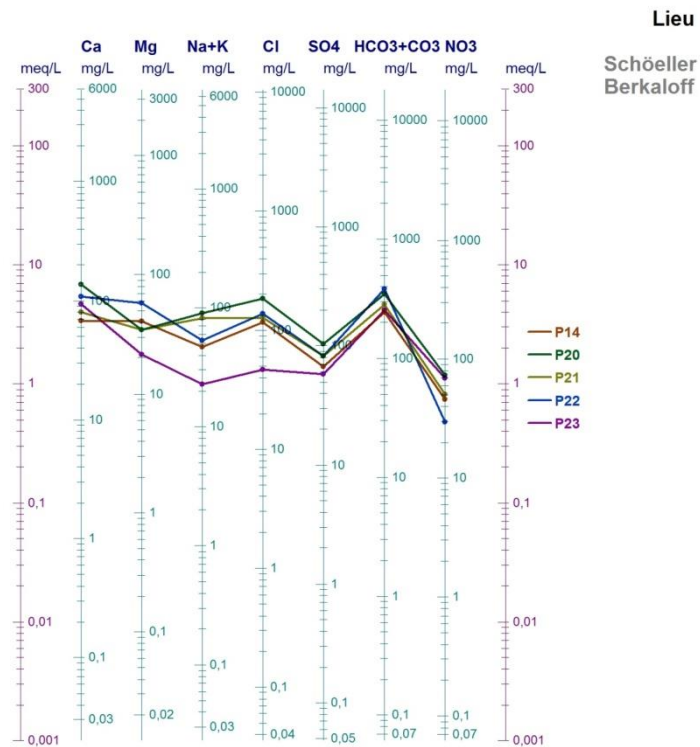


Figure III.16 (b) : Représentation du faciès Bicarbonaté calcique

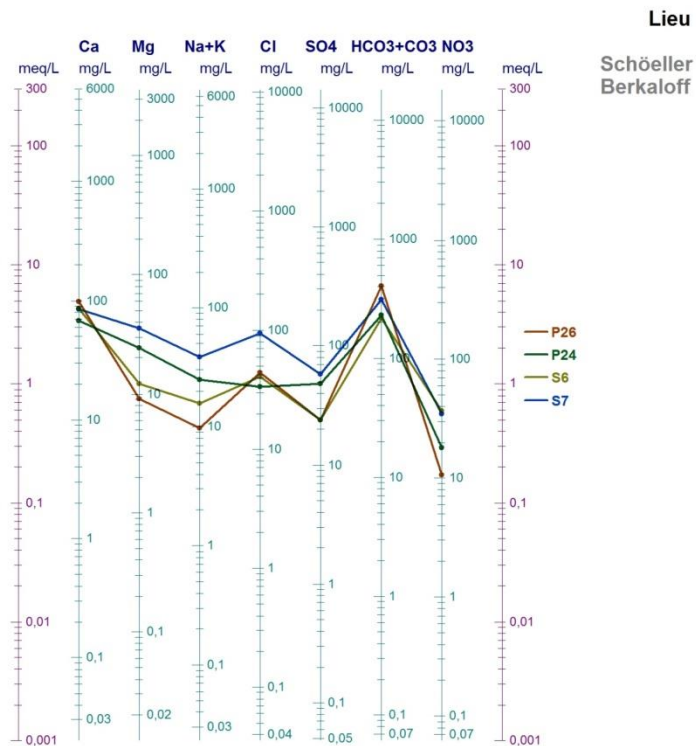


Figure III.16 (c) : Représentation du faciès Bicarbonaté calcique

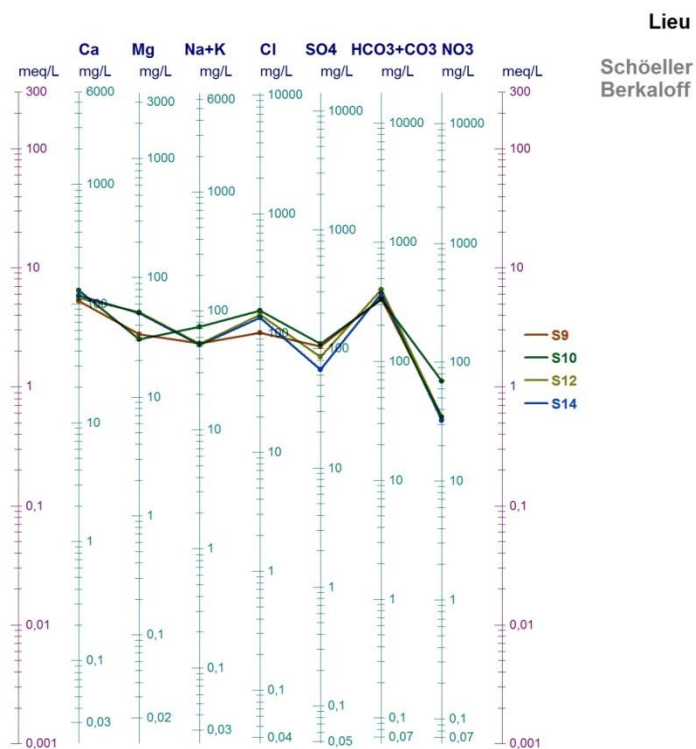


Figure III.16 (d) : Représentation du faciès Bicarbonaté calcique

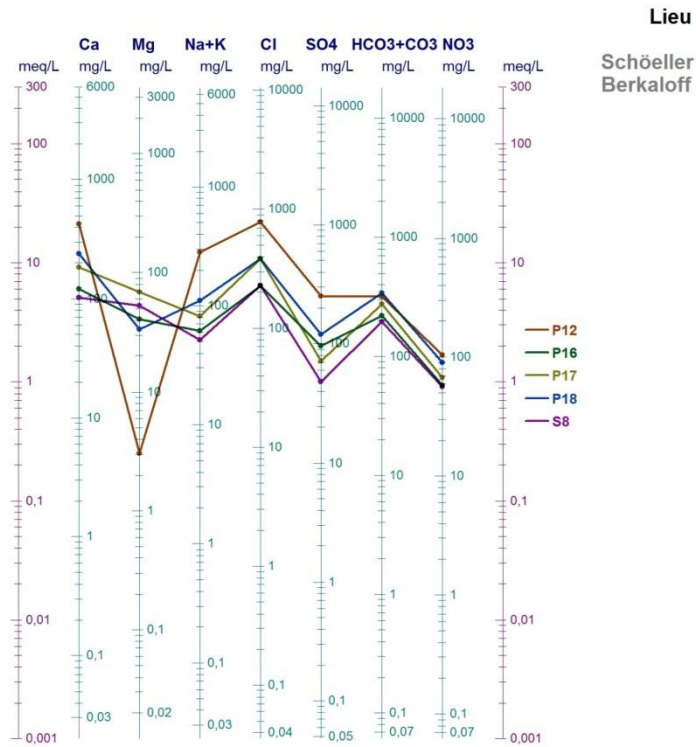


Figure III.17: Représentation du faciès Chloruré calcique

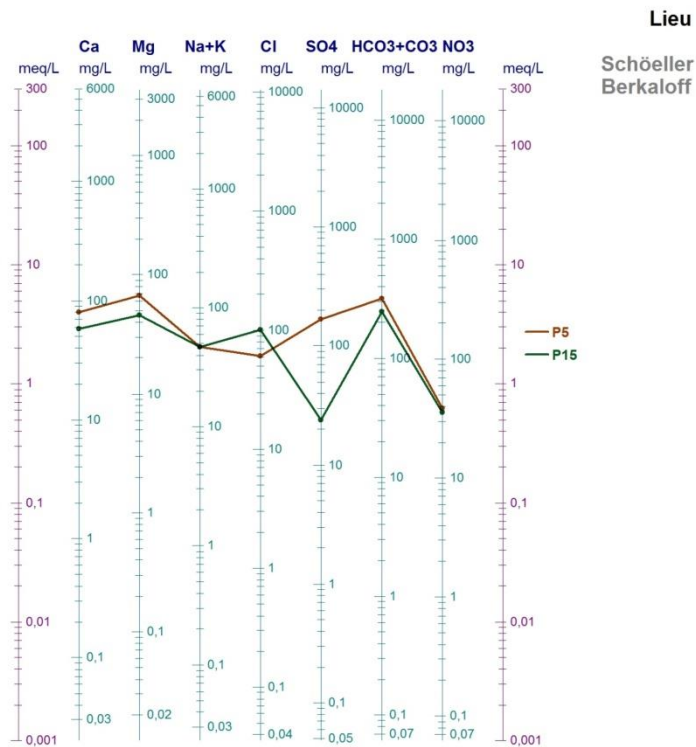


Figure III.18: Représentation du faciès Bicarbonaté magnésien

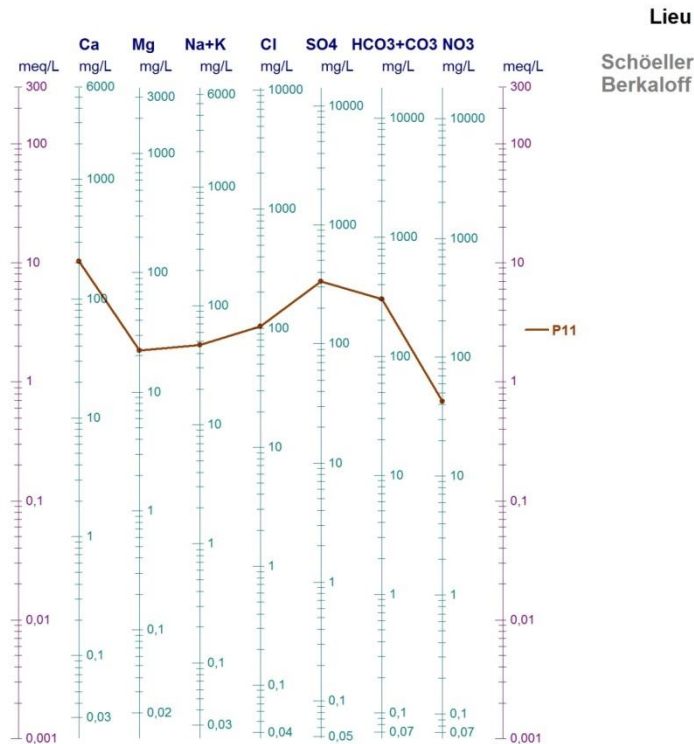


Figure III.19: Représentation du faciès Sulfaté calcique

#### III.4.2.1. Diagramme de PIPER

Ce diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global, les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

Les figures suivantes reproduisent la position des eaux dans le diagramme de Piper. Cette représentation permet de comparer aisément les échantillons d'eau. Les eaux de la nappe de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu montrent dans le losange majoritairement 02 classes hydro-chimiques : nous avons les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes qui dominent sur toute la nappe, et les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes (localisées généralement au Nord, au centre et vers l'exutoire de l'aquifère).



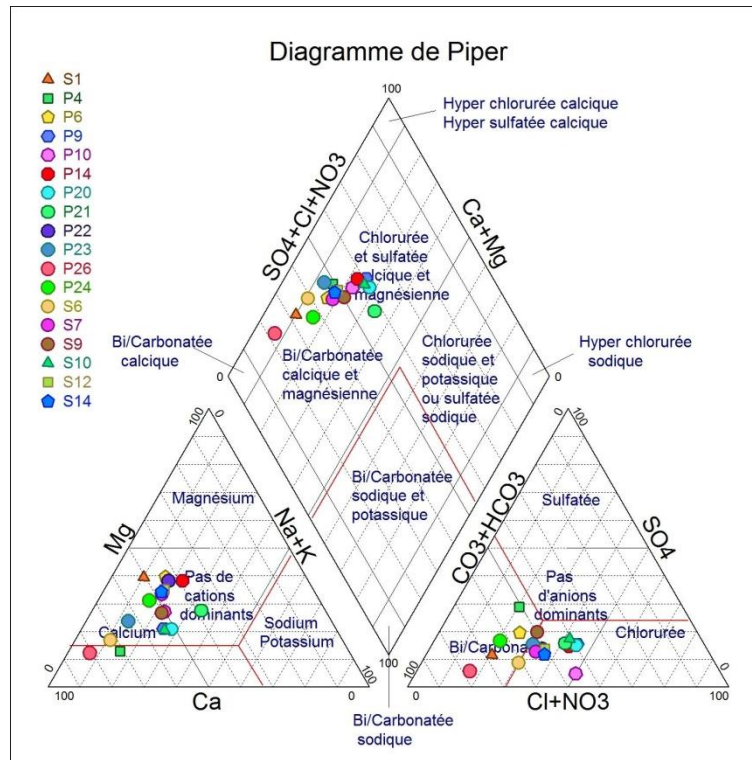


Figure III.20: Représentation du faciès bicarbonaté calcique

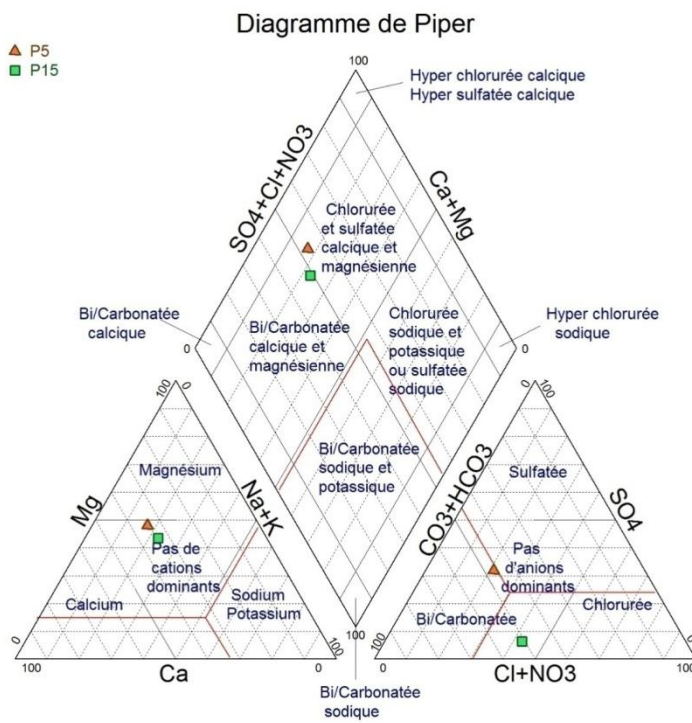


Figure III.21: Représentation du faciès bicarbonaté magnésien

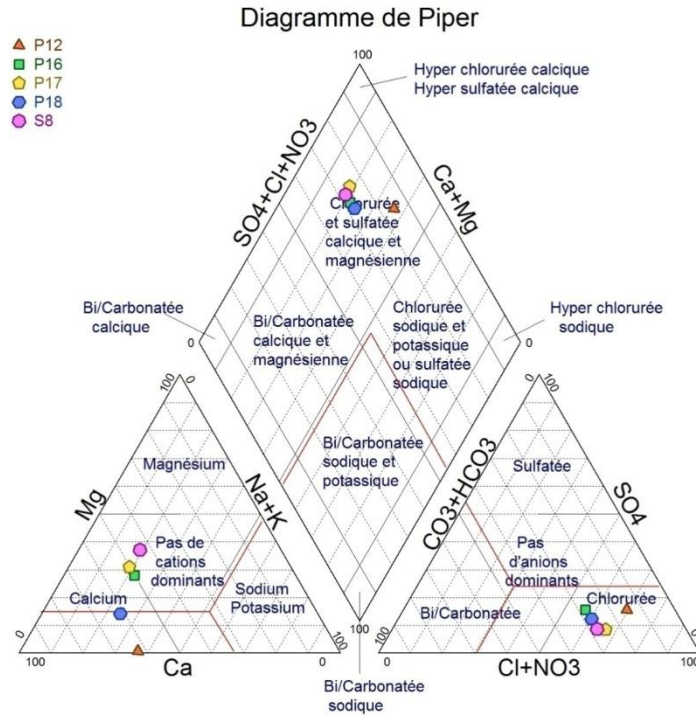


Figure III.22: Représentation du faciès chloruré calcique

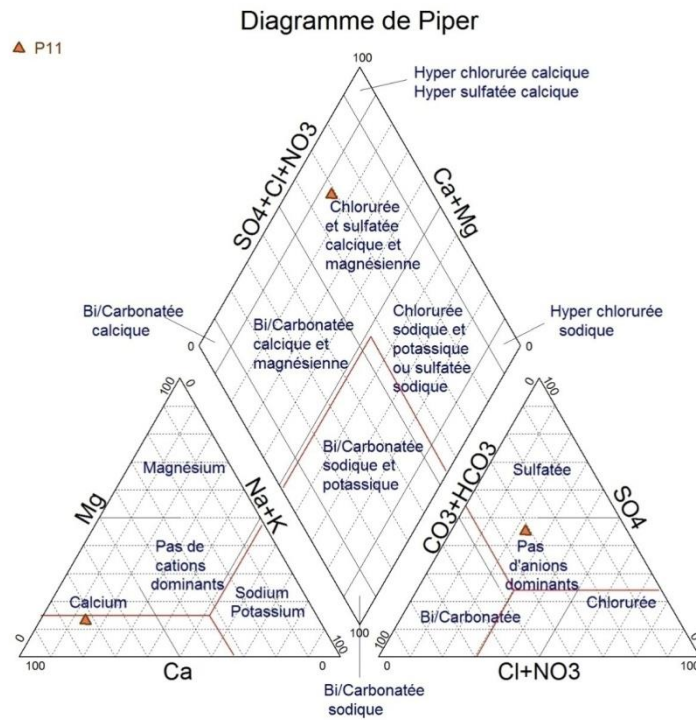


Figure III.23 : Représentation du faciès sulfaté calcique



### III.5. Qualité des eaux liée à la consommation humaine et à des fins d'irrigation

Lors de l'utilisation de l'eau hors de son milieu, sa qualité est souvent mentionnée, elle est fonction du type d'usage. Ainsi, les exigences relatives à la qualité sont différentes d'une utilisation à l'autre. Dans ce travail, seule la qualité d'eau destinée à la consommation humaine et aux activités agricoles est soulevée. Dans cette optique, nous allons profiter des données analytiques disponibles pour évaluer la qualité de notre eau. En effet, la quasi-totalité des eaux mobilisables dans la région sont utilisées pour ces deux activités. La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. La mauvaise qualité des eaux peut être induite par des activités anthropiques ou par des phénomènes naturels.

#### III.5.1. Potabilité des eaux

L'appréciation de la qualité des eaux de la zone étudiée se fait à partir des normes de qualité basées sur les paramètres physico-chimiques, bactériologiques et organoleptiques. A chaque paramètre est affecté une valeur guide ou idéale et une valeur maximale admissible (CMA).

