

# UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1

Faculté de Technologie

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE L'EAU ET L'ENVIRONNEMENT



## Mémoire de Master

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème :

**Contribution des méthodes hydrochimiques et géostatistiques à l'étude des sources des monts de Chréa dans l'Atlas blidéen (Parc National de Chréa).**

Présenté par : **BOUZZOUNI Amina**

Devant le jury composé de :

M. N. Messaoud Nacer	Maitre Conf. A., USDB	Président de jury
M. M. Khelfi	Maitre Conf. B., USDB	Examineur
M <sup>me</sup> S. Bouzouidja	Maitre-Assist A., USDB	Examinatrice
M. A.S. Moulla	Chercheur Confirmé, CRNA	Co- Promoteur
M. A. Guendouz	Professeur, USDB	Promoteur

**Promotion 2020/2021**

# Remerciements



Tout d'abord je tiens à remercier **ALLAH LE TOUT PUISSANT** de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience de mener à terme ma formation et pouvoir réaliser ce modeste travail de recherche.

En guise de reconnaissance, je tiens à remercier, très sincèrement, le Professeur **GUENDOZ Abdelhamid**, avec qui j'ai eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances et de ses compétences, de ses précieux conseils et de son suivi tout au long de mon parcours académique. Son sens élevé du devoir, le fait de s'être toujours montré à l'écoute, ainsi que sa rigueur scientifique, imposent l'estime et le respect.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à mon autre encadreur, Chercheur Confirmé et Chef de Département (CRNA Alger) Monsieur **MOULLA Adnane Souffi**, pour son encadrement de qualité, et sa motivation professionnelle et son sens du détail.

Je n'omettrais pas de citer Monsieur **KHELFI Mohamed El-Amine**, un grand merci de m'avoir aidé lorsque j'avais besoin d'aide, Monsieur **OUAREZKI Sidali** responsable du laboratoire d'hydrochimie (CRNA) pour son aide précieuse ; Mademoiselle **CHORFI Hadjer** (Ingénieur Spécialisé, CRNA) pour ses aides apportées lors de l'analyse des échantillons, ses corrections, sa gentillesse et sa patience ainsi que pour le temps qu'elle a imparti à l'aboutissement de ce travail ; Et enfin Monsieur **TAIEB ERRAHMANI Djamel** (Chercheur Principal, CRNA) qui s'est porté volontaire pour me fournir l'aide demandée lors de mon travail de terrain. Je n'oublierais pas Madame **BELAID-ABDELOUAHAB Messaouda** pour sa contribution dans l'élaboration de cartes de situation de la zone d'étude. Que tout le monde trouve ici, le témoignage de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier également les membres du jury pour leur présence, pour leur lecture attentive de ce mémoire, ainsi que pour les remarques qu'ils m'auront adressé lors de ma soutenance afin d'améliorer mon mémoire. Je n'oublierais pas mes enseignants, en espérant qu'ils verront dans ce manuscrit, les fruits du dévouement avec lequel ils se sont investis durant les enseignements qu'ils nous ont prodigué. A tous les enseignants du Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

## *Dédicaces*

*A mon très cher père, tu as toujours été pour moi un exemple de père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa, j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension. Ton soutien fut une lumière tout au long de mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployé pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.*

*A ma **maman** qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mes sœurs et mon frère : **Salam, Maria et Youcef** pour votre soutien et encouragements.*

*A mon amie qui était toujours à mes côtés : **Rym**.*

## Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des Abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction Générale

### CHAPITRE I :

#### Présentation du Parc National de Chr ea

Introduction .....	14
II.1 Partie terrain.....	14
II.1.1 �chantillonnage.....	14
II.1.2 Procédure de prélèvement.....	14
II.1.3 Paramètres physico-chimiques mesurés in situ.....	15
II.1.3.1 Température.....	15
II.1.3.2 Potentiel d'Hydrogène (pH) .....	15
II.1.3.3 Conductivité.�lectrique.....	16
II.1.3.4 Salinité (TDS).....	16
II.1.3.5 Dosage de l'alcalinité (TAC).....	16
II.1.3.6 L'oxygène dissous.....	17
II.2 Présentation géographique des points d'eau échantillonnés au PNC.....	19
II.3 La partie analytique (analyses hydrochimiques).....	20
II.3.1 Analyses hydrochimiques.....	20
II.3.1.1 Présentation des techniques d'analyse.....	20

II.3.1.2 Dosage des carbonates et bicarbonates par pH-métrie.....	20
II.3.2 Matériel utilisé .....	21
II.3.2.1 Réactifs utilisés .....	21
II.3.3 Mode opératoire .....	21
II.3.3.1 La silice.....	22
II.3.3.2 Spectrophotomètre Uvicon 93 .....	22
II.3.3.2.1 Réactifs utilisés .....	22
II.3.3.2.2 Mesure.....	23
II.3.3.2.3 Calcul.....	23
II.3.3.3 Chromatographie ionique.....	24
a) Préparation des éluants.....	24
b) Préparation des échantillons.....	25
II.3.3.4 Mise en fonctionnement du système.....	25
1- Injection de l'échantillon.....	25
2- Analyse.....	25
II.4 Partie logiciel.....	25

## CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Introduction .....	16
II.1 Partie terrain.....	16
II.1.1 Échantillonnage.....	16
II.1.2 Procédure de prélèvement.....	16
II.1.3 Paramètres physico-chimiques mesurés in situ.....	17
II.1.3.1 Température.....	17
II.1.3.2 Potentiel d'Hydrogène (pH) .....	17
II.1.3.3 Conductivité.électrique.....	18
II.1.3.4 Salinité (TDS).....	18
II.1.3.5 Dosage de l'alcalinité (TAC).....	18

II.1.3.6 L'oxygène dissous.....	19
II.2 Présentation géographique des points d'eau échantillonnés au PNC.....	21
II.3 La partie analytique (analyses hydrochimiques).....	22
II.3.1 Analyses hydrochimiques.....	22
II.3.1.1 Présentation des techniques d'analyse.....	22
II.3.1.2 Dosage des carbonates et bicarbonates par pH-métrie.....	22
II.3.2 Matériel utilisé .....	23
II.3.2.1 Réactifs utilisés .....	23
II.3.3 Mode opératoire .....	23
II.3.3.1 La silice.....	24
II.3.3.2 Spectrophotomètre Uvicon 93 .....	24
II.3.3.2.1 Réactifs utilisés .....	24
II.3.3.2.2 Mesure.....	25
II.3.3.2.3 Calcul.....	25
II.3.3.3 Chromatographie ionique.....	26
a) Préparation des éluants.....	26
b) Préparation des échantillons.....	27
II.3.3.4 Mise en fonctionnement du système.....	27
3- Injection de l'échantillon.....	27
4- Analyse.....	27
II.4 Partie logiciel.....	27

**CHAPITRE III : Approche hydrochimique,  
statistique et géostatistique**

III.1 Introduction.....	26
III.2 Outils Informatiques utilisés.....	26
III.3 Description qualitative des eaux de sources de Chréa.....	27
III.3.1 pH.....	27
III.3.2 Conductivité.....	27
III.3.3 TDS ou Sels Totaux Dissous.....	28
III.3.4 La balance ionique.....	29

III.3.5 Les espèces ioniques.....	30
III.3.5.1 Les anions.....	30
III.3.5.1.1 Les bicarbonates $\text{HCO}_3^-$ .....	30
III.3.5.1.2 Les chlorures $\text{Cl}^-$ .....	30
III.3.5.1.3 Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).....	31
III.3.5.2 Les cations.....	31
III.3.5.2.1 Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).....	31
III.3.5.2.2 Le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ).....	31
III.3.5.2.3 Le sodium ( $\text{Na}^+$ ).....	32
III.3.5.2.4 Le potassium ( $\text{K}^+$ ).....	32
III.4 Interprétation des résultats .....	32
III.4.1 Diagramme de Piper :.....	32
III.4.2 Diagramme de Schöeller-Berkaloff .....	33
III.5 L'équilibre Calco-Carbonique .....	36
III.6 Les indices de saturation.....	37
III.7 Origine des éléments chimiques .....	37
III.7.1 Le couple Na/Cl.....	38
III.7.2 Le couple Ca/ $\text{SO}_4$ .....	39
III.7.3 Les couples Mg/ $\text{HCO}_3^-$ – Ca/ $\text{HCO}_3^-$ .....	40
III.7.4 Le couple TDS/Cl.....	40
III.8 APPROCHE STATISTIQUE.....	41
III.8.1 Introduction .....	41
III.8.1.1 Présentation du logiciel XLSTAT.....	41
III.8.2 Le principe d'Analyse en Composantes Principales: .....	43
III.8.3 Interprétation des résultats.....	41
III.8.3.1 Espace des variables.....	42
III.8.3.1.1 Matrice de corrélation.....	42
III.8.3.1.2 Analyses des valeurs propres.....	43
III.8.3.3 Analyse du cercle de corrélation.....	43
III.8.3.4 Espace des individus.....	44
III.8.3.4.1 Projection dans l'espace des individus du plan factoriel $F_1 \times F_2$ .....	44
III.9 Approche géostatistique.....	45
III.9 Introduction.....	45
III.9.1 Théorie des variables régionalisées, concepts et méthodes.....	45

III.9.2 Fonctions aléatoires.....	46
III.9.3 Hypothèses de base.....	46
1- Stationnarité du second ordre.....	46
2- Hypothèse intrinsèque.....	46
III.9.4 Propriétés du variogramme.....	47
III.9.4.1 Isotropie et anisotropie.....	48
III.9.4.2 Modélisation du variogramme.....	48
III.9.4.3 Validation croisée.....	49
III.9.4.4 Krigeage.....	49
III.9.4.5 Application de l'approche géostatistique.....	49
III.9.4.6 Outil informatique utilisé.....	49
III.9.4.6.1 Système d'Information Géographique.....	49
a) Les histogrammes.....	50
III.9.4.6.2 Représentation Cartographique.....	50
b) Les cartes de Chréa .....	58
III.9.4.6.3 Discussion des différentes approches.....	62
Conclusion générale.....	64
Références Bibliographiques ANNEXES	

## **Liste des Figures**

<b>Figure 1</b> : Carte historique de la limite du Parc National de Chréa (PNC).....	1
<b>Figure 2</b> : Localisation géographique du Parc National de Chréa.....	2
<b>Figure 2</b> : Carte des limites de secteurs.....	4
<b>Figure 3</b> : Carte Lithologique du PNC.....	6
<b>Figure 4</b> : Carte de réseau hydrographique.....	9
<b>Figure 5</b> : Carte climatique du parc national de Chréa.....	10
<b>Figure 6</b> : Températures moyennes mensuelles de la wilaya de Blida.....	10
<b>Figure 7</b> : Carte pluviométrique du PNC.....	11
<b>Figure 8</b> : Variation des précipitations moyennes mensuelles (2000–2019).....	12
<b>Figure 9</b> : Histogramme des précipitations moyennes annuelles (2000–2019)..	12
<b>Figure 11</b> : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles.....	13
<b>Figure 12</b> : Prélèvement des échantillons des sources.....	17
<b>Figure 13</b> : Prélèvement des échantillons et le matériel utilisés.....	18
<b>Figure 14</b> : Appareils utilisés dans la mesure des paramètres physico-chimique	19

<b>Figure 15</b> : Localisation des points d'eaux échantillonnées (2003-2019) sur la zone d'étude.....	20
<b>Figure 16</b> : Méthode de pH-métrie. ....	22
<b>Figure 17</b> : Courbe N°1 calibration pour la silice.....	24
<b>Figure 18</b> : Spectrophotomètre UV-visible UVICON 430 (Labo. d'Hydrochimie).24	
<b>Figure 19</b> : Chromatographe ionique Dionex120.....	24
<b>Figure 20</b> : Interface du logiciel Diagramme.....	26
<b>Figure 21</b> : Diagramme de Piper.....	33
<b>Figure 22</b> : Schoeller-Berkaloff pour les groupes G1, G2, G3, G4.....	33-34
<b>Figure 23</b> : Graphe des indices de saturation.....	37
<b>Figure 24</b> : Relation Calcium – pH et $\text{HCO}_3^-$ – pH.....	38
<b>Figure 25</b> : Relation Sodium – Chlorure.....	38
<b>Figure 26</b> : Relation Ca – $\text{SO}_4$ .....	39
<b>Figure 27</b> : Couples Mg/ $\text{HCO}_3$ et Ca/ $\text{HCO}_3$ . ....	40
<b>Figure 28</b> : Relation TDS – Chlorures. ....	40
<b>Figure 29</b> : Interface de commande du logiciel XLSTAT.....	41
<b>Figure 30</b> : Cercle de corrélation ACP des variables du plan factoriel F1×F2.....	44
<b>Figure 31</b> : Espace variables individus.....	45
<b>Figure 32</b> : Propriétés des variogrammes.....	48
<b>Figure 33</b> : Histogrammes de Chréa.....	51
<b>Figure 34</b> : Histogrammes d'El-Hamdania.....	52
<b>Figure 35</b> : Les semi-variogrammes de Chréa.....	53
<b>Figure 36</b> : Les semi-variogrammes d'El-Hamdania.....	54
<b>Figure 38</b> : Localisation des points de sources sur la carte de fracturation.....	63

## Liste des Tableaux :

<b>Tableau 1</b> : Répartition administrative du territoire du Parc National de Chréa par entités administratives.....	3
<b>Tableau 2</b> : Caractéristique générale de la station pluviométrique.....	9
<b>Tableau 3</b> : Classification de la minéralisation des sources.....	27
<b>Tableau 4</b> : Résultats hydrochimiques des eaux de sources.....	28
<b>Tableau 5</b> : Classification des eaux selon Schoeller–Berkalof.....	36
<b>Tableau 6</b> : Matrice de corrélation.....	42
<b>Tableau 7</b> : Modélisation des semi-variogrammes de secteur d’El-Hamdania.....	54
<b>Tableau 8</b> : Modélisation des semi-variogrammes de Chréa.....	55

## ملخص:

الحظيرة الوطنية لشريعة هي كتلة صخرية تشكل جزءًا من الوحدة الجغرافية للأطلس التلي وتهيمن على 3 قطاعات: القطاع المركزي، الحمدانية، وحمام ملوان. فيما يتعلق بالموارد المائية، لطالما اعتبرت هذه الكتلة الصخرية خزانًا مائيًا معتبرا من الناحية الجيولوجية، فهي تقدم وحدة صخرية متصدعة ومتشققة، والتي تؤثر بشكل مباشر على أدائها الهيدروجيولوجي والهيدروديناميكي.

سمحت لنا 80 مصدرًا للمياه (ينابيع) في إطار هذه الدراسة بتطبيق الأساليب الهيدروكيميائية والإحصائية وإحصاء جغرافيا بتحديد العلاقات من خلال الارتباطات بين المصادر المختلفة.

**الكلمة الرئيسية:** يانبيع، الحظيرة الوطنية للشريعة، الهيدروكيميا، الهيدروجيولوجيا، الهيدروديناميكية، الجيوساتاتيكية.

## Résumé :

Le Parc National de Chréa fait partie d'une unité géographique de l'Atlas Tellien appelé l'Atlas blidéen. Il comporte 3 secteurs : le secteur central, El-Hamdania et Hammam Melouane. Sur le plan de ressources hydriques, ce massif a été considéré depuis longtemps comme un château d'eau naturel. Sur le plan géologique, il présente un ensemble lithologique fracturé et fissuré, ce qui influence directement son fonctionnement hydrogéologique et hydrodynamique.

80 sources ont été retenues dans le cadre de cette étude. Elles nous ont permis d'appliquer les outils hydrochimiques et statistiques (ACP et géostatistique) qui nous ont amené à préciser le processus de minéralisation des eaux, les corrélations les plus significatives entre les différents paramètres mesurés, ainsi qu'une image globale du cheminement souterrain des eaux.

**Mots-clés :** Sources, Parc de Chréa, Hydrochimie, Hydrogéologie, ACP, XLSTAT, Hydrodynamisme, Géostatistique

**Abstract:**

Chr ea National Park is part of a geographical unit of the Tellian Atlas called the blidéen Atlas. It dominates 3 sectors: the central sector, El-Hamdania and Hammam Melouane. In terms of water resources, this massif has been considered for a long time as a water storage reservoir for the region. On the geological level it consists of a fractured and fissured lithological ensemble, which directly influence the hydrogeological and hydrodynamic functioning of the hosted aquifer.

80 water springs were studied by means of hydrochemical and statistical methods. This enabled one to identify the origin of the waters' mineralization, to characterize the relationships between the different springs and, to specify the most significant correlations to be drawn between their analyzed parameters.

**Keywords:** Springs, Chr ea park, Hydrochemistry, Hydrogeology, PCA, XLSTAT Hydrodynamics, Geostatistics.

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>PNC :</b>	Parc National de Chréa
<b>MaB :</b>	Man and Biosphère.
<b>UNESCO:</b>	United nations educational scientific and cultural organization.
<b>CRNA :</b>	Centre de Recherche Nucléaire d'Alger.
<b>Ch. :</b>	Chréa.
<b>Hm :</b>	El-Hamdania .
<b>pH :</b>	Potentiel Hydrogéné.
<b>TDS :</b>	Sels Totaux Dissous.
<b>TAC :</b>	Titre alcalimétrique.
<b>DO :</b>	Oxygène dissous.
<b>BI :</b>	Balance ionique.
<b>GPS :</b>	Global Positioning System.
<b>CRDS:</b>	Cavity Ring-Down Spectroscopy.
<b>V :</b>	Volume.
<b>f :</b>	Facteur
<b>N :</b>	Normalité.
<b>Std :</b>	Standard.
<b>M :</b>	Masse Molaire.
<b>ACP :</b>	Analyse en Composantes Principales.

### **Introduction générale.**

Au cours des siècles derniers, l'homme est devenu de plus en plus dépendant des ressources en eau pour son alimentation et son bien-être. L'eau est une nécessité vitale considérée comme principal facteur limitant la vie de l'homme.

Les eaux de sources ne cessent de gagner en importance à travers le monde. Elles sont considérées aujourd'hui comme l'une des sources majeures d'approvisionnement des populations en eau potable à cause du fait qu'elles ne nécessitent pas un très grand traitement, comparées aux eaux de surface.

En Algérie, l'Atlas blidéen, fait partie intégrante de l'Atlas tellien, qui se caractérise par sa spécificité géologique et hydrogéologique. Ces ressources en eau sont étudiées en profondeur.

Dans ce contexte l'étude proposée couvre deux principaux secteurs (le secteur central et celui El-Hamdania) du Parc National de Chréa, qui s'étale sur les monts de l'Atlas blidéen.

L'objectif de cette étude est de faire l'inventaire de tous les points d'eau des deux secteurs du Parc et d'appliquer différentes méthodes (hydrochimique, statistique, géostatistique) afin de comprendre le comportement hydrodynamique des sources dans ce type de milieu discontinu (fissuration et fracturation).

Le présent travail est structuré comme suit :

### **Introduction générale.**

- **Chapitre I** : qui consiste en la présentation géographique et morphologique du PNC qui représente les caractéristiques de la zone d'étude.
- **Chapitre II** : il comporte la méthodologie de prélèvement et de mesure in situ, ainsi les analyses en laboratoire d'hydrochimie.
- **Chapitre III** : il est consacré à l'application de l'approche hydrochimique, statistique et géostatistique.

### **Conclusion générale.**

## I.1 Présentation du Parc National de Chréa :

Le PNC est situé au nord de l'Algérie, il a été créé en 1983 au centre de l'Atlas blidéen et s'étale sur une superficie de 26.587 ha. Il représente ainsi un espace de protection et de promotion des ressources naturelles dont la potentialité hydrique est importante. Il se distingue par de nombreux petits cours d'eau et plus de 80 sources [1]

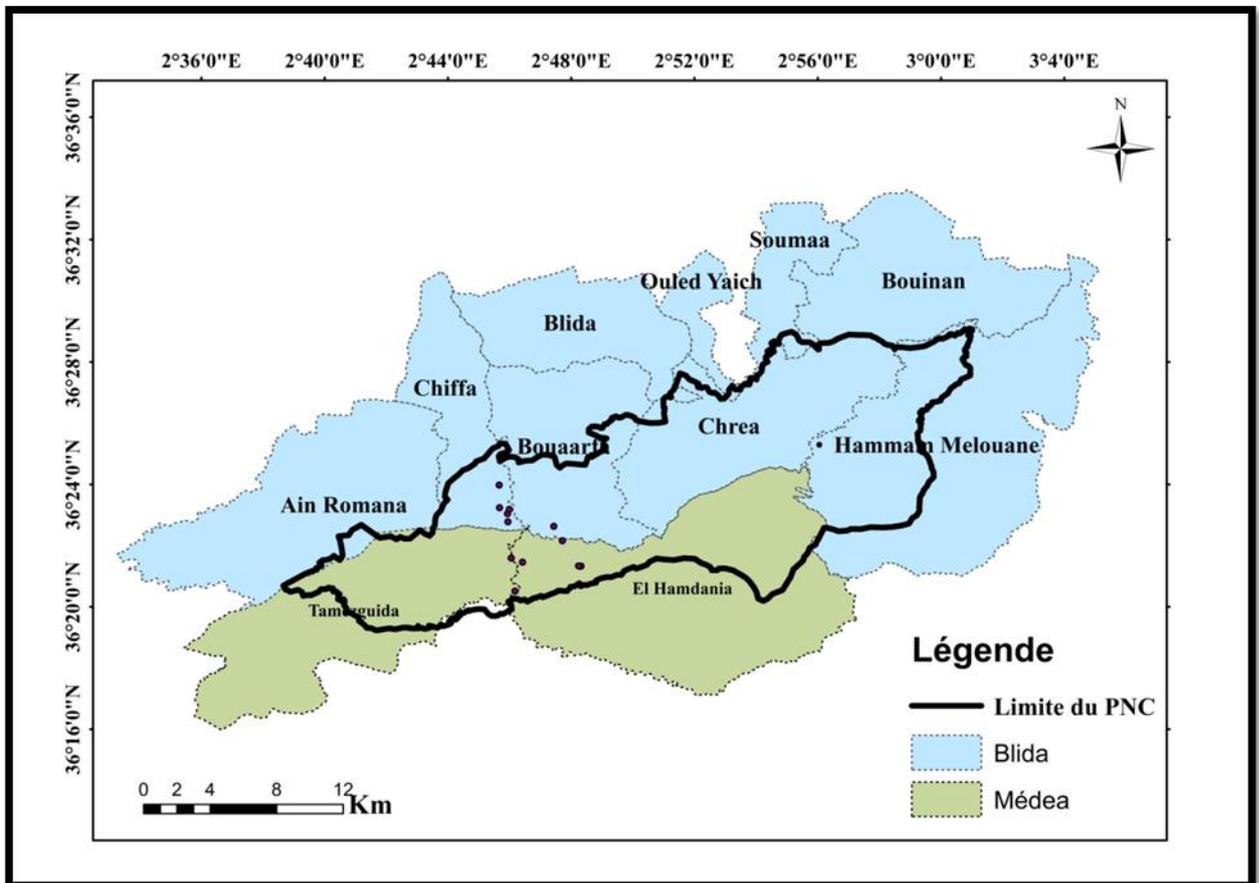


Figure 1 : Carte des limites du Parc National de Chréa (PNC).

## I.2 Situation Géographique :

Le PNC est situé au nord de l'Algérie à 50 km au sud-ouest d'Alger, localisé sur le massif de l'Atlas Tellien, d'orientation générale sud-ouest / nord-est, s'étend entre les parallèles 36°36' et 36°00' et les méridiens 3°20' et 2°40' son territoire est reparti successivement sur les hauteurs des monts de Hammam Melouane à l'Est, les crêtes de Chréa au centre et Djebel Tamesguida à l'Ouest. La plaine de la Mitidja constitue sa limite Nord et l'Oued Melah sa limite Sud. [2]

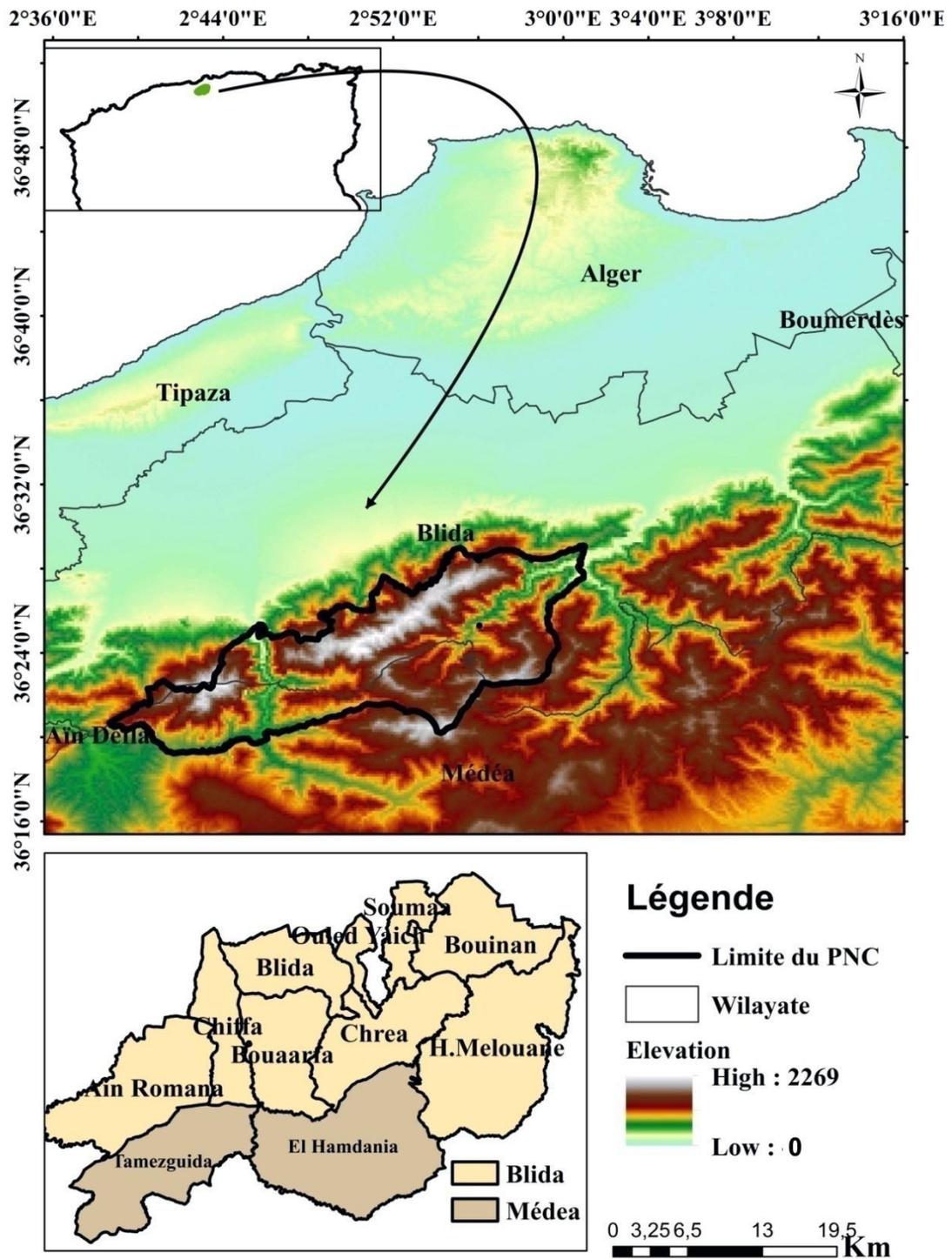


Figure 2 : Localisation géographique du Parc National de Chr a.

Le Tableau ci-dessous, représente la répartition administrative du territoire du Parc National de Chréa [3].

