الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers Département de Géologie

Mémoire De Fin De Stage Pour L'obtention Du Diplôme De Master en Hydrogéologie

Thème

Étude comparative entre les méthodes d'interpolation pour lacartographie de la qualité des eaux souterraines de la nappephréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest Algérien

Présenté par :
- Chelab mohamed
- Belkacemi walid

Dirigé par :
- M^me^ BELKHIR KHADIDJA

Jury de soutenance :

Nom	prénom	Grade	Qualité	université
Mme. Bakhti	Amel	MCB	Président	Oran2
Mr. Bergan	Cheikh	MCB	Examinateur	USTO
Mme. Belkhir	Khadidja	MAA	Encadreur	Oran2

Promotion : Juin 2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à Mme Belkhir Khadidja, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa patience et son encadrement rigoureux tout au long de ce mémoire.

Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt porté à notre travail, ainsi que leurs remarques constructives.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous nos enseignants du département de géologie, pour la qualité de l'enseignement reçu durant notre formation.

Dédicace

Nous dédions ce mémoire :

À nos familles respectives, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements constants et leur soutien moral tout au long de notre parcours universitaire.

À nos parents, piliers de notre réussite, pour leurs sacrifices et leur patience.

À nos enseignants et à tous ceux qui ont contribué à faire de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

À nos camarades et amis pour les bons moments partagés, les discussions enrichissantes et l'entraide mutuelle.

Chelab Mohamed & Belkacemi Walid

Table des matières

Remerciements i

Dédicace ii

Table des matières iii

Liste des tableaux vi

Liste de figures vii

Résumé viii

ABSTRACT viii

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I

Aperçu des méthodes d'interpolation

1. Introduction 4
2. Définition et principe de L'interpolation 4
3. Différentes méthodes d'interpolation 5

3.1. Méthodes déterministes 5

3.1.1. La méthode IDW 5

3.1.2. Méthode RBF 6

3.2. Méthodes géostatistiques 7

3.2.1. Semi-variogramme 7

3.2.2. Modèles de semi-variogramme 8

3.2.3. Krigeage 8

3.2.4. Méthodes de krigeage 10

4. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation 10

4.1. Métriques d'évaluation pour la méthode IDW 11

4.2. Métriques d'évaluation pour la méthode RBF 11

4.3. Métriques d'évaluation pour le krigeage 11

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

I. Situation géographique 13

1. Géomorphologie et climatologie 13

2. Géologie de la région 14

3. Principaux aquifères dans la plaine de Ghriss 15

4. Piézométrie de l'aquifère Plio-Quaternaire 17

Chapitre III

Hydrochimie des eaux

1. Analyse générale des données 19

2. Outils de traitement des données 19

3. Les facies chimique 20

3.1. Le diagramme de Piper 20

3.1.1. Classification des faciès hydro-chimiques 22

3.2. Diagramme de Stabler 23

3.3. diagramme de Berkaloff 24

Conclusion 28

Chapitre V

Méthodes d'interpolation

1. Introduction 30

2. Matériels et Méthodes 30

3. Analyse exploratoire des données par Histogramme 32

4. Vérification de la stationnarité des données hydrochimiques 35

5. L'interpolation de paramètres hydrochimiques par krigeage 36

6. Comparaison des différentes méthodes d'estimation 38

6.1. Interpolation de Calcium Ca^{+2} par les méthodes classiques IDW& RBF 39

6.2. Interpolation de Calcium Ca^{+2} par les méthodes géostatistiques 40

7. Génération de la carte finale de la distribution spatiale des éléments hydrochimiques de la

plaine de Ghriss 41
Conclusion 43
Conclusion générale 45
Références bibliographiques 47

Liste des tableaux

Tableau 1: Les caractéristiques des facies des eaux de la nappe plioquaternaire..... 22
Tableau 2: Matrice de corrélation des paramètres des eaux analysées..... 26
Tableau 3 : Variance totale expliquée par les valeurs propres..... 27
Tableau 4: la moyenne des erreurs d'estimation de différentes méthodes..... 38
Tableau 5: L'écart type des erreurs d'estimation de différentes méthodes..... 38