Dans ce travail, seule la potabilité de point de vue chimique a été prise comme critère de potabilité tout en se référant aux normes algériennes.

Le tableau III.5 montre que : Dans la nappe du fossé de Sebdou nous avons des eaux potables et de bonne qualité et d'autres signalées comme non potables (qui se localisent au Sud-Est et au Sud de la nappe) (fig.III.1) (certaines concentrations en éléments chimiques sont élevées et dépassent les normes), ce qui impose un traitement antérieur avant leur utilisation.

Tableau III.5 : Potabilité des eaux de la nappe du fossé de Seb Dou.

Pts d'eau	X	Y	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	pH	R. s (mg/L)	Remarque
Normes			200	150	200	20	500	400	50	6,5 - 8,9	2000	Potable
S1	139,6	163,45	102	48	23	1	61	62	35	7,8	680	Potable
P 4	131,6	159,8	176	19	44	3	54	168	57	7,5	1000	non Potable
P 5	139	162,15	80	66	44	3	61	169	39	8,1	760	Potable
P 6	139,1	162,45	82	45	35	3	54	91	57	8,1	640	non Potable
P 9	137	160,6	120	47	64	3	182	101	66	7,9	780	non Potable
P 10	137,2	160,45	136	44	69	3	206	34	90	7,9	900	non Potable
P 12	136,5	158,5	421	3	281	4	782	254	105	7,6	2600	non Potable
P 14	132,4	158,4	68	40	44	3	118	67	46	8	760	Potable
P 15	132,5	158,15	58	45	44	3	101	24	36	7,9	620	Potable
P 16	133,5	157,8	120	40	58	4	226	96	58	7,8	940	non Potable
P 17	133,9	157,45	184	68	78	4	384	72	67	7,9	1380	non Potable
P 18	134,5	157,8	240	33	108	4	381	120	90	7,8	1700	non Potable
P 20	131,2	156,7	138	34	83	8	185	103	74	7,8	900	non Potable
P 21	131	156,3	80	34	78	4	128	82	51	7,8	640	non Potable
P 22	129,6	155,55	108	57	51	3	135	82	30	7,9	800	Potable
P 23	128,5	155,3	94	21	21	2	47	58	70	8,1	480	non Potable
P 26	134	159,5	98	9	9	1	44	24	11	8,1	580	Potable
P11	136,86	158,25	206	22	44	3	104	336	43	7,5	1240	Potable
P24	128,4	155,2	68	24	21	4	34	48	18	8,1	440	Potable
S6	135,3	158,876	86	12	14	2	41	24	37	8,4	420	Potable
S7	136,5	160,6	84	35	37	2	94	58	35	7,8	580	Potable
S8	131,2	157,5	102	52	51	1	229	48	57	8	1080	non Potable
S9	132,75	156,3	106	33	51	3	101	106	35	7,8	680	Potable
S10	131,05	156,95	130	30	69	5	155	110	70	7,5	880	non Potable
S12	130,2	156,6	112	51	51	2	145	86	35	7,7	840	Potable
S14	133,75	161,75	116	50	44	2	135	67	32	7,6	820	Potable

### III.5.2. Aptitude des eaux à des fins d'irrigation

La région de Seb Dou est caractérisée par un climat semi-aride, où la salinisation et l'alcalinisation des eaux sont les principaux risques que peuvent encourir les eaux destinées à l'irrigation. Dans le but d'évaluer ces deux risques, les résultats des analyses physicochimiques ont été projetés sur le digramme Riverside. Sur cette représentation graphique, le risque de salinité est estimé par la conductivité exprimé en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Alors que le risque d'alcalinisation des sols est quantifié par le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio).

Pour déterminer la qualité des eaux de la nappe du fossé de Sebdou à des fins d'irrigation, nous avons eu recours au calcul de quelques indices qui peuvent donner des indications pertinentes sur la qualité ainsi que l'usage auquel sont destinées ces eaux.

### III.5.2.1. Indice de Kelly's Ratio (K.R.)

Cet indice est représenté par le rapport des concentrations de  $\text{Na}^+$  (meq/L) et la somme de  $\text{Ca}^+$  (meq/L) et  $\text{Mg}^+$  (meq/L). Il est parmi les indices constituant une base pour la détermination de l'aptitude des eaux à l'irrigation.

$$K.R. = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$$

Si :  $K.R. < 1$  : l'eau est considérée comme bonne pour l'irrigation.

Si :  $K.R. \geq 1$  : l'eau est mauvaise pour l'irrigation (elle est déconseillée).

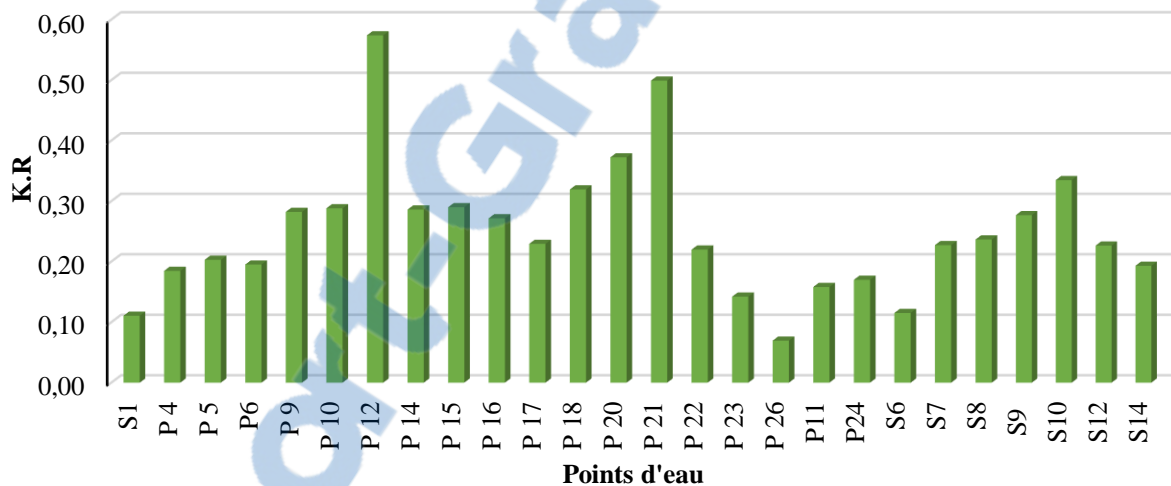


Figure III.24: Valeurs des KR

Le calcul de l'indice de Kelly's Ratiomontre des valeurs inférieures à 1 ce qui confère à ces eaux une bonne qualité vis-à-vis de son utilisation en irrigation.

### III.5.2.2. Pourcentage de Sodium (% $\text{Na}^+$ ) (classification des eaux par la méthode de Wilcox)

Le %  $\text{Na}^+$  peut être calculé par la relation suivante :

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

La répartition des classes en fonction de cet indice est donnée par le tableau III.6.

Tableau III.6 : Classification des eaux d'irrigation selon le %Na

Indice	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

Le calcul du % Na pour les eaux de notre zone d'étude est reporté sur le tableau III.7. Ces données ont permis de faire une représentation graphique (fig.III.25).

Tableau III.7 : Classification des eaux d'irrigation du fossé de Sebdou selon le %Na

Point d'eau	%Na <sup>+</sup>	Résultats	Point d'eau	%Na <sup>+</sup>	Résultats
S1	13.79	Très bonne	P21	41.84	Admissible
P4	19.42	Très bonne	P22	24.66	Bonne
P5	24.36	Bonne	P23	16.67	Très bonne
P6	23.03	Bonne	P26	8.55	Très bonne
P9	28.63	Bonne	P11	17.09	Très bonne
P10	28.57	Bonne	P24	21.37	Bonne
P12	40.19	Admissible	S6	14.04	Très bonne
P14	30.32	Bonne	S7	24.68	Bonne
P15	31.33	Bonne	S8	25.24	Bonne
P16	27.92	Bonne	S9	27.98	Bonne
P17	24.55	Bonne	S10	31.62	Bonne
P18	29.09	Bonne	S12	24.54	Bonne
P20	34.60	Bonne	S14	21.70	Bonne

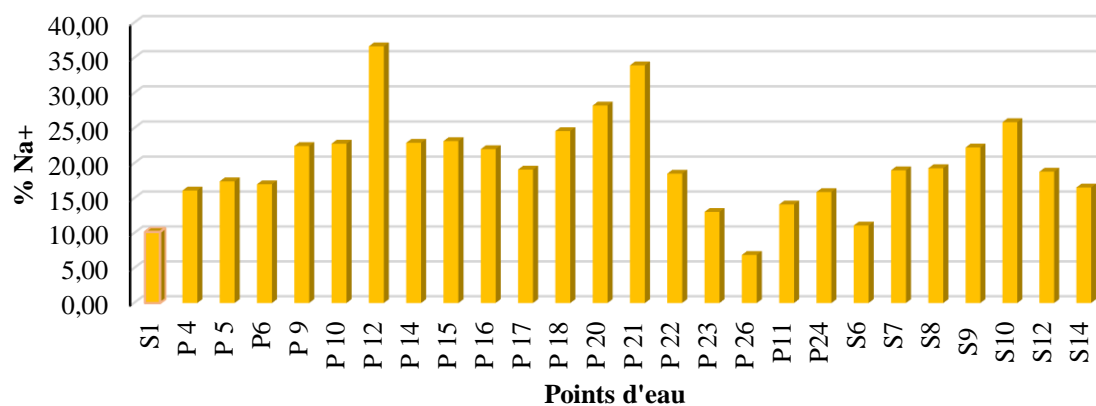


Figure III.25: Variation du pourcentage de sodium

Le calcul du pourcentage en sodium montre que les points d'eau sont rangés dans les classes 1, 2 et 3, donc il est permis d'irriguer avec ces eaux.

Il est connu que le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium (S. Dahali, 2013). Les études menées par Wilcox sur cette question ont abouti à un diagramme donnant la classification des eaux en fonction du pourcentage en Sodium et de la conductivité électrique calculée (figure III.25).

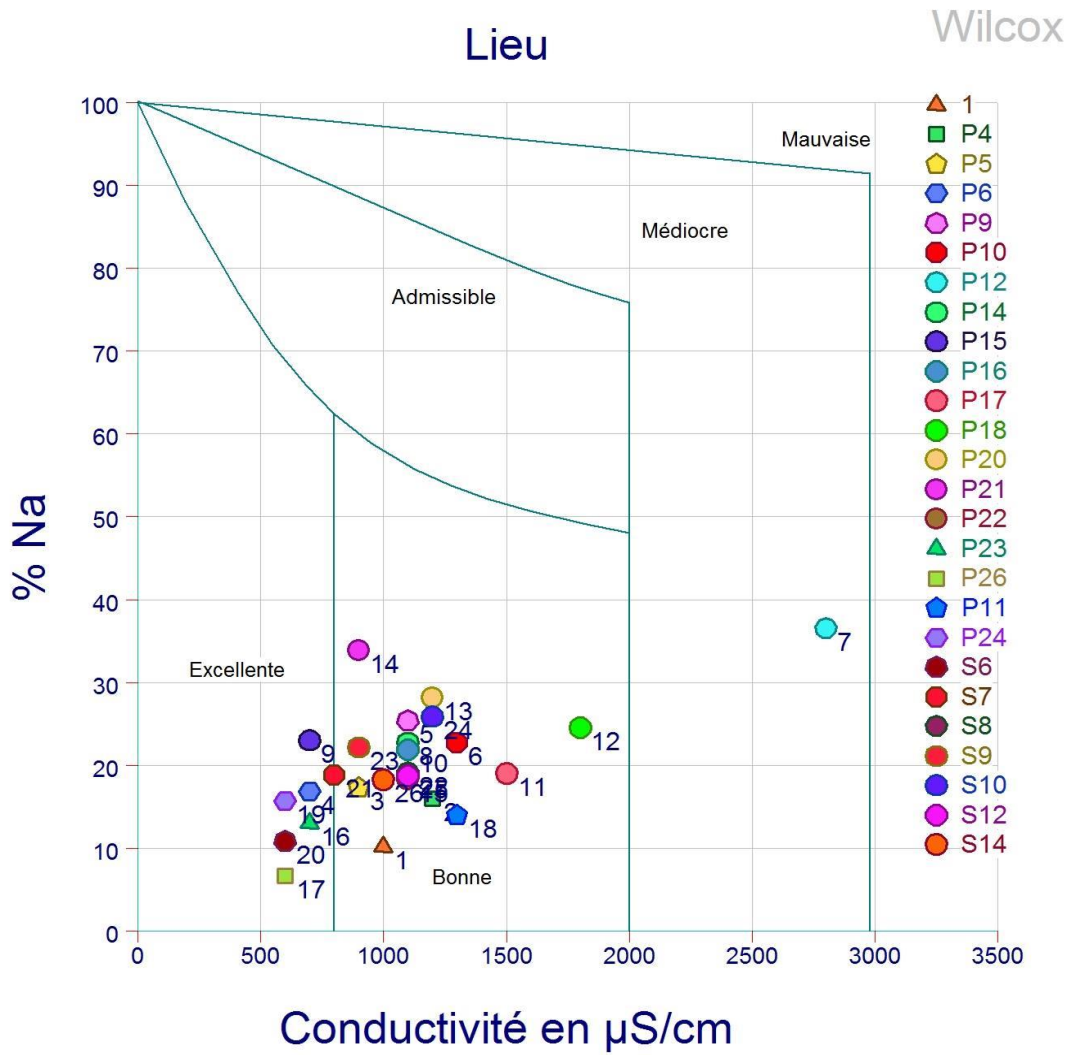


Figure III.26: Diagramme de Wilcox

Le diagramme confirme la bonne qualité des eaux et leur aptitude pour des utilisations en agriculture, toute fois, nous remarquons que le point d'eau 7 situé à Dermam est qualifié de médiocre.

**III.5.2.3. Sodium Absorption Ratio (S.A.R.) ou Pouvoir Alcalinisant**

La toxicité en sodium a lieu avec son accumulation dans les tissus des plantes. Une augmentation du SAR des eaux d'irrigation augmente celle des solutions du sol et de ce fait le sodium échangeable du sol (Isaac St. & al. 2009 inMoudjibA., 2010). Ce dernier coefficient est calculé ainsi :

$$S.A.R. = \frac{rNa^+}{\sqrt{(rCa^{2+} + rMg^{2+})/2}}$$

Avec :



- SAR < 10 : Eaux excellentes
- $10 \leq \text{SAR} \leq 18$  : Eaux bonnes
- $18 < \text{SAR} \leq 26$  : Eaux convenables
- SAR > 26 : Eaux médiocres

Selon ces normes, la qualité des eaux rencontrées au niveau du fossé de Sebdou peut être classée comme suit :

Tableau III.8 : Classification des eaux d'irrigation selon le SAR

Point d'eau	SAR	Résultats	Point d'eau	SAR	Résultats
S1	2.66	Eau excellente	P21	10.33	Eau bonne
P4	4.46	Eau excellente	P22	5.61	Eau excellente
P5	5.15	Eau excellente	P23	2.77	Eau excellente
P6	4.39	Eau excellente	P26	1.23	Eau excellente
P9	7	Eau excellente	P11	4.12	Eau excellente
P10	7.27	Eau excellente	P24	3.10	Eau excellente
P12	19.30	Eau convenable	S6	2	Eau excellente
P14	5.99	Eau excellente	S7	1.21	Eau excellente
P15	6.13	Eau excellente	S8	5.81	Eau excellente
P16	6.48	Eau excellente	S9	6.12	Eau excellente
P17	6.95	Eau excellente	S10	7.71	Eau excellente
P18	9.24	Eau excellente	S12	5.65	Eau excellente
P20	8.95	Eau excellente	S14	4.83	Eau excellente

Le report sur diagramme de Richards (figure III.27), a révélé les résultats mentionnés au tableau III.9.

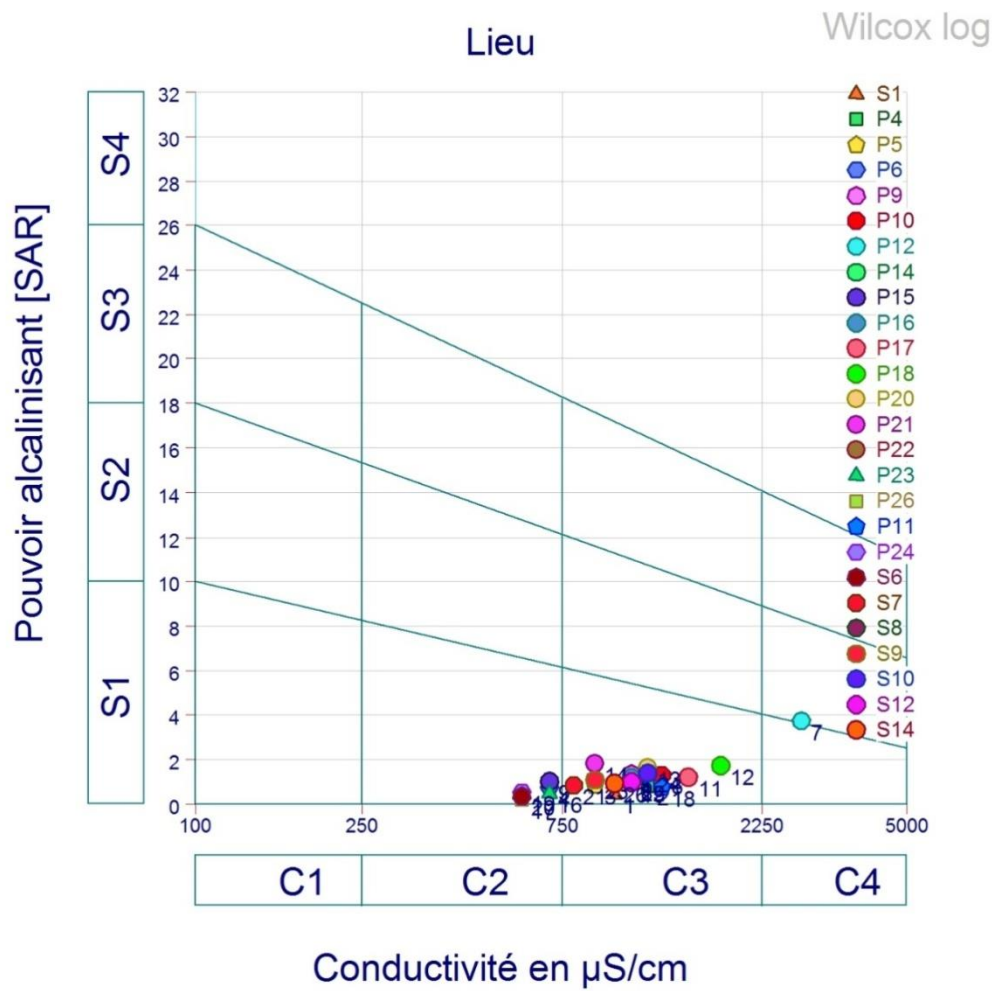


Figure III.27 : Diagramme de Richards

Tableau III.9 : Classification de Richards  
(in Baba Hamed K. & Kerzabi R. 1991).