**Tableau. 1** : Répartition administrative du territoire du Parc National de Chréa par entités administratives.

Wilaya	Communes	Superficie	Superficie%	Wilaya %
<b>Blida</b>	Ain Romana	316 ha	1,26%	<b>67,43%</b>
	Chiffa	1225 ha	4,61%	
	Bou-Arfa	3343 ha	12,57%	
	Blida	84 ha	0,32%	
	Chr�ea	7602 ha	28,59%	
	Ouled Yaich	56 ha	0,21%	
	Soum�a	273 ha	1,03%	
	Bouinan	174 ha	0,65%	
	Hammam Melouane	4764 ha	17,92%	
	<b>Total de la wilaya</b>	<b>17857 ha</b>	<b>67,43%</b>	
<b>M�ed�a</b>	Tamezguida	4100 ha	15,43%	<b>32,55%</b>
	El-Hamdania	4550 ha	17,12%	
	<b>Total de la wilaya</b>	<b>8650 ha</b>	<b>32,55%</b>	
<b>T O T A L :</b>		<b>26507 ha</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

### I.3 Les secteurs du Parc National de Chr ea :

Pour des raisons de gestion de proximité, visant en particulier la maîtrise du terrain par une pr esence permanente et assidue, des moyens humains et matériels du Parc National de Chr ea, il a été défini, en fonction des maisons forestières habitables, et du tissu de routes et pistes accessibles, trois secteurs d'intervention au niveau du parc couvrant dans la complémentarité, la totalité du terrain.

**a** – Le secteur central s'étend sur la partie Nord-Est du Parc National de Chr ea et sa superficie est de 9772 ha, il est sillonné par la route nationale N 37.

**b** – Le secteur d'El-Hamdania s'étend sur la partie Ouest de Parc National de Chr ea avec une superficie de 8828 ha, il est sillonné par la route nationale N  01.

c– Le secteur de Hammam Melouane s’étend sur la partie Sud-Est du Parc National de Chr a avec une superficie de 8000 ha. [4].

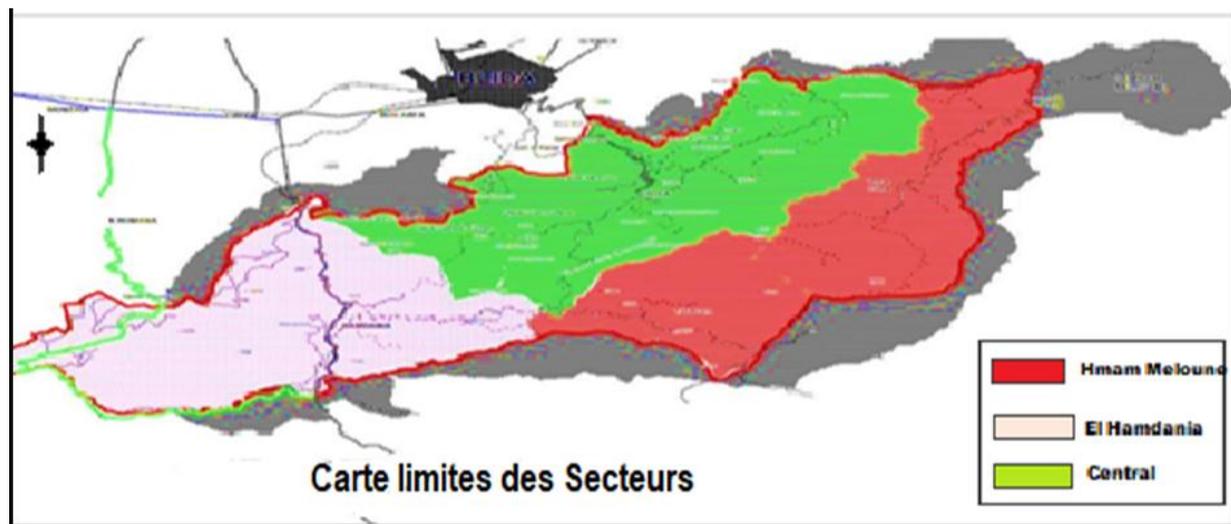


Figure 3 : Carte des limites des trois secteurs.

#### I.4 Aperçu topographique :

Le massif de l'Atlas blidéen se présente comme une barrière rocheuse à topographie très tourmentée dont le point le plus élevé culmine à 1627 m à Koudiat Sidi Abdelkader et le point le plus bas 217m (Chiffa). Son territoire est dominé par trois ensembles topographiques bien distincts :

Le premier ensemble concerne l'anticlinal de l'Atlas blidéen formant un chaînon montagneux constitué d'Ouest en Est par djebel Tamezguida (1386 m), djebel Mouzaia (1603 m), djebel Djam a Dr a (1448 m), djebel Gueroum ne (1627 m), et djebel Ferroukha (1498 m).

Le deuxième ensemble, concerne les contreforts partant de la ligne de crête principale et s'orientant soit vers le Nord, soit vers le Sud. Vers le Nord, Dr a Tigounatine, djebel Dr a, djebel Feraoun, et le Dr a du djebel Ferroukha, forment les principaux contreforts septentrionaux de cet ensemble. Vers le Sud, djebel Sidi Mohamed, Koudiat Alloue, Kal a Béni Moussa forment l'essentiel de nombreux contreforts plus réduits, caractérisant à l'instar du versant Nord, le versant Sud.

Le troisième ensemble, concerne les zones relativement plates et faiblement inclinées, de superficies parfois assez importantes. Ces zones se situent entre le djebel Ferroukha du côté de la ligne de crête, et le djebel Marmoucha. Sur le djebel Ferraoun, le djebel Merdouchergui, et le djebel Tamezguida, se répartissent plusieurs Koudiat telles que Koudiat Tala Aouine (1442 m) et KoudiatTifraouine (1118 m). [3]

### I.4.1 Contexte géologique à l'échelle de l'Atlas blidéen :

Il se compose presque entièrement de schistes d'âge Crétacé inférieur sans fossiles, d'éboulis de pentes de même origine, sans cohésion qui se désagrègent en éléments plus ou moins grossiers et pauvres en éléments minéraux. Ces schistes sont présents sur la quasi-totalité des versants septentrionaux. Leur épaisseur est plus de 100 m environ. Elles se prolongent régulièrement vers le Sud – Sud/Est sous des argiles variantes entre 40 et 60 % et forment la base sur laquelle se sont accumulés les dépôts des terrains postérieurs : calcaires marneux, gr s, argiles sableuses et conglomérats [2], [3].

Deux zones d'aspects différents constituent ce massif :

- a) **Anticlinal de Blida** : C'est une arête schisteuse, formée par les crêtes des Béni Salah, boisée de cèdre, et la crête du djebel Ferroukha et Marmoucha. Au Nord de ces crêtes, partent de courts contreforts boisés d'aspect peu varié. Au Sud, l'anticlinal est nettement délimité par les dépressions de l'Oued Merdja à l'Ouest et de l'Oued Mekt a à l'Est et à la tête duquel le col de Talakat (1136 m) sert d'union vers la seconde zone (le second anticlinal).
- b) **Anticlinal de Takitount** : Cette zone montagneuse est d'aspect tout à fait diff rent. Profondément entaillée de ravins. Elle est surmontée par des crêtes calcaires aux flancs abrupts dressés parfois en monts rocheux que l'on dénomme Kal a. De ces promontoires s'étirent vers le Nord et le Nord–Est, deux contreforts qui s'élargissent en éventail au-dessus des affluents de l'oued El Harrach.

Ce sont, le djebel Hallouk 1316 m (formidable escarpement   crête dentelée), le Kef Safra 1273 m, et Hadjer Ayoun 1375 m, qui constituent, les points culminants de ces contreforts. Du col de Talakat (croisement des deux anticlinaux), surgit l'arête du djebel Sidi Mohamed 1435 m, formant la ligne de partage des eaux. De cette crête, se détache la ligne de contrefort du djebel Anseur et la ligne de crête de Tiberguent,

laquelle se termine au-dessus d'El-Hamdania. Cette région datant du Crétacé, présente fréquemment, des superpositions anormales du Cénomaniens sur le Sénonien provenant du renversement des plis vers le Sud, à partir de l'anticlinal de Blida. Une zone synclinale située entre le col de Talakat et le djebel Hallouk, sépare les deux anticlinaux. [3]

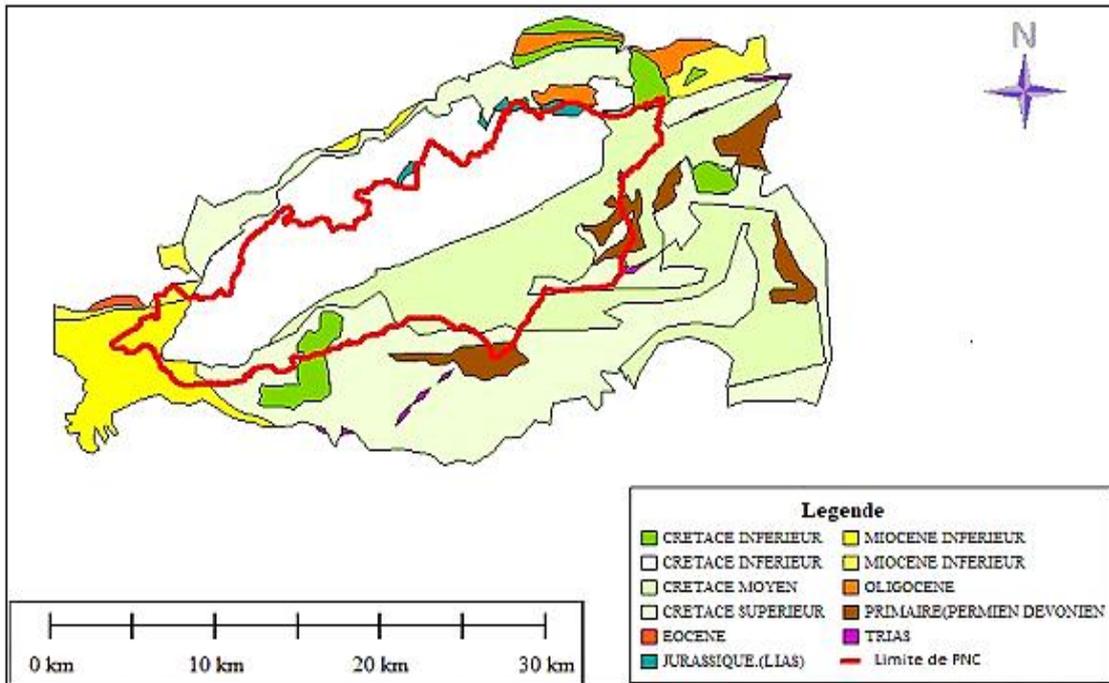


Figure 4 : Lithologie du PNC.

### I.5 Lithologie :

La région étudiée n'offre pas une grande diversité de roches ; en effet, les formations les plus anciennes sont représentées par de puissantes assises de schistes argileux (dit : schiste de la Chiffa) avec quelques taches de calcaires jurassiques, puis viennent la formation composée d'argile et quartzite et enfin le faciès marneux qui se développe sur la bordure Nord du pied du contrefort de Blida.

**a Les schistes de la Chiffa** : Cette formation se présente comme une puissante assise de schistes argileux, très monotone, finement litée et intercalée de quartzite à sa partie supérieure. Ces schistes portent des traces de nombreux efforts tectoniques.

**b Les calcaires jurassiques** : Les terrains jurassiques sont très limités dans le secteur du PNC. On peut les rencontrer, en dehors de quelques lambeaux ou chicots isolés, qui viennent se placer entre les schistes précédents et le Néocomien.

Cette formation est composée de calcaires, de massifs cristallins, parfois gréseux très tectonisés, comme en témoignent les affleurements de l'Oued-El-Kebir au Sud de Blida et au Douar Bou-Zougua à l'Est du périmètre d'étude.

**c Les argiles et quartzites du Crétacé** : Les dépôts sont représentés par une épaisse série d'argiles schisteuses avec des grès et des quartzites surmontées de marnes et de lentilles calcaires ; qu'on retrouve en plusieurs lambeaux discontinus. Ils sont d'âge Crétacé inférieur.

**d Les dépôts quaternaires** : Les terrains quaternaires regroupent aussi bien les alluvions récentes ou anciennes qui dominent des vallées, que les alluvions récentes du fond des oueds. [5].

### I.6 Pédologie :

Selon Killian et Martin (1957) les sols du massif de Chréa sont toujours très décalcifiés, même si la roche mère est calcaire ; les pentes et les sommets présentent un sol maigre schisteux prédominant avec un pH voisin de la neutralité (6,2 à 7,2). Par contre, les sols des bas-fonds et des pentes douces sont plus épais, plus évolués et riches en matière organique dans la zone Nord et Nord-Ouest. [6]

### I.7 Hydrographie :

Les eaux du parc liées au bassin versant de l'oued El Harrach sont principalement drainées par Oued Maktaa et Oued Mâane, et au bassin versant de l'oued Chiffa. Du point de vue quantitatif, le curvigraphe a montré que la densité du réseau hydrographique au niveau du Parc National de Chréa est importante. Elle est d'environ 2,4 km/km<sup>2</sup>. Ce paramètre est beaucoup plus important dans la partie du

bassin versant de l'oued El Harrach. (3,1 km/km<sup>2</sup>) que dans celle de l'oued Mazafran (1,9 km/km<sup>2</sup>). [4]

Cette différence semble due à la nature du substrat qui est caractérisée par une forte présence de schistes et d'argiles facilement altérables dans la première partie hydrographique. Cette fragilité du substrat a probablement favorisé le développement d'un ravinement évoluant en cours d'eau. Par contre dans la deuxième partie, le substrat est moins altérable par la présence de calcaires et de grès.

La composante hydrographique constitue une potentialité économique à l'échelle régionale. En effet, elle représente un apport annuel moyen de **1.000 hm<sup>3</sup>/an**.

Le Parc National de Chréa présente, de par sa position géographique, une potentialité hydrique importante. C'est une zone très arrosée : 1000 mm de précipitations sur les sommets et les zones d'altitude du versant Nord, et autour de 900 mm pour la majorité des stations. La composante hydrographique de ce territoire est divisée en deux grandes parties appartenant aux deux bassins versants des oueds El Harrach et Chiffa [3].

Le partage des eaux est naturellement fait ; d'une part par la ligne de crêtes (d'orientation Nord-Est, Sud-Ouest) reliant les massifs de djebel Mermoucha, djebel Ferroukha, et djebel Guerroumène, et d'autre part par la ligne de crête orientée du Nord vers le sud à partir de djebel Guerroumène (Koudiat Sidi Abdelkader) jusqu'au point côté 1297 m à Takitount, en croisant djebel Sidi Mohamed.

Ces deux lignes de crêtes scindent le territoire du PNC en deux zones distinctes d'orientation Sud-Est et Nord-Ouest. Les eaux collectées au nord du parc se déversent dans l'oued Chiffa et la partie Sud-Est afflue vers l'oued El-Harrach. Les eaux du parc liées au bassin versant de l'oued El Harrach sont principalement drainées par Oued Maktaa [3].

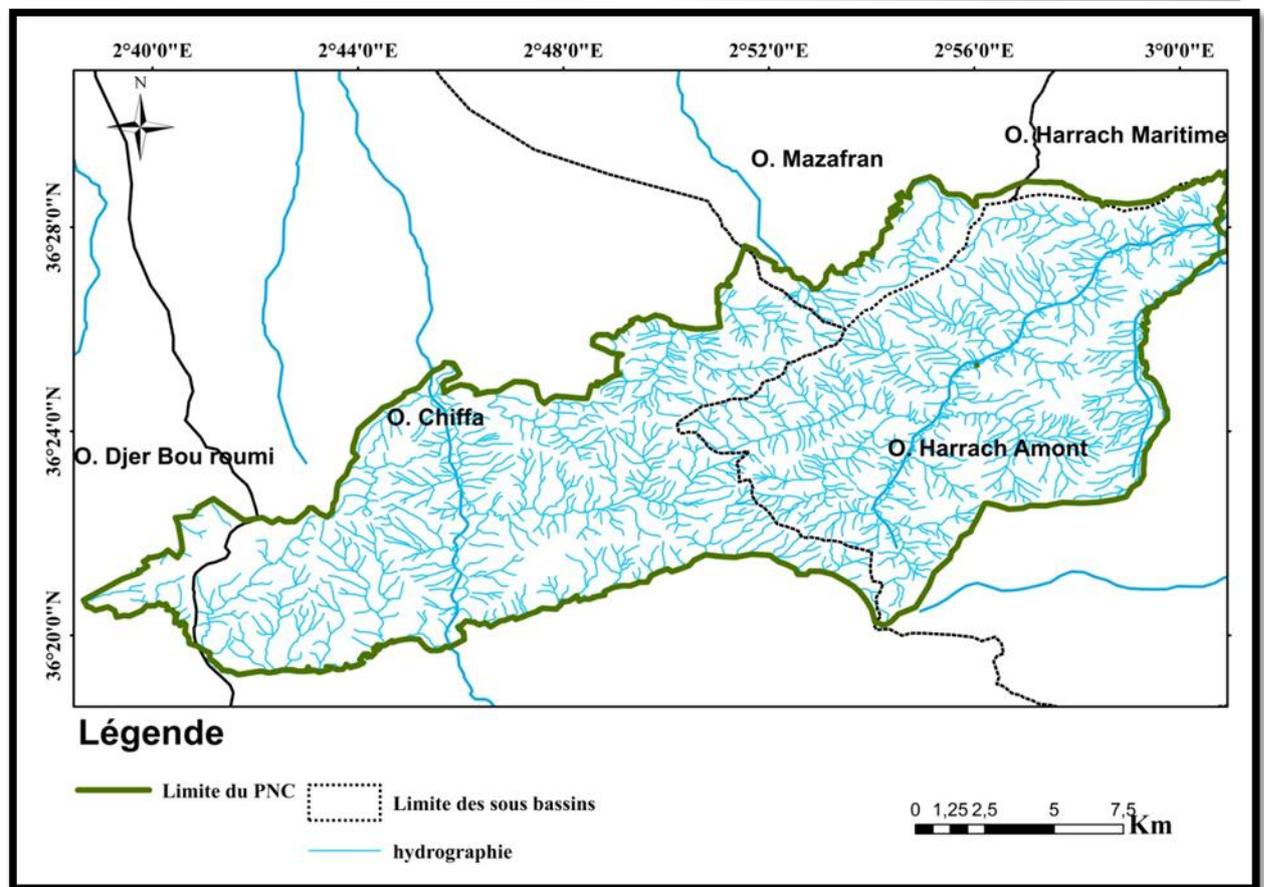


Figure 5 : Carte du réseau hydrographique

**Les caractérisations climatologiques :**

Afin de caractériser les tendances générales des différents paramètres climatiques de la zone d'étude, on a utilisé une série de données climatiques annuelles et mensuelles allant de 2000 à 2019 enregistrées au niveau de la station Douar Malki (Hammam Melouane) (**Tableau 2**).

**Tableau 2** : Caractéristiques générales de la station pluviométrique. [04]

Station	Code ANRH	Coordonnées Lambert		Altitude (m)
		X	Y	
Douar Malki	21427	532.45	355.75	130

### I.8.1 Climat et bioclimat :

Le massif de Blida, par ses deux versants, s'inscrit entièrement dans les bio-climats humides et sub-humides, qui sont prédominants dans la région. [2]

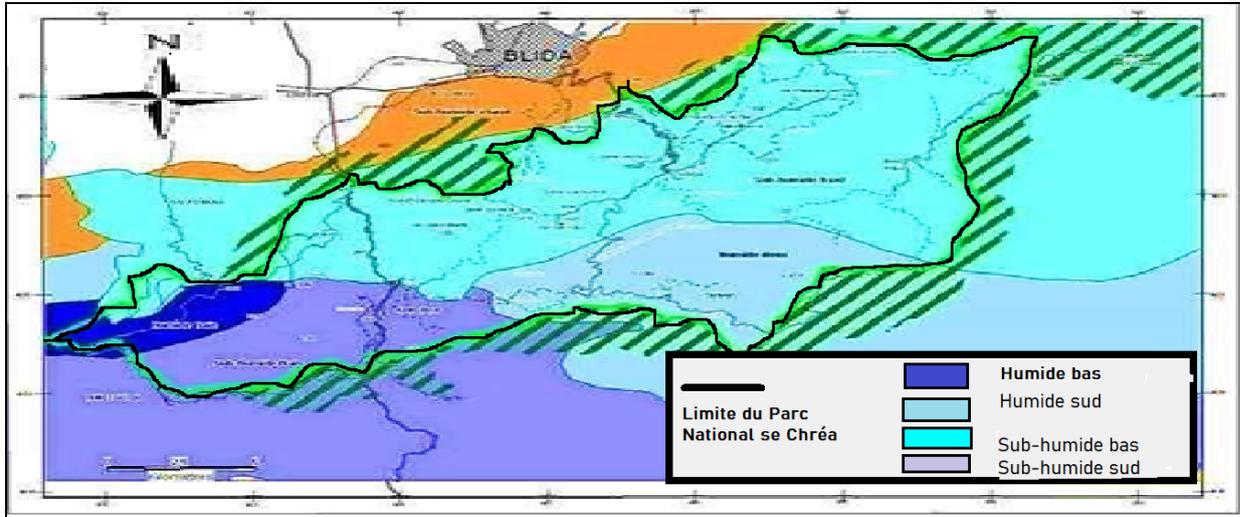


Figure 6 : Carte climatique du Parc National de Chr a. [4]

Situé au carrefour de deux ambiances climatiques, l'une caractérisée par les influences xériques provenant du continent et l'autre, par les influences maritimes venant du nord du pays, le Parc National de Chr a est compris entre l'isotherme 8  et 11 C de températures moyennes annuelles. Les sommets étant plus froids et les piémonts plus chauds.

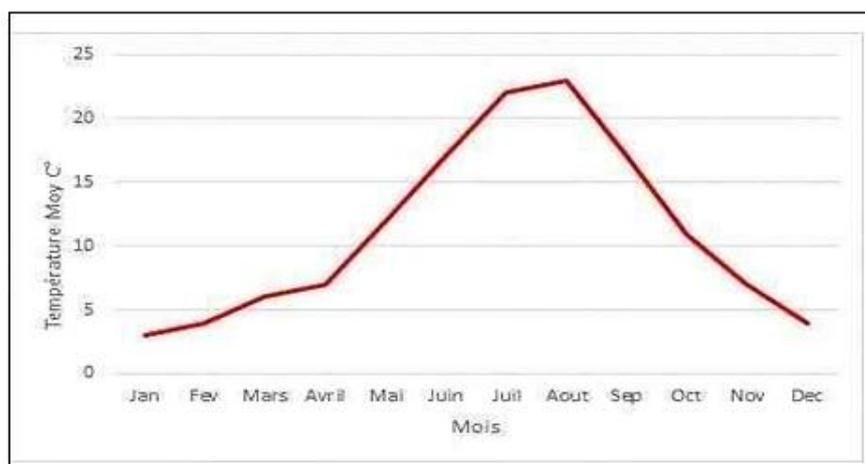


Figure 7 : Températures moyennes mensuelles de la wilaya de Blida.[04]

Les températures les plus basses sont enregistrées à Chréa avec 3°C, alors que les températures maximales varient entre 26,3 et 33,6°C.

## I.8.2 Précipitations :

Le Parc National de Chréa est compris entre les isohyètes 760 et 1400 mm/an de précipitations moyennes annuelles. Pour les précipitations journalières, il a été dénombré sur la base de 30 années d'observation soit 10950 jours, 2820 jours pluvieux à la station de Chréa et presque le même nombre à la station de Blida. [2].

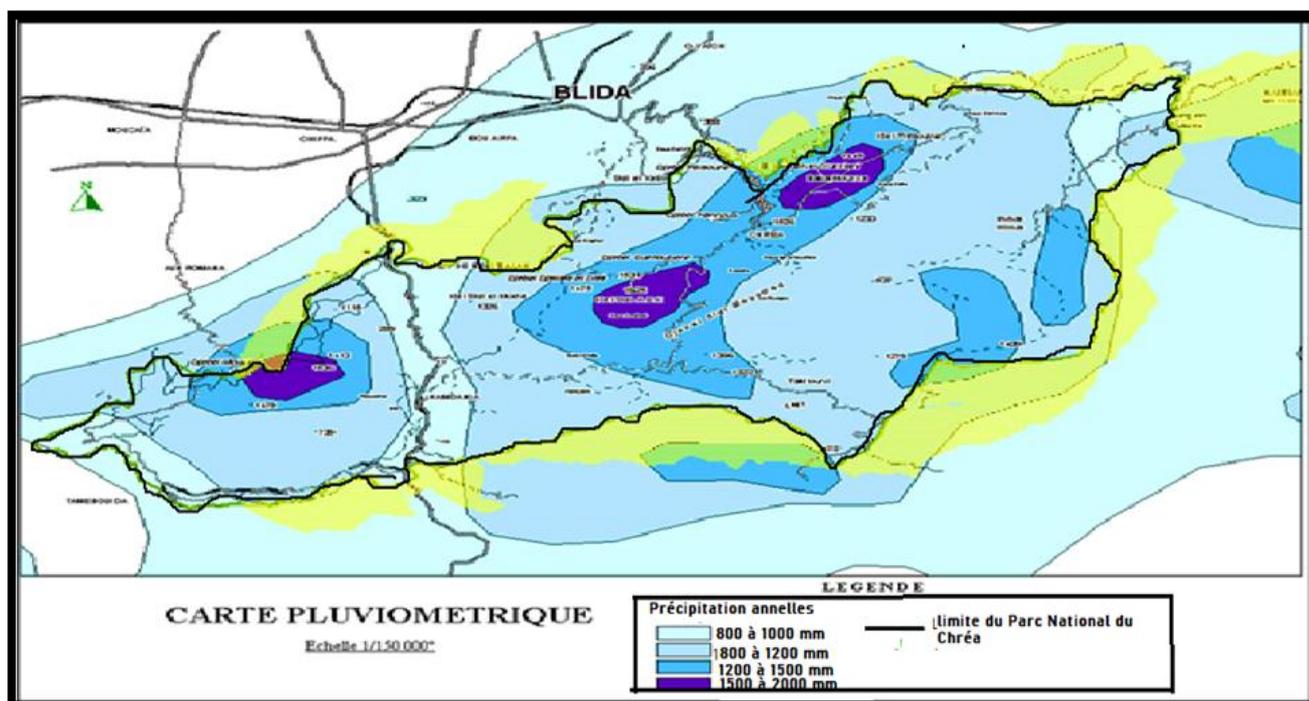


Figure 8 : Carte pluviométrique du PNC. [4]

### I.8.2.1 Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations sont très irrégulières d'un mois à un autre. Leur répartition n'est pas homogène, elles dépendent de plusieurs facteurs qui sont la latitude et la continentalité [4]. (cf. Annexe 1)

Le mois le plus pluvieux est Avril. La plus faible précipitation est enregistrée au mois de Juillet.

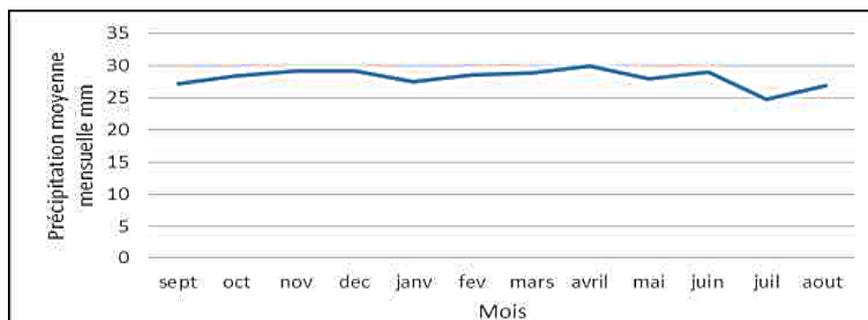


Figure 9 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (2000–2019).