Liste de figures

Figure 1: Schéma explicatif de l'interpolation spatiale (https://portailsig.org/) 4
Figure 2: Exemple de voisinage de recherche dans la méthode IDW 5
Figure 3: Coupe transversale illustrant la façon dont la surface RBF s'ajuste à travers les valeurs d'échantillonnage 6
Figure 4: Exemple de variogramme 8
Figure 5: Situation géographique de la zone d'étude 13
Figure 6: Carte géologique du plain de Ghrisse (Bekkoussa et al. 2008) 15
Figure 7: Coupe hydrogéologique de la plaine de Ghriss (ANRH, 2012 ; Lakhdari T., 20 16
Figure 8: Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (septembre 2001, ANRH) 17
Figure 9: Fenêtre de dialogue du logiciel "HLA diagrammes" 19
Figure 10: Diagramme de Piper 21
Figure 11: Daigramme de Stabler 23
Figure 12: Diagramme de Berkaloff 25
Figure 13 : Contribution des variables 28
Figure 14: Cercle des corrélations entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de Ghriss (planF1–F2) 28
Figure 15: Schéma général présentant la démarche de l'étude 31
Figure 16: représente la localisation des données 32
Figure 17: analyse exploratoire des données hydrochimique par histogramme 34
Figure 18: stationnarité données hydrochimique en fonction des coordonnées x,y 36
Figure 19: Semi-variogramme expérimentaux et théoriques des éléments hydrochimiques de la plaine de Ghriss 37
Figure 20: Carte de répartition des teneurs en calcium par la méthode RBF et IDW 39
Figure 21: Méthode de Krigeage ordinaire 40
Figure 22: Méthode de Krigeage universel 40
Figure 23: Cartes de prédiction de la distribution spatiale des substances chimiques des eaux souterraines paramètres Mg, Na, SO4, K 41
Figure 24: Cartes de prédiction de la distribution spatiale des substances chimiques des eaux souterraines paramètres HCO3 ,NO3 ,Cl ,Ec 42
Figure 25: Cartes de prédiction de la distribution spatiale des substances chimiques des eaux souterraines paramètre Ph. 43

Résumé

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines d'une région est d'une importance capitale pour planifier le bon développement des eaux souterraines et comprendre leurs localisations et distributions spatiales La modélisation spatiale constitue un élément fondamental de la chaîne d'outils de gestion de la ressource en eau. Cette étude se propose de tester les différentes méthodes d'interpolation déterministes (la méthode de pondération inverse de distance (IDW), la méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF),) et géostatistique (krigeage ordinaire (KO), krigeage universel (KU)) pour cartographier les paramètres hydrochimique dans les eaux souterraines de la nappe plioquaternaire de la plain de Ghriss, Les estimations montrant des différences significatives selon les méthodes utilisées, il est intéressant d'évaluer les cartes de répartition spatiales des paramètres hydro _chimiquesobtenues en comparant leurs qualités prédictives au moyen du calcul de l'erreur moyenne d'estimation. Les résultats indiquent la supériorité de la technique du krigeage universel par rapport aux estimations déterministes.

Mots-clés : Géostatistique, méthodes déterministes, Analyse spatiale, eau souterraine, paramètres hydrochimique

ABSTRACT

Assessing the quality of groundwater in a region is of paramount importance for planning the proper development of groundwater and understanding its spatial locations and distributions. Spatial modeling is a fundamental element of the water resource management tool chain. This study aims to test the different deterministic interpolation methods (the inverse distance weighting (IDW) method, the radial basis function (RBF) network method) and geostatistical methods (ordinary kriging (KO), universal kriging (KU)) to map the hydrochemical parameters in the groundwater of the Plioquaternary aquifer of the Ghriss plain. Since the estimates show significant differences depending on the methods used, it is interesting to evaluate the spatial distribution maps of the hydrochemical parameters obtained by comparing their predictive qualities by calculating the average estimation error. The results indicate the superiority of the universal kriging technique over deterministic estimates.

Keywords: Geostatistics, deterministic methods, spatial analysis, groundwater,hydrochemical parameters.

ملخص:

يُعد تقييم جودة المياه الجوفية في أي منطقة أمرًا بالغ الأهمية لتخطيط التنمية السليمة لها وفهم مواقعها وتوزيعاتها المكانية. وتُعد النمذجة المكانية عنصرًا أساسيًا في سلسلة أدوات إدارة موارد المياه. تهدف هذه الدراسة إلى اختبار مختلف أساليب الاستيفاء الحتمي) طريقة ترجيح المسافة العكسية(IDW) ، وطريقة شبكة دالة الأساس الشعاعي ((RBF)والأساليب الجيوإحصائية) الكريج العادي(KO) ، والكريج الشامل ((KU لرسم خرائط المعلمات الهيدروكيميائية في المياه الجوفية لخزان المياه الجوفية من العصر الرباعي في سهل غريس. ونظرًا لأن التقديرات تُظهر اختلافات كبيرة تبعًا للأساليب المستخدمة، فمن المهم تقييم خرائط التوزيع المكاني للمعلمات الهيدروكيميائية التي تم الحصول عليها بمقارنة خصائصها التنبؤية بحساب متوسط خطأ التقدير. وتشير النتائج إلى تفوق أسلوب الكريج الشامل على التقديرات الحتمية.