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation	Points d'eau
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.	S6- P23 – P24 – P26
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.	P18- P20- P21- S10- S12 - S14 - S1 - P4- P5- P6- P9- P10-P14 - P15- P16- P17- P22 - P11 -- S7- S8- S9
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.	P12
5	Mauvaise	C3 – S4 C4 – S3 C4 – S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisé sous certaines conditions : sol très perméable, bon lessivage et plantes tolérantes très bien au sel.	

### III.6. Conclusion

\*- L'étude hydro-chimique montre l'existence de trois classes importantes : les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (faciès prédominant), les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes (au centre et vers l'exutoire), et la classe des eaux Chlorurées calciques (Sud-Est).

\*- Les concentrations les plus élevées sont rencontrées au Sud-Est de la nappe.

\*- L'acquisition de la minéralisation des eaux au niveau de la plaine du fossé de Seb dou est dépendante, en premier lieu de la lithologie du fossé qui est caractérisé par une hétérogénéité, La discrimination de ces différentes origines peut s'avérer utile dans un contexte où les nitrates représentent un indicateur de la qualité des eaux souterraines.

\*- Le test des eaux pour des fins d'irrigation montre qu'elles sont globalement utiles pour cet usage.

\*- La confrontation des analyses chimiques des différents points d'eau avec les normes chimiques de potabilité des eaux algériennes montrent que 50% des eaux ne sont pas



potables. Il est donc conseiller de traiter ces eaux si elles sont destinées à la consommation pour lutter contre tout type d'intoxication ou de maladies.

\*- Il est nécessaire de contrôler la qualité de ces eaux continuellement et de détecter l'origine de cet enrichissement en éléments désagréables (sources de pollution) et d'essayer au moins de les réduire.

\*- L'utilisation des engrais est un facteur major dans la pollution de ce type de nappe.

\*- Les eaux usées domestiques ou industrielles rejetées doivent subir un traitement préalable avant leur rejet (prenons comme exemple les eaux rejetées par ENADITEX de Sebdo).

### Introduction

L'analyse statistique des données consiste en un ensemble de techniques qui ont pour objet de faciliter la visualisation des données, de révéler leur structure sous-jacente et d'extraire certaines variables importantes. Il existe de nombreuses techniques qui relèvent de l'analyse exploratoire. Tout d'abord des techniques de base qui n'exigent que des calculs simples comme les diagrammes, les histogrammes, les boîtes à moustache (*boxplot*), les diagrammes de série chronologique. A côté de ces techniques, on trouve des méthodes d'analyses exploratoires qui exigent des calculs plus complexes comme l'analyse factorielle en composantes principales, l'analyse des correspondances ou encore l'analyse hiérarchique par cluster.

La classification est un des nombreux domaines de la fouille de données qui vise à extraire l'information à partir de grands volumes de données en utilisant différentes techniques computationnelles de l'apprentissage, des statistiques et des reconnaissances des formes (Abdellaoui, 2014).

Classifier, c'est regrouper entre eux des objets similaires selon certains critères. Les diverses techniques de classification visent toutes à répartir  $n$  individus, caractérisés par  $p$  variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$  en un certain nombre  $m$  de sous-groupes aussi homogènes que possible, chaque groupe étant bien différencié des autres.

Ce chapitre vise à répondre à un certain nombre de problèmes sur lesquelles vont s'articuler les différentes parties :

- Définir les paramètres statistiques d'une série de données hydrochimiques par l'utilisation des diagrammes en boîtes,
- Faire une classification hiérarchique ascendante des données,
- Utiliser une analyse en composante principale ACP,
- Faire une modélisation permettant de mieux cerner cette qualité d'eau.

Nous nous sommes attachés à traiter et à structurer les résultats des analyses chimiques des eaux pour les rendre plus parlants, plus explicites à travers l'usage de représentations graphiques, de tableaux ou de matrices de résultats. L'interprétation consistera à commenter les graphiques, à dégager les relations qui peuvent être mises en évidence ou encore à confirmer des intuitions qui sont apparues au chapitre précédent.

### IV.1. Diagramme en boîtes à moustaches

Avant d'utiliser des méthodes d'analyse avancées comme par exemple une analyse discriminante ou une régression multiple, il est nécessaire dans un premier temps, de découvrir les données afin d'identifier des tendances, de repérer des anomalies ou tout simplement de disposer d'informations essentielles telles que le minimum, le maximum, ou la moyenne d'un échantillon de données.

#### IV.1.2. Définition

La boîte à moustache est une invention de John Wilder Tukey (1915-2000) en 1977 pour représenter synthétiquement une distribution de données.

L'expression boîte à moustaches encore appelée boîte à pattes ou diagrammes en boîtes est une traduction de Box and Whiskers plot.

Cette représentation graphique est un moyen simple qui permet de comparer rapidement différentes dispersions entre elles.

### IV.1.3. Objectif

La boîte à moustaches permet la présentation de cinq valeurs qui résument les données : le minimum, les 3 quartiles Q1, Q2 (médiane), Q3 et le maximum.

Il s'agit d'une modalité de représentation intéressante car elle permet de mettre en évidence la dispersion des données sur la base de calculs très simples à réaliser. Ainsi, la valeur médiane qui correspond au quartile 2 divise la série de données en deux de manière à ce qu'il y ait autant de valeurs en dessous de la médiane qu'au-dessus. Le quartile 3 partage le groupe du haut en deux groupes égaux et le quartile 1 partage le groupe du bas en deux parties égales. Pour réaliser les boîtes à moustaches nous avons eu recours au logiciel de statistiques (Stastica.12).

Ce genre de diagramme permet de visualiser rapidement comment se fait la distribution des nombres dans une série donnée. C'est très pratique avec les séries comprenant beaucoup de valeurs. Ainsi :

- plus le corps de la boîte est petit, plus les valeurs « du milieu » sont homogènes, plus les moustaches sont grandes, plus les valeurs sont dispersées.
- plus la boîte est à gauche, plus les valeurs de la série sont basses.

Pour ce genre de données, la « boîte à moustaches » est plus parlante qu'un histogramme ou un graphique en bâtons.

### IV.1.4. Représentation des boîtes à moustaches

#### IV.1.4.1. Représentation de l'ensemble des points d'eau

Le tableau IV.1 résume les paramètres statistiques de nos séries de données hydrochimiques

Tableau IV.1 : Paramètres statistiques des eaux du fossé de Sebdou

Paramètres statistiques	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nb. d'observations	26	26	26	26	26	26	26	26
Minimum	2,900	0,250	0,390	0,020	3,210	0,950	0,500	0,170
Maximum	21,050	5,660	12,210	0,200	7,500	22,020	7,000	1,690
1er Quartile	4,225	2,088	1,678	0,050	4,243	1,710	1,200	0,560
Médiane	5,350	2,870	2,190	0,070	5,255	3,460	1,700	0,780
3ème Quartile	6,725	3,938	2,945	0,100	5,993	5,188	2,185	1,075
Moyenne	6,375	3,021	2,541	0,075	5,173	4,533	1,991	0,831
Variance (n-1)	13,742	1,891	4,869	0,001	1,227	19,525	2,170	0,136
Ecart-type (n-1)	3,707	1,375	2,207	0,037	1,108	4,419	1,473	0,368

L'analyse de la figure IV.1, fait ressortir le caractère dominant du faciès bicarbonaté calcique et suivi du faciès chloruré calcique. Ces résultats confirment ceux déjà trouvés par la formule caractéristique, c'est-à-dire les (88%) représentés par rapport à la totalité des échantillons qui est de 26 (chapitre précédent).

Là aussi, l'allure des boîtes donne une idée sur la dispersion spatiale des teneurs, en effet, les chlorures présentent une grande variabilité, suivis du calcium, des bicarbonates et du magnésium. Ceci peut s'expliquer par la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration (dans notre cas les calcaires, les dolomies, les marnes et les alluvions, et la vitesse de percolation de l'eau dans le sol.

Nous voyons aussi clairement que les médianes des bicarbonates et du calcium sont assez proches mais une dispersion plus grande pour le calcium comme en témoigne l'étendue de la boîte.

Les sulfates et les nitrates sont caractérisés par une distribution plus ou moins symétriques, la place de la médiane est au milieu de la boîte, mais ces deux derniers présentent une faible dispersion.

Les valeurs du potassium sont assez homogènes de telle façon que la boîte devient très étroite et écrasée.

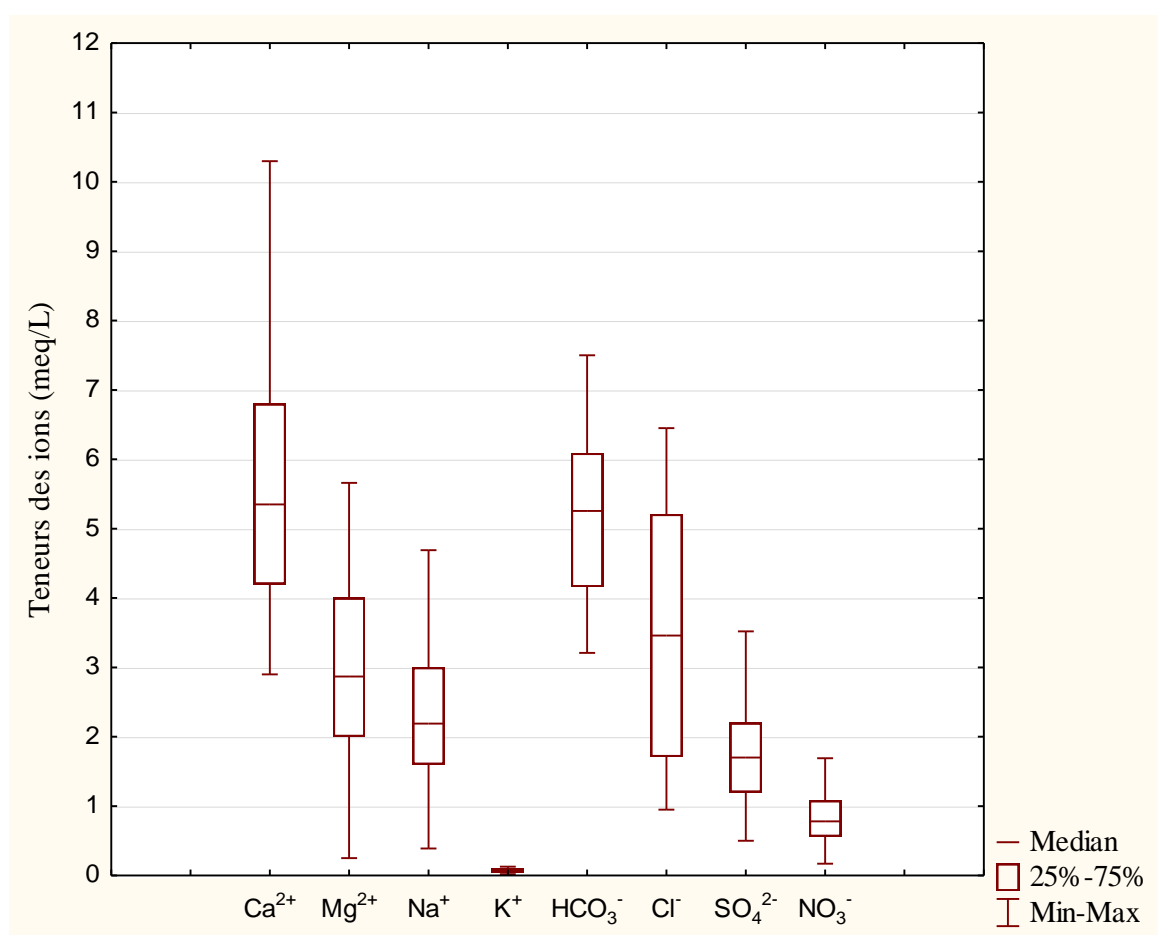


Figure IV.1 : Boite à moustache de l'ensemble des échantillons.

#### IV.1.4.2. Représentation des échantillons pris selon les 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)- Bicarbonaté calcique

Il apparaît clairement sur la figure IV.2, que la variable  $\text{HCO}_3^-$ , possède la boîte la plus élevée pour les anions et le  $\text{Ca}^{2+}$  pour les cations. Le faciès est bien bicarbonaté calcique pour les échantillons: S1,P4,P6,P9,P10, P14,P20,P21,P22,P23,P26,P24,S6, S7,S9,S10,S12,S14 confirmant ainsi les formules caractéristiques (chapitre III).

Nous remarquons aussi que les chlorures avec l'étendue de leur boîte révèlent une forte dispersion, il en est de même pour le calcium, magnésium, sodium et bicarbonates. Une plus faible dispersion est observée pour les sulfates et les nitrates.

Tableau IV.2 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées calciques

Paramètres statistiques	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
Nb. d'observations	18	18	18	18	18	18	18	18
Minimum	3,40	0,75	0,39	0,02	3,52	0,95	0,50	0,17
Maximum	8,80	4,75	3,60	0,20	7,50	5,80	3,50	1,45
1er Quartile	4,23	2,09	1,13	0,05	4,72	1,52	1,20	0,56
Médiane	5,20	2,83	2,04	0,07	5,45	3,08	1,55	0,67
3ème Quartile	5,95	3,73	2,64	0,07	6,26	4,02	2,05	1,03
Moyenne	5,29	2,84	1,96	0,07	5,46	3,00	1,58	0,76
Variance (n-1)	1,91	1,30	0,92	0,00	1,23	2,46	0,54	0,12
Ecart-type (n-1)	1,38	1,14	0,96	0,04	1,11	1,57	0,74	0,34

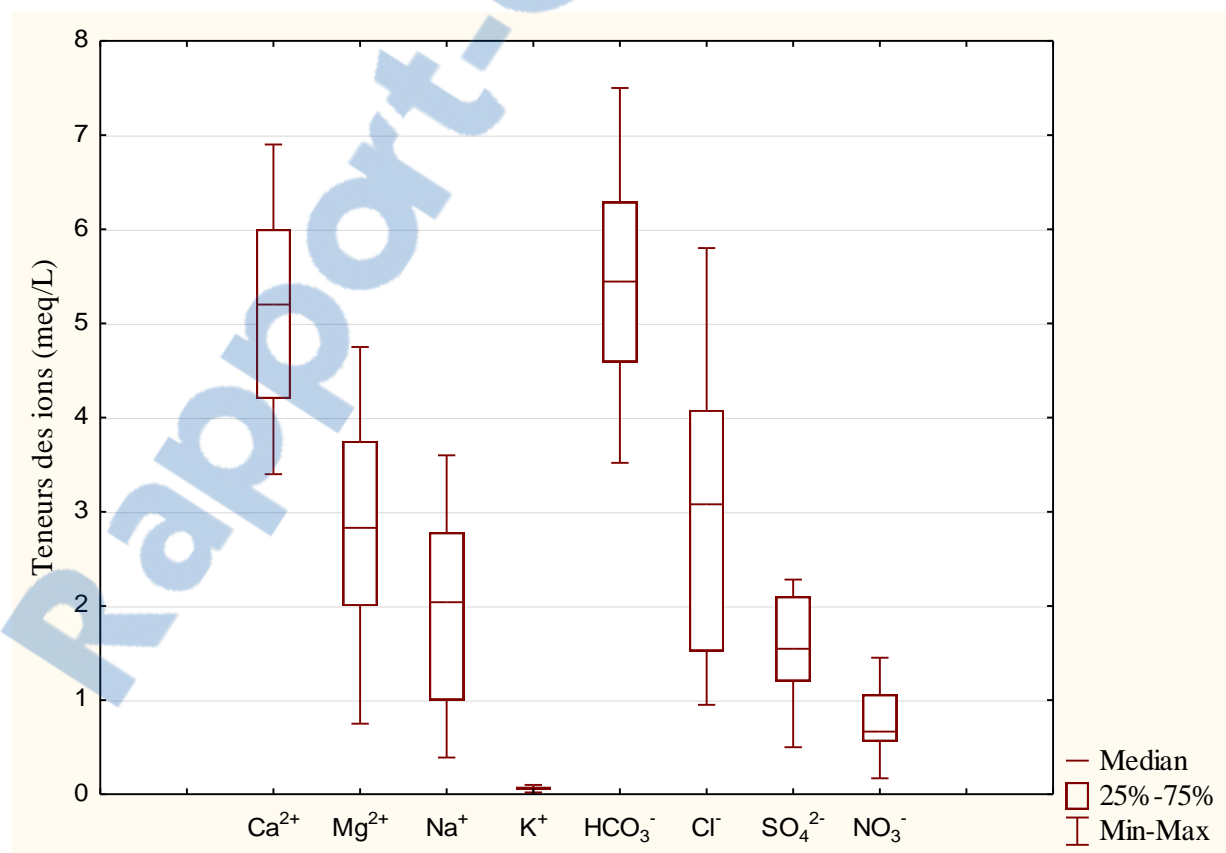


Figure IV.2 : Représentation des eaux à faciès bicarbonaté calcique.

**b)- Bicarbonaté magnésien**

La dispersion des séries d'ions est différente, ainsi les bicarbonates et le magnésium ont des médianes très proches mais une dispersion plus grande pour le magnésium. Tous les groupes sont caractérisés par une distribution symétrique comme en témoigne la place de la médiane au milieu de la boîte. Pour leur part le sodium, le potassium et les nitrates sont caractérisés par une dispersion quasi nulle.