### I.8.2.2 Précipitations annuelles :

La pluviosité moyenne annuelle est d’environ 662 mm, avec une valeur minimale de 344 mm enregistrée en 2001 et un maximum de 954 mm en 2002.

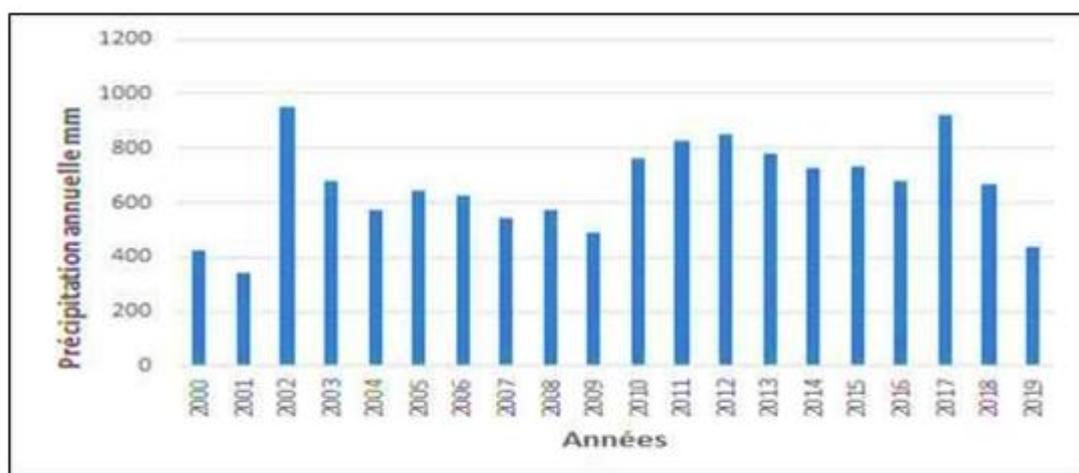


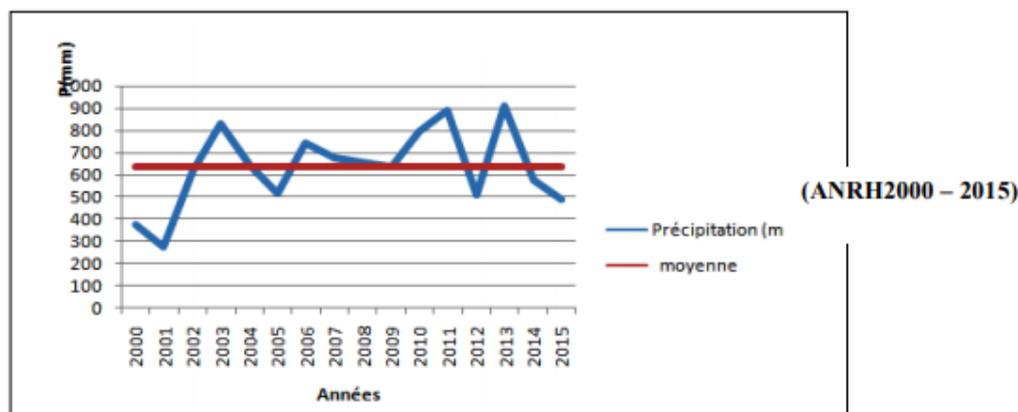
Figure 10 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles (2000–2019).

Les Tableaux 2 et 3, illustrent les données des précipitations moyennes annuelles et mensuelles, enregistrées entre 1967 et 2015.

Les Figures 10 et 11, montrent que les valeurs les plus élevées de la pluviométrie sont enregistrées durant la période hivernale avec un maximum enregistré au mois de Décembre (137,97 mm). La période sèche commence de juin à aout avec une valeur minimale enregistrée de 4,08 mm au mois de Juillet. [4].

**Tableau.3** : Précipitation moyenne mensuelle (période 1967–2009) ANRH, station d'El-Hamdania (011–15)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
P(mm)	36.4	58.2	102.3	137.9	107.6	126.2	97.2	82.7	53.2	9.02	4.0	6.98



**Figure 11** : Histogramme des précipitations interannuelles de la station de Blida pour la période (2000–2015).

L'étude des variations des précipitations établies par l'ANRH d'Alger au niveau de la station d'El-Hamdania montre que la région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles supérieures à 1400 mm [4].

### I.9. Conclusion :

Le PNC est caractérisé par sa grande potentialité hydrique. Il se situe à 50 km au Sud-Ouest d'Alger. Administrativement, il se trouve confiné dans la wilaya de Blida et de Médéa. Il est composé de trois secteurs : le secteur central (Chréa), celui de Hammam Melouane et enfin celui d'El-Hamdania .

L'aspect topographique du massif blidéen présente une barrière rocheuse tourmentée avec une pente qui culmine à 1627 m (Sidi Abd El Kader) et un point très bas à 217 m (Chiffa) dont les caractéristiques lithologiques sont :

- Les schistes de la Chiffa
- Les calcaires jurassiques
- Les argiles quartzites du Crétacé.

Sur le plan hydrographique les eaux du PNC sont liées à deux bassins : le bassin versant de l'oued El Harrach et celui de l'Oued Chiffa. La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles supérieures à 1400 mm avec un climat humide et sub-humide.

## **INTRODUCTION :**

Sur le plan méthodologique ce travail est divisé en trois parties principales :

- Travail de terrain comprenant les campagnes d'échantillonnage des points d'eau existants sur la zone étudiée. Elles ont été effectuées durant les années :
  - (2003 BET Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).
  - (2019 en co-collaboration avec le Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA)
- Un travail analytique au laboratoire d'hydrochimie du Département de la Datation et Traçage Isotopique, Division des Applications Nucléaires du CRNA, réservé aux techniques d'analyses hydrochimiques des échantillons prélevés.
- Un traitement des données avec des logiciels :
  - ✓ Diagrammes
  - ✓ XLSTAT (Analyse en Composantes Principales)
  - ✓ ArcGIS.

### **II.1 Partie Terrain :**

Les campagnes d'échantillonnages regroupent celles effectuées par l'ANRH durant les années (2003–2019), ainsi que ma sortie sur terrain encadrée par les chercheurs du CRNA le 25 avril 2021 (cf. photos ci-après)

#### **II.1.1 Échantillonnage :**

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau [7]. D'une manière générale, le prélèvement doit être effectué manuellement.

#### **II.1.2 Procédure de prélèvement :**

Avant le prélèvement d'un échantillonnage de l'eau, les flacons (2x500 mL) en polyéthylène, doivent être bien rincés. Après le prélèvement on ajoute 03 gouttes

d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) à un des flacons afin d'éviter une perte de signal par la précipitation des cations.

Enfin les flacons doivent être fermés hermétiquement puis conservés à une température basse ( $< 4^\circ\text{C}$ ).

### **II.1.3 Paramètres physico-chimiques mesurés in situ :**

Les paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité, TDS, alcalinité et oxygène dissous) doivent être mesurés in situ. En effet, ces paramètres sont très sensibles aux conditions du milieu (changements de température, de pression et activité bactérienne) et donc susceptibles de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur site. [8]

#### **II.1.3.1 Température :**

Il est primordial de connaître la température d'une eau. Ceci est dû au fait de son importance dans la solubilité des sels, des gaz, de sa conductivité et la détermination de l'origine et de l'écoulement de l'eau [8]

#### **II.1.3.2 Potentiel d'Hydrogène (pH) :**

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline, il est fonction de l'activité des ions hydrogènes  $\text{H}^+$  présents dans cette eau. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques [8]. Le pH et la température sont mesurés à l'aide d'une électrode de pH combinée (pH-mètre WTW Multi 350i).

Nous avons procédé de la manière suivante :

- L'étalonnage doit être vérifié régulièrement avec des solutions tampons de pH 4, 7 et 10.
- Remplir le seau par l'eau prélevée.
- Plonger l'électrode dans le seau qui contient l'eau examinée.
- Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation.
- Noter la valeur de pH affiché sur l'écran lorsque l'instrument produit un bip sonore.

### **II.1.3.3 Conductivité :**

La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale et d'estimer la totalité des sels solubles dans l'eau. La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. [8]

Elle est mesurée à l'aide d'une électrode de conductivité électrique combinée de marque WTW. Le procédé est comme suit :

- ✪ Rincer plusieurs fois la cellule (sonde) à conductivité, d'abord avec l'eau distillée puis en la plongeant dans le seau contenant l'eau examinée.
- ✪ Agiter le liquide afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide ambiant. Cette agitation permet aussi d'éliminer les bulles d'air sur les électrodes.
- ✪ Noter la valeur de la conductivité affichée sur l'écran du conductivimètre ainsi que la valeur de la salinité (TDS).

### **II.1.3.4 Salinité (TDS) :**

La salinité désigne la quantité de sels totaux dissous dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux [9].

### **II.1.3.5 Dosage de l'alcalinité (TAC) :**

L'alcalinité de l'eau se définit comme sa capacité à absorber des ions  $H^+$  libérés par un acide fort durant un titrage jusqu'au point déterminé (point d'équivalence). L'alcalinité est mesurée à l'aide d'un titrateur digital combiné de marque HACH (titration de  $H_2SO_4$  0.16N ou 1.6N).

La procédure se fait comme suit :

- À l'aide d'une pipette, on prélève 100 mL d'eau à doser puis on les verse dans un bécher, puis on ajoute un indicateur coloré le green-methyl et de la phénolphtaléine en poudre.
- Le dosage de l'eau est réalisé par une solution d'acide sulfurique à 0.16N à l'aide d'un titrateur digital goutte à goutte, jusqu'à l'obtention de la couleur rose (au virage)
- Noter la valeur obtenue.

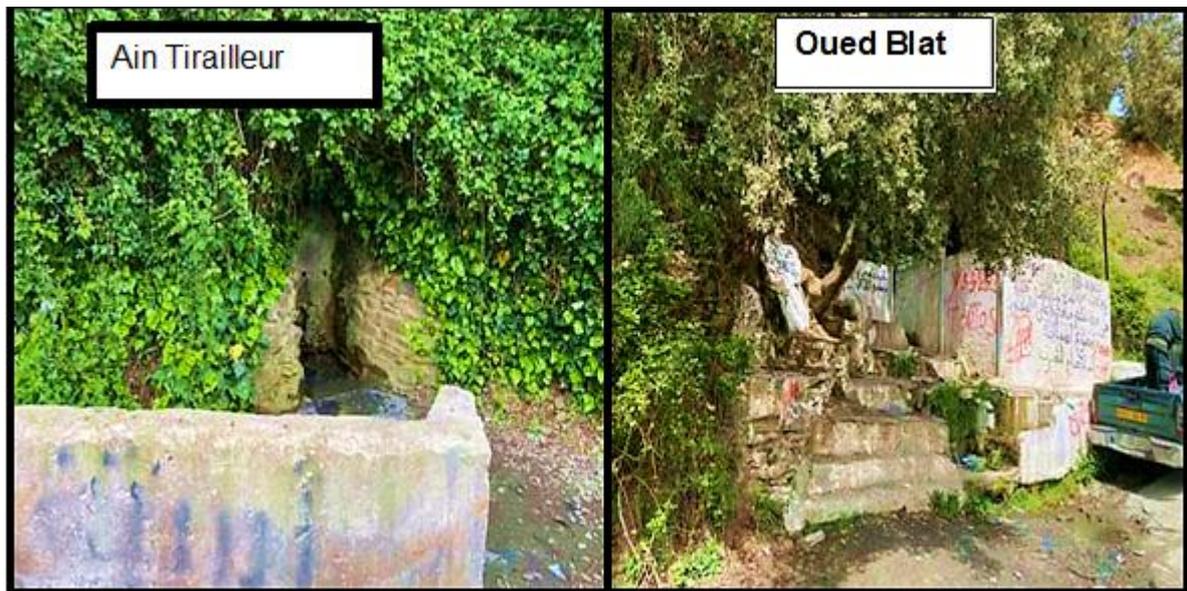


Figure 12 : Prélèvement des échantillons de sources

#### II.1.3.6 Oxygène dissous :

L'oxygène dissous est un facteur écologique dans les eaux naturelles car sa présence (milieu aérobie) permet la respiration des êtres vivants aquatiques.

Il est mesuré par une sonde luminescente LDOTM HQ10 de HACH, en mg/L ou en pourcentage de saturation ( $O_2\%$ ). [8]

L'appareillage utilisé dans la mesure des paramètres physico-chimiques est présenté sur la Fig. 13 ci-dessous :



Figure 13 : Prélèvement des échantillons et le matériel utilisés.

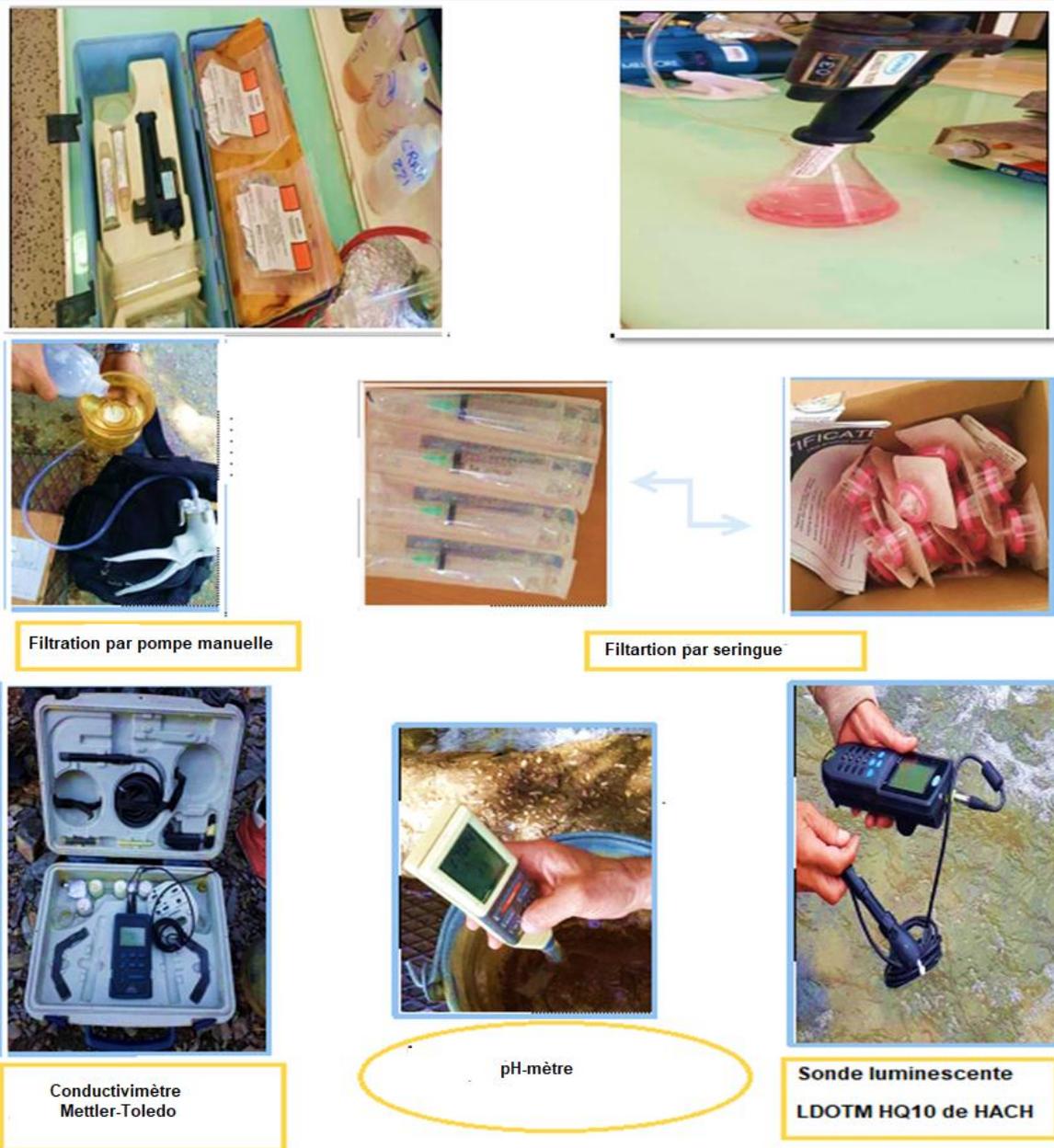


Figure 14 : Les appareils utilisés dans la mesure des paramètres physico-chimiques.

## II.2 Présentation géographique des points d'eau échantillonnés au niveau du PNC :

La région d'étude est située dans la partie occidentale du parc national de Chr a, au niveau de la commune de Bouaarfa, de Chiffa et de Béni Ali. Ces sites d'étude ont été choisis afin de comparer nos résultats expérimentaux avec ceux de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) retenues pour les besoins de l'étude et qui sont représentés sur la carte ci-après.

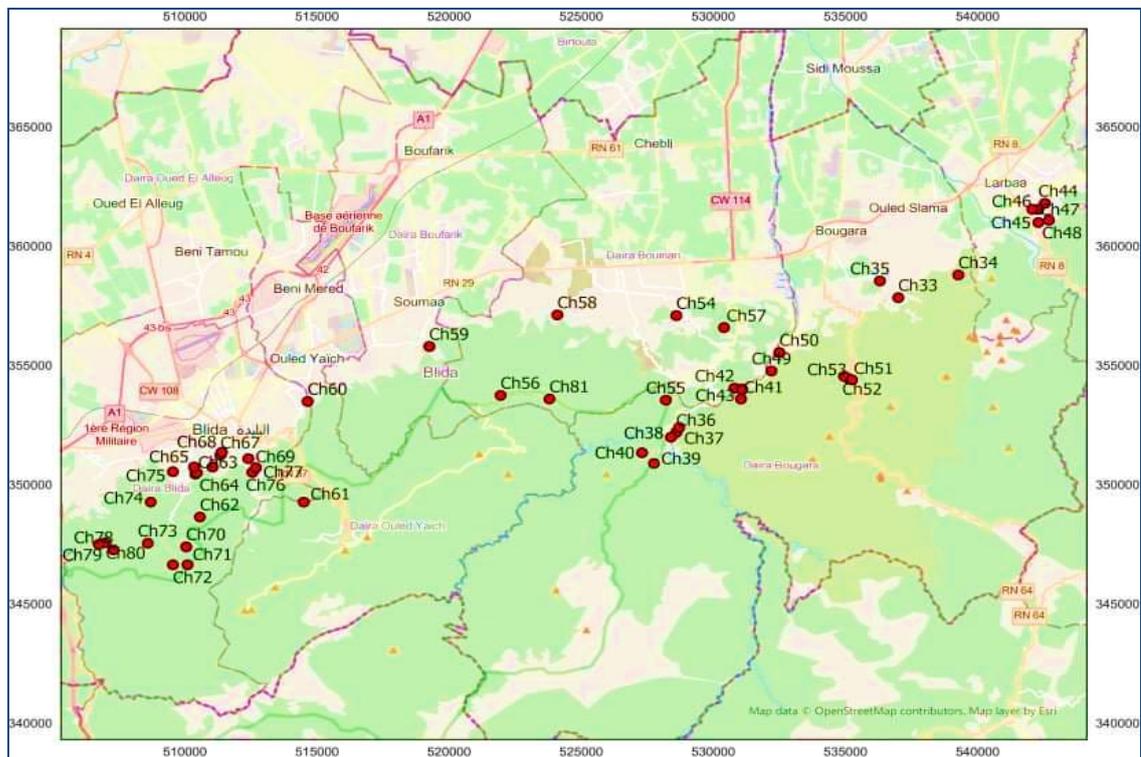


Figure 15 : Localisation des points d’eau ANRH (2003–2019) sur la zone d’étude.

### II.3 La partie analytique (analyses hydrochimiques) :

Durant la période de mon stage effectué au CRNA, des analyses hydrochimiques sur des échantillons d’eau recueillis au PNC ont été faites selon le programme suivant :

- Dosage des carbonates et bicarbonates par pH-métrie.
- Chromatographie ionique (ions majeurs et quelques éléments en traces).
- Dosage de la silice : Spectrophotomètre Uvicon 930

#### II.3.1 Analyses Hydro chimiques

##### II.3.1.1 Présentations des techniques d’analyse :

##### II.3.1.2 Dosage des Carbonates et Bicarbonates par pH-métrie :

###### ➤ Principe du dosage

Les carbonates n’existent qu’à  $\text{pH} > 8.3$  et les bicarbonates  $4.4 < \text{pH} < 8.3$ , il est facile de savoir, au cours d’un dosage acidimétrique doublé d’une mesure continue du pH, à quel moment ces ions sont encore ou non présents dans l’échantillon.

### II.3.2 Matériel utilisé

- pH-mètre
- Plaque chauffante, magnétique et agitateur.
- Burette graduée pour titrage.
- Becher

#### II.3.2.1 Réactifs utilisés :

- Solution tampons pH = 4 et pH = 7.
- Solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 0.01 N.

#### II.3.3 Mode opératoire :

On prépare les échantillons par série de 10, on place dans chaque bêcher de 50 mL, une prise d'essai de 20 mL et on note la valeur du pH.

✓ Si le pH > 8.3 on ajoute l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0.01 N goutte à goutte à l'aide d'une burette graduée jusqu'à ce que le pH-mètre indique 8.3 et on note la valeur V (mL) versé. Si le pH est compris entre 4.4 < pH < 8.3 on ajoute de l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0.01 N, jusqu'à ce que le pH-mètre indique 4.4 et on note la valeur V (mL) du volume versé. Après le titrage d'acide on calcule la concentration de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en mEq/L par la formule :

$$\text{Alcalinité totale (mEq/L)} = \frac{\text{V}_{\text{acide}} \cdot N_{\text{f.1000}}}{\text{V}_{\text{échantillon}}}$$

$$\text{Alcalinité totale (mg/L)} = \text{Alcalinité totale} \times M_{\text{HCO}_3^-}$$

Avec :

$$f_{st} = \frac{V_{st} \cdot N_{st}}{V_{\text{acide}} \cdot N_{\text{acide}}}$$

- $M_{\text{HCO}_3^-} = 61.01 \text{ mg/mol}$ .



Figure 10: Méthode de pH-métrie.

### II.3.3.1 La silice :

La silice se trouve dans les eaux sous forme dissoute et colloïdale.

La mesure de la concentration de la silice se fait à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible.

### II.3.3.2 Spectrophotomètre Uvicon 93 :

#### II.3.3.2.1 Réactifs utilisés :

- HCL concentré 1 : 1
- Molybdate d'ammonium 10 g  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ , dissous dans 100 mL d'eau déionisée avec ajustement de pH entre 7-8.
- Acide oxalique : 10 g dissous dans 100 mL d'eau déionisée.
- Solution standard de Silicium 1000 mg/L : On prépare des étalons de concentration suivantes : 2, 5, 10, 15, et 30 mg/L de Si.

Dans 50 mL d'échantillon filtré à  $0.45 \mu$  (ou 25 mL), on ajoute rapidement 1 mL de HCL 1 : 1 (ou 1/2 mL) puis 2 mL de solution de molybdate d'ammonium. On agite bien, on attend 5 à 10 min et à la fin on ajoute 1.5 mL (ou 0.75 mL) d'acide oxalique.

### II.3.3.2 Mesure :

On mesure l'absorbance du blanc avec la touche 'auto zéro' sur l'appareil, les standards de Silicium (0–30 mg/L), et les échantillons préparés à la longueur d'onde de 410 nm. La couleur jaune de la solution se dégrade après environ 20 min, c'est pour cela qu'il faut préparer seulement un nombre limité d'échantillons.

### II.3.3.2.3 Calcul :

La concentration du silicium est déterminée à partir de la courbe de calibration. Le résultat de la silice est calculé suivant la formule ci-dessous.

$$\text{SiO}_2 \text{ mg/L} = \text{Si (mg)} / 0.4675$$

$$\text{SiO}_2 \text{ mEq/L} = \text{SiO}_2 \text{ mg/L} / 60.09$$

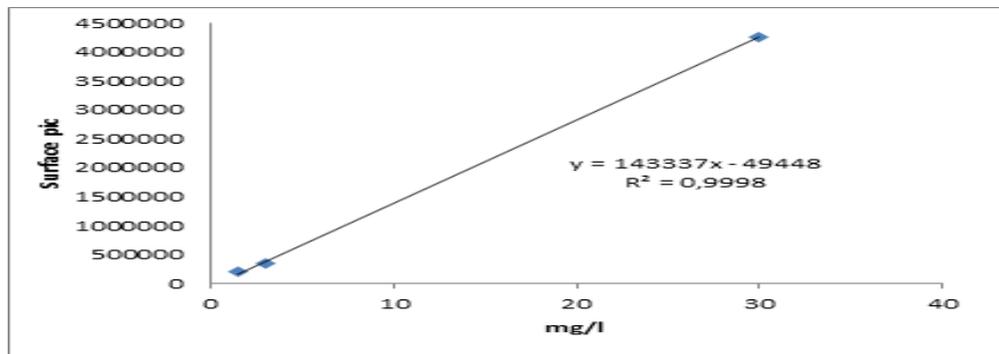
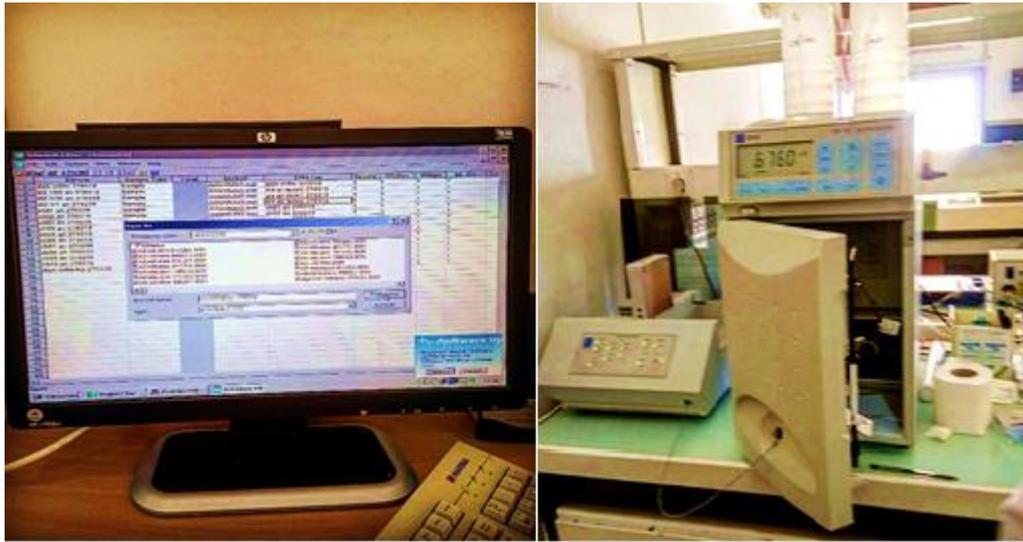


Figure 17 : Courbe N°1 de calibration pour le dosage de la Silice.



Figure 18 : Spectrophotomètre UV-visible UVICON 430 (Laboratoire d'Hydrochimie)

### II.3.3.3 Chromatographie ionique



**Figure 19** : Chromatographe ionique Dionex120.

La chromatographie ionique est une technique qui permet l'analyse qualitative (par séparation des espèces présentes), et quantitative des espèces ioniques présentes dans un échantillon liquide dépourvu de matière organique. Le chromatographe ionique permet de détecter et de quantifier une grande variété d'ions. Cette technique est fondée sur des processus d'échange entre une phase liquide (éluant et échantillon) et une phase solide (résine échangeuse d'ions) [10].

#### II.3.3.3.1 Méthodologie à suivre

La procédure à suivre dans ce cas consiste en les étapes suivantes :

##### a) Préparation des éluants:

- Dégazage des éluants : le dégazage des éluants permet de prévenir la formation de bulles d'air dans la tête de la pompe et dans la cellule de détection.
- La filtration : Toujours filtrer les éluants avant leur utilisation pour enlever les petites particules qui pourraient contaminer les clapets de la pompe et engendrer des débits erronés.
- La pressurisation des flacons : Pressuriser les flacons avec un gaz inerte filtré (il est préférable d'utiliser l'hélium). Si l'hélium n'est pas disponible, l'argon ou l'azote peuvent être utilisés.