Tableau IV.3 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées magnésiennes

Paramètres statistiques	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nb. d'observations	2	2	2	2	2	2	2	2
Minimum	2,90	3,75	1,91	0,07	4,06	1,71	0,50	0,58
Maximum	4,00	5,50	1,91	0,07	5,19	2,84	3,52	0,62
1er Quartile	3,18	4,19	1,91	0,07	4,34	1,99	1,26	0,59
Médiane	3,45	4,63	1,91	0,07	4,63	2,28	2,01	0,60
3ème Quartile	3,73	5,06	1,91	0,07	4,91	2,56	2,77	0,61
Moyenne	3,45	4,63	1,91	0,07	4,63	2,28	2,01	0,60
Variance (n-1)	0,61	1,53	0,00	0,00	0,64	0,64	4,56	0,00
Ecart-type (n-1)	0,78	1,24	0,00	0,00	0,80	0,80	2,14	0,03

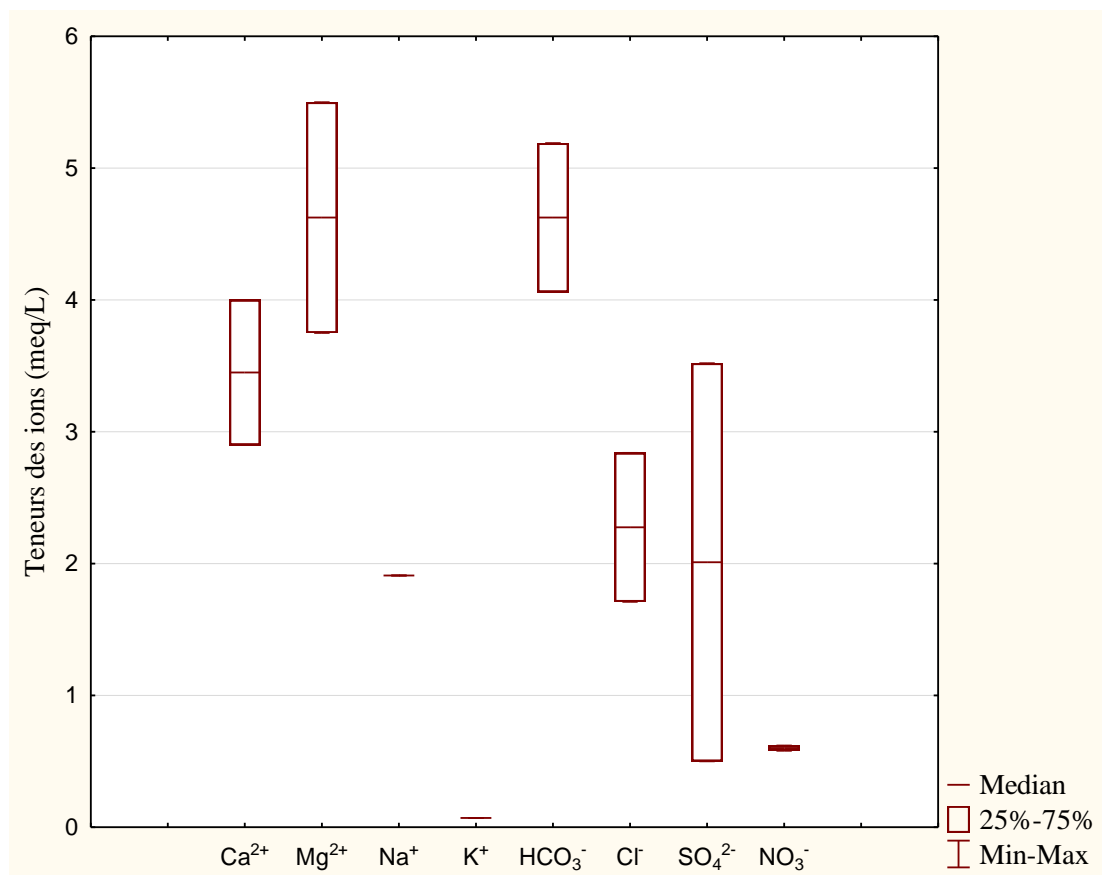


Figure IV.3 : Représentation des eaux à faciès bicarbonaté magnésien

c)- Sulfaté calcique

La boîte à moustache est représentée par seulement des traits (fig. IV.4), car nous avons un seul échantillon dans ce groupe. Toutefois, il apparaît clairement que les sulfates et le calcium prédominent.

Tableau IV.4 : Paramètres statistiques des eaux sulfatées calciques

Statistique	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nb. d'observations	1	1	1	1	1	1	1	1
Minimum	10,30	1,83	1,91	0,07	4,93	2,92	7,00	0,69
Maximum	10,30	1,83	1,91	0,07	4,93	2,92	7,00	0,69
1er Quartile	10,30	1,83	1,91	0,07	4,93	2,92	7,00	0,69
Médiane	10,30	1,83	1,91	0,07	4,93	2,92	7,00	0,69
3ème Quartile	10,30	1,83	1,91	0,07	4,93	2,92	7,00	0,69
Moyenne	10,30	1,83	1,91	0,07	4,93	2,92	7,00	0,69
Variance (n-1)								
Ecart-type(n-1)								

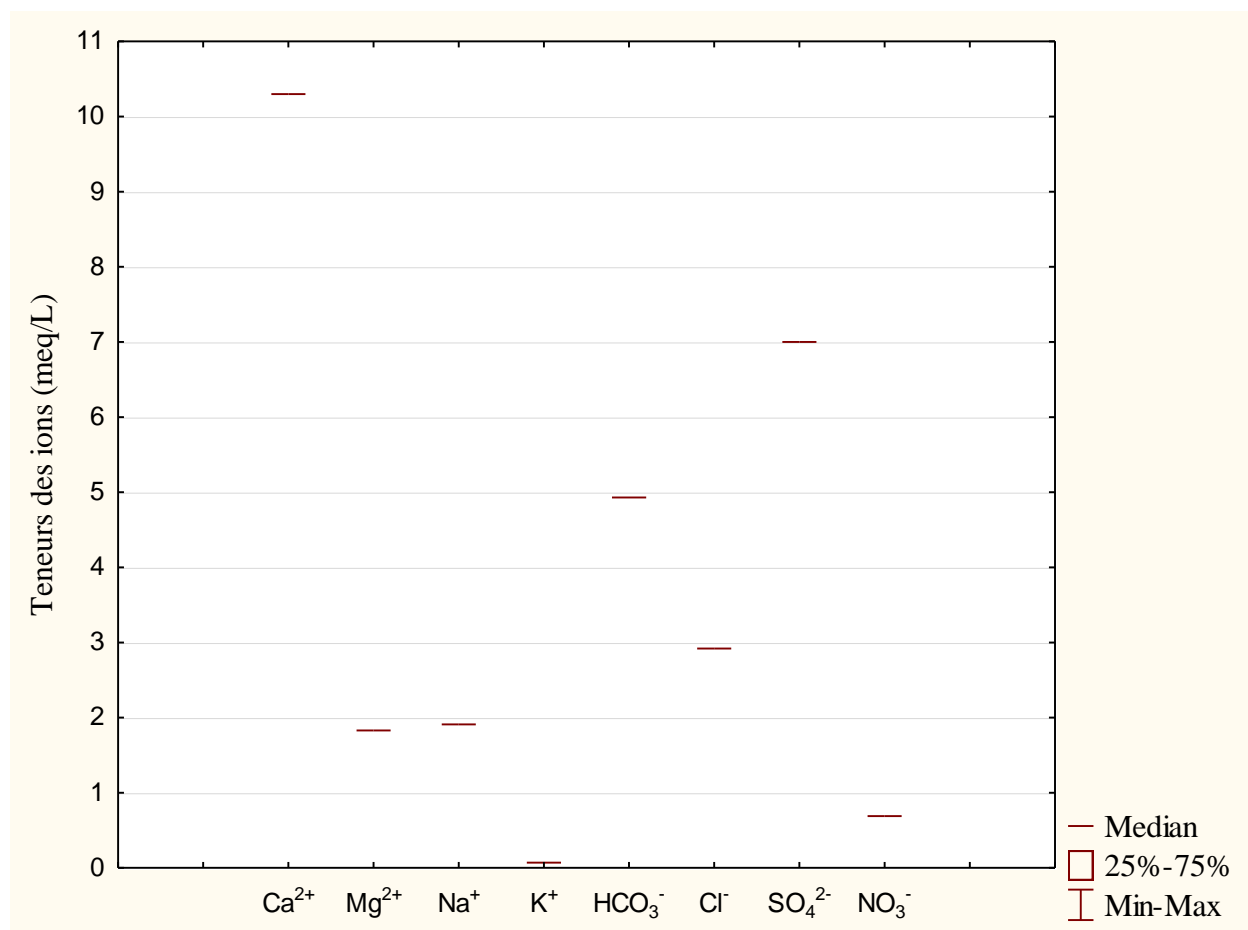


Figure IV.4 : Représentation des eaux à faciès sulfaté calcique

d)- Chloruré calcique

Les séries (figure IV.5) ont des médianes distinctes, une grande dispersion est observé pour le calcium, suivi des chlorures. Les autres groupes par contre, sont caractérisés par une distribution nettement plus dissymétrique.

Tableau IV.5 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées calciques

Paramètres statistiques	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nb. d'observations	5	5	5	5	5	5	5	5
Minimum	5,10	0,25	2,21	0,02	3,21	6,36	1	0,91
Maximum	21,05	5,66	12,21	0,10	5,60	22,02	5,29	1,69
1er Quartile	6,00	2,75	2,52	0,10	3,60	6,45	1,50	0,93
Médiane	9,20	3,33	3,39	0,10	4,49	10,73	2,00	1,08
3ème Quartile	12,00	4,33	4,69	0,10	5,18	10,81	2,50	1,45
Moyenne	10,67	3,26	5,00	0,08	4,42	11,27	2,46	1,21
Variance (n-1)	41,13	4,06	17,15	0,00	1,03	40,85	2,82	0,12
Ecart-type (n-1)	6,41	2,01	4,14	0,04	1,01	6,39	1,68	0,34

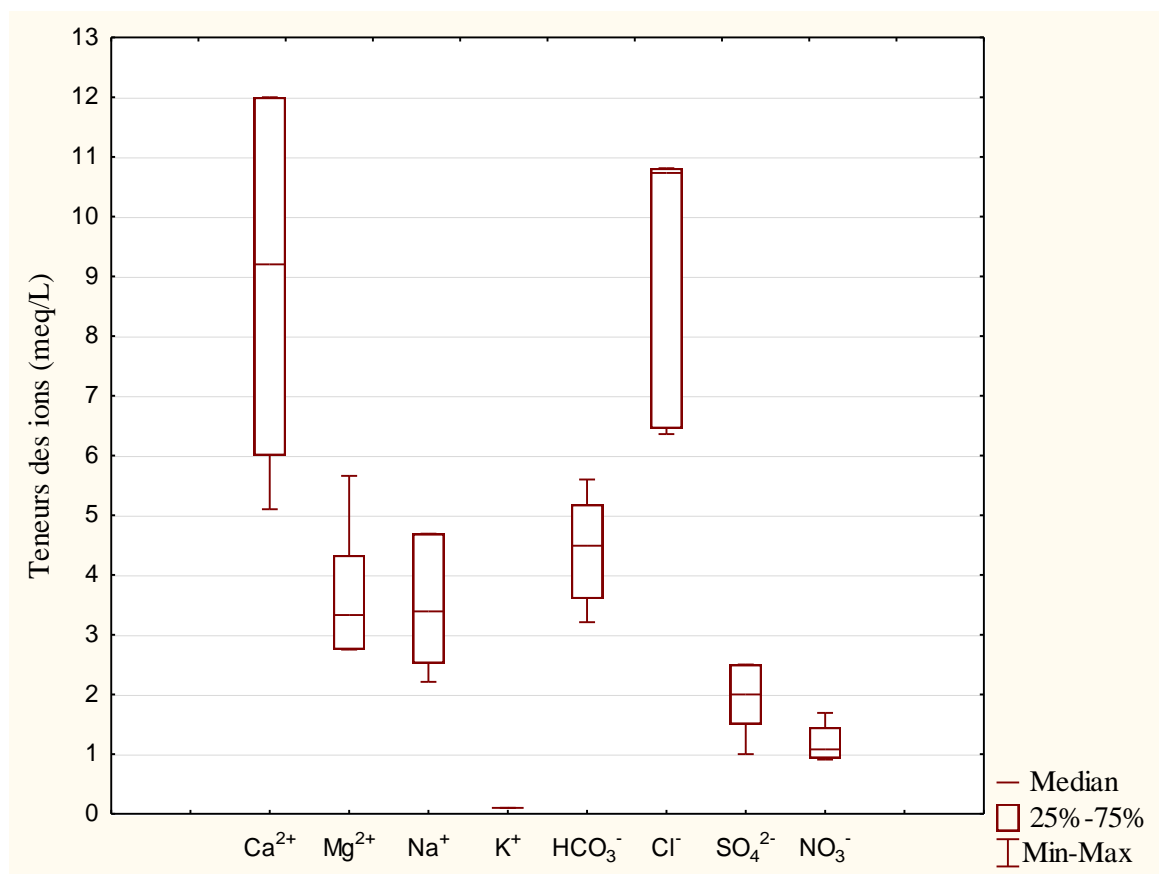


Figure IV.5 : Représentation des eaux à faciès chloruré calcique



## IV.2. Classification Ascendante Hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (C.A.H.) a pour objectif de constituer des groupes homogènes d'objets (classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables, ou à partir d'une matrice décrivant la similarité ou la dissimilarité entre les objets (Source : logiciel XLSTAT).

La CAH permet de construire une hiérarchie entière des objets sous la forme d'un "arbre" dans un ordre ascendant. L'un des résultats est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données. On peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est lente. Par ailleurs, le dendrogramme peut devenir illisible si on l'utilise avec trop de données.

La CAH permet donc d'obtenir une représentation schématique simple d'un tableau de données complexe à partir d'une typologie (segmentation), c'est à dire d'une partition des  $n$  individus dans des classes, définies par l'observation de  $p$  variables.

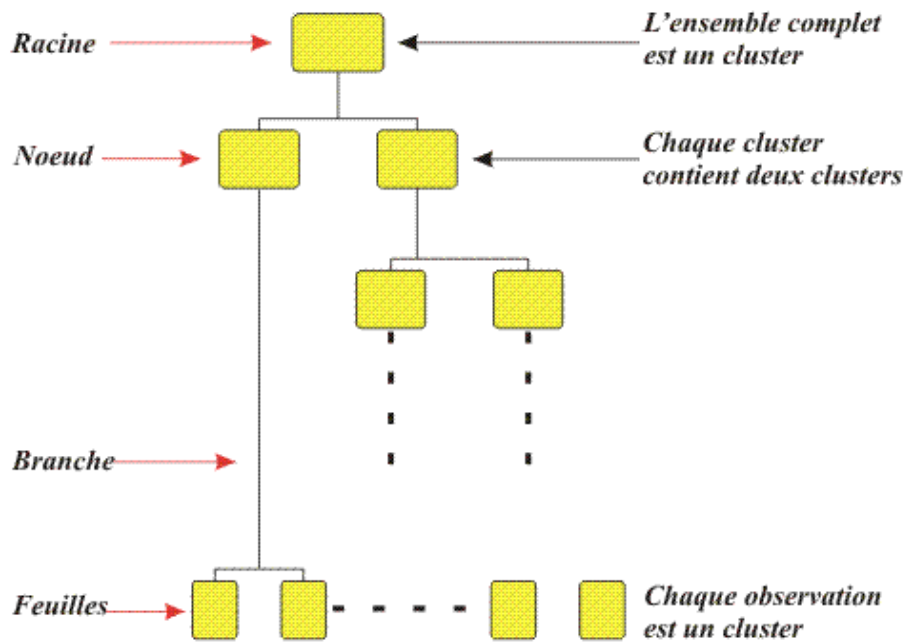
### IV.2.1. Principe de la C.A.H.

La CAH est une méthode de classification itérative dont le principe est simple :

Nous commençons par calculer la dissimilarité entre les  $N$  objets. Puis nous regroupons les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets. Nous calculons ensuite la dissimilarité entre cette classe et les  $N-2$  autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis nous regroupons les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. Nous continuons ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme) (fig. IV.6), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions.

Nous pouvons alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs.



**Hierarchie**

Figure IV.6 : Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

**IV.2.2. Présentation de l'algorithme de la C.A.H.**

- \*- 1<sup>ère</sup> phase : Initialisation de l'algorithme
  - Les classes initiales = n singletons individus,
  - Calcul de la matrice des distances des individus 2 à 2.
- \*- 2<sup>ème</sup> 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.