**b) Préparation des échantillons :**

- **Flaconnage et stockage :** Collecter les échantillons dans des flacons en polyéthylène à haute densité qui ont été nettoyés vigoureusement avec de l'eau déionisée.
- **Préparation des échantillons et standards :** les échantillons sont filtrés avec des filtres de 0.45 µ immédiatement après leur collecte.
- **Dilution :** La dilution des espèces ioniques est possible lorsqu'on a à faire à des échantillons suffisamment concentrés. On utilise de l'eau déionisée ou de l'éluant pour diluer l'échantillon.

**II.3.3.4 Mise en fonctionnement du système :**

Pressurisation des flacons de l'éluant, démarrage de la pompe, optimisation de la pression, du débit, de la conductivité de la cellule et de la température. Le système s'équilibre pendant 20 à 30 minutes.

**1- Injection de l'échantillon :**

Elle se fait soit par l'utilisation d'une seringue soit à partir d'un passeur automatique.

**2- Analyse :**

La calibration se fait par injection d'une solution standard en premier, puis avec la solution d'échantillon en second.

**II.4 Partie Logiciel :**

Pour le traitement des données j'ai utilisé les logiciels :

- ✓ Diagrammes,
- ✓ ArcGIS,
- ✓ Analyses-en composant principale XLSTAT.

### III.1 Introduction :

L'étude hydrochimique consiste à déterminer les caractéristiques physico- chimiques des eaux des sources dans le but de mieux connaître le processus de minéralisation et d'acquisition de la charge saline de ces eaux, ainsi que le fonctionnement hydrodynamique et la circulation des eaux. Ce dernier se fait à travers tous les réseaux de fractures et de fissures du mont de l'Atlas blidéen. Ceci permettra d'identifier les éventuelles relations entre toutes les sources notamment celles des secteurs : central de Chréa et celui d'El-Hamdania. Nous examinerons respectivement dans ce chapitre les parties relatives à la classification des eaux et à leur faciès et aux corrélations entre différents couples chimiques. L'analyse par les outils statistiques ACP et géostatistique, permettront de comprendre la structure de ces sources et les différents liens entre-elles.

### III.2 Outils informatiques utilisés

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, on utilise le logiciel **Diagrammes** (Fig. 20) qui permet de représenter les résultats d'analyses sous forme de représentation graphiques binaires ou autres : diagrammes de Piper, de Schoeller–Berkaloff...

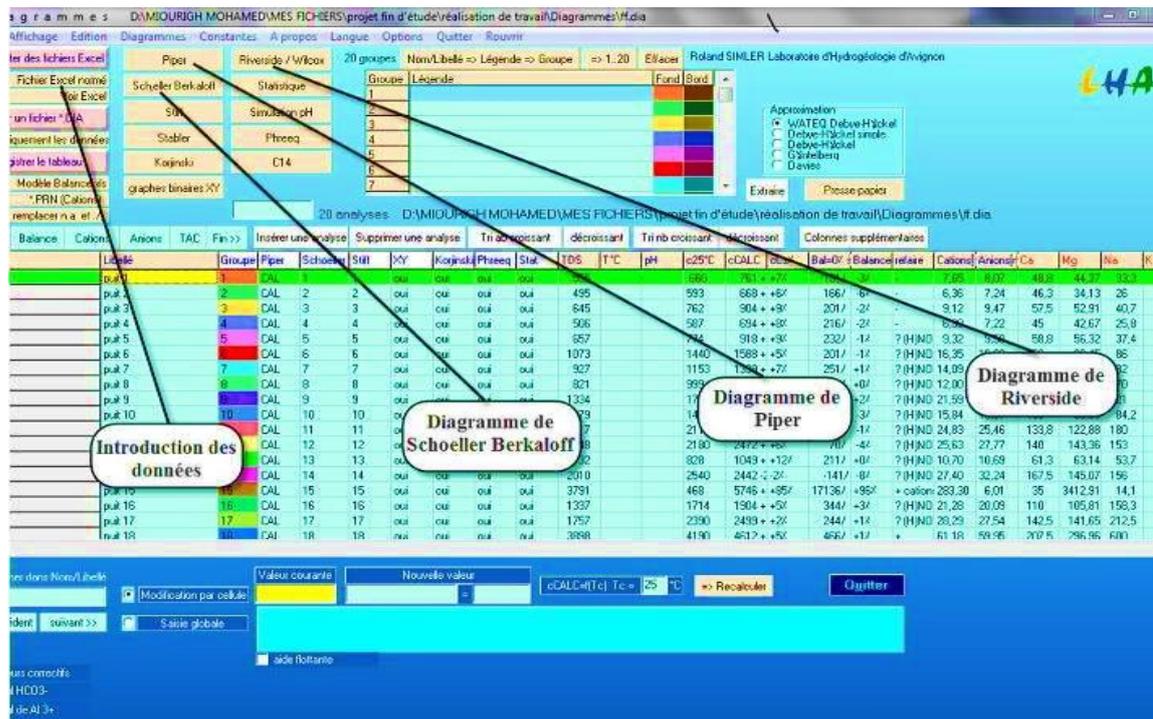


Figure 20 : Représentation de l'interface du logiciel d'Hydrochimie

### III.3 Description qualitative des eaux des sources de Chréa :

Les normes des paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux sont prises d'après celle de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) et du Décret exécutif n°14-96 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014, modifiant et complétant le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatifs à la qualité de l'eau de consommation humaine [9]

#### III.3.1 pH :

Les valeurs de pH obtenues pour la majorité des sources oscillent entre 6.50 et 8.08 ces valeurs sont proches de la neutralité avec une légère tendance vers la basicité ce qui explique la présence des ions  $\text{HCO}_3^-$ .

#### III.3.2 Conductivité :

Les conductivités mesurées varient entre 177–1920  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les valeurs s'inscrivent dans les normes de minéralisation très acceptables. Le Tableau ci-dessous montre l'évaluation de la minéralisation dans les eaux naturelles.

Tableau 3 : Classification de la minéralisation des sources.

<b>Conductivité &lt; 100<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> : minéralisation très faible</b>
<b>100<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> &lt; conductivité &lt; 200<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> : minéralisation faible</b>
<b>200<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> &lt; conductivité &lt; 333<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> : minéralisation moyenne</b>
<b>333<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> &lt; conductivité &lt; 666<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> : minéralisation moyenne accentuée</b>
<b>666<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> &lt; conductivité &lt; 1000<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> : minéralisation importante</b>
<b>Conductivité &gt; 1000<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> : minéralisation élevée</b>

**Tableau. 4** : Résultats hydrochimiques des eaux des sources.

Secteur central					
Nom de Sources	Cond (µs/cm)	Minéralisation	Nom de Source	Cond (µs/cm)	Minéralisation
Ain Tirailleur	194.2	Faible	Ain EI Houta	482	Moyenne accentuée
Beni Sbiha	273	Moyenne	Bourebbo	372	Moyenne accentuée
Mermoucha	162	Faible	Khamo Messaoud	291	Moyenne
Agni	250	Moyenne	Yama Bahria	330	Moyenne
Tafrane	302	Moyenne	Ain Sbâa	127.6	Faible
El Aouina	342	Moyenne accentuée	Oued Sidi Moussa	177	Faible
Oued Blat 1	481	Moyenne accentuée	E Randa	377	Moyenne accentuée
Oued Blat 2	421	Moyenne accentuée	Ferroukha	415	Moyenne accentuée
Oued Blat 3	572	Moyenne accentuée	Tassakra	170	Faible
Secteur d'El Hamdania					
Hoichem	580	Moyenne accentuée	Oued EI Merdja	500	Moyenne accentuée
Carrière De Gypse	706	Importante	Ain Sbâa(Chiffa)	355	Moyenne accentuée
Oued Djir	808	Importante	Oued EI Hemi 1	442	Moyenne accentuée
Tiberguent1	579	Moyenne accentuée	Oued EI Hemi2	278	moyenne
Tiberguent2	567	Moyenne accentuée	Oued EI Hemi 3	409	Moyenne accentuée
Lac de Bouarous	497	Moyenne accentuée	Ruisseau Des Singes 1	382	Moyenne accentuée
<b>50sources</b>					
Ain echikh	220	minéralisation moyenne	Oued yefrane	57000	élevée
Ain fradjna	520	Moyenne accentuée	Ain laamariche	600	Moyenne accentuée
Ain sidi habchi	920	importante	Ain tallene	1920	éleve

### III.3.3 TDS ou sels totaux dissous

Il existe une relation de proportionnalité entre les sels totaux dissous et la conductivité.

$$\text{TDS} = \text{Cte} \times \text{conductivité}$$

La valeur maximale de salinité est de 3271 mg/L (Ain Talilene) et la valeur minimale est de 64.4 mg/L (Ain Sbâa).

On constate que pour l'ensemble des eaux des sources sont moyennement minéralisées.

### III.3.4 Balance ionique :

Avant de traiter et d'interpréter les résultats des analyses des eaux prélevées au niveau des différentes stations (eaux souterraines et eaux de surface), il faut analyser la fiabilité des résultats par le calcul de la Balance Ionique (BI). Il faut rappeler qu'en théorie, une eau naturelle est électriquement neutre. De ce fait, la somme (en équivalents chimiques) des cations devrait être égale à celle des anions (en équivalents-chimiques). En réalité, cette égalité est rarement obtenue. De façon générale, la différence est attribuée aux incertitudes, à la présence de certains ions non dosés ou à d'éventuelles erreurs d'analyse. Ainsi, une certaine marge de déséquilibre entre anions et cations est admise. Elle est exprimée sous forme d'un écart relatif par la formule :

$$BI = \frac{\sum(\text{cations}) - \sum(\text{anions})}{\sum(\text{cations}) + \sum(\text{anions})} \cdot 100$$

Le calcul de la BI permet généralement de vérifier la fiabilité des résultats des analyses chimiques. Cependant, les incertitudes sur les résultats, variables selon les techniques d'analyse, peuvent expliquer les erreurs parfois élevées sur les BI, à cause de la présence éventuelle d'anions organiques non pris en compte dans les calculs.

D'une manière générale, des analyses chimiques sont considérées :

- Excellentes lorsque  $BI < 5 \%$ .
- Acceptable lorsque  $5\% \leq BI < 10\%$ .
- Douteuse lorsque  $BI \geq 10\%$ .

Le contrôle de la qualité des analyses par la balance ionique est systématiquement appliqué à toutes les analyses pour la chronique 1990–2004.

D'après les résultats des BI obtenues à partir du logiciel Diagramme, on distingue deux groupes :

**1<sup>er</sup> Groupe** : Les valeurs de BI des résultats d'analyses des eaux des deux secteurs sont inférieures à **5%** pour la grande majorité des sources.

**2<sup>ème</sup> Groupe** : Les valeurs de BI des analyses comprises entre **5** et **10%** ont été trouvés pour les sources (01, 02, 03, 05, 08, 09, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77 et 78) et dont l'analyse chimique est considérée comme acceptable.

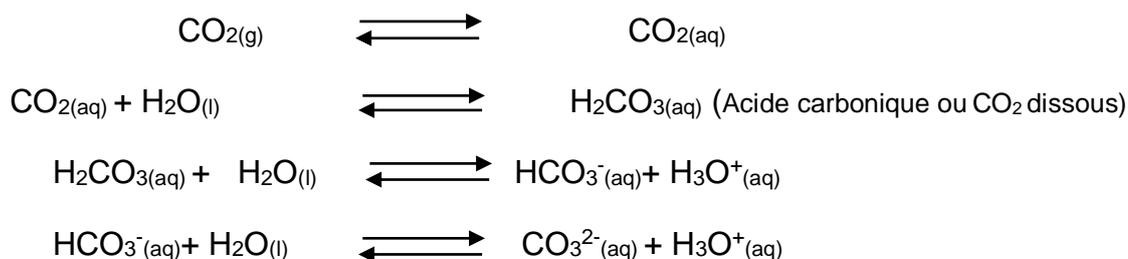
### III.3.5 Espèces ioniques

#### III.3.5.1 Anions

##### III.3.5.1.1 Bicarbonates $\text{HCO}_3^-$

Les eaux des sources montrent une prédominance de l'ion bicarbonate dans l'eau avec des concentrations variant entre 70 et 510 mg/L. Les bicarbonates dans les eaux naturelles peuvent avoir des origines diverses, cependant le système Calco-Carbonique peut être considéré comme la source principale de leur présence dans ces eaux.

Le système Calco-Carbonique peut être résumé par les réactions suivantes :



À l'interface eau-roche (ex. : Calcite), la réaction suivante a lieu :



Ces réactions nécessitent donc la présence du  $\text{CO}_2$  dans l'eau. En effet, le  $\text{CO}_2$  provient de l'air et de l'activité intense des bactéries dans le sol.

##### III.3.5.1.2 Chlorures $\text{Cl}^-$

L'ion chlorure est un élément conservateur, il possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas entraîné dans les processus hydrochimiques ou adsorbé par les formations géologiques et ne se combine pas facilement avec les autres éléments chimiques.

Les teneurs en chlorures des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés, les teneurs en chlorures enregistrées sont inférieures aux normes (OMS, 250 mg/L), (norme algérienne, 500 mg/L), sauf pour les deux sources Oued El-Mogranate et Ain El-Malha.

### **III.3.5.1.3 Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des sulfates en proportions très variables. Leur présence résulte de la légère solubilité du sulfate de calcium des roches gypseuses ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) et de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches (comme par exemple, les pyrites  $\text{FeS}_2$ ). La valeur maximale admissible est de 400 mg/L dans une eau destinée à la consommation. Les teneurs en sulfate sont comprises entre 6,84 et 2375 mg/L.

### **III.3.5.2 Cations**

#### **III.3.5.2.1 Le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonate. Sa présence dans les eaux naturelles provient de plusieurs origines différentes qui sont :

- La dissolution des formations carbonatées.
- La dissolution des formations gypseuses.
- Les phénomènes d'échange de base.

Les eaux de sources prélevées présentent des valeurs relativement variées en calcium, (de 15.9 mg/L à 222.0 mg/L) sauf la source Ain El-Malha qui a la concentration maximale 425 mg/L. Nous tenons à signaler que les eaux de bonne qualité renferment environ 100 à 140 mg/L de calcium.

#### **III.3.5.2.2 Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )**

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature ; il constitue environ 2,1 % de l'écorce terrestre. Sa teneur dans les eaux souterraines ou de surface dépend des terrains traversés. Il provient de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomite), ou encore également par la dissolution des formations salifères. Les normes algériennes sont de 200 mg/L. Les valeurs du magnésium fluctuent entre 7,5 et 407,0 mg/L.

### **III.3.5.2.3 Sodium (Na<sup>+</sup>)**

Le sodium est toujours présent dans les eaux naturelles en proportions variables, il provient essentiellement du lessivage des formations riches en NaCl (argiles et marnes) et des échanges de bases. Les normes algériennes sont de 200 mg/L. Les valeurs du sodium fluctuent entre 7,5 et 120.0 mg/L sauf pour la source de Oued El Mogranate, qui présente la concentration maximale de 650 mg/L.

### **III.3.5.2.4 Potassium K<sup>+</sup>**

C'est un élément alcalin très réactif avec l'eau, on le retrouve dans les roches ignées et dans de nombreux minerais. Il se trouve aussi dans la végétation sous forme de carbonates [12]. Une valeur maximale de 12 mg/L est préconisée dans une eau destinée à la consommation. Les teneurs en potassium pour les eaux des deux secteurs sont convenables aux normes, sauf aux sources de Marmoucha (13 mg/L) et Ain Hmed Elaarbi (15 mg/L).

## **III.4 Interprétation des résultats :**

Afin de comprendre l'origine des éléments chimiques dans les eaux de sources ainsi que leur minéralisation, nous examinerons respectivement les faciès chimiques, les corrélations binaires.

### **III.4.1 Diagramme de Piper :**

L'examen de l'évolution temporelle des diagrammes de Piper des sources de 2003 à 2019 montre que les eaux présentent pratiquement un même faciès chimique dominant : bicarbonaté calcique et magnésien, alors que seulement 7% (8 sources) présentent un faciès chimique chloruré sulfaté calcique et magnésien.

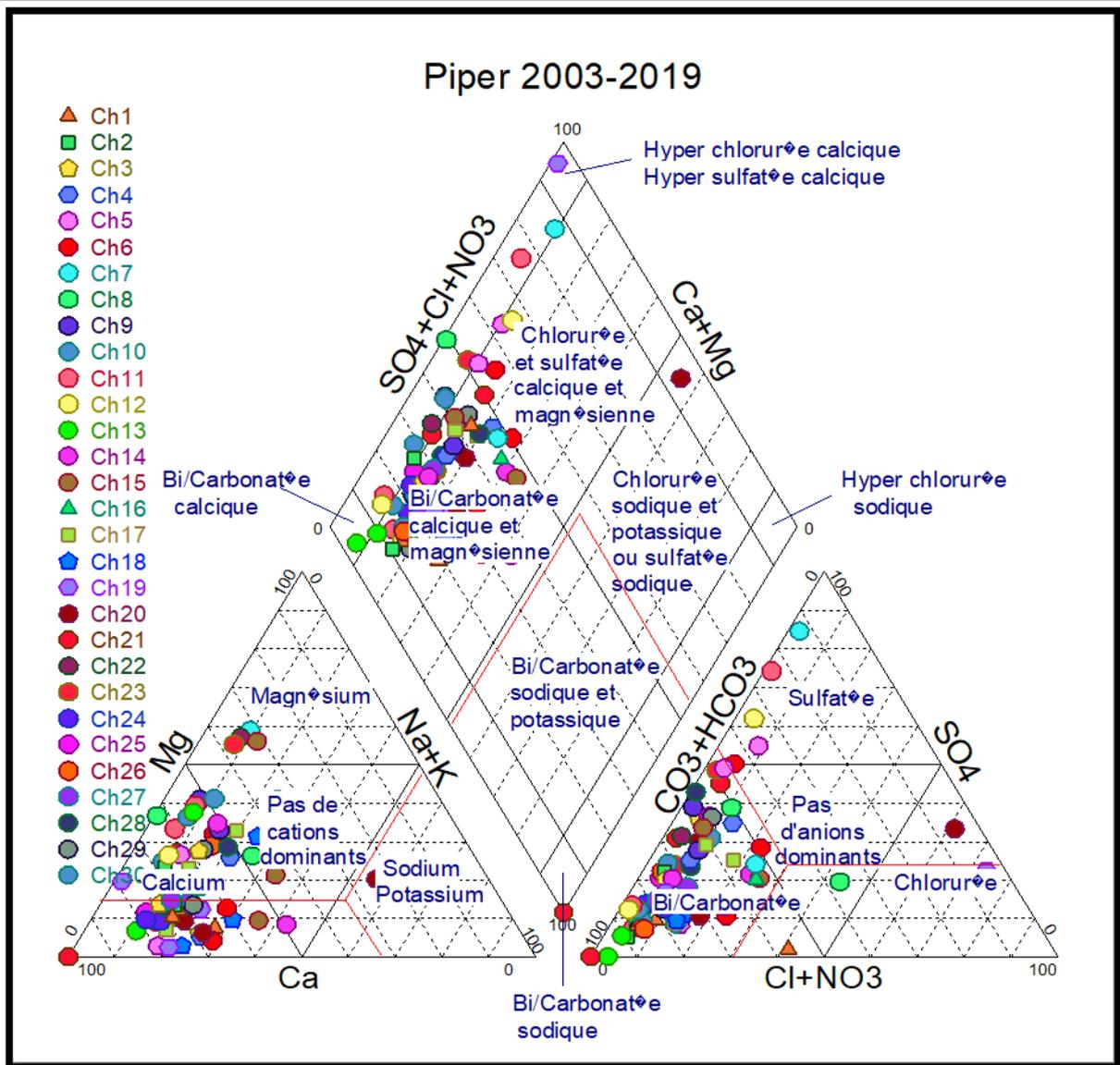
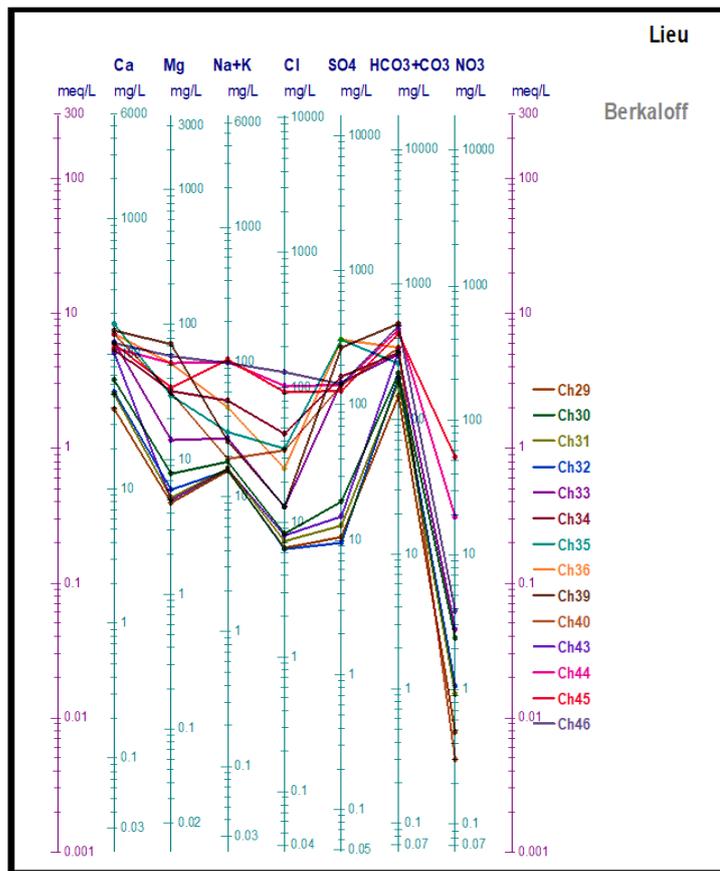
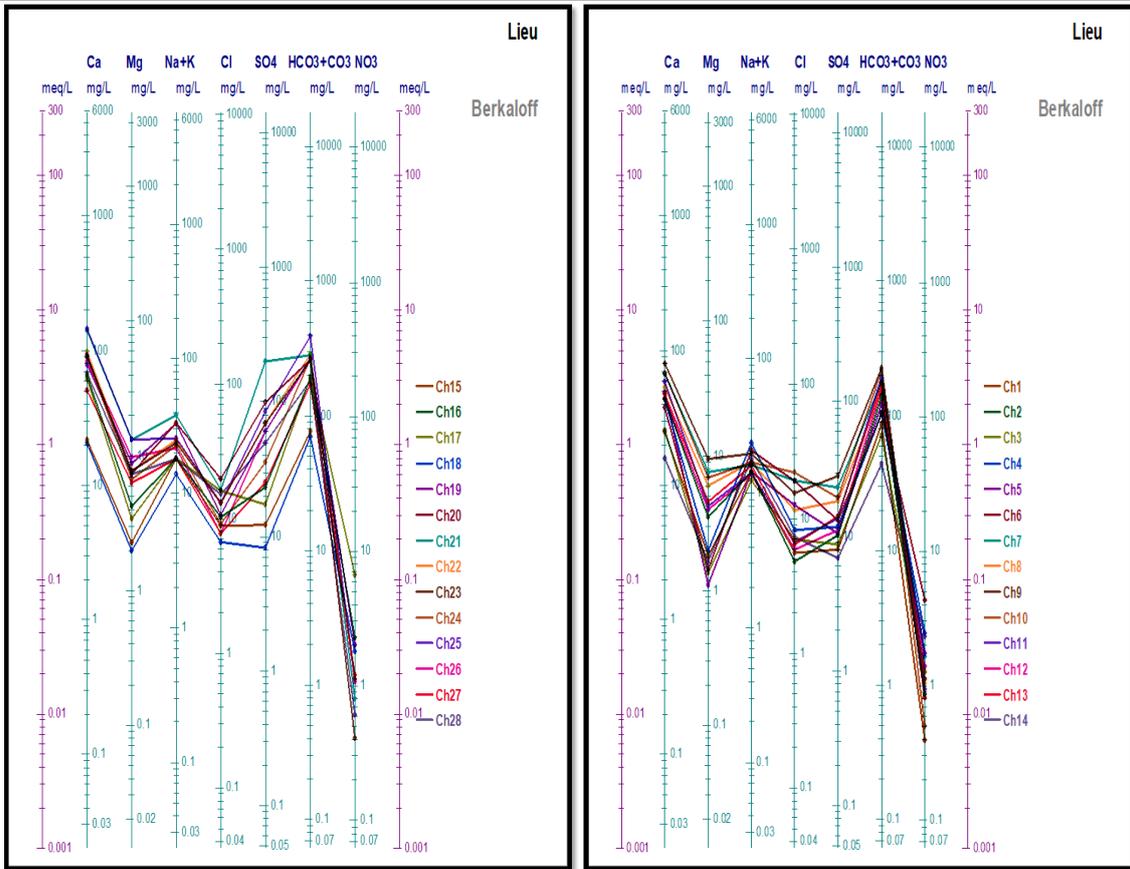


Figure 21 : Diagramme de piper.

### III.4.2 Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Les représentations sur les diagrammes Schoeller–Berkaloff (les sources ont été subdivisées en 4 groupes et cela est dû au logiciel qui ne peut représenter qu'un certain nombre de sources limité). Elles montrent une très bonne homogénéité dans la famille de toutes les sources : elles proviennent toutes d'un même processus pluviométrique. Les eaux de pluies qui s'abattent sur tout le mont de Chréa s'infiltrent dans les formations géologiques composées principalement de schistes et de niveaux carbonatés fissurés et complètement fracturés et émergent au niveau et à la base de ces fractures.



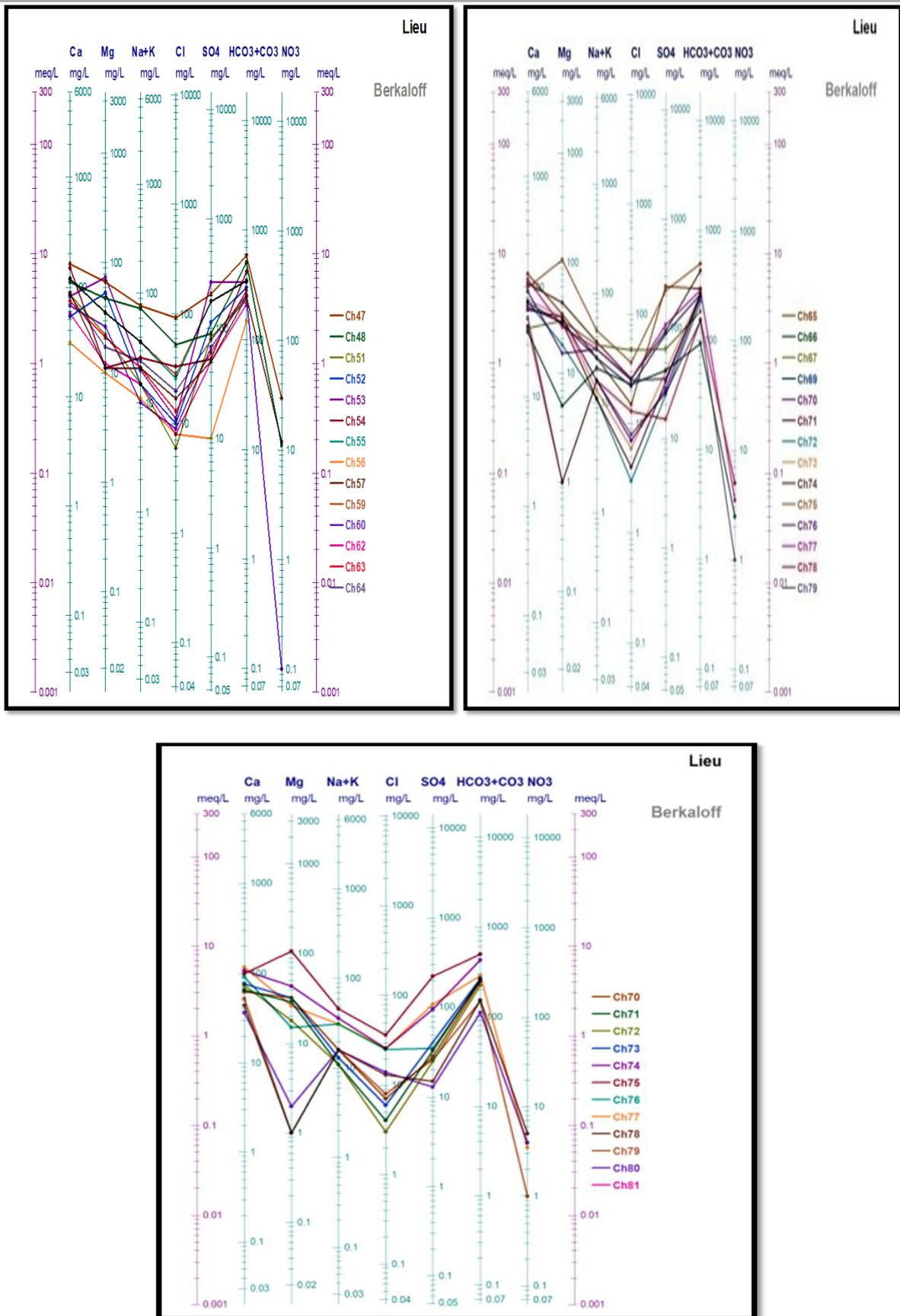


Figure 22 : Berkaloff pour les groupes G1, G2, G3, G4, G5 et G6.

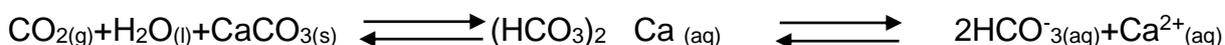
**Tableau 5** : Classification des eaux selon Schoeller–Berkaloff.

Les groupes	Formules Caractéristiques		Faciès Chimiques
<b>G1</b>	HCO <sub>3</sub> >No <sub>3</sub> >Cl	Ca > Mg > Na+K	<b>Bicarbonatée calcique</b>
<b>G2</b>	HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> >No <sub>3</sub>	Ca > Na+K > Mg	<b>Bicarbonatée calcique</b>
<b>G3.</b>	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl>NO <sub>3</sub>	Ca > Na+K > Mg	<b>Bicarbonatée calcique</b>
<b>G4</b>	HCO <sub>3</sub> >No <sub>3</sub> >Cl	Ca > Mg > Na+K	<b>Bicarbonatée calcique</b>
<b>G5</b>	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl>NO <sub>3</sub>	Ca > Na+K > Mg	<b>Bicarbonatée calcique et magnésien</b>
<b>G6</b>	HCO <sub>3</sub> >SO <sub>4</sub> >Cl>NO <sub>3</sub>	Ca > Na+K > Mg	<b>Bicarbonatée calcique et magnésien</b>

### III.5 L'équilibre Calco-Carbonique :

Les eaux acides sont capables de dissoudre les roches carbonatées selon des réactions chimiques entre la roche carbonatée, l'eau et le CO<sub>2</sub>.

Le système calco-carbonique CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/CaCO<sub>3</sub>, peut être caractérisé par un emboîtement de **(4)** équilibres (0), (1), (2), (4), dont la somme peut être représentée par le bilan réactionnel de la dissolution de la calcite (CaCO<sub>3</sub>).



dont le développement est comme suit :

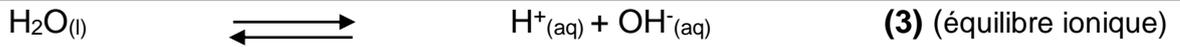
❖ **Interface : eau / atmosphère**



❖ **Phase liquide :**

On observe 3 équilibres réactionnels qui régissent cette phase :





❖ **Interface : (solide /liquide)**



### III.6 Indices de saturation

L'indice de saturation indique l'état de l'équilibre ou de déséquilibre entre les principaux minéraux. Concernant notre étude, les indices de saturation des eaux obtenus par le biais du logiciel 'Diagrammes', montrent une sous-saturation vis à vis de la calcite, de la dolomite et du gypse. Comme le temps d'infiltration des eaux de pluie est court, par conséquent le contact (eaux-roche) est réduit.

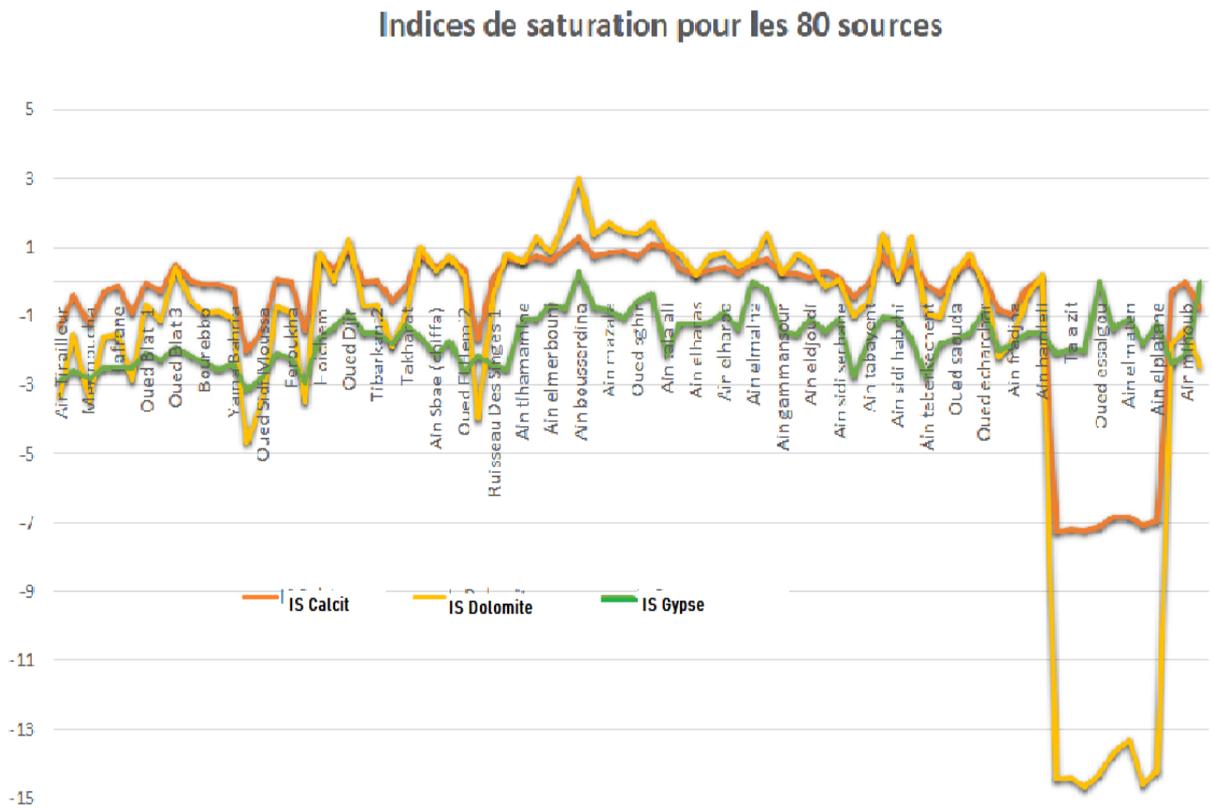


Figure 23 : Indice de saturation.

### III.7 Origine des éléments chimiques

Nous avons représenté successivement sur les figures 24 à 28, les corrélations entre les couples hydrochimiques suivants  $\text{HCO}_3^-$  – pH et  $\text{Ca}^{2+}$  – pH.

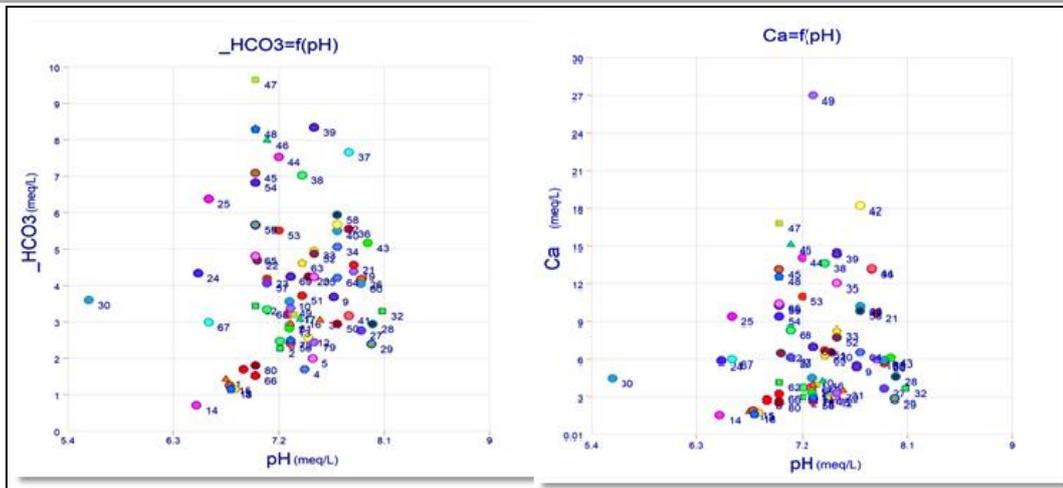


Figure 24 : Relation Calcium – pH et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – pH

L'interprétation des deux graphes (Fig. 24) montre la présence des ions bicarbonates et les ions calcium en corrélation avec le pH dans les eaux de sources qui sont liées par deux processus la mise en en solution du CO<sub>2</sub> lors de l'infiltration selon l'équilibre chimique établi dans les réactions 1 et 2 du système calco-carbonique et la dissolution des formations carbonatées.

### III.7.1 Couple Na/Cl

Le diagramme Na-Cl (Fig. 25) montre que l'ensemble des sources du massif de l'Atlas blidéen se répartissent le long d'une droite parallèle à la droite de dissolution de la Halite, ce qui suggère une origine commune des ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> liée à la dissolution et au lessivage des eaux au cours de leur infiltration au contact des niveaux argileux carbonatés et schisteux.

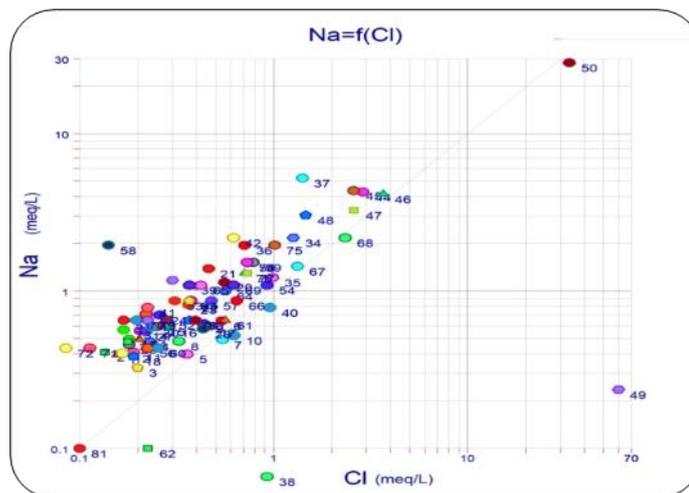


Figure 25 : Relation Sodium – Chlorure

### III.7.2 Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$

Les points d'eau des sources représentés sur un diagramme  $\text{Ca}^{++} - \text{SO}_4^{=}$  se distribuent autour et le long de la droite de dissolution expérimentale du gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) ce qui suggère que l'origine des ions calcium et sulfates est commune : lessivage et dissolution des sels et des traces gypseuses dans les formations argileuses carbonatées et schisteuses.

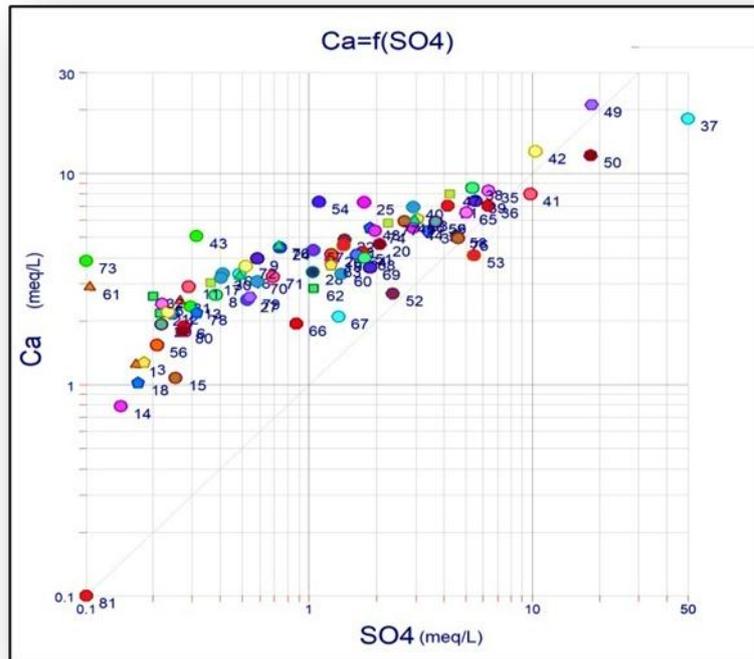


Figure 26 : Relation  $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$

### III.7.3 Couple $\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ et $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

La relation entre les ions  $\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$  montre que tous les points se répartissent en dessous de la droite de pente 1, ce qui suggère une origine commune de par la dissolution des carbonates (calcaires dolomitiques) et la mise en solution du  $\text{CO}_2$  dans un contexte calco-carbonique.

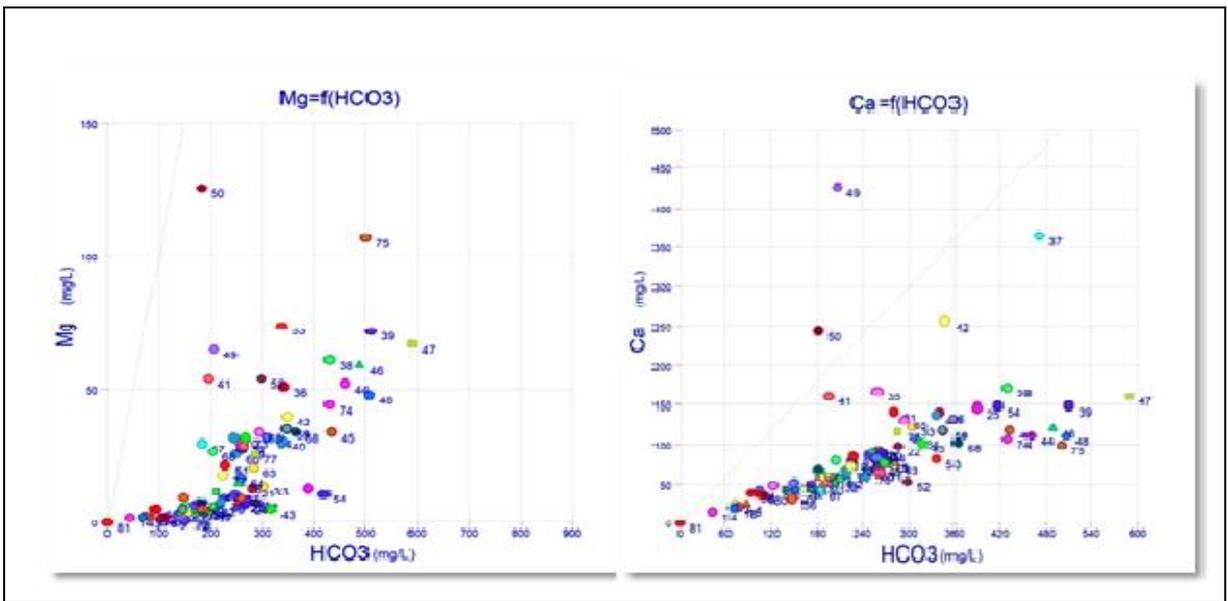


Figure 27 : Les couples Mg/HCO<sub>3</sub> et Ca/HCO<sub>3</sub>

#### III.7.4 Couple TDS/ Cl

Le diagramme montre une augmentation de la charge saline avec les ions chlorures ce qui suggère et confirme l'acquisition de la salinité par dissolution des différents niveaux de minéraux et des sels présents dans les formations schisteuses carbonatées et argileuses de l'Atlas blidéen (formations de la Chiffa).

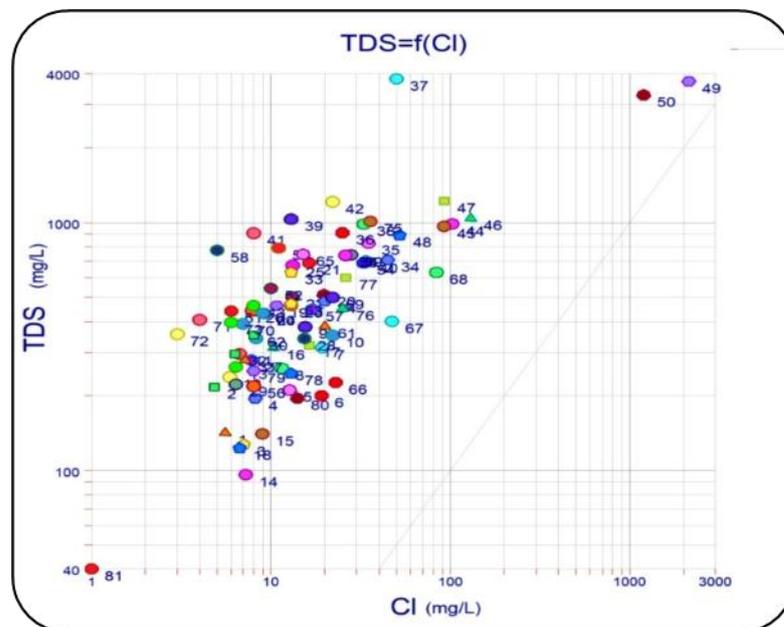


Figure 28 : Relation TDS–Chlorures.

## III.8 APPROCHE STATISTIQUE

### III.8.1 Introduction

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode basée sur des statistiques descriptives multidimensionnelles permettant de traiter simultanément un nombre quelconque de variables quantitatives. L'objectif est de visualiser, d'interpréter et de résumer l'information contenue dans les différentes données. Cette analyse est réalisée par le logiciel XLSTAT .

#### III.8.1.1 Présentation de logiciel XLSTAT

XLSTAT est parfaitement intégré à Excel et permet d'utiliser les techniques de statistique d'analyse de données et de modélisation, c'est-à-dire qu'il permet de rajouter des variables quantitatives ou qualitatives à l'ACP une fois que celle-ci a été construite [14].

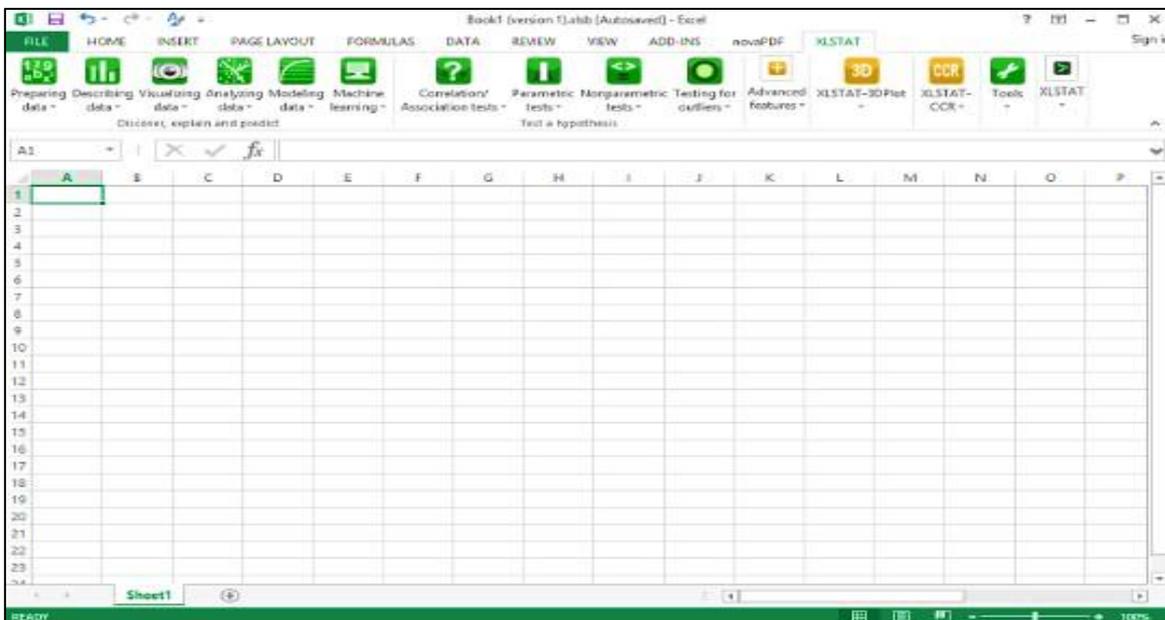


Figure 29 : Interface de commande du logiciel XLSTAT

### III.8.2 Le principe de l'Analyse en Composantes Principales

Construire un système de représentation de dimension réduite c'est-à-dire étudier les variables et les visualiser dans espace de dimension réduit ainsi que les corrélations entre les différentes variables et la ressemblance entre les individus sont explorés. Le maximum d'information est résumé puis représenté sous forme graphique. [17]

### III.8.3 Interprétation des résultats

L'analyse statistique des données par ACP traite d'abord l'espace des variables entre elles. Dans notre cas, c'est l'ensemble des éléments physico-chimiques. Ensuite, l'espace des individus (il s'agit des sources d'eau de Chréa et d'El-Hamdania) et enfin elle permet de confronter les variables et les individus.

#### III.8.3.1 Espace des variables

##### III.8.3.1.1 Matrice de corrélation

Le Tableau 6 présente la matrice de corrélation entre les éléments physico-chimiques. Cette matrice montre des éléments qui sont caractérisés par un bon coefficient de corrélation (R). Plusieurs valeurs sont corrélées positivement, ce qui signifie que leur concentration varie proportionnellement.

**Tableau 6** : Matrice de corrélation

Variables	pH	CE (µs/cm)	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
pH	1	0.184	0.129	0.205	0.142	0.045	0.004	0.100	0.206	0.116	0.139
CE (µs/cm)	0.184	1	0.966	0.904	0.809	0.034	0.091	0.598	0.817	0.142	0.923
Ca <sup>++</sup>	0.129	0.966	1	0.899	0.769	0.052	0.017	0.478	0.834	0.161	0.934
Mg <sup>++</sup>	0.205	0.904	0.899	1	0.704	0.082	0.054	0.374	0.754	0.281	0.890
Na <sup>+</sup>	0.142	0.809	0.769	0.704	1	0.140	0.130	0.460	0.899	0.088	0.679
K <sup>+</sup>	0.045	0.034	0.052	0.082	0.140	1	0.147	0.038	0.084	0.090	0.046
Li <sup>+</sup>	0.004	0.091	0.017	0.054	0.147	0.147	1	0.154	0.180	0.155	0.083
Cl <sup>-</sup>	0.100	0.598	0.478	0.374	0.038	0.038	0.154	1	0.422	0.193	0.366
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.206	0.817	0.834	0.754	0.084	0.084	0.180	0.422	1	0.215	0.660
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.116	0.142	0.161	0.281	0.090	0.090	0.155	0.193	0.215	1	0.169
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.139	0.923	0.934	0.890	0.046	0.046	0.083	0.366	0.66	0.169	1
SiO <sub>2</sub>	0.069	0.899	0.957	0.833	0.026	0.026	0.078	0.473	0.785	0.183	0.861

On observe dans ce sens une forte corrélation entre :

- **Ca<sup>2+</sup>** et (CE, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>) avec R>0.7
- **Mg<sup>2+</sup>** et (CE, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>) avec R>0.7
- **HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** et (CE, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub>) avec R>0.7

### III.8.3.1.2 Analyses des valeurs propr

La valeur propre présente l'inertie des individus sur l'axe pour faciliter l'interprétation.

On exprime chaque valeur propre en pourcentage de la variance totale.

- Le premier axe F1 exprime 30.5 % de la variance totale.
- Le deuxième axe F2 exprime 16.33 % de la variance totale.
- Le total de l'information est illustré par ses 2 axes est de 46.56 % ce qui donne relativement une bonne présentation.

**Tableau. 7** : Table des valeurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	6.33	1.36	1.23	0.98	0.77	0.55	0.40	0.21	0.10	0.01	0.009	0.008
Variabilité %	52.75	11.41	10.26	8.20	6.42	4.60	3.40	1.86	0.89	0.13	0.074	0.06
% Cumulé	52.75	64.16	74.43	82.63	89.06	93.66	97.07	98.83	99.72	99.86	99.93	100.00

### III.8.3.3 Analyse du cercle de corrélation

Le cercle de la corrélation est un graphique qui représente les corrélations des variables avec la composante puis l'efficacité de la représentation des variables du cercle, c'est-à-dire plus une variable est proche du cercle plus la qualité de représentation est bonne.

- L'axe F1 horizontal et la première dimension de l'ACP 30.5% de l'information initiale.

Les éléments ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) sont positivement corrélés sur l'axe F1 qui est représentatif des faciès chimiques.

- L'axe vertical F2 est la dimension de l'ACP, il représente 16.33% de l'information initiale. Sur cet axe les ions ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ) sont positivement corrélés.

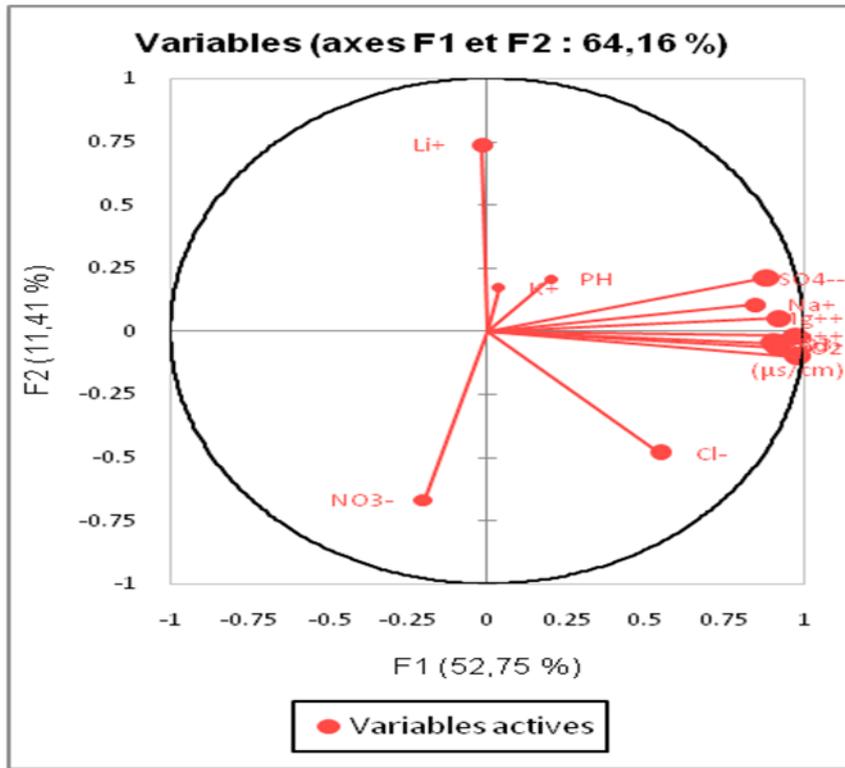


Figure 30 : Cercle de corrélation de l'ACP des variables du plan factoriel F1x F2,

#### III.8.3.4 Espace des individus

La projection de l'ensemble des individus sur le plan F1x F2 permet de différencier deux domaines.