Nous pourrions résumer les étapes de la C.A.H. comme représentées sur la figure IV.7 :

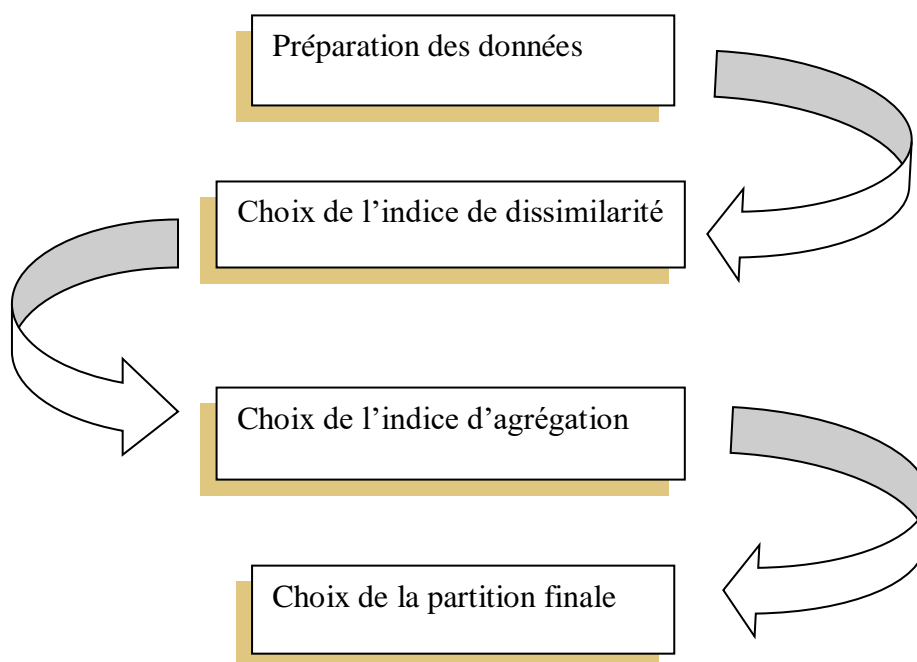


Figure IV.7 : Etapes de la classification ascendante hiérarchique

### IV.2.3. 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.2.4. 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 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.8), tel que :

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

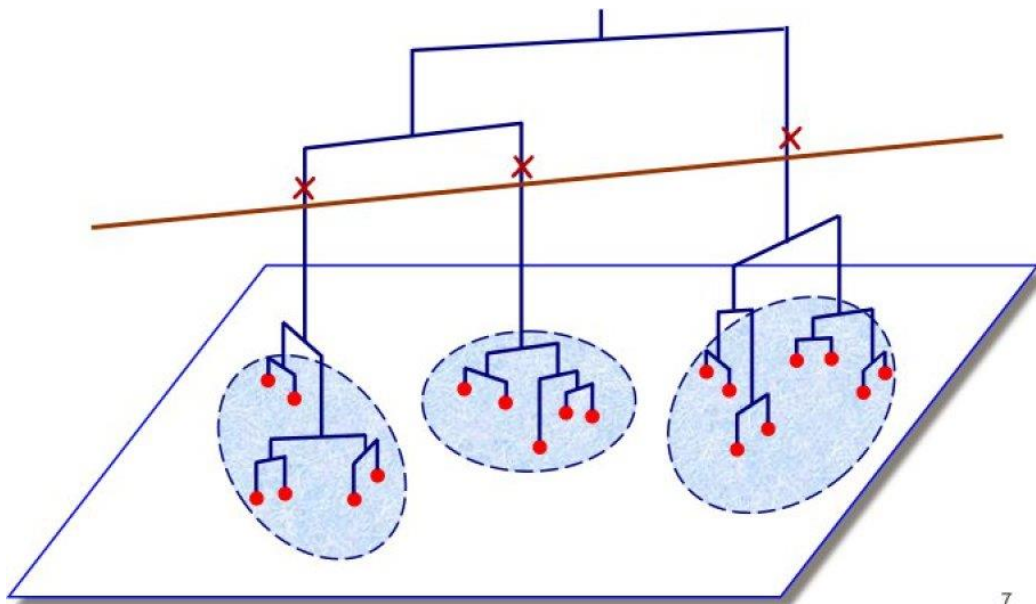


Figure IV.8 : Représentation des classes en fonction de la CAH

#### IV.2.5. 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
<b>Quantitative data</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrélation de Pearson,</li> <li>- Corrélation de Spearman</li> <li>- Corrélation de Kendall</li> <li>- Inertie</li> <li>- Covariance (n)</li> <li>- Covariance (n-1)</li> <li>- Similarité générale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distance euclidienne</li> <li>- Distance du khi<sup>2</sup></li> <li>- Distance de Manhattan</li> <li>- Dissimilarité de Pearson</li> <li>- Dissimilarité de Spearman</li> <li>- Dissimilarité de Kendall</li> <li>- Dissimilarité générale</li> </ul>
<b>données binaires (0/1)</b>	<p><b>Similarité/Dissimilarité :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indice de Jaccard</li> <li>- Indice de Dice</li> <li>- Indice de Sokal &amp;Sneath</li> <li>- Indice de Rogers &amp;Tanimoto</li> <li>- Indice de Sokal &amp;Michener</li> <li>- Indice de Sokal &amp;Sneath</li> <li>- Phi de Pearson</li> <li>- Indice de Ochiai</li> <li>- IndicedeKulczinski</li> </ul>	<p><b>Similarité/Dissimilarité</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indice de Jaccard</li> <li>- Indice de Dice</li> <li>- Indice de Sokal &amp;Sneath</li> <li>- Indice de Rogers &amp;Tanimoto</li> <li>- Indice de Sokal &amp; Michener</li> <li>- Indice de Sokal &amp; Sneath</li> <li>- Phi de Pearson</li> <li>- Indice de Ochiai</li> <li>- Indice de Kulczinski</li> </ul>

Source : logiciel XLSTAT

#### IV.2.6. Application de la méthode C.A.H. aux données des eaux du fossé de Sebdou

Nous allons appliquer cette méthode (C.A.H.) pour les eaux de l'aquifère plio-quaternaire du fossé de Sebdou, pour essayer de regrouper 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.

Nous avons utilisé le code de calcul XLSTAT, afin de regrouper les puits ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 26 (puits) et les variables de 08 (ions majeurs : décrits au chapitre précédent).

La méthode du lien complet a été choisi 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.

Les résultats de cette méthode sont comme suit :

##### IV.2.6.1- Statistiques des nœuds

Nous avons réuni dans le tableau IV.8, 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	899,946	26
2	424,655	25
3	355,042	23
4	312,770	22
5	230,913	14
6	212,645	8
7	186,604	7
8	164,861	5
9	141,329	6
10	120,370	4
11	119,758	7
12	112,814	2
13	93,011	6
14	84,285	3
15	82,134	2
16	64,738	3
17	63,364	3
18	58,975	2
19	58,043	2
20	48,775	2
21	41,988	2
22	40,137	3
23	35,270	2
24	34,814	3
25	19,748	2

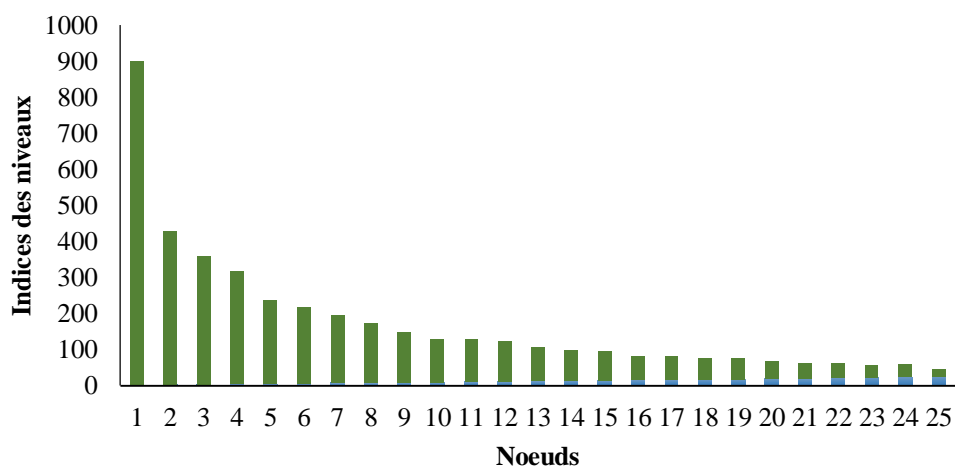


Figure IV.9 : Diagramme des niveaux

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.10).

#### IV.2.6.2. 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 six classes (fig. IV.10 et IV.11) (selon leur dissimilarité en teneurs en ions majeurs) pour une troncature correspondant à une inertie de 212,645.

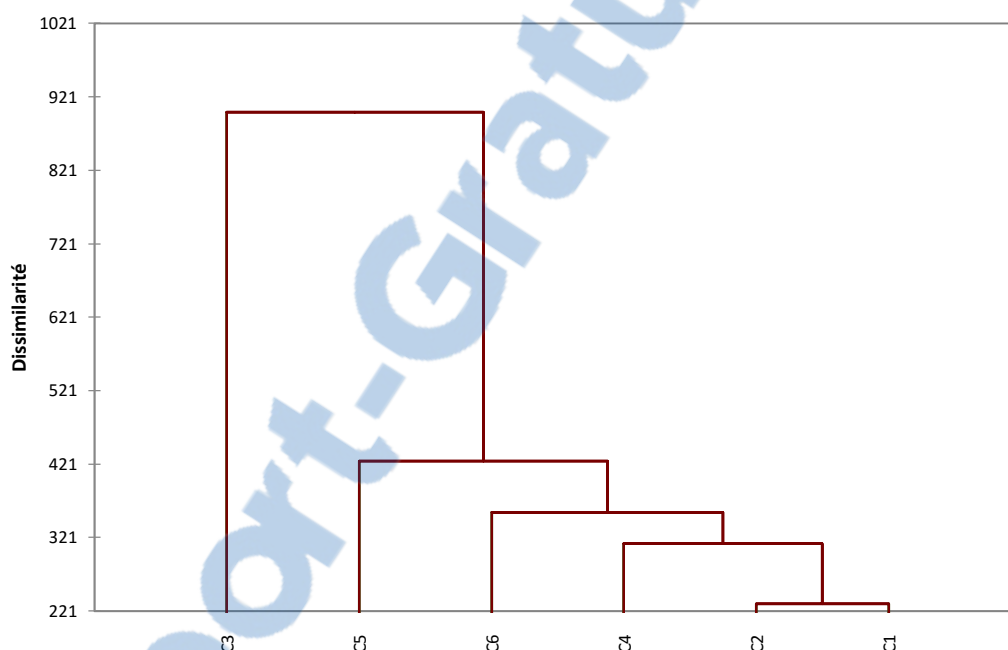


Figure IV.10 : Hiérarchie des partitions obtenues par C.A.H (dendrogramme)

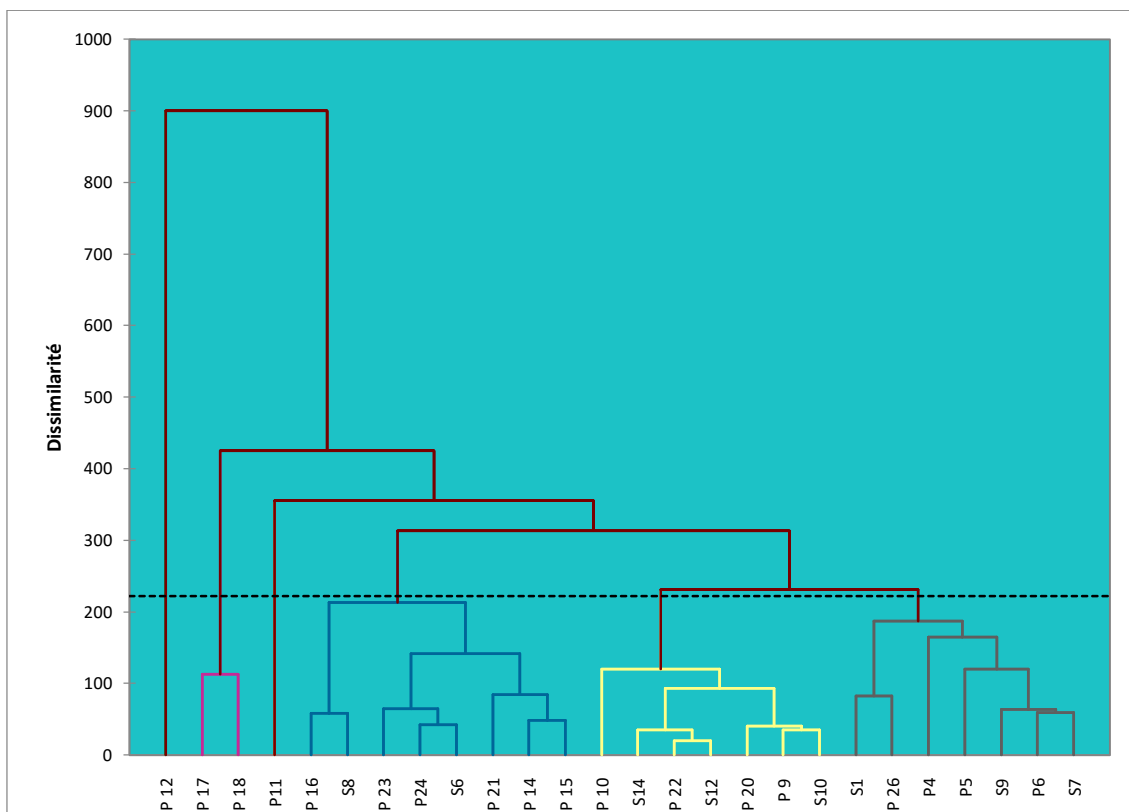


Figure IV.11 : Hiérarchie des partitions (intra-classe et inter-classe) obtenues par C.A.H  
 L'analyse du dendrogramme met en évidence les différentes classes. Le tableau IV. 8 indique pour chaque puits sa classe d'affectation dans l'ordre initial des individus selon leurs teneurs en ions majeurs.

Tableau IV.8 : Répartition des points d'eau de chaque classe par la CAH

Classe	1	2	3	4	5	6
Points d'eau	S1	P 9	P 12	P 14	P 17	P11
	P4	P 10		P 15	P 18	
	P5	P 20		P 16		
	P6	P 22		P 21		
	P 26	S10		P 23		
	S7	S12		P24		
	S9	S14		S6		
				S8		

Dans les tableaux qui suivent, nous avons décortiqué les classes obtenues par le dendrogramme pour extraire les intra classes.



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

Classe1			
Intra classes	Points d'eau		
1	S1-P26	P4-P5-S9-P6-S7	
2		P4	P5-S9-P6-S7

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

Classe2			
Intra classes	Points d'eau		
1	P10	S14-P22-S12-P20-P9-S10	
2		S14-P22 -S12	P20-P9-S10

Tableau IV.11 : Classification des intra classes de la classe 4

Classe 4			
Intra classes	Point d'eau		
1	P16 -S8	P23 -P24 -S6 -P21 -P14 -P15	
2		P23 -P24 -S6	P21 -P14 -P15

Le tableur XLSTAT nous fournit en plus du dendrogramme les barycentres des classes et les distances entre ces barycentres (tableaux IV.12 et IV.13).

Tableau IV.12 : Barycentre des classes

Classe	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	104,000	36,429	34,714	2,286	67,000	96,857	361,286	38,429
2	122,857	44,714	61,571	3,714	163,286	83,286	366,000	56,714
3	421,000	3,000	281,000	4,000	782,000	254,000	319,000	105,000
4	84,500	33,500	41,375	2,875	115,500	55,875	236,125	46,625
5	212,000	50,500	93,000	4,000	382,500	96,000	308,000	78,500
6	206,000	22,000	44,000	3,000	104,000	336,000	301,000	43,000

Tableau IV.13 : Distances entre les barycentres des classes

	1	2	3	4	5	6
1	0					
2	104,687	0				
3	839,288	745,164	0			
4	142,119	148,357	815,681	0		
5	345,323	247,028	516,400	313,517	0	
6	270,023	282,011	757,187	312,611	373,794	0

De l'analyse du dendrogramme nous retenons six (06) classes. Chacune comprend des points semblables en au moins un composant, par exemple pour les deux objets (points d'eau) P5 et P4 de la classe 1 ont la même teneur en ion  $\text{Na}^+$  et presque la même en ion  $\text{SO}_4^{2-}$

La ressemblance des teneurs entre les points de chaque classe diminue à chaque fois que la distance augmente.

Les classe 3 et 6 comprennent chacune un seul point car leurs teneurs pour certains ions s'individualisent par rapport aux autres points d'eau.

### IV.3. Analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus utilisées. Dès lors que l'on dispose d'un tableau de données quantitatives (continues ou discrètes) dans lequel n observations (des individus, des produits, ...) sont décrites par p variables (des descripteurs, attributs, mesures, ...), si p est assez élevé, il est impossible d'appréhender la structure des données et la proximité entre les observations en se contentant d'analyser des statistiques descriptives univariées ou même une matrice de corrélation. (Kaouani A. et al. 2007).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique d'analyse statistique, portant sur au moins deux variables, permettant une représentation graphique des liens entre variables n et des positions des individus par rapport aux vecteurs de ces variables. (Blavoux et Mudry, 1985, Lasne, 1992 ; Muet 1985, Maqsoud 1996, Khaldi, 2005). Son efficacité est supérieure à d'autres méthodes telles que les diagrammes en barres de Collins, en camembert de Stiff, de Schoeller et de Piper (Güler et al. 2002).

#### IV.3.1. Objectifs

L'A.C.P sert à mettre en évidence des *similarités* ou des *oppositions* entre variables et à *repérer* les variables les plus corrélées entre elles (Ouandaogo Yameogo S., 2008).

L'utilisation de cette méthode a pour objet de :

- Etudier et visualiser les corrélations entre les variables,
- Obtenir des facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ.
- Réduire le nombre des variables à un nombre plus petit de variables « représentatives » et « non corrélées ».
- Visualiser les observations dans un espace à deux ou trois dimensions.

### IV.3.2. Utilisation de l'ACP

Il existe plusieurs applications pour l'ACP, parmi lesquelles :

- L'étude et la visualisation des corrélations entre les variables, afin de limiter le nombre de variables à mesurer par la suite,
- L'obtention de facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ, afin d'utiliser ces facteurs dans des méthodes de modélisation telles que la régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante,
- La visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions, afin d'identifier des groupes homogènes d'observations, ou au contraire des observations atypiques.

### IV.3.3. Principe de l'ACP

L'ACP peut être considérée comme une méthode de projection qui permet de projeter les observations depuis l'espace à  $p$  dimensions des  $p$  variables vers un espace à  $k$  dimensions ( $k < p$ ) tel qu'un maximum d'informations soit conservé (l'information est ici mesurée au travers de la variance totale du nuage de points) sur les premières dimensions. Si l'information associée aux 2 ou 3 premiers axes représente un pourcentage suffisant de la variabilité totale du nuage de points, on pourra représenter les observations sur un graphique à 2 ou 3 dimensions, facilitant ainsi grandement l'interprétation (Kaouani et al, 2007).

### IV.3.4. Applications de l'A.C.P. sur les eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou

Une analyse en composante principale a été réalisée en utilisant les données hydrochimiques des eaux des sources ainsi que celles des eaux des puits (les 26 points d'eau utilisés dans le chapitre précédent) à l'aide du Logiciel Statistica (version.12). Les variables sont au nombre de 8 et sont : les cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), les anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ).

La méthode d'A.C.P utilisée pour cette étude est basée sur l'interprétation des différents facteurs de même que la matrice de corrélation obtenue à la suite du traitement des données. Le nuage de points résultant de ce traitement a été projeté dans les différents plans factoriels qui sont déterminés dans l'espace des variables et dans celui des unités statistiques.

Le choix des axes principaux tient compte de la réduction du nombre de facteurs. Ce nombre est tel que la somme cumulée des contributions est importante (75 % qui représente les trois quarts de l'inertie totale). En effet, deux variables sont corrélées lorsque leur coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,7. De plus au niveau des plans factoriels, des variables ne sont représentatives que lorsqu'elles sont proches de l'extrémité de ces facteurs. Lorsque deux variables sont corrélées, la variation de l'une entraîne celle de l'autre.

**Le coefficient de corrélation** exprime le niveau de corrélation (linéaire) entre les variables : plus il est proche de 1, plus les variables sont corrélées positivement, plus il est proche de -1, plus elles sont corrélées négativement. Un coefficient de corrélation nul indique l'absence de corrélation linéaire.

L'utilisation de l'analyse en composantes principales (A.C.P) pour l'étude globale des eaux souterraines permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau IV.14 : Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux de la nappe de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Seb dou

Variables	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	1							
Mg <sup>2+</sup>	-0,37	1						
Na <sup>+</sup>	0,88	-0,23	1					
K <sup>+</sup>	0,27	-0,05	0,40	1				
Cl <sup>-</sup>	0,87	-0,11	0,94	0,30	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,67	-0,24	0,49	0,26	0,38	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,16	0,09	0,03	-0,10	-0,04	0,09	1	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,67	-0,10	0,71	0,46	0,71	0,31	-0,03	1

Ca<sup>2+</sup>: Calcium, Mg<sup>2+</sup>: Magnésium, Na<sup>+</sup>: Sodium, K<sup>+</sup>: Potassium, Cl<sup>-</sup>: Chlorures, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: Sulfates, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Bicarbonates, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrates.