- Premier domaine [1, 4, 6, 8, 10, 25, 24, 26, 28, 30, 33]

Il montre les individus dont la corrélation est importante sur l'axe F1. Cela explique probablement que ces sources présentent une interconnexion entre-elles.

- Deuxième domaine [58, 75, 76, 50, 37, 61, 50, 49]

Ils sont portés beaucoup plus sur l'axe F2, ce qui explique probablement que ces individus ne présentent pas de grande interconnexion.

##### III.8.3.4.1 Projection dans l'espace des individus du plan factoriel F1x F2

L'examen de l'espace variables-individus, montre qu'il existe une conformité dans l'acquisition du chimisme des eaux des deux domaines évoqués dans l'espace.

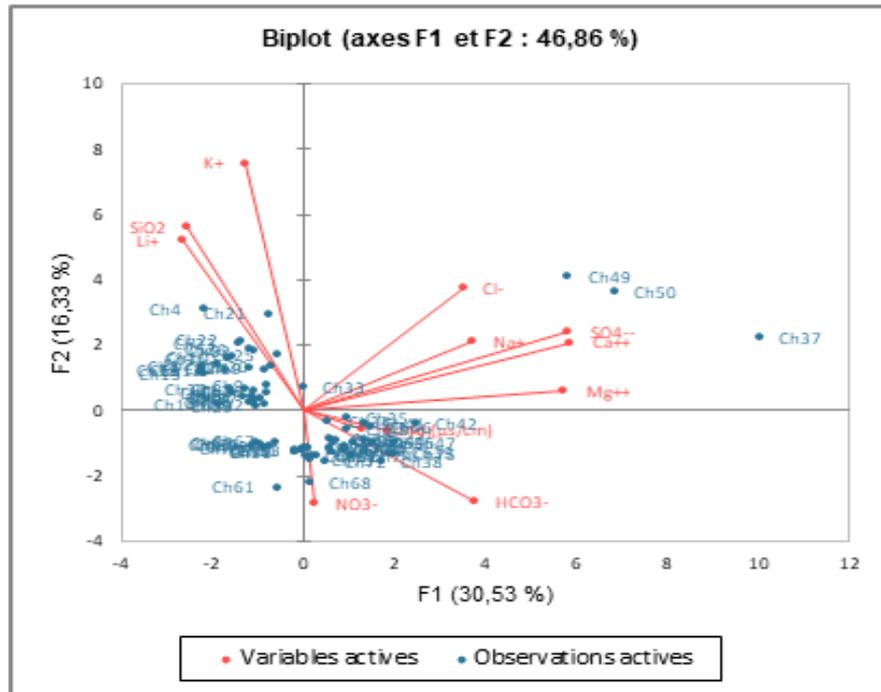


Figure 31 : Espace variables-individus

## III.9 Approche géostatistique

### III.9 Introduction

La géostatistique est l'étude des variables régionalisées, à la frontière entre les Mathématiques et les Sciences de la Terre. Elle s'appuie sur la théorie des fonctions aléatoires, c'est-à-dire l'analyse des phénomènes en termes probabilistiques.

#### III.9.1 Théorie des variables régionalisées concepts et méthodes

#### III.9.2 Généralités

En général, un jeu de données spatiales se présente sous la forme d'une liste de valeurs numériques  $z = (z_1, \dots, z_n)$  (la variable) et des coordonnées des sites  $(s_1, \dots, s_n)$  auxquelles la variable a été mesurée ou estimée.

##### 1- Répartition spatiale de $(z)$

La distribution de  $z$  doit être complétée par sa répartition spatiale, de ce fait on s'appuie sur un symbole appelé « symbol plot » dans lequel, on représente pour chaque site un symbole (croix, étoile, cercle) dont la taille est proportionnelle à la valeur  $(z)$  observée.

## 2- Nuée variographique

En géostatistique intrinsèque, la nuée variographique est un nuage de points de données, exprimant leur variabilité selon l'inter-distance. Elle fournit la représentation graphique intervenant dans le calcul du variogramme.

### III.9.2 Fonctions aléatoires

Pour décrire la distribution statistique spatiale d'un échantillon il sera commode de spécifier une fonction de répartition commune à toutes les variables aléatoires  $(z_1, \dots, z_n)$  de l'échantillon. Comme  $(z_1, \dots, z_n)$  est une variable aléatoire, on définit ainsi en tout point  $(s)$  une variable  $z(s)$ . On dit alors que  $z$  est une fonction aléatoire.

### III.9.3 Hypothèses de base

Une fonction aléatoire  $z(s)$  est caractérisée par sa loi spatiale  $F(v)$ . Elle correspond à la loi de probabilité conjointe de  $(z(s_1), z(s_2), z(s_3), \dots, z(s_n))$ .

$$F(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) = P\{(z(s_1) < v_1), (z(s_2) < v_2), (z(s_n) < v_n)\}$$

La géostatistique linéaire se limite à la fonction de distribution d'ordre un  $F(v)$  et d'ordre deux  $F_{z(s_i), z(s_j)}(v_i, v_j)$  [16].

#### a- Stationnarité du second ordre

$Z(s)$  est stationnaire du 2<sup>ème</sup> ordre quand l'espérance mathématique existe, elle ne dépend pas du point  $(s)$  et la covariance entre chaque paire  $(Z(s+h), Z(s))$  existe et ne dépend que de  $h$  (distance).

#### b- Hypothèse intrinsèque

On dit qu'une fonction aléatoire  $Z(s)$  est intrinsèque quand ses accroissements  $z(s+h) - z(s)$  sont stationnaires d'ordre 2. C'est-à-dire que :

- L'espérance des écarts est zéro ;
- La variance des écarts ne dépend que de  $h$ .

#### c- Outil d'exploration des données

Le variogramme est défini pour toute fonction aléatoire intrinsèque et dépend uniquement de l'inter-distance  $h$ .

Le variogramme théorique est la différence entre les valeurs prises par deux variables  $z(s) - z(s+h)$  dont on peut calculer la variance d'où le variogramme c'est 1/2 de la variance. On appelle variogramme la demi-variance de cette différence.

Le variogramme théorique est défini comme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(s+h) - Z(s)) = \frac{1}{2} E \left[ (Z(s+h) - Z(s))^2 \right] = C(0) - C(h)$$

Avec  $C(0) = \text{var}(Z(s))$  et  $C(h) = \text{cov}(Z(s+h), Z(s))$

Remarque :

- Un variogramme mesure la dissemblance entre les valeurs en fonction de leur éloignement.
  - Une co-variance mesure la ressemblance entre les valeurs et leur éloignement.

Un variogramme expérimental est un estimateur du variogramme théorique à partir des données

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z(s_i+h) - Z(s_i)]^2$$

$N(h)$  est le nombre de paires dans la classe de distance  $h$ . [16]

### III.9.4 Propriétés du variogramme

Le variogramme est une fonction de  $h$ , croissante et est souvent caractérisé par trois paramètres :

- L'effet de pépité  $C_0$  : le comportement à l'origine du variogramme reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée.
- Le palier  $C+C_0$  : valeur du variogramme pour la distance égale à la portée ;
- La portée  $a$  : distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle.

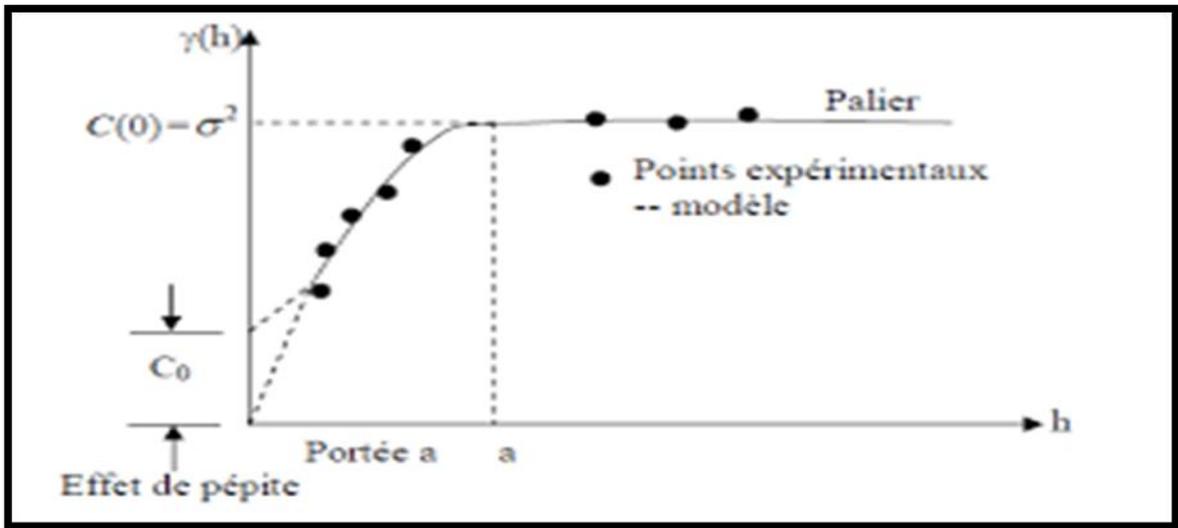


Figure 32 : Propriétés du variogramme

#### III.9.4.1 Isotropie et anisotropie :

Le variogramme ne dépend que de h

- Si le variogramme ne dépend que de la norme h, il est dit isotrope
- Si le variogramme dépend de la direction du vecteur ( $\theta$ ), il est dit anisotrope. [16]

#### III.9.4.2 Modélisation du variogramme

Le variogramme expérimental n'est pas défini partout, notamment aux distances h pour lesquelles il n'existe pas de paire de points de mesures. Ainsi, on lui ajuste une fonction mathématique appelée modèle de variogramme. Ainsi Goovaerts, P. 1997 recommande d'utiliser des modèles éprouvés ou des modèles construits à partir de modèles éprouvés. Les types de modèles courants sont :

- Linéaire : 
$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{c}{a}h & \text{pour } a \geq h \geq 0 \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases}$$
- Sphérique : 
$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left( \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \text{pour } a \geq h \geq 0 \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases}$$
- Gaussien : 
$$\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right)$$

### III.9.4.3 Validation croisée

Une pratique intéressante pour valider le modèle de variogramme et consiste à effectuer une validation croisée. Le principe est d'éliminer à tour de rôle chaque observation et de l'estimer à l'aide de ses voisins. En chaque point, on obtient donc une valeur vraie et une valeur estimée que l'on peut comparer pour déterminer si le modèle fournit des estimations se comportant comme prévu. Plus précisément :

$$\text{Exponentiel : } \gamma(h) = c_0 + c \left( 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right) \text{ [16]}$$

### III.9.4.4 Krigeage

Le krigeage et le co-krigeage sont l'une et l'autre, des techniques de géostatistique d'estimation locale garantissant le minimum de variance. C'est le meilleur estimateur linéaire non-biaisé. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation mais aussi des distances entre les données deux à deux. Dans notre cas d'étude, c'est le krigeage ordinaire qui a été pris [16].

### III.9.4.5 Application de l'approche géostatistique

Après avoir décrit les fondements mathématiques de l'approche géostatistique et les méthodes d'interpolation spatiale, nous nous efforçons de les appliquer afin d'établir une carte des variables physico-chimiques (pH, TDS, CE, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

### III.9.4.6 Outil informatique utilisé

#### III.9.4.6.1 Système d'Information Géographique

Le SIG est un système d'informations géographiques conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. Il s'applique dans un environnement géoréférencé, pour la visualisation (sous forme d'image assimilée le plus souvent à une carte) [10].

L'ArcGIS, est un logiciel qui permet d'exploiter un système d'information géographique, que nous allons utiliser afin de saisir nos données sous forme de cartes.

**a- Les caractéristiques statistiques**

❖ **Pour secteur de Chréa**

L'analyse des histogrammes des variables (CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , pH,  $\text{Cl}^-$ , TDS) pour le secteur de Chréa montre que la distribution a une forme qui tend vers une distribution normale avec une moyenne de :

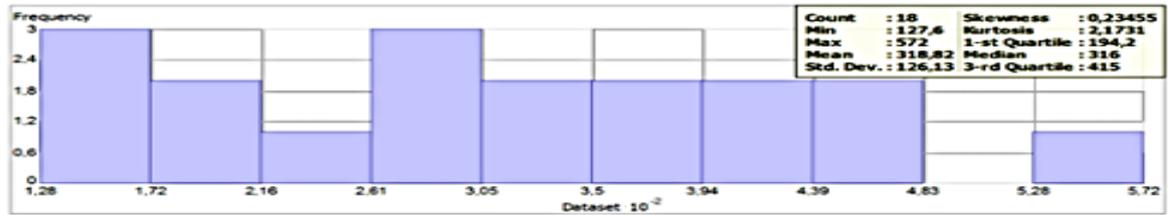
- 318.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la conductivité.
- 45.8 mg/L pour le calcium.
- 56.3 mg/L pour les bicarbonates.
- 7.1 pour le pH
- 160.9 mg/L pour les sels totaux dissous.
- 10.8 mg/L pour les chlorures.

❖ **Pour le secteur d'El-Hamdania :**

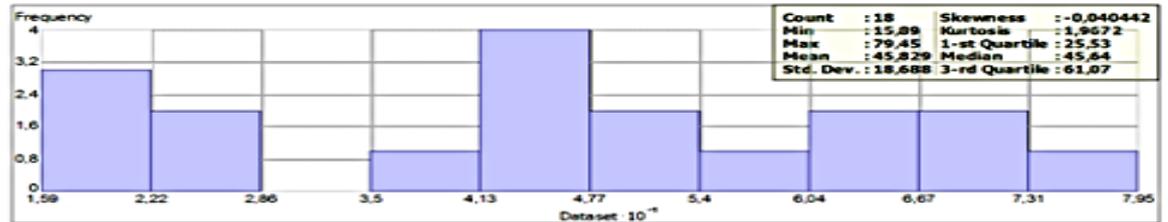
L'analyse des histogrammes des variables (CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , pH,  $\text{Cl}^-$ , TDS) pour le secteur d'El-Hamdania montre que la distribution a une forme qui tend vers la distribution normale avec une moyenne de :

518.21  $\mu\text{s}/\text{cm}$  pour la conductivité

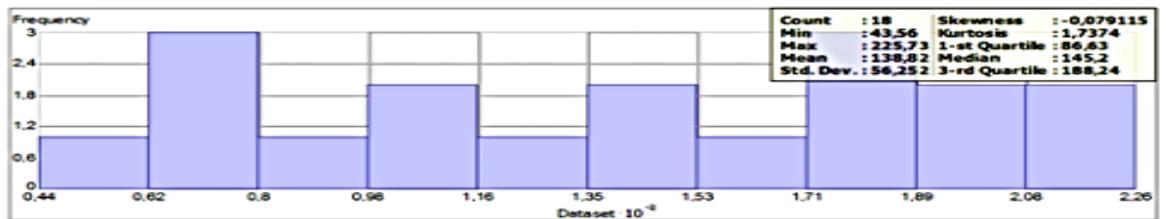
- 81.811 mg/L pour le calcium
- 240.74 mg/L pour les bicarbonates
- 7.3 pour le pH
- 11.04 mg/L pour les chlorures
- 367.78 mg/L pour les sels totaux dissous.



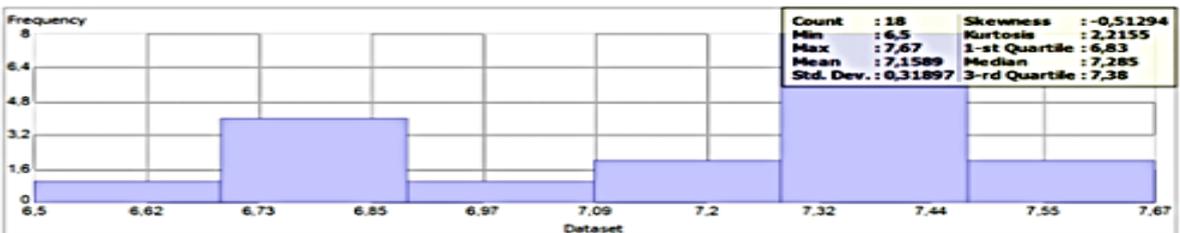
Données; Sources Chrea (Conductivité)



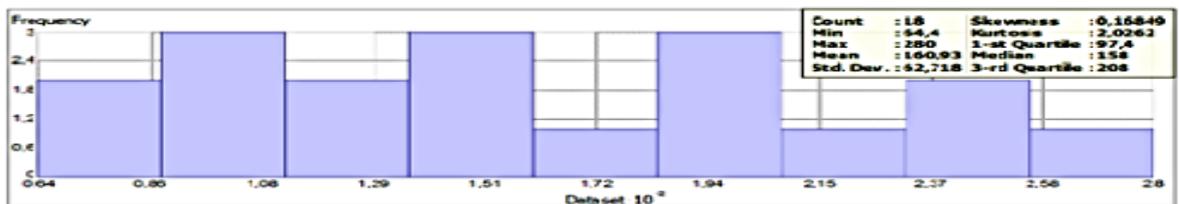
Données : Sources Chrea (Calcium)



Données : Sources Chrea (Bicarbonate)



Données : Sources Chréa (PH)

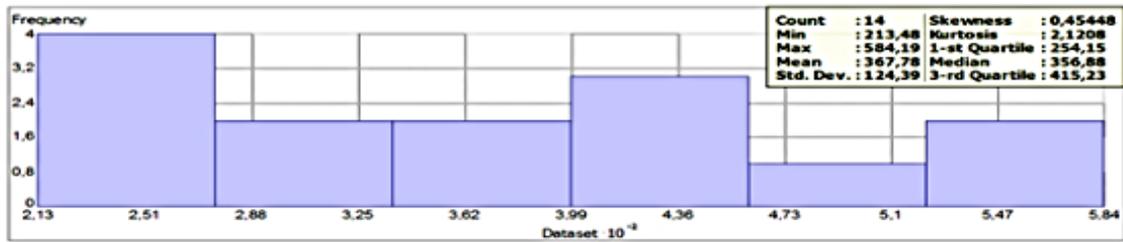


Données : Sources Chréa (TDS)

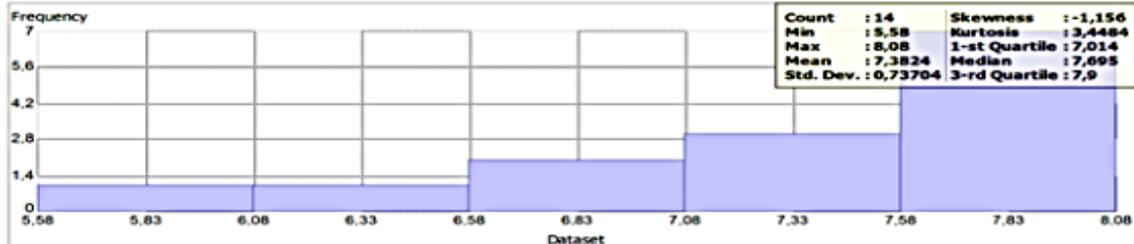


Données : Sources Chréa (CL)

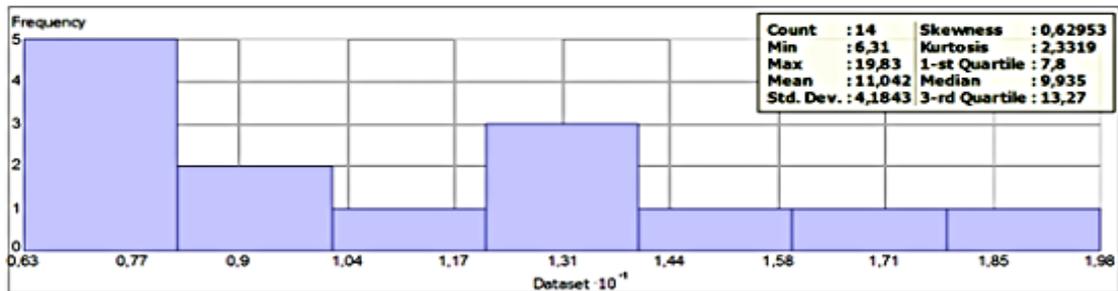
Figure 33 : Histogramme des paramètres chimiques du secteur de Chréa



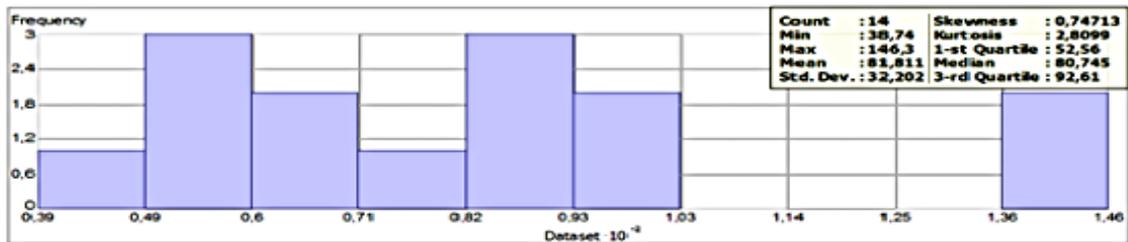
Données : Sources Hamdania (TDS)



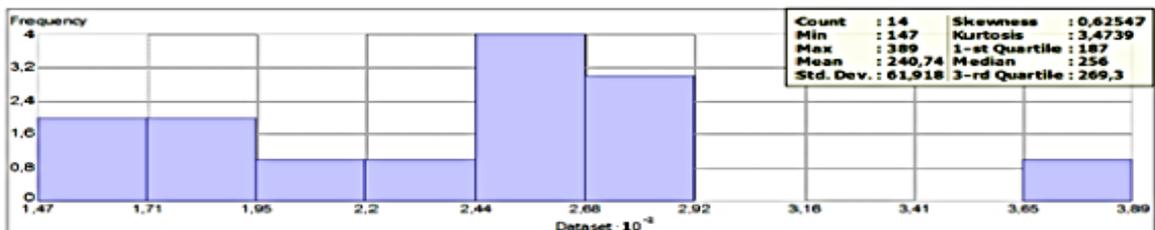
Données : Sources Hamdania (PH)



Données : Sources Hamdania (CL)



Données : Sources Hamdania (Calcium)



Données : Sources Hamdania (Bicarbonate)

F

Figure 34 : Histogramme des paramètres chimiques du secteur d'El-Hamdania

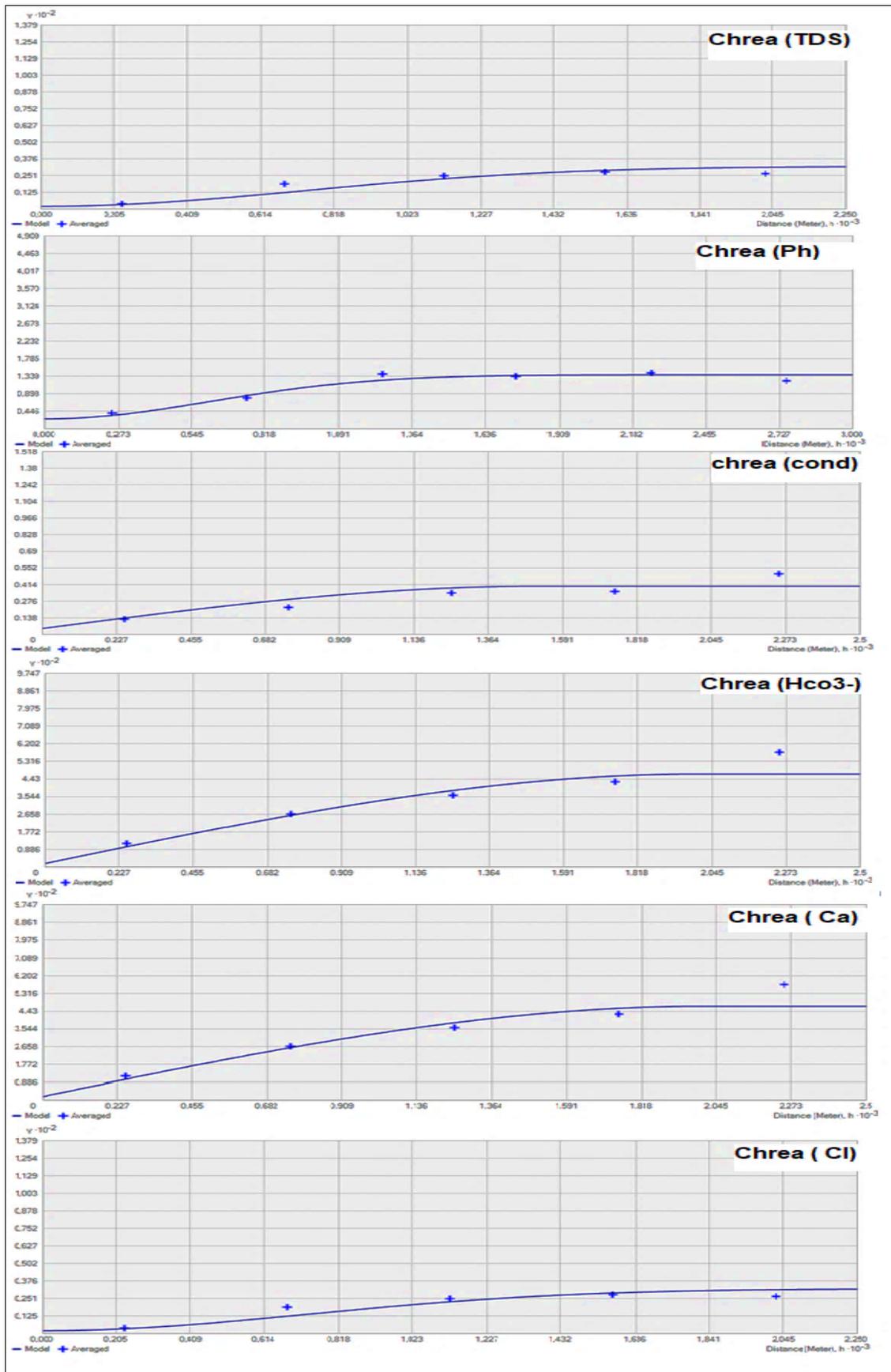


Figure 35 : Les semi-variogrammes du secteur de Chréa

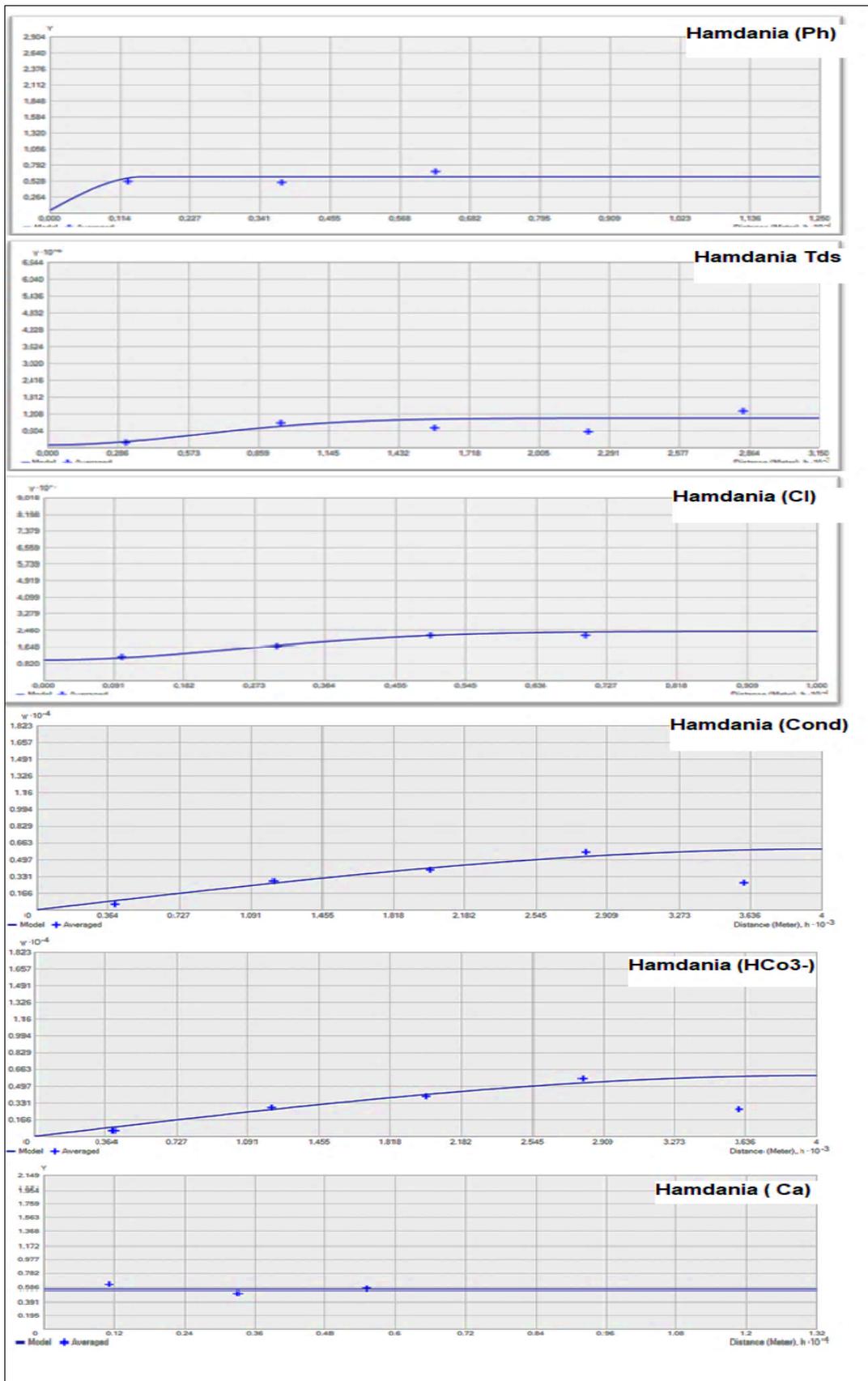


Figure 36 : Les semi-variogrammes de secteur d'El-Hamdania.

**Tableau 7** : Modélisation des semi-variogrammes de secteur de Chréa

Sources	variables	SVE		Modèles		Variance	Porté (m)	Validation croisée	
		Nombre de pas	Pas de distance (m)	Numéro	type de structure			MES	VES
Chréa	Conductivité	5	900	1	effet de pépité	3000		1.03	0.02
				2	Modèle sphérique	2200	15000		
	Ca	5	900	1	effet de pépité	95		0.98	0.018
				2	Modèle sphérique	2500	1500		
	Bica	5	500	1	effet de pépité	190		1.08	0.002
				2	Modèle sphérique	1900	4000		
	PH	6	500	1	effet de pépité	0.025		1.08	0.03
				2	Modèle Gaussien	1500	0.11		
	TDS	5	700	1	effet de pépité	952		0.99	0.02
				2	Modèle Gaussien	2250	4034		
	Cl	5	450	1	effet de pépité	2		0.957	0.112
				2	Modèle Gaussien	1500	28		

**Tableau 8** : Modélisation des semi-variogrammes de secteur d'El-Hamdania

Sources	variables	SVE		Modèles		Variance	Porté (m)	Validation croisée	
		Nombre de pas	Pas de distance (m)	Numéro	type de structure			MES	VES
El-Hamdania	Conductivité	5	900	1	effet de pépité	2700	3500	0.93	0.0083
				2	Modèle sphérique	4500			
	Ca	5	800	1	effet de pépité	200	1000	1.30	0.031
				2	Modèle sphérique	3000			
	Bica	5	800	1	effet de pépité	100	6000	1.31	0.07
				2	Modèle sphérique	4008			
	PH	5	2500	1	effet de pépité	0.05	0.57	1.085	0.31
				2	Modèle Gaussien	2300			
	TDS	5	630	1	effet de pépité	1000	12000	1.29	0.0385
				2	Modèle Gaussien	2500			
	Cl	5	2000	1	effet de pépité	10	14	1.04	0.00003
				2	Modèle Gaussien	6173.78			

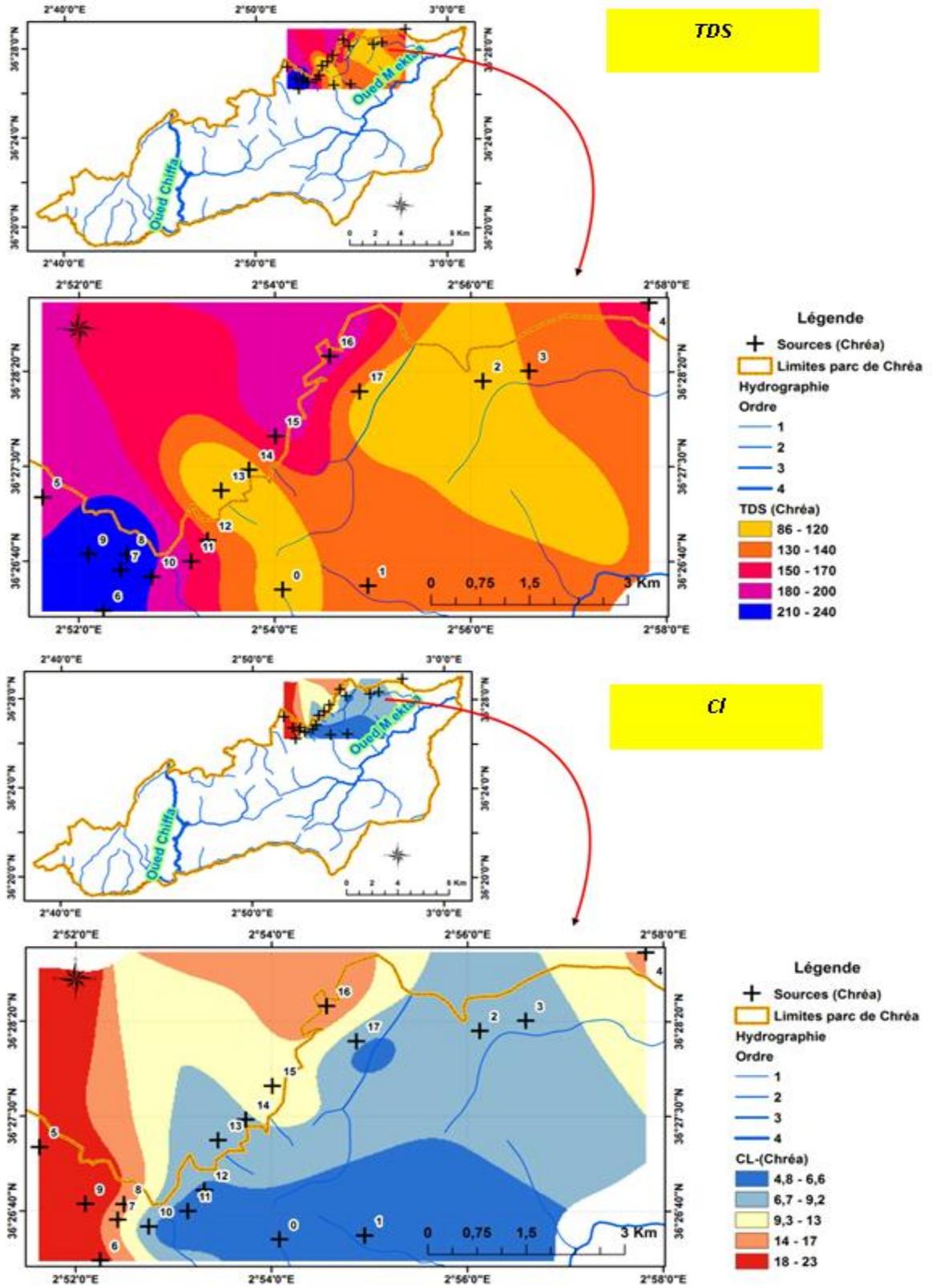
Les résultats montrent une variabilité sphérique et gaussienne bien structurée pour tous les groupes de variables avec une discontinuité à l'origine ou effet de pépité qui signale une irrégularité de la variable régionalisée. La validation croisée doit être réalisée avant d'entreprendre le krigeage. Elle fournit des critères statistiques de sélection dans le choix d'un modèle de variogramme. Elle consiste à éliminer temporairement un point de l'ensemble des données puis à estimer sa valeur par krigeage à l'aide des données restantes et du modèle de variogramme qui a été ajusté. Cette opération est répétée pour tous les points. Le résultat montre que la distribution des erreurs standardisées est gaussienne avec une moyenne des erreurs standardisées (MES) égale à zéro et une variance des erreurs standardisées (VES) proche de l'unité, ce qui implique que les modèles retenus sont robustes et de bonne qualité.

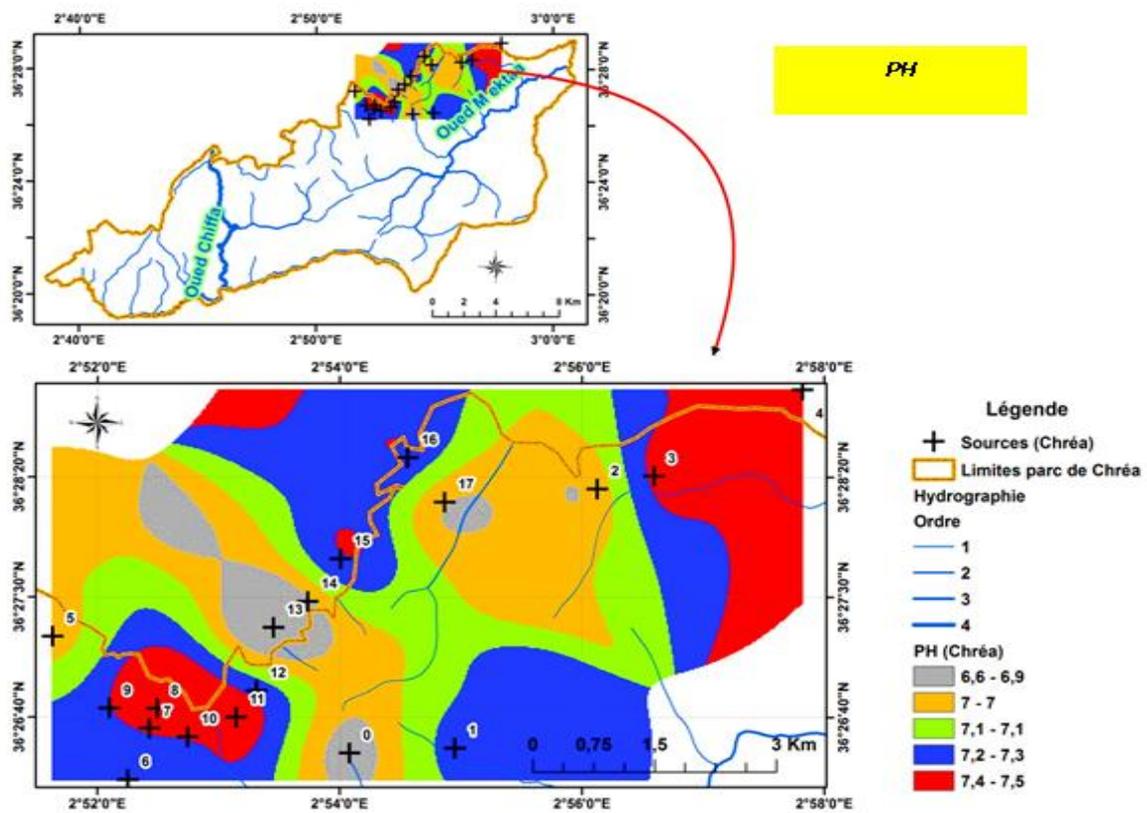
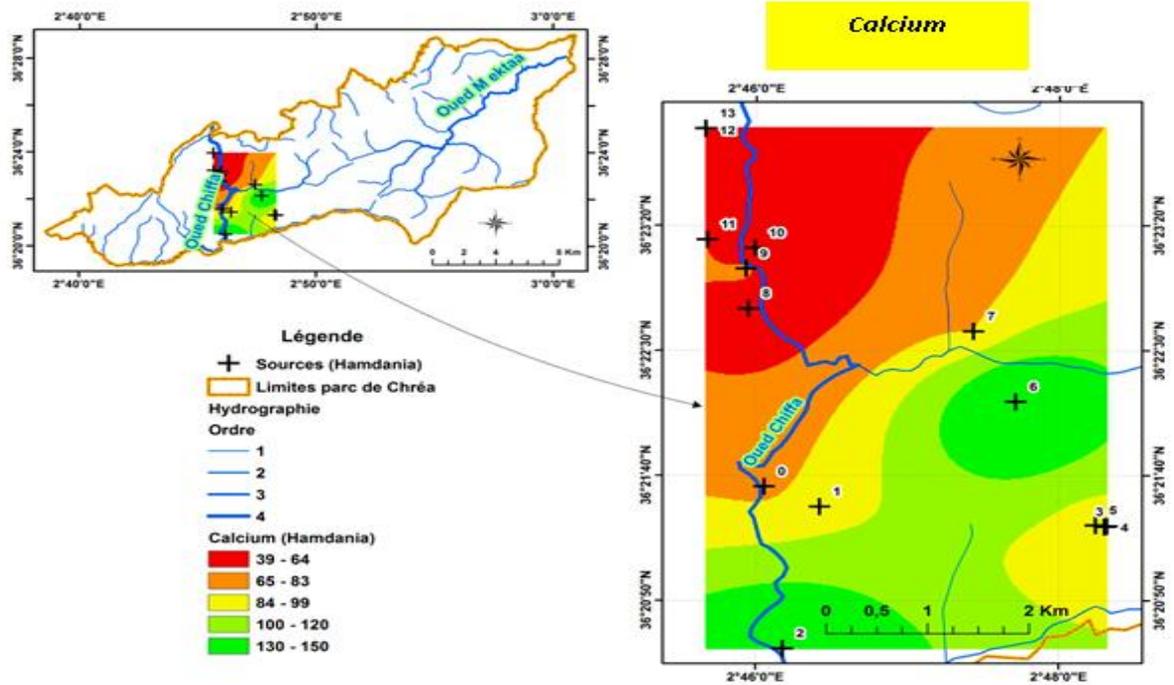
#### **III.9.4.6.7 Représentation Cartographique**

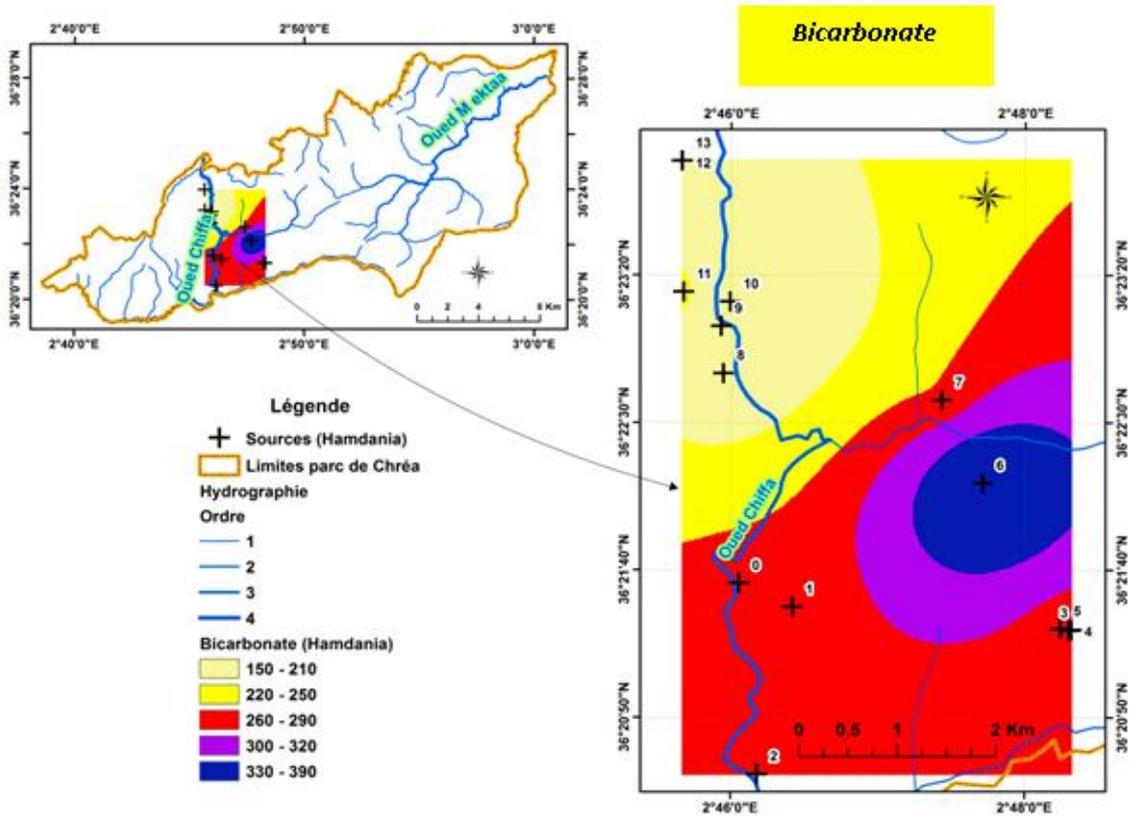
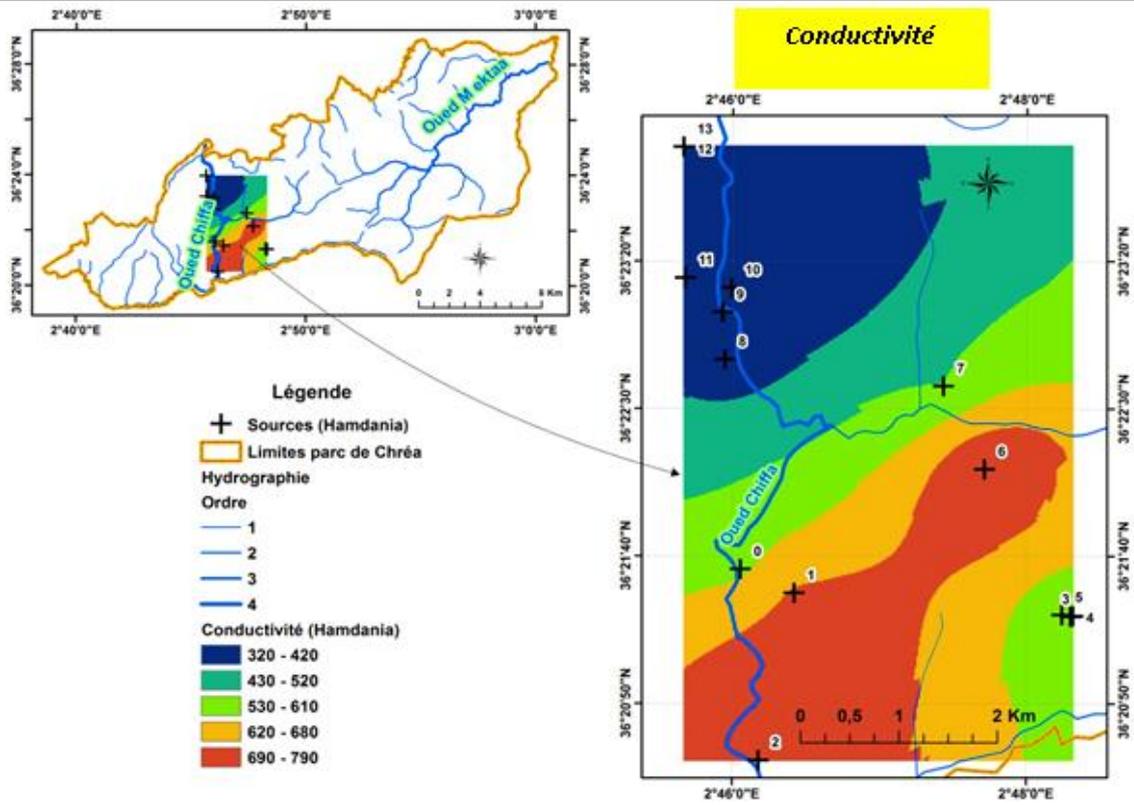
L'analyse géostatistique des données des deux domaines (Chrèa et El-Hamdania) du parc national du Chrèa nous a permis de réaliser une représentation cartographique des principaux éléments chimique.

La distribution de la conductivité sur l'ensemble du domaine Chrèa et d'El-Hamdania montre que les eaux des sources les moins minéralisées, se situent en hauteur vers les sommets, alors que les eaux des sources les plus minéralisées se situent vers le bas, processus qui est conforme au mode de circulation des eaux.

Les eaux d'infiltration qui émergent en altitude, n'ont pas le temps nécessaire pour se charger en sels (temps de contact eaux-roche réduit), alors que pour les eaux de sources situées en aval, elles sont relativement chargées en sels (circuit de circulation souterrain et temps de contact eau-roche plus longs).







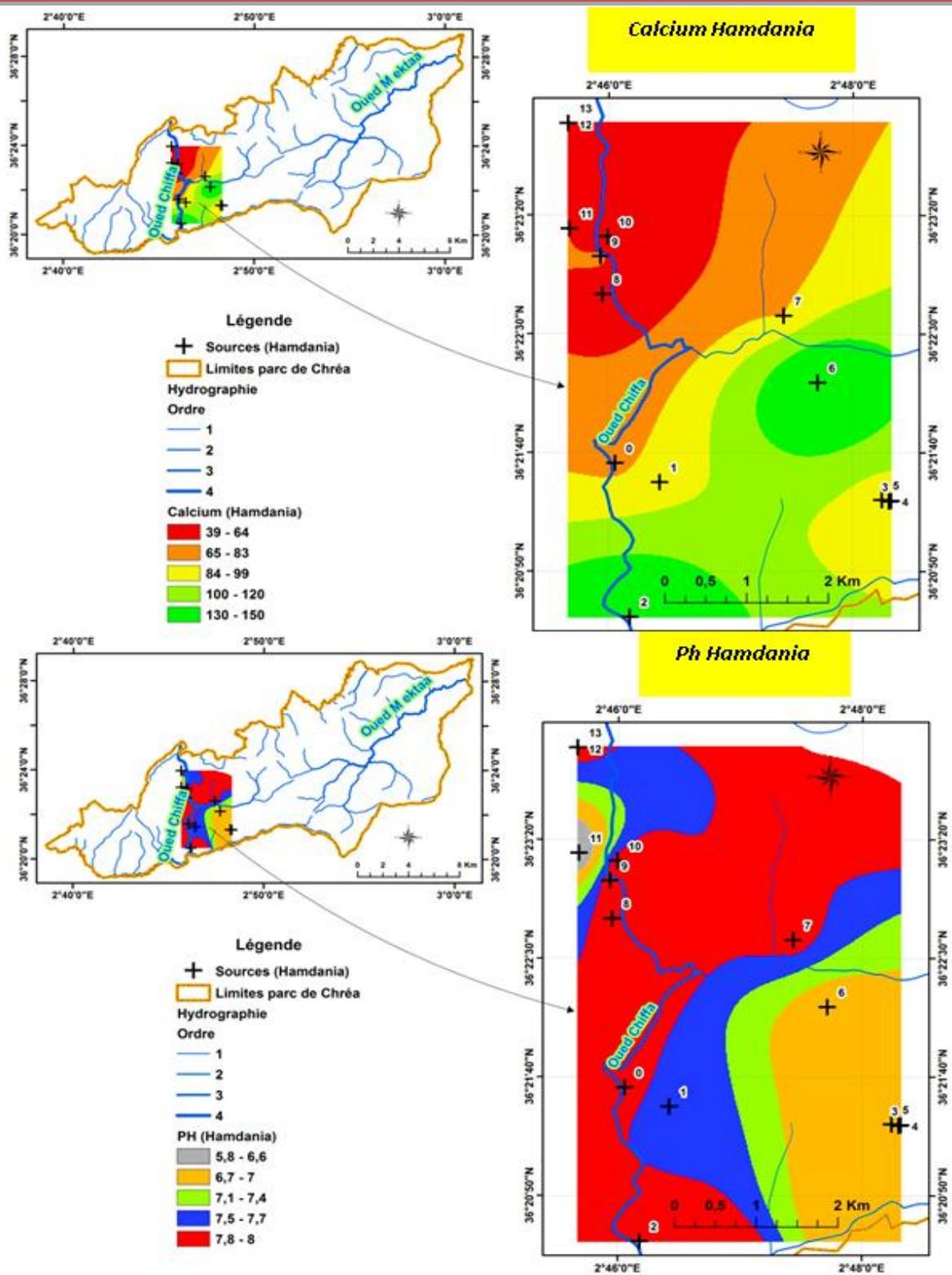


Figure 37 : Représentation cartographique des principaux éléments chimiques des deux secteurs de Chrèa et d'El-Hamdania

### **III.9.4.8 Discussion des différentes approches**

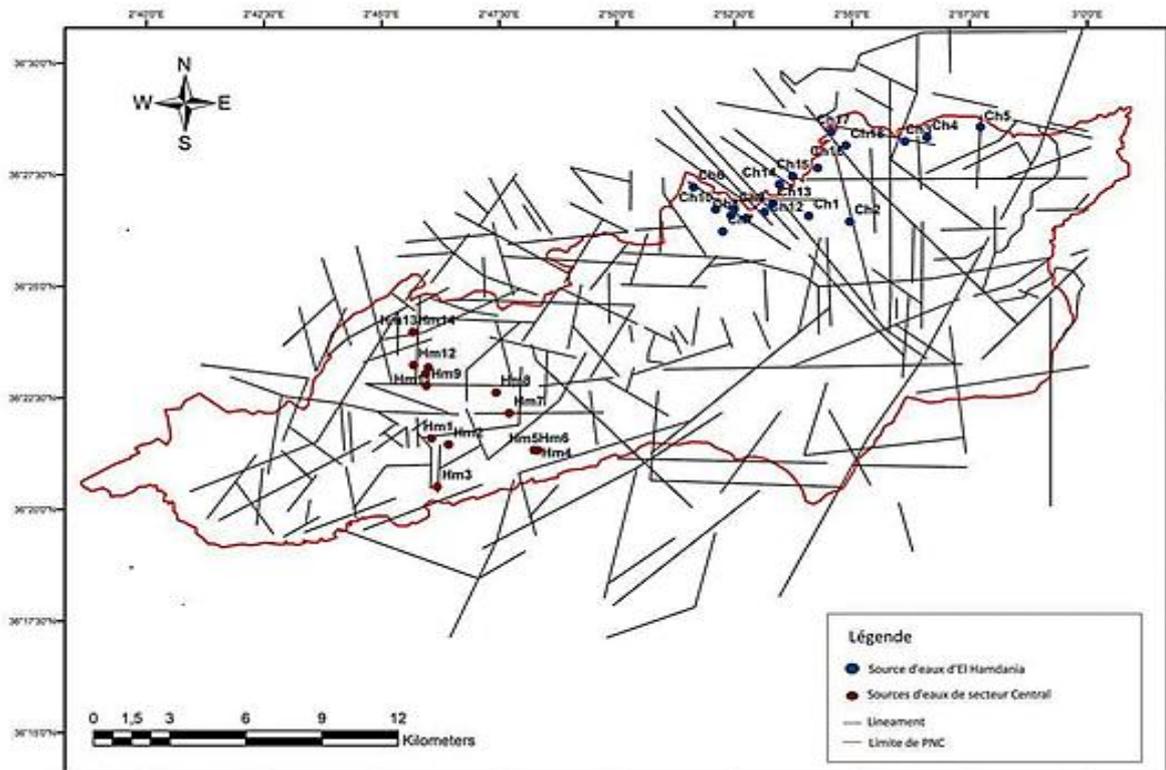
Le comportement hydrodynamique de l'ensemble des sources réparties sur le grand massif du l'Atlas blidéen sur l'espace du Parc National de Chréa, secteur central et secteur d'El-Hamdania, est intimement lié au comportement climatique (répartition pluviométrique) et hydrogéologique (nature lithologique des formations réservoir et structurale [fractures et failles]). L'analyse hydrochimique (TDS, CE, anions, cations) des sources étudiées, suggère des processus de minéralisation des eaux en relation avec leur mode de circulation.