Très bonne corrélation  Bonne corrélation  Corrélation moyenne  Corrélation faible 

La matrice des coefficients de corrélation montre que les fortes corrélations entre les variables sont positives donc leurs concentrations évoluent dans le même sens.

- Le Calcium est fortement corrélé au Sodium et aux Chlorures,
- le Sodium est très fortement corrélé aux chlorures, ceci montre que ces éléments sont liés entre eux et/ou proviennent de la même origine, et reste moyennement corrélé aux nitrates.
- les  $SO_4^{2-}$  sont moyennement corrélés au Calcium et faiblement corrélés au Sodium, nitrates et aux chlorures.

L'ACP consiste aussi à sélectionner le nombre d'axes factoriels que l'on souhaite conserver. A cet effet il y a quelques règles (H. Aziz, 2014)

- **Règle de Kaiser** en A.C.P normée : on ne s'intéresse qu'aux axes avec une valeur propre supérieure à 1 (= inertie d'une variable initiale).
- **Règle de l'inertie minimale** : On sélectionne les premiers axes afin d'atteindre un % donné d'inertie expliquée (70% par exemple).
- **Règle du coude** : On observe souvent de fortes valeurs propres au départ puis ensuite de faibles valeurs avec un décrochage dans le diagramme. On retient les axes avant le décrochage.

Le tableau des valeurs propres (tableau IV.15) qui donne le pourcentage exprimé par chaque facteur, permet de connaître le nombre de facteurs nécessaires pour l'interprétation de ces phénomènes à partir du pourcentage cumulé de ces différents facteurs.

Tableau IV.15 : Valeurs propres des axes et leurs contributions

Numéros	Valeurs propres	Variabilités%	Valeurs propres cumulées	Variabilités Cumulées %
1	3,99	49,82	3,99	49,82
2	1,14	14,25	5,13	64,07
3	1,06	13,23	6,18	77,30
4	0,79	9,91	6,98	87,21
5	0,63	7,87	7,61	95,08
6	0,31	3,93	7,92	99,01
7	0,07	0,89	7,99	99,90
8	0,01	0,10	8,00	100,00

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur **F1** exprime **49.82 %** de la variance, le facteur **F2 : 14.25 %**, et le facteur **F3 :13.23 %**. Ces trois facteurs expriment donc **77.30 %** de la variance totale. Donc nous sélectionnons les 3 premières valeurs propres, qui expliquent ensemble plus de **77 %** de l'inertie totale du nuage de points.

La figure IV.12 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 :

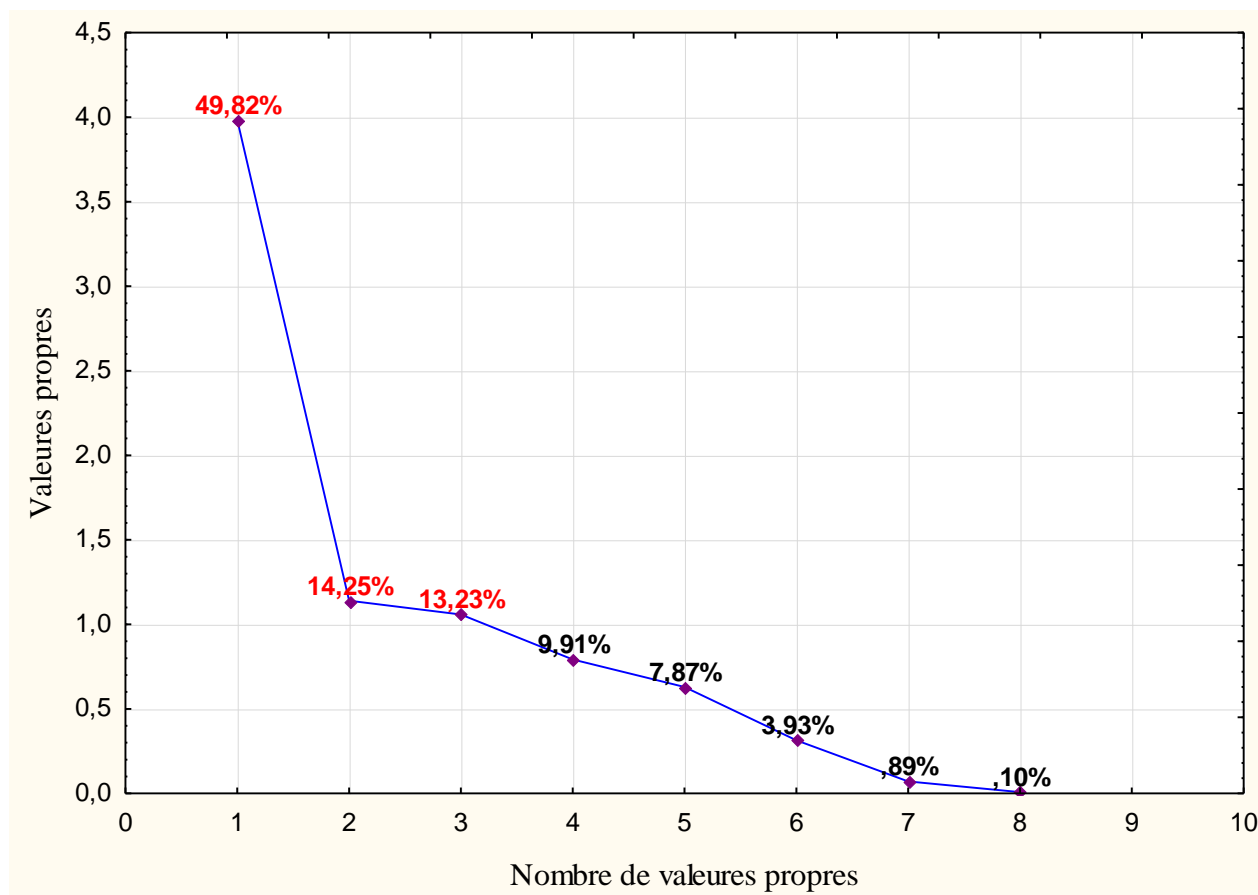


Figure IV.12 : Valeurs propres de la matrice de corrélation

Le tableau IV.16, permet de voir la corrélation entre les facteurs et les variables :

Tableau IV.16 : Corrélation entre les variables et les axes

Variables	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Ca <sup>2+</sup>	0.95	-0.25	0.04
Mg <sup>2+</sup>	-0.31	0.29	-0.82
Na <sup>+</sup>	0.95	0.02	-0.07
K <sup>+</sup>	0.49	0.49	-0.08
Cl <sup>-</sup>	0.91	0.10	-0.15
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.63	-0.33	0.17
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.03	-0.75	-0.54
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.80	0.27	-0.17

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,
- Le facteur F2 est corrélé négativement aux HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- Le facteur F3 est corrélé négativement au Mg<sup>2+</sup>.

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F2 permet d'extraire les figures IV.13 et IV.14.

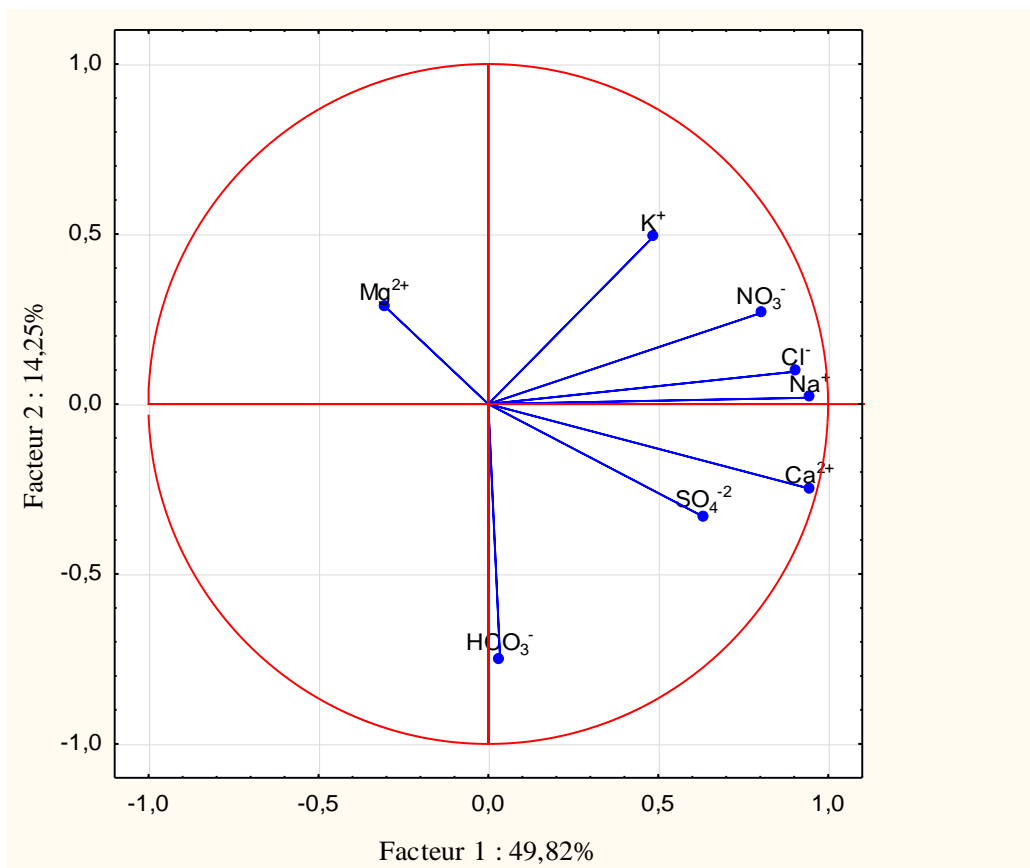


Figure IV.13 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2

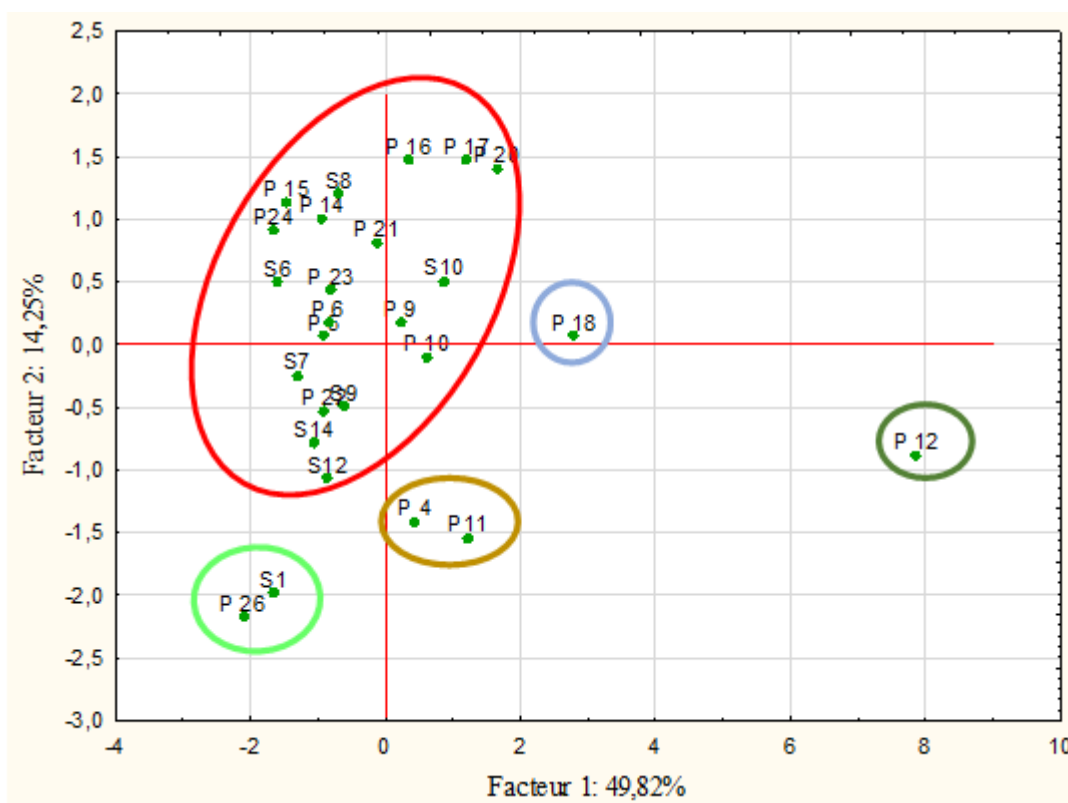


Figure IV.14 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2



Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel (fig.IV.13) puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation sauf le  $Mg^{2+}$  et les  $HCO_3^-$ . L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

- Le premier axe factoriel est corrélé positivement aux:  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  et d'un degré moindre aux  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ . C'est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issu de l'interaction eau-roche.

- Le second axe factoriel semble opposé aux  $HCO_3^-$  et corrélé positivement au  $K^+$ .

- Le sodium est associé aux chlorures d'où une origine commune. En effet, le sodium et le potassium peuvent être apportés par les précipitations. Le calcium et les sulfates sont associés, il est fort probable qu'ils aient une origine commune due à la présence des formations marno-calcaires.

- Les sulfates ne sont pas associés aux nitrates, cela permet de supposer des origines différentes. L'ion sulfate peut provenir des précipitations atmosphériques ou par oxydation des minéraux sulfurés. L'origine atmosphérique suppose que les sulfates et les chlorures auraient une évolution similaire, c'est-à-dire que ces deux ions doivent évoluer ensemble. Par conséquent, une augmentation en chlorures est accompagnée d'une augmentation en sulfates. Dans notre cas, la majorité des échantillons ne présentent pas cette relation, c'est-à-dire que l'augmentation en sulfate n'est pas accompagnée d'une augmentation en chlorures et, de ce fait, l'origine externe des sulfates est exclue de même que l'effet de l'activité biologique en été, qui a tendance à immobiliser le soufre dans la matière vivante (Gieseck, 1975, Bakalowicz, 1980).

L'examen de cet espace factoriel (figure IV.14) montre des groupements d'individus formant ainsi différentes familles d'eaux, où nous remarquons que presque tous les points d'eau sont regroupés excepté un point qui s'écarte clairement. Aussi, il semble se dégager 5 groupes :

- **Groupe 1** : rassemble les points d'eau : P20 – P17-P16-S8-P15-P14-P24-P21-P23-S6-S10-P6-P5-P9-P10–P22 –S7- S9 –S12 –S14 qui se caractérisent par des teneurs en ions proches

- **Groupe 2** : dans lequel s'inscrivent S1-P26 sont des points d'eau qui se caractérisent par les plus fortes teneurs en  $HCO_3^-$ .

- **Groupe 3** : où, P11 –P4 sont caractérisés par des teneurs en  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  les plus élevées.

- **Groupe 4** : ne comportant qu'un seul point d'eau P12 caractérisé par une forte minéralisation surtout en  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ .

- **Groupe 5** : s'individualise par le point P18 qui se caractérise par des teneurs élevées en  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NO_3^-$ .

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F3 donne les figures IV.15 et IV.16.