Les eaux des sources les moins chargées obéissent à un schéma d'infiltration à émergence rapide et bref, donc un temps de contact et une interaction eau-roche brève. Ceci correspond donc aux sources qui émergent en altitude.

Les eaux des sources qui émergent vers les parties basses et donc en aval, montrent un chimisme plus prononcé (eaux plus chargées). Ce schéma est lié à une circulation plus longue et plus profonde et un temps de contact eaux-roche plus long, donc un hydrodynamisme forcément différent.

Sur le plan statistique, l'ACP et la géostatistique, confirment le schéma hydrochimique, puisque les meilleures relations et corrélations entre variables, individus et les deux ensembles suggèrent que les sources situées en altitude, sont corrélées entre-elles et celles émergeant plus bas également corrélées entre-elles.

En outre, sur le plan structural, le positionnement des sources se situe aux droits de l'intersection des plans de fracturation et des failles (Fig. 38), aussi bien celles proches du sommet que celles situées en aval.



**Figure 38** : Localisation des points d'émergence des sources sur la carte de fracturation [10]

### **Conclusion générale :**

L'étude abordée dans le contexte de la valorisation des eaux de sources du Parc National de Chréa (secteur centre et secteur d'El-Hamdania ) nous a permis d'exploiter différentes approches à savoir : l'hydrochimie, l'ACP et la géostatistique pour contribuer à une meilleure compréhension du comportement hydrodynamique de l'ensemble des sources réparties sur le grand massif de l'Atlas blidéen.

En effet, l'exploitation de l'outil d'analyse hydrochimique reflète ce comportement, ce qui a rendu possible la connaissance du processus de minéralisation des eaux ainsi que l'origine des éléments et leur faciès chimique.

L'étude des faciès chimiques de l'ensemble des sources a été déterminé à partir des diagrammes de Schoeller–Berkaloff et de Piper. Le faciès chimique le plus dominant est le bicarbonaté calcique et magnésien (présent pour plus de 90% des sources). Les diagrammes binaires ont montré que la minéralisation des eaux se fait principalement par dissolution et lessivage des formations géologiques, et est dû au temps de contact eau–roche. Les ions bicarbonates et calcium sont très corrélés entre eux ce qui suggère que l'origine de ces deux éléments est commune. L'ion bicarbonate provient de deux processus : mise en solution du CO<sub>2</sub> aqueux lors de l'infiltration (système calco-carbonique) et mise en solution des carbonates présents sur le massif.

L'ACP permet d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus à travers la projection des variables dans les principaux axes factoriels. Les résultats comparatifs donnés par l'analyse en composantes principales, montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les ions (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup>). Ceci témoigne d'une acquisition commune du chimisme, principalement par dissolution et équilibre CO<sub>2</sub>–Eau de pluie, lors de l'infiltration.

L'approche géostatistique a été utilisée pour l'interpolation des données. Pour ce faire, le krigeage ordinaire précédé par l'estimation d'une fonction variographique, a été utilisé. C'est cette fonction qui va tenir compte à la fois de la géométrie des données, des caractéristiques de la régionalisation et de la précision de l'estimation.

## *Conclusion générale*

---

Il est donc important de souligner que la qualité de l'estimation et l'appréciation de sa précision, reposent sur le modèle variographique utilisé. Les résultats montrent que cette approche donne des modèles sphériques et gaussiens robustes et de bonne qualité bien structurés et aux semi-variogrammes expérimentaux omnidirectionnels.

Sur le plan structural, la projection des sources sur le réseau de failles et de fractures du mont de l'Atlas blidéen, montre que pratiquement 90% des sources se situent aux intersections des plans de fractures et de failles qui constituent en fait leurs points d'émergence.

En dernier, ce mémoire m'a permis d'améliorer mes performances dans diverses techniques à savoir : le prélèvement d'échantillons sur terrain, les mesures des paramètres physico-chimiques in situ, les techniques d'analyse hydrochimiques au laboratoire, ainsi que le traitement des données avec des outils informatiques récents (Diagrammes, XLSTAT, ArcGIS) ce qui est considéré comme un grand acquis.

## Références bibliographiques

---

- [1] **Plan d'action** Décembre 2014 Parc National de Chréa.
- [2] **BNEF, 1984** – Etude du milieu du parc national de Chréa. Bureau national des études forestières. Blida. 150 p.
- [3] **Plan de gestion II du Parc National de Chréa (2005)**. Ed. du Parc de Chréa, période quinquennale 2005-2009, 212p.
- [4]. **Dahel R.(2015)**.le Parc National de Chréa , une aire protégée à influence régionale .Revue Ajooblogia.vol No.7,pp.05.04.
- [5] **Meddour R. 1994** : Contribution à l'étude phytosociologique de la portion Centro-orientale du parc national de Chréa. Essai d'interprétation synthétique des étages et des séries de végétation de l'atlas blidéen. Thèse de Magister. INA. Alger.
- [6] **Guechoud, 2016** : Cartographie et structure de tacsu baccata à Chréa en relation avec la structure de l'espace dominante (cèdre de l'Atlas). Magistère en Sciences agronomiques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [7] **Rodier J. 1984** : L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition Dunod Paris.
- [8] **Touahri Abdeldjbar 2012** : Dotation des eaux des nappes du complexe terminal et de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [9] **Bouderbala I. & Limani N. 2019** : Relation entre le fonctionnement hydrochimique, hydrodynamique, isotopique et la fracturation géologique des monts de l'Atlas blidéen. Mémoire de Master, Université Blida 1.
- [10] **Medjadji A. & Djadja K. 2020** : Étude hydrochimique des eaux de sources du Parc National de Chréa. Mémoire de Master, Université Blida 1.
- [11] **Rodier J., 2009** : L'analyse de l'eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer physico-chimie, bactériologie et biologie » 9ème édition, Dunod, Paris
- [12] **Bulletin du Bureau de Recherche Géologique et Minières** 2ème série, section III N°4-1970 : Hydrogéologie qualité des eaux pollution 1 ère partie.

[13] **Fedhi C., 2009** : Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott Laouinet (région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien).

[14] **Leghlam S., 2020** : Analyses Statistique multivariables de la qualité des eaux souterraine de la plaine de la Mitidja

[15] **Brinis N., Boudoukha A., Hamel A. 2015** : Analyse statistique et géochimique de la dynamique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du synclinal de Ghassira, Algérie orientale.

[16] **Khelfi M.A. 2018** : Régionalisation de l'exposant climatique dans l'Algérie du centre. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Blida.

**Webographie ;**

(1) **Wikipédia**

(2) **Google**

## ANNEXE 1 :Tableau des précipitations enregistrées de la station Douar Makli. [04]

Code Station : 021427													
Nom de la station : DOUAR MALKI													
X : 532.45													
Y : 355.75													
Z :130													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juinn	Jui	aout	Annuel
2000	3.7	38.8	72.7	38.9	154.5	59.4	1.3	42.3	17.8	0	0	1	428.4
2001	14.6	9.7	48.98	53.4	37.4	16.4	50.1	37.6	23.3	0.5	8.4	46.4	344.6
2002	30.9	42.9	159.3	169.1	199.9	147.1	22.4	121.5	41.7	15.8	1.2	2.5	954.3
2003	54.3	32.5	59.5	129.1	90.9	48	85.3	70.8	118.8	3.4	8.4	0	878.8
2004	11.5	40.1	85.5	119.4	94.5	134.3	46.8	34.1	6.9	0	0	0.9	574
2005	26.2	50.8	96.3	96.2	174.8	102	21.4	7.1	98.6	0.6	0	1.9	645.9
2006	14.1	22.6	32.4	179.6	3.8	80.1	172.1	104.6	6.7	0.8	3.4	6.4	626.6
2007	53.1	129.1	52.3	52.3	9.3	40.5	41.2	23.1	80.6	1.5	3.1	0	546.8
2008	17.8	26.4	123.1	99.9	125.4	10.4	54.3	77	37.6	0.2	0	0.4	572.5
2009	70.3	7.3	51.9	88.9	54.4	57.3	92.1	25.9	24.5	1.4	0	16.4	490.4
2010	6.9	58.9	110.1	60	52.2	165.3	20.4	118.8	118.4	49.5	0	1.5	762
2011	19.6	82	78.5	68.8	48	240.7	122	12.4	15.9	0.2	0	40.8	828.7
2012	4.6	50.4	77.6	31.9	125.3	141.5	81	90	217.7	1.2	0	31.1	852.3
2013	9.6	36.8	181.6	165	67.8	77.4	155.4	2	11.3	74.7	0	0	781.6
2014	45.6	17.5	78.9	196.3	152.6	112.2	96.9	0	19.5	6.7	0.2	0	728.4
2015	26.7	66.4	77.8	0	139.9	132.8	156.8	73.8	59.4	0.3	2	0	735.6
2016	11.9	9.7	90.2	119	316.4	23.5	49.5	34.1	8.4	11.3	0.6	3.6	678.2
2017	54.3	25.1	144.4	158.6	20.3	104.7	97.5	177.2	70.7	67.7	0	0	920.5
2018	33.6	95.4	144.2	80.7	129	16.3	54.8	47.4	51.6	8.2	4.8	3	920.5
2019/2020	35.7	22.7	117.1	18.8	17.8	0	93.2	132.2					

**ANNEXE 2 : Paramètres physicochimiques des 80 sources .**

Nom	Ref	XX	YY	Z	PH	Cond (µs/cm)	Ca++	Mg++	Na+	K+	Li+	Cl-	SO4-	NO3-	HCO3	BI	SiO2	TDS	O2sat	T(°C)	Tac	F-
Ain Tirailleur	Ch1	2,901339	36,44	1320,00	6,75	194,20	24,93	1,81	9,04	5,39	0,21	5,52	8,03	0,39	86,63	5%	24,93	97,40	6,90	12,70	78,00	0,54
Beni Sbiha	Ch2	2,916861	36,44	962,00	7,21	273,00	43,72	3,51	9,42	5,16	0,21	4,80	10,29	0,87	139,10	7%	43,72	136,00	8,50	14,70	125,00	0,00
Mermoucha	Ch3	2,935417	36,47	1027,00	6,83	162,00	25,53	1,36	7,51	5,04	0,20	7,05	8,73	1,27	70,77	8%	25,53	82,00	9,40	11,40	120,00	0,52
Agni	Ch4	2,943222	36,47	1002,00	7,42	250,00	43,25	1,98	10,95	13,03	0,21	8,20	11,77	2,46	103,71	17%	43,25	126,00	9,40	11,30	150,00	0,50
Tafrane	Ch5	2,963667	36,48	784,00	7,49	302,00	48,49	1,10	9,17	5,32	0,00	12,70	10,50	1,75	122,02	8%	48,49	147,00	8,60	14,00	120,00	0,56
El Aouina	Ch6	2,8805	36,45	879,00	6,90	342,00	37,73	1,43	14,88	6,07	0,00	19,15	13,22	4,33	103,71	4%	37,73	174,00	7,70	15,30	108,00	0,51
Oued Blat 1	Ch7	2,870861	36,44	945,00	7,29	481,00	66,97	7,70	11,30	4,97	0,00	19,26	23,26	1,86	178,15	7%	66,97	244,00	9,90	9,88	215,00	0,51
Oued Blat 2	Ch8	2,873833	36,44	942,00	7,21	421,00	53,23	6,08	11,03	5,98	0,00	11,53	18,25	1,04	151,30	8%	53,23	215,00	9,30	12,00	182,00	0,55
Oued Blat 3	Ch9	2,874889	36,45	956,00	7,67	572,00	79,45	9,48	14,23	5,32	0,00	15,53	27,97	1,12	225,73	7%	79,45	280,00	9,20	10,60	238,00	0,53
Ain El Honta	Ch10	2,868333	36,45	925,00	7,29	482,00	67,55	6,95	12,02	4,99	0,21	22,13	19,53	0,50	217,80	0%	67,55	242,00	9,00	12,00	195,00	0,51
Bourebbo	Ch11	2,879111	36,44	1118,00	7,28	372,00	58,47	4,28	9,37	4,92	0,00	6,71	13,77	0,94	196,02	1%	58,47	194,00	9,80	10,00	105,00	0,52
hamo masseoud	Ch12	2,88575	36,44	1120,00	7,45	291,00	44,31	4,04	9,21	4,73	0,20	5,90	11,22	1,40	157,13	1%	44,31	166,00	9,50	11,00	125,00	0,52
Yama Bahria	Ch13	2,888556	36,45	1128,00	7,29	330,00	46,97	4,58	11,34	4,77	0,00	6,39	14,18	0,82	172,68	0%	46,97	160,00	9,40	10,50	142,00	0,63
Ain Sbae	Ch14	2,890861	36,45	1108,00	6,50	127,60	15,89	1,64	12,80	5,21	0,00	7,29	6,84	2,31	43,56	19%	15,89	64,40	9,50	10,00	65,00	0,59
Oued Sidi Moussa	Ch15	2,895611	36,46	1095,00	6,78	177,00	21,60	2,26	13,69	4,66	0,20	8,94	12,12	0,00	76,23	6%	21,60	89,00	9,50	10,00	60,80	0,60
E Randa	Ch16	2,900111	36,46	1102,00	7,38	377,00	65,29	4,25	13,52	4,85	0,21	10,26	23,34	2,28	188,24	5%	65,29	192,00	9,50	10,30	169,00	0,61
Feroukha	Ch17	2,909333	36,47	933,00	7,33	415,00	61,07	3,43	13,47	4,85	0,00	16,29	17,30	6,64	196,02	-1%	61,07	208,00	7,80	13,00	190,00	0,59
Tassakra	Ch18	2,914417	36,47	973,00	6,79	170,00	20,47	1,99	8,83	5,03	0,21	6,71	8,21	1,81	70,00	5%	20,47	90,00	9,40	11,50	71,80	0,59
Hoichem	Ch19	2,76759	36,36	326,20	7,84	580,00	78,37	8,91	26,82	6,22	0,21	10,72	60,23	2,01	269,30	0%	26,37	415,23	9,40	14,50	190,00	0,86
Carrière De Gypse	Ch20	2,77368	36,36	432,40	7,45	706,00	92,61	7,44	26,20	7,03	0,00	19,83	99,44	0,00	260,00	-3%	92,61	505,44	9,30	14,20	260,00	0,54
Oued Djir	Ch21	2,76966	36,34	372,50	7,84	808,00	141,60	13,26	32,03	5,84	0,21	16,37	199,20	0,81	280,00	3%	141,62	578,46	9,20	15,40	205,00	0,70
Tibarkant1	Ch22	2,80501	36,36	684,00	7,01	579,00	97,81	7,76	19,39	5,37	0,21	13,16	69,22	1,13	286,00	0%	97,81	414,52	5,20	16,30	200,00	0,51
Tibarkant2	Ch23	2,80528	36,36	681,00	7,10	567,00	91,69	7,78	18,82	5,06	0,21	12,94	68,49	0,41	256,00	1%	91,69	406,00	5,00	16,50	150,00	0,59
Lac de Bourous	Ch24	2,80402	36,36	699,00	6,51	497,00	89,60	6,68	16,25	6,68	0,00	9,15	35,49	0,00	265,00	5%	89,60	355,81	9,90	16,40	100,00	0,57
Takharat	Ch25	2,79523	36,37	733,00	6,60	816,00	146,30	13,26	20,12	5,47	0,00	13,27	84,22	1,13	389,00	5%	146,30	584,19	6,10	12,80	370,00	0,67
Oued El Merdja	Ch26	2,79057	36,38	399,00	7,90	500,00	83,12	9,81	16,49	5,42	0,21	7,84	60,34	1,08	256,00	1%	83,12	357,96	9,90	13,30	198,00	0,56
Ain Sbae (chiffa)	Ch27	2,76581	36,38	285,00	7,90	355,00	50,58	6,34	12,73	5,23	0,00	7,80	25,35	1,22	170,00	2%	50,58	254,15	9,90	13,70	150,00	0,51
Oued El Hemi 1	Ch28	2,76556	36,38	294,00	8,00	442,00	68,44	7,29	13,15	4,91	0,00	15,31	49,87	0,61	181,00	3%	68,44	316,44	9,90	13,70	150,00	0,55
Oued El Hemi2	Ch29	2,76656	36,39	300,00	7,99	278,00	38,74	4,79	10,50	5,00	0,00	6,40	10,48	0,48	147,00	2%	38,74	213,94	10,40	13,20	110,00	0,51
Oued El Hemi 3	Ch30	2,76129	36,39	346,00	5,58	409,00	64,15	7,85	13,50	4,88	0,00	8,29	19,33	2,40	220,00	3%	64,15	292,81	9,70	13,30	160,00	0,51
isseau Des sines	Ch31	2,7611	36,40	305,00	7,55	382,00	49,78	5,21	11,36	4,92	0,00	7,20	12,69	0,93	187,00	0%	49,78	213,48	9,80	12,20	145,00	0,51
isseau Des sines 2	Ch32	2,7611	36,40	305,00	8,08	336,00	52,56	6,00	10,92	4,88	0,00	6,31	9,56	1,06	204,00	0%	52,56	240,55	/	13,98	/	/
Ain tihamamine	Ch33	537000	357850	200000	7,50	770,00	123,00	14,00	20,00	7,00	0,00	13,00	147,00	2,80	304,00	1%	46,00	631,00	/	14,05	/	/
Ain Oued elanser	Ch34	539275	358800	160000	7,70	1180,00	107,00	32,00	50,00	2,00	0,00	45,00	163,00	0,00	310,00	2%	38,00	709,00	/	14,13	/	/
Ain elmerbouni	Ch35	536300	358550	120000	7,50	1310,00	167,00	30,00	28,00	2,00	0,00	35,00	305,00	0,00	259,00	2%	25,00	826,00	/	14,21	/	/
Ain bousserdina	Ch36	528600	352200	195000	7,80	1530,00	141,00	51,00	45,00	1,00	0,00	25,00	305,00	0,00	341,00	2%	0,00	909,00	/	14,28	/	/
Ain bousserdina	Ch37	528700	352400	150000	7,80	5700,00	364,00	407,00	120,00	6,00	0,00	50,00	2375,00	0,00	470,00	-1%	0,00	3792,00	/	14,36	/	/
ir maktaa lazreg	Ch38	528400	352000	180000	7,40	1700,00	172,00	61,00	1,52	1,00	0,00	33,00	258,00	33,50	430,00	1%	0,00	990,00	/	14,43	/	/
Ain mazala	Ch39	527750	350900	210000	7,50	1530,00	149,00	72,00	25,00	1,00	0,00	13,00	267,00	0,00	510,00	1%	0,00	1037,00	/	14,51	/	/
Ain bouhadj	Ch40	527300	351350	170000	7,70	880,00	139,00	31,00	18,00	1,00	0,00	34,00	140,00	0,30	337,00	5%	0,00	700,00	/	14,58	/	/
Oued sghir	Ch41	531050	353600	120000	7,80	1530,00	161,00	54,00	18,00	1,00	0,00	8,00	470,00	0,00	195,00	0%	16,80	907,00	/	14,66	/	/
Ain taliene	Ch42	530800	354050	138000	7,70	1920,00	255,00	40,00	50,00	2,00	0,00	22,00	498,00	2,20	348,00	4%	0,00	1217,00	/	14,74	/	/
Ain tala ali	Ch43	531100	354000	180000	7,96	790,00	101,00	5,00	15,00	1,00	0,00	8,00	15,00	0,00	318,00	3%	0,00	463,00	/	14,81	/	/
Ain mehieddine	Ch44	542550	361800	120000	7,20	1000,00	111,00	52,00	98,00	2,00	0,00	103,00	140,00	19,10	460,00	2%	17,60	985,00	/	14,89	/	/
Ain elharas	Ch45	542300	361000	160000	7,00	1200,00	119,00	34,00	100,00	4,00	0,00	92,00	128,00	53,20	433,00	0%	9,20	963,00	/	14,96	/	/
Ain elmadjadji	Ch46	542300	361550	158000	7,10	1170,00	121,00	59,00	95,00	3,00	0,00	130,00	142,00	3,80	488,00	1%	16,00	1042,00	/	15,04	/	/
Ain elharba	Ch47	542075	361550	158000	7,00	2090,00	161,00	67,00	75,00	2,00	0,00	92,00	205,00	29,70	589,00	0%	32,40	1221,00	/	15,12	/	/
Ain echorfa	Ch48	542700	361100	120000	7,00	1570,00	111,00	48,00	70,00	3,00	0,00	52,00	90,00	11,00	506,00	3%	36,00	891,00	/	15,19	/	/
Ain elmalha	Ch49	532200	354775	120000	7,30	7700,00	425,00	65,00	5,46	8,00	0,00	2130,00	883,00	0,00	206,00	-50%	2,60	3722,00	/	15,27	/	/
Oued elmogranate	Ch50	532500	355550	138000	7,70	5750,00	245,00	125,00	650,00	5,00	0,00	1190,00	875,00	0,00	181,00	-4%	9,60	3271,00	/	15,34	/	/
Ain gammansour	Ch51	535125	354450	610000	7,40	890,00	85,00	22,00	15,00	0,00	0,00	6,00	83,00	0,00	228,00	9%	7,40	439,00	/	15,42	/	/
Oued gammansour	Ch52	534950	354550	596000	7,50	780,00	54,00	54,00	15,00	0,00	0,00	10,00	113,00	0,00	298,00	2%	6,80	544,00	/	15,50	/	/
Ain eldjoudi	Ch53	535250	354400	600000	7,20	1330,00	82,00	74,00	20,00	0,00	0,00	11,00	263,00	0,00	337,00	-1%	9,10	787,00	/	15,57	/	/
Ain ezhairya	Ch54	528600	357100	150000	7,00	600,00	148,00	11,00	25,00	1,00	0,00	33,00	53,00	0,00	417,00	3%	0,00	688,00	/	15,65	/	/
Ain sidi serhane	Ch55	528200	353550	480000	7,00	530,00	118,00	35,00	35,00	1,00	0,00	26,00	176,00	0,00	346,00	1%	11,00	7				

**ANNEXE 3** :Le Tableau ci-dessous présente les valeurs de pression de CO<sub>2</sub> d'équilibre et la concentration en H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> d'équilibre obtenue à partir du logiciel Diagrammes.

Libellé	Nom De Source	pCO2 eq	H2CO3 Co2 dissous	Libellé	Nom De Source	pCO2 eq	H2CO3 Co2 dissous
Ch01	Ain Tirailleur	0.01581	0.538	Ch40	Ain bouhadj	0.00344	<b>0.117</b>
Ch02	Beni Sbiha	0.00869	0.296	Ch41	Oued sghir	0.02761	<b>0.94</b>
Ch03	Mermoucha	0.01076	0.366	Ch42	Ain tallene	0.04134	<b>1.408</b>
Ch04	Agni	0.004	0.136	Ch43	Ain tala ali	0.03674	<b>1.251</b>
Ch05	Tafrane	0.004	0.136	Ch44	Ain mehieddine	0.05532	<b>1.883</b>
Ch06	El Aouina	0.01327	0.452	Ch45	Ain elharas	0.04845	<b>1.649</b>
		0.00913	0.311	Ch46	Ain elmadjadji	0.00905	<b>0.308</b>
Ch07	Oued Blat 1	0.00939	0.32	Ch47	Ain elharba	0.00318	<b>0.108</b>
Ch08	Oued Blat 2	0.00479	0.163	Ch48	Ain echorfa	0.00892	<b>0.304</b>
		0.01114	0.379	Ch49	Ain elmalha	0.00918	<b>0.313</b>
Ch09	Oued Blat 3	0.01034	0.352	Ch50	Oued elmogranate	0.0203	<b>0.691</b>
		0.00564	0.192	Ch51	Ain gammansour	0.04042	<b>1.376</b>
Ch10	Ain El Honta	0.00894	0.304	Ch52	Oued gammansour	0.03327	<b>1.133</b>
Ch11	Bourebbo	0.01424	0.485	Ch53	Ain eldjoudi	0.00752	<b>0.256</b>
Ch12	Khamo masseoud	0.01298	0.442	Ch54	Ain ezhairya	0.01944	<b>0.662</b>
Ch13	Yama Bahria	0.00786	0.267	Ch55	Ain sidi serhane	0.00698	<b>0.238</b>
Ch14	Ain Sbae	0.00919	0.313	Ch56	Ain tafrent	0.03327	<b>1.133</b>
Ch15	Oued Sidi Moussa	0.01169	0.398	Ch57	Ain tabayent	0.00309	<b>0.105</b>
Ch16	E Randa	0.00384	0.131	Ch58	Ain berrehal	0.00902	<b>0.307</b>
Ch17	Feroukha	0.00905	0.308	Ch59	Ain sidi habchi	0.02094	<b>0.713</b>
Ch18	Tassakra	0.0039	0.133	Ch60	Oued azza	0.01105	<b>0.376</b>
Ch19	Hoichem	0.02722	0.927	Ch61	Ain teberkechent	0.00506	<b>0.172</b>
Ch20	La Carrière De Gypse	0.02004	0.682	Ch62	Ain hmedelaarbi	0.02817	<b>0.959</b>
Ch21	Oued Djir	0.08102	2.758	Ch63	Oued saouda	0.00939	<b>0.32</b>
Ch22	Tibarkant1	0.09465	3.222	Ch64	Ain laamariche	0.04517	<b>1.538</b>
Ch23	Tibarkant2	0.00318	0.108	Ch65	Oued echarchar	0.01577	<b>0.537</b>
Ch24	Lac de Bouarous	0.00215	0.073	Ch66	Ain nesreddine	0.01277	<b>0.435</b>
Ch25	Takharat	0.0018	0.061	Ch67	Ain fra d'ina	242115	<b>8.24E+06</b>
Ch26	Oued El Merdja	0.00152	0.052	Ch68	Ain babamoussa	258920	<b>8.82E+06</b>
Ch27	Ain Sbae (chiffa)	0.57804	19.68	Ch69	Ain hamledi	222393	<b>7.57E+06</b>
Ch28	Oued El Hemi 1	0.00531	0.181	Ch70	Ain douali	263535	<b>8.97E+06</b>
Ch29	Oued El Hemi 2	0.00171	0.058	Ch71	Tala zit	414455	<b>1.41E+07</b>
Ch30	Oued El Hemi 3	0.00933	0.318	Ch72	Oued yefrane	471506	<b>1.61E+07</b>
Ch31	Ruisseau Des Singes 1	0.00596	0.203	Ch73	Oued essalgou	249113	<b>8.48E+06</b>
Ch32	Ruisseau Des Singes 2	0.00779	0.265	Ch74	Oued sidi yekhlaf	276436	<b>9.41E+06</b>
Ch33	Ain tihamamine	0.00512	0.174	Ch75	Ain elmaten	0.00776	<b>0.264</b>
Ch34	Ain Oued elanser	0.00637	0.217	Ch76	Elonser	0.00475	<b>0.162</b>
Ch35	Ain elmerbouni	0.01617	0.55	Ch77	Ain elplatane	0.01129	<b>0.384</b>
Ch36	Ain bousserdina	0.01521	0.518	Ch78	Ain sidi fodil		
Ch37	Ain bousserdina	0.00647	0.22	Ch79	Ain mihoub		
Ch38	bir maktaa lazreg	0.00291	0.099	Ch80	Ain echikh		