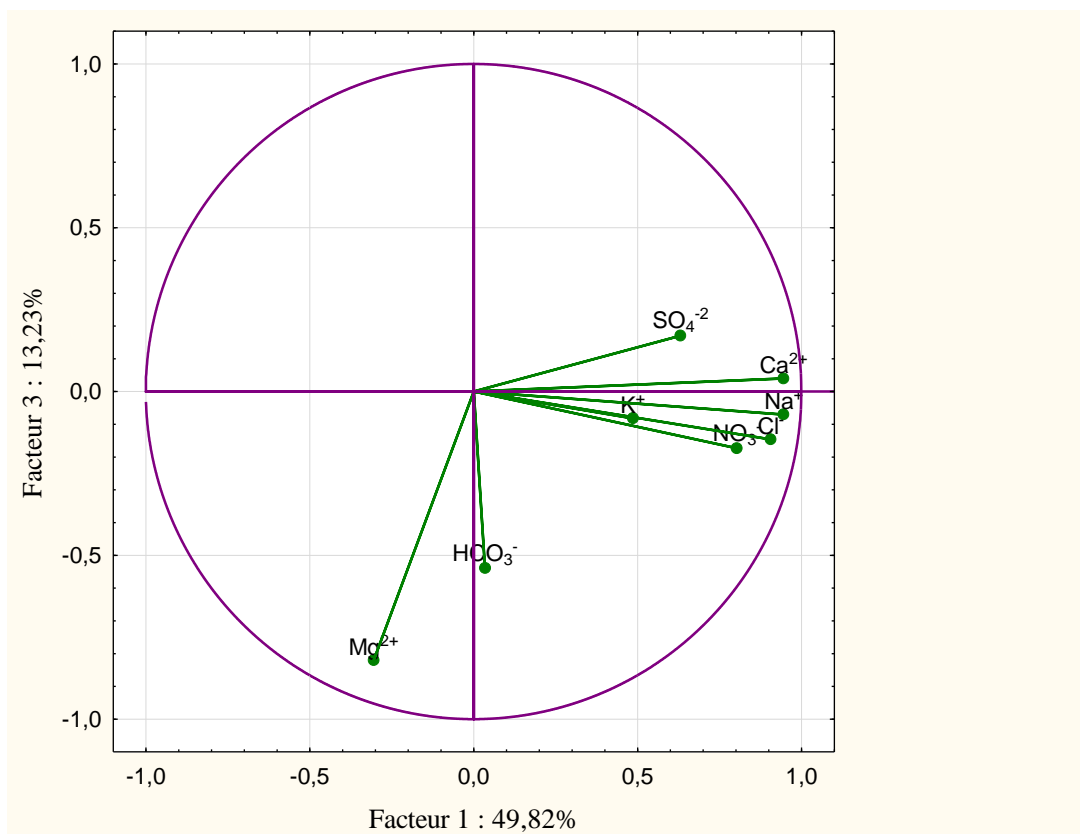


Figure IV.15 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F3

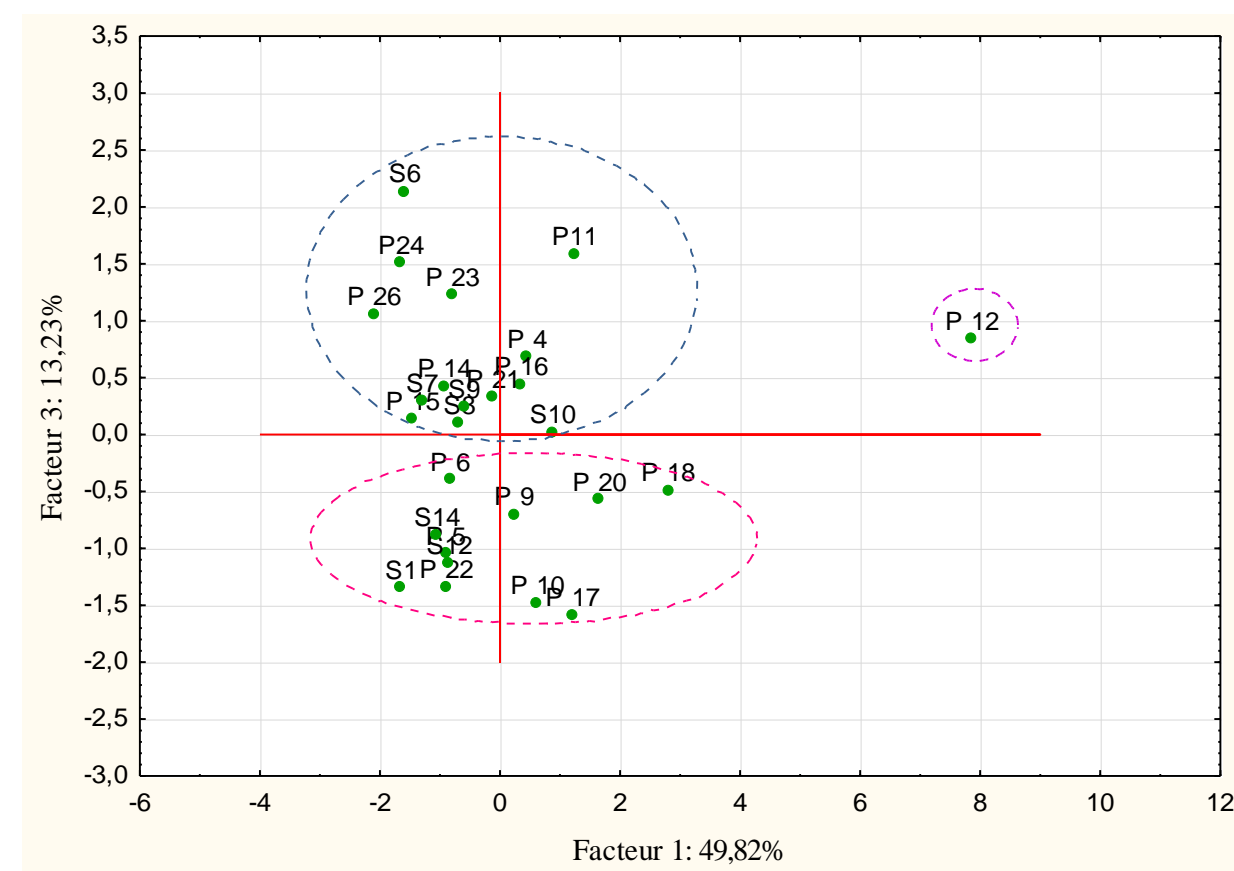


Figure IV.16 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F3

La projection sur un plan F1-F3 montre les mêmes corrélations que celles dégagées du plan précédent :

- Le premier axe factoriel est corrélé positivement aux:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et d'un degré moindre aux  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ .
- Le deuxième axe est corrélé négativement au  $\text{Mg}^{2+}$ .
- Le fait que les  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  soient opposés par rapport à l'axe F3, suggère qu'une partie de ces ions provient des minéraux silicatés présents dans le sol.
- En raison de l'association entre les sulfates et les nitrates dans le plan F1-F3, l'origine anthropique est probable et par conséquent, présence d'une pollution. Quant aux nitrates, ils sont généralement concentrés dans la biomasse. Ils ont une origine essentiellement anthropique, ils sont introduits dans le système soit par lessivage des engrais épandus, soit par le rejet des eaux usées.

Donc on peut déterminer trois groupes comme suit :

- **Groupe 1:** S6 – P24-P23-P26-S7-P15-P14-P16-P4-P11-P21-S8-S9-S10.
- **Groupe 2 :** P6-P9-P20-P18-P17-P10-P22-S1-S12-P5-S14 se caractérise par les teneurs les plus élevées du  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .
- **Groupe 3 :** P12 se caractérise par  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  les plus élevés.

#### IV.4. Comparaison entre CAH et ACP

La comparaison entre les résultats fournis par les deux méthodes CAH et ACP, montre une grande similitude dans la classification. (fig. IV.17)

L'A.C.P nous a donné 05 classes, tandis que la C.A.H 06 classes. Cette dernière a permis une classification plus pointue.

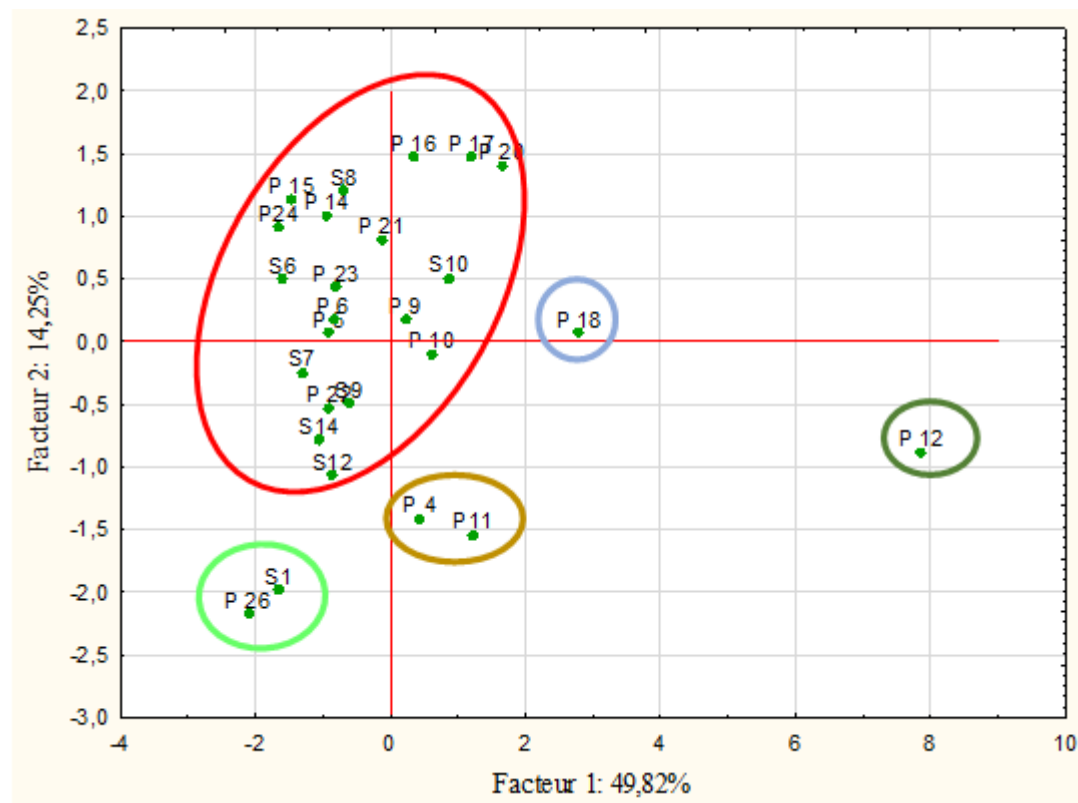
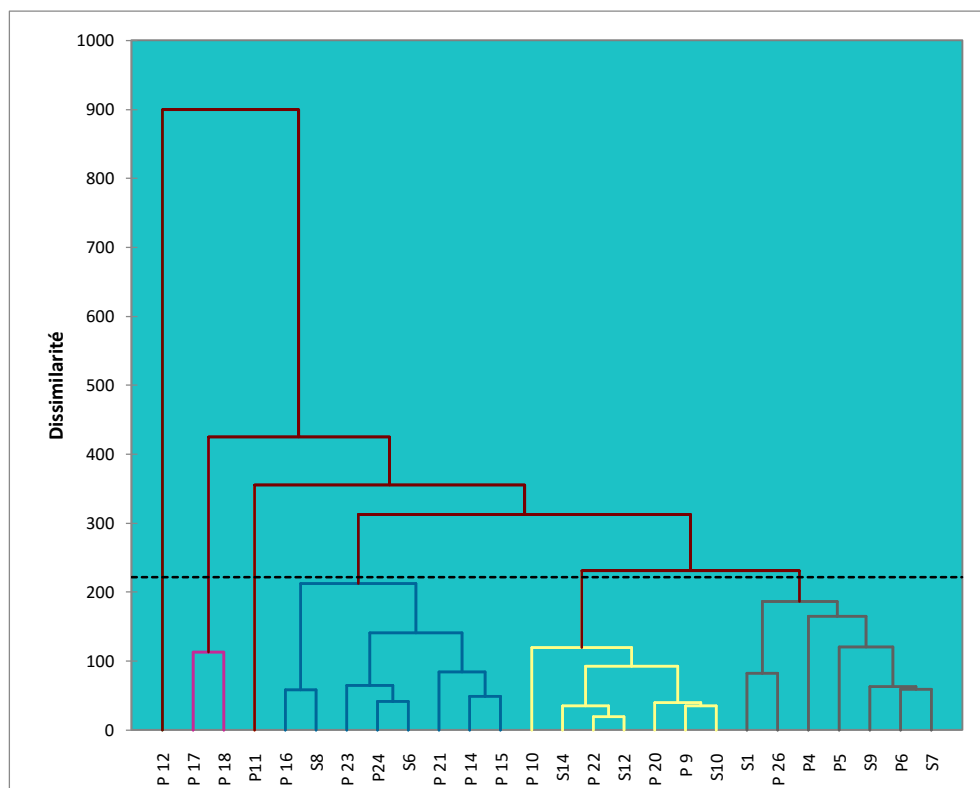


Figure IV. 17 : Comparaison entre la méthode CAH et ACP

Pour terminer nous avons tenté de confronter les résultats de la CAH avec l'ACP, pour ce faire, nous avons dessiné les classes issues du dendrogramme sur la projection factorielle (F1 – F2) de l'A.C.P. (fig. IV. 18). L'analyse de cette dernière figure met en évidence une certaine adéquation quand au nombre de classes, le puits 12 reste toujours isolé par rapport à l'ensemble. Nous remarquons aussi que la CAH a dissocié les points P17 et P20 de la classe 4, par contre les puits S1,P26 se sont associés pour se joindre au grand cercle qui a regrouper les classes 1 et 2 du dendrogramme.

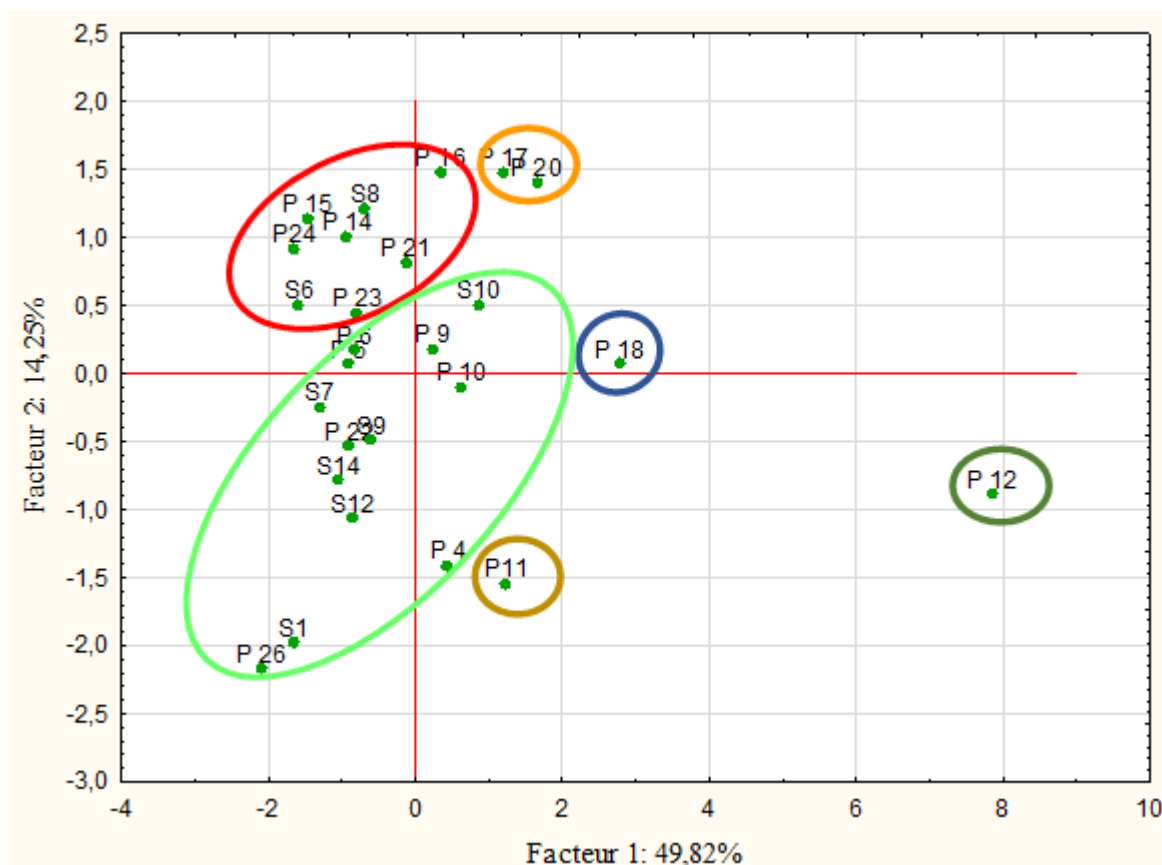


Figure IV. 18 : Confrontation C.A.H. et A.C.P

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, des analyse statistiques (C.A.H et A.C.P) ont été réalisées sur des variables centrées réduites à l'aide des logiciels Statistica12 et XISTAT. Les données portent sur l'ensemble des 26 points d'eau, 08 variables ont été traitées, qui sont les ions majeurs ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  et  $HCO_3^-$ ).

L'analyse des données chimiques a permis de distinguer globalement deux pôles de mélanges :

- **les eaux faiblement minéralisées** caractérisant la totalité des points d'eau de la nappe ceci revient : à l'alimentation de la nappe qui se fait principalement par les précipitations donc des concentrations faibles en éléments chimiques, au temps de séjour de ces eaux dans les formations géologiques qui est relativement court et le facteur le plus important est la nature de l'encaissant qui joue le rôle primordial dans l'acquisition de la minéralisation (l'aquifère est formé par des dépôts conglomeratiques et croûte calcaire). Cette catégorie d'eau se divise en 2

groupes : le premier se caractérise par des teneurs élevées en Bicarbonates et Magnésium ainsi que les fortes températures (leur origine revient aux formations carbonatées adjacentes), le deuxième groupe couvrent la totalité de la nappe ou les corrélations entre les individus sont relativement très faibles d'où nous supposons des origines très variées des éléments chimiques.

- **les eaux fortement minéralisées** : représentées par un seul échantillon qui englobe les teneurs les plus élevées de la minéralisation (également un excès en nitrates), c'est un point qui pose un problème (pour cela il est nécessaire de faire d'autres prélèvements dans cette zone pour s'assurer de ce résultat et pour comprendre mieux le mécanisme qui se passe à cet endroit).

En conclusion nous pouvons estimer que la qualité des eaux de la nappe du fossé de Sebdoou est en général bonne avec une menace certaine d'une pollution anthropique.

## Conclusion générale

---

Le Fossé de Sebdou situé au Nord-ouest algérien (wilaya de Tlemcen), comporte un aquifère alluvial d'âge Plio-Quaternaire. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par son impluvium (infiltration des eaux de précipitations) et par le déversement souterrain des formations carbonatées adjacentes.

La carte piézométrique de Mai 1990 a montré que le sens d'écoulement est généralement orienté vers l'Ouest (Plateau de Titmokhen).

L'étude climatique a montré que la région de Sebdou est caractérisée par un climat méditerranéen à hiver froid, avec une température moyenne mensuelle de 18,70 °C et des précipitations moyennes annuelles de 368,5mm.

Les analyses physico-chimiques des eaux révèlent que celles-ci se classent en 4 hydro-faciès, prédominées par les eaux bicarbonatées calciques, suivi de celui des eaux bicarbonatées magnésiennes et chlorurées calciques et un seul point d'eau se range dans le faciès sulfaté calcique.

L'utilisation des méthodes statistiques Diagrammes en boîtes, C.A.H et A.C.P. sur ces données permet de mettre graphiquement en évidence les liens entre les éléments chimiques et faciliter donc leur interprétation. Elles ont permis de déceler globalement deux groupes : les eaux faiblement minéralisées représentant la majorité de l'étendue de la nappe et celles fortement minéralisées représenté par le point d'eau P12 situé au Sud-Est de l'aquifère. Ce point d'eau pose aussi un problème quant à sa concentration très élevée en nitrates relevant d'une pollution probable, et pour y remédier, il est important d'effectuer d'autres prélèvements au voisinage de ce puits pour pouvoir confirmer ou pas cette contamination.

Les méthodes et formules utilisées ont montré que les eaux sont dans l'ensemble potables mise à part quelques points qui présentent des concentrations dépassant les normes algériennes, et qu'elles sont aptes à être utilisées en irrigation.

D'une façon générale et jusqu'à maintenant la qualité chimique de la nappe du fossé de Sebdou est, globalement, satisfaisante mais n'est pas loin d'être contaminée et ça n'empêche de prévoir une contamination et une diffusion de polluants notamment avec les quelques valeurs rencontrées qui sont non- conformes aux normes de potabilité algériennes et que les rejets augmentent d'une année à l'autre sans nier la forte probabilité de l'existence d'un risque de pollution.

On recommande donc de faire des prélèvements et intensifier le nombre d'échantillons au Sud-Est de l'aquifère et procéder même à des analyses bactériologiques.

## Conclusion générale

---

Pour protéger cette ressource en eau contre la pollution, il est recommandé d'établir une carte de vulnérabilité à la pollution du secteur d'étude et limiter l'utilisation intensive des engrais chimiques.

En guise de conclusion, nous pourrions dire que les différentes approches utilisées ont permis d'avoir plus d'informations sur les eaux du fossé de Sebdu.

En effet, nous souhaitons avoir une chronique de données spatio-temporelles récente et continue pour pouvoir procéder à une comparaison et mieux suivre l'évolution du chimisme de ces eaux.



## Références bibliographiques :

- Abdellaoui N.**, 2014 - Classification ascendante hiérarchique. Mem. Licence Informatique. Univ. Tlemcen. p73.
- Aziz H.**, 2014 - Application de quelques traitements statistiques aux données hydrochimiques de la nappe alluviale du fossé de Sebdou (Nord-Ouest de l'Algérie). Mem. Master. Univ. Tlemcen. p145.
- Baba Hamed et Kerzabi R.** 1991 – Contribution à l'Etude hydrogéologique de la Haute Tafna en amont du barrage Béni Bahdel (Monts de Tlemcen). Mém. Ing. Etat, Univ. Tlemcen, Tome 1 et 2, 424 p., 154 Fig., 61 Tab., 5 pl., 15 ph.h.t.
- Baba Hamed K.**, 2001 - Contribution à l'étude hydrologique de trois sous bassins de la Tafna : Oued Sebdou, Mouilah et Isser (NW – Algérie). Mém. Magistère. Univ. Oran. p187.
- Benest M.** 1982 – Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie occidentale). Rev. géol. dyn. géog. phys. Vol. 23, fasc. 5, pp. 345-362.
- Benest M.**, 1985 – Evolution de la plate-forme de l'Ouest Algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire. Docum. Lab. Géol. Lyon, n° 95, 581 p., 145 fig., 23 pl.
- Bensaoula F., Bensalah M., Adjim M.**, 2005 - Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 04, Juin 2005, pp.7-10..
- Bensouna A.**, 2016 - Impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie du bassin versant de oued Sebdou Tafna (N.W Algerien) Mém. Master., Univ. Tlemcen, p72.
- Blavoux B. et Mudry J.**, 1985 - Apport de l'hydrochimie à la compréhension hydrochimique des aquifères karstiques. Coll. Inter. L'eau clef du développement au Maghreb. (Oran, Algérie, Oct. 1984), 14 pp.
- Bouanani A.**, 2004- Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (N.W Algerien). Thèse de doctorat d'état, Univ. Tlemcen. p198.
- Bouanani A., Baba Hamed K., Fandi W.**, 2013 - Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – Nord-ouest Algérie). Revue des Sciences de l'Eau. 26(2) (2013) 119-132.

**Castany G.**, 1982 - : Hydrogéologie Principes et méthodes. 2e Cycle. Livre. Univ. Pierre et Marie Curie. Paris. France.

**Chevalier F et Le Bllac J.**, 2012- Classification 2. Fac.des Sci. Economiques. Univ. Rennes. 44p.

**Collignon B.**, 1986. Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen, Thèse. Doctorat. Univ. Avignon.

**Dahali S.**, 2013 – Etude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe du continentale intercalaire de la région de Touat Wilaya d’Adrar. Mem. Master. Ouargla. P78.

**Doumergue M.**, 1910- Notice explicative de la carte géologique de Tlemcen au 1/50 000.

**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 ». Thèse Doc.Univ. Oran, 239 p. , 196 Fig., 52 Tab.

**Kouani A., El Jamali S. et Talbi M.**, 2007 - Analyse en composantes principales : Une méthode factorielle pour traiter les données didactiques, Pub.Radisma, numéro 2, 2007

**Maqsoud A.**, 1996 - Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d’hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Lille, 324 pp.

**Meddi H. et Meddi M.** 2009 – Variabilité des précipitations annuelles du Nord Ouest de l’Algérie. Sécheresse n°20. Pp 57-65.

**Megnounif A., Terfous A., Ghenaim A., Poulet J.B.**, 2004 - Rôle des crues dans la production de sédiments transportés en suspension dans un cours d’eau des bassins versants méditerranéens. VIII èmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004.

**Moudjib A.**, 2010 – L’aptitude des eaux de la région d’Aïn-Sefra à des fins d’irrigations, Mém. Ing. Etat, univ. Tlemcen, p. 15-32

**Ouandaogo Y. S. 2008** – Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso. Qualité et vulnérabilité. Mémoire Doc., Univ. Avignon et des Pays de Vaucluse. p 254.

**Rodier J.**, 2009.L’analyse de l’eau « eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer » Ed. Paris Bordas, France. 568p.

**Saporta A.**, 1990. Probabilité, analyse des données et statistique. Ed , Technip, Paris, France.

**Thomas J.** 1985- Carte structurale de l’Oranie nord –occidentale.

**Wilox L.V.**, 1948 .The quality of water for agricultural use .US Dept Agriculture Tech. Bull.962, Washington DC, USA.

**Zennaki A.**, 2015- Essai de modélisation d'une nappe. Application à la nappe alluviale d'oued Boukiou (NW algérien). Mem. Magistère. Univ. Tlemcen.p136.

Rapport-Gratuit.com

## Liste des figures

---

Figure I.1 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna (A. Bouanani et al, 2013) ---	8
Figure 1.2 : Carte illustrant l'étendue du fossé de Sebdou (F. Bensaoula, 2005) -----	9
Figure I.3 : Carte géologique du secteur Sebdou-Tafna à 1/25 000 (M. Benest, 1985) -----	10
Figure I.4 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sebdou (K. Baba Hamed, 2001)-----	11
Figure I.5 : Log stratigraphique des Monts de Tlemcen(Baba-Hamed &Kerzabi, 1991) -----	14
Figure I.6 : Carte structurale de l'Oranie nord –occidentale (Thomas, 1985) -----	15
Figure I.7 : Coupe structurale au niveau du Fossé d'effondrement de Sebdou (Auclair et Biehler, 1967)-----	16
Figure 1.8 : Répartition des points d'eau au niveau du fossé de Sebdou -----	18
Figure 1.9 : Carte piézométrique de la nappe du Fossé de Sebdou (Mai, 1990) -----	19
Figure II.1: Situation géographique des stations de mesure des paramètres climatiques-----	22
Figure II.2. Variations interannuelles des précipitations à la station de Sebdou (1983/1984-2014/2015) -----	23
Figure II.3 : Variations des précipitations mensuelles à la station de Sebdou(1983/1984-2014/2015) -----	24
Figure II.4 : Répartition des précipitations saisonnières à la station de Sebdou(1983/1984-2014/2015) -----	25
Figure II.5 : Variations des températures moyennes mensuelles, minimales et maximales à la station de Béni Bahdel (1980-1981/2014-2015) -----	26
Figure II.6 : Diagramme Pluviothermique dans la zone d'étude -----	27
Figure II.7 : Abaque de De Martonne -----	28
Figure. III.1 : Carte de répartition des points d'eau de la nappe du Plio-Quaternaire du fossé de Sebdou -----	32
Figure III.2 : Corrélation entre les cations et les anions -----	33
Figure III.3 : Variation de la température des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou -----	33
Figure III.4 : Variation de l'ion calcium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou -----	34
Figure III.5 : Variation de l'ion magnésium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou -----	34
Figure III.6 : Variation de l'ion sodium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou-----	35
Figure III.7 : Variation de l'ion potassium des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou -----	35
Figure III.8 : Variation des bicarbonates des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou -----	36
Figure III.9 : Variation des chlorures des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou-----	37
Figure III.10 : Variation des sulfates des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou--	37
Figure III.11 : Variation des nitrates des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou---	37
Figure III.12: Variation du résidu sec des eaux l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou----	38

## Liste des figures

---

Figure III.13 : Variation de la minéralisation des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu	38
Figure III.14 : Variation de la conductivité électrique des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu	39
Figure III.15 : Variation du pH des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdu	40
Figure III.16 (a, b, c, d) : Représentation du faciès Bicarbonaté calcique	42,43
Figure III.17 : Représentation du faciès Chloruré calcique	44
Figure III.18: Représentation du faciès Bicarbonaté magnésien	44
Figure III.19 : Représentation du faciès Sulfaté calcique	45
Figure III.20 : Représentation du faciès bicarbonaté calcique	46
Figure III.21 : Représentation du faciès bicarbonaté magnésien	46
Figure III.22 : Représentation du faciès chloruré calcique	47
Figure III.23 : Représentation du faciès sulfaté calcique	47
Figure III.24 : Valeurs des KR	50
Figure III.25 : Variation du pourcentage de sodium	51
Figure III.26 : Diagramme de Wilcox	52
Figure III.27 : Diagramme de Richards	54
Figure IV.1 : Boîte à moustache de l'ensemble des échantillons	60
Figure IV.2 : Représentation des eaux à faciès bicarbonaté calcique	61
Figure IV.3: Représentation des eaux à faciès bicarbonaté magnésien	62
Figure IV.4 : Représentation des eaux à faciès sulfaté calcique	63
Figure IV.5 : Représentation des eaux à faciès chloruré calcique	64
Figure IV.6 : Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012)	66
Figure IV.7 : Etapes de la classification ascendante hiérarchique	67
Figure IV.8 : Représentation des classes en fonction de la CAH	68
Figure IV.9 :Diagramme des niveaux	70
Figure IV.10 : Hiérarchie de partition obtenue par C.A.H (dendrogramme)	71
Figure IV.11 : Hiérarchie de partition (intra-classe et inter-classe) obtenues par C.A.H	72
Figure IV.12 : Valeurs propres de la matrice de corrélation	79
Figure IV.13 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2	80
Figure IV.14 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2	80
Figure IV.15 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F3	82
Figure IV.16 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F3	82
Figure IV.17 : Comparaison entre la méthode CAH et ACP	84
Figure IV.18 : Confrontation C.A.H. et A.C.P	85

## Liste des tableaux

---

Tableau II.1 : Caractéristiques de la station de mesure -----	21
Tableau II.2 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Sebdou (1983/1984-2014/2015) -----	23
Tableau II.3 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sebdou (1983/1984-2014/2015) -----	24
Tableau II.4 : Précipitations saisonnières à la station de Sebdou (1983/1984-2014/2015) ----	24
Tableau II.5 : Valeurs des températures moyennes mensuelles à la station de Béni Bahdel (1983-1984/2014-2015) -----	25
Tableau II.6 : Précipitations et températures moyennes mensuelles (1980-1981/2014-2015) ---	27
Tableau III.1 : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux du fossé de Sebdou -----	31
Tableau III.2 : Classification d'une eau en fonction de sa conductivité électrique (Rodier, 2009) -----	39
Tableau III.3 : Classification des eaux selon le pH (Rodier, 2009) -----	40
Tableau.III.4 : Classification des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou selon leurs faciès -----	41
Tableau III.5 : Potabilité des eaux de la nappe du fossé de Sebdou -----	49
Tableau III.6 : Classification des eaux d'irrigation selon le %Na -----	51
Tableau III.7 : Classification des eaux d'irrigation du fossé de Sebdou selon le %Na -----	51
Tableau III.8 : Classification des eaux d'irrigation selon le SAR -----	53
Tableau III.9 : Classification de Richards ( <i>in Baba Hamed K. &amp; Kerzabi R. 1991</i> ) -----	55
Tableau IV.1 : Paramètres statistiques des eaux du fossé de Sebdou -----	59
Tableau IV.2 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées calciques -----	61
Tableau IV.3 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées magnésiennes -----	62
Tableau IV.4 : Paramètres statistiques des eaux sulfatées calciques -----	63
Tableau IV.5 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées calciques -----	64
Tableau IV. 6 : Similarités / dissimilarités d'une C.A.H. proposées par XLSTAT -----	69
Tableau IV.7 : Nœuds successifs du dendrogramme -----	70
Tableau IV.8 : Répartition des points d'eau de chaque classe par la CAH -----	72
Tableau IV.9 : Classification des intra classes de la classe 1 -----	73
Tableau IV.10 : Classification des intra classes de la classe 2 -----	73
Tableau IV.11 : Classification des intra classes de la classe 4 -----	73
Tableau IV.12 : Barycentre des classes -----	73
Tableau IV.13 : Distances entre les barycentres des classes -----	74
Tableau IV.14 : Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux de la nappe de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou -----	77
Tableau IV.15 : Valeurs propres des axes et leurs contributions -----	78
Tableau IV.16 : Corrélation entre les variables et les axes -----	79

## Liste des abréviations

---

**ACP** : Analyse en composantes principales.  
**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques  
**B.I** : Balance Ionique  
**Ca<sup>2+</sup>** : 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  
**HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Bicarbonates  
**I** : Indice  
**Km** : Kilomètre  
**KR** : Ration de Kelly  
**Mg/L** : Milligramme par litre  
**Mg<sup>2+</sup>** : Ion magnésium  
**Na<sup>+</sup>** : 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)  
**SC** : Somme des carrés  
**TH** : titre hydrotimétrique  
**Tmoy** : Température moyenne  
**T (an)** : Température annuelle  
**T<sub>M</sub>** : Moyennes mensuelles des températures maximales (°C).  
**T<sub>m</sub>** : Moyennes mensuelles des températures minimales (°C).  
**T<sub>moy</sub>** : Températures moyennes mensuelles (°C).  
**UE** : Union Européenne,  
**USEPA** : United States Environmental Protection Agency (Agence de Protection Environnementale des Etas-Unis).

# Annexes

## Annexe1 : Données de la campagne piézométrique de Mai 1990

N° de puits	Niveau piézométrique statique (m)	X (km)	Y (km)
1	941,5	134	159,5
2	954,77	134,35	160
3	925,25	133,6	159,9
4	891,66	131,6	159,8
5	1009,2	139	162,15
6	1015,2	139,1	162,45
7	1005,72	138,5	162
8	1003,5	138,4	161,6
9	975,65	137	160,6
10	984,67	137,2	160,45
11	970,4	136,86	158,25
12	970,02	136,5	158,5
13	966,8	136,65	158,5
14	884,8	132,4	158,4
15	891,54	132,5	158,15
16	925,12	133,5	157,8
17	932,75	133,9	157,45
18	937,22	134,5	157,8
19	932,78	132,6	156,5
20	896,99	131,2	156,7
21	904,98	131	156,3
22	926,23	129,6	155,55
23	936,8	128,5	155,3
24	941,6	128,4	155,2



Pts d'eau	X	Y	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Minéralisation	pH	R. s.	C. E. (μS/cm)	T (°C)	BI
			mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L						
S1	139,6	163,45	102	5,1	48	3,95	23	1	1	0,03	61	1,72	62	1,29	458	7,51	35	0,56	620	7,8	680	1000	15,5	4,8
S2	137,4	159,8	36	1,8	40	3,29	89	3,87	1	0,03	135	3,8	67	1,4	391	6,41	18	0,29	620	7,6	700	1000	25	13,9
S4	125,9	167,5	90	4,5	45	3,7	9	0,39	1	0,03	44	1,24	24	0,5	405	6,64	11	0,18	434	8,1	580	700	17	0,3
S5	132,65	162,8	104	5,2	22	1,81	6	0,26	1	0,03	13	0,37	10	0,21	342	5,61	25	0,4	430	7,8	490	600	16	5,1
P 4	131,6	159,8	176	8,8	19	1,56	44	1,91	3	0,08	54	1,52	168	3,5	376	6,16	57	0,92	744	7,5	1000	1200	16,1	1
P 5	139	162,15	80	4	66	5,43	44	1,91	3	0,08	61	1,72	169	3,52	317	5,2	39	0,63	558	8,1	760	900	14,3	1,6
P 6	139,1	162,45	82	4,1	45	3,7	35	1,52	3	0,08	54	1,52	91	1,9	325	5,33	57	0,92	434	8,1	640	700	16,5	1,4
P 7	138,5	162	104	5,2	56	4,61	55	2,39	5	0,13	94	2,65	168	3,5	248	4,07	56	0,9	744	8,1	940	1200	16	5,2
P 8	138,4	161,6	88	4,4	54	4,44	54	2,35	3	0,08	77	2,17	129	2,69	223	3,66	62	1	558	8,2	720	900	15,6	8,5
P 9	137	160,6	120	6	47	3,87	64	2,78	3	0,08	182	5,13	101	2,1	329	5,39	66	1,06	682	7,9	780	1100	15,9	3,6
P 10	137,2	160,45	136	6,8	44	3,62	69	3	3	0,08	206	5,8	34	0,71	402	6,59	90	1,45	806	7,9	900	1300	16,1	3,8
P 12	136,5	158,5	421	21,05	3	0,25	281	12,22	4	0,1	782	22,03	254	5,29	319	5,23	105	1,69	1736	7,6	2600	2800	15,6	0,9
P 13	136,65	158,5	20	1	38	3,13	127	5,52	24	0,61	155	4,37	58	1,21	54	0,89	11	0,18	620	8	640	1000	15,5	21,5
P 14	132,4	158,4	68	3,4	40	3,29	44	1,91	3	0,08	118	3,32	67	1,4	244	4	46	0,74	682	8	760	1100	16,2	4,3
P 15	132,5	158,15	58	2,9	45	3,7	44	1,91	3	0,08	101	2,85	24	0,5	248	4,07	36	0,58	434	7,9	620	700	17,1	3,6
P 16	133,5	157,8	120	6	40	3,29	58	2,52	4	0,1	226	6,37	96	2	220	3,61	58	0,94	682	7,8	940	1100	16,1	4
P 17	133,9	157,45	184	9,2	68	5,6	78	3,39	4	0,1	384	10,82	72	1,5	274	4,49	67	1,08	930	7,9	1380	1500	14,9	1,1
P 18	134,5	157,8	240	12	33	2,72	108	4,7	4	0,1	381	10,73	120	2,5	342	5,61	90	1,45	1116	7,8	1700	1800	16,7	2
P 19	132,6	156,5	6	0,3	13	1,07	147	6,39	78	1,99	121	3,41	77	1,6	61	1	41	0,66	558	8,1	640	900	14,6	18,7
P 20	131,2	156,7	138	6,9	34	2,8	83	3,61	8	0,2	185	5,21	103	2,15	348	5,7	74	1,19	744	7,8	900	1200	16,9	2,7

P 21	131	156,3	80	4	34	2,8	78	3,39	4	0,1	128	3,61	82	1,71	280	4,59	51	0,82	558	7,8	640	900	17,3	2,1
P 22	129,6	155,55	108	5,4	57	4,69	51	2,22	3	0,08	135	3,8	82	1,71	384	6,3	30	0,48	682	7,9	800	1100	17,2	0,4
P 23	128,5	155,3	94	4,7	21	1,73	21	0,91	2	0,05	47	1,32	58	1,21	254	4,16	70	1,13	434	8,1	480	700	17,5	2,8

**Annexe 2 :** Tableau des analyses physico-chimiques des points d'eau du fossé de Sebdou de l'année 1990

### 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

CMA : concentration maximale admissible. UE : l'Union Européenne, USEPA : United States Environmental Protection Agency (Agence de Protection Environnementale des Etats-Unis), OMS : Organisation Mondiale de Santé.