الكلمات المفتاحية: الجيو إحصائية، الأساليب الحتمية، التحليل المكاني، المياه الجوفية، المعلمات الهيدروكيميائية.

.

INTRODUCTION GENERALE

Le couplage des techniques de modélisation spatiale à celles des SIG a beaucoup évolué ces dernières années, grâce aux progrès de l'informatique. D'une part, les logiciels de traitement géostatistique se sont enrichis d'outils simplifiés de représentation géographique, voire, plus récemment, de fonctions d'import/export pour communiquer avec des logicielsSIG ; d'autre part, les logiciels SIG ont intégré des outils de modélisation spatiale à traversdes extensions spécialisées. Ainsi les modules TIN et GRID d'Arc/ Info, commercialisés au début des années 1990, sont venus rejoindre les applications de la gamme ArcGIS avec les extensions Spatial Analyst, 3D Analyst, plus récemment complétées par Geostatistical Analyst (Thomas 2003). L'extension Geostatistical Analyst (GA) propose une large gammede fonctions de modéli sation spatiale plus ou moins sophistiquées susceptibles de répondre aux besoins d'interpolation de valeurs à partir de données de différents types (Johnston et al. 2001). Les applications d'interpolation sont de plus en plus nombreuses, et ce dans des domaines variés, notamment en hydrogéologie et hydrochimie où l'information disponible se résume souvent à des données directes, obtenues in situ à partir de sondages, et à des données indirectes, qui ne renseignent pas directement sur les propriétés mais présentent certaines corrélations avec elles (Gomez et Garcia, 1998). Le choix d'une technique appropriée dépend de nombreuses considérations, et son application nécessite une bonne dose d'expérience et d'expertise (Martin et al. 1989 ; Rogers 2003).

Le couplage des techniques de SIG et la géostatistique offrent des outils puissant et précis pour la cartographie et l'analyse spatiale des propriétés des eaux et de leurs indicateurs.

Dans cette étude, une comparaison entre les méthodes déterministes (IDW et la méthode RBf) et les méthodes géostatistique est faite. L'objectif de cette étude étant dechoisir la meilleure méthode d'interpolation pour la génération des cartes de la qualité hydrochimique de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, dans la wilaya de Mascara. Outre le résumé, l'introduction générale, et la conclusion générale, ce mémoire est structuréen quatre chapitres :

- Le premier chapitre donne un aperçu sur les méthodes d'interpolation.
- Le second chapitre décrit la zone d'étude avec ses aspects géologiques et hydrogéologiques.
- Le troisième chapitre étudié l'hydrochimie des eaux de la nappe plioquaternaire
- Le quatrième chapitre présente les principales étapes menées dans l'interpolation et ceci pour les différentes méthodes. A la fin de ce chapitre, une comparaison entre les méthodes

d'interpolation est faite. L'objectif étant de choisir la meilleure méthode pour la cartographie de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ghriss.

Chapitre I :
Aperçu des méthodes d'interpolation

1. Introduction :

L'interpolation est une technique mathématique utilisée pour estimer les valeurs entre des points de données connus, revêt une importance immense en hydrogéologie. Elle sert d'outil central pour construire des représentations continues des paramètres des eaux souterraines dans une zone d'étude, en exploitant des points de mesure discrets. Grâce à l'interpolation, les hydrogéologues acquièrent des connaissances inestimables sur la répartition spatiale des propriétés critiques des eaux souterraines telles que la charge hydraulique, les concentrations de contaminants et les caractéristiques de l'aquifère. Cette compréhension globale est essentielle pour déchiffrer les schémas d'écoulement des eaux souterraines, tracer les voies de migration des contaminants et délimiter les limites des aquifères. De plus, une interpolation précise jette les bases du développement de modèles hydrogéologiques essentiels pour une gestion efficace des ressources en eaux souterraines, des stratégies d'atténuation de la pollution et des évaluations d'impact environnemental. (Fetter C.W., 2001).

Dans le SIG il existe plusieurs méthodes d'interpolation qui donnent généralement des résultats variés et différents. Il existe plusieurs approches pour classifier ces méthodes (Hartkamp et al., 1991 ; Sarközy, 1999)

2. Définition et principe de L'interpolation :

Est le processus de prédiction ou d'estimation des valeurs entre des points de données observés. Cela permet de reconstruire une fonction ou une surface continue à partir dedonnées discrètes ou échantillonnées de manière sporadique dans l'espace. Utilisée dans de nombreux domaines, cette technique est cruciale pour produire des cartes continues, des surfaces de terrain ou des modèles prédictifs basés sur des données limitées (figure 1).L'interpolation peut être réalisée à l'aide de méthodes déterministes ou stochastiques, adaptées en fonction des caractéristiques des données et des objectifs de l'analyse.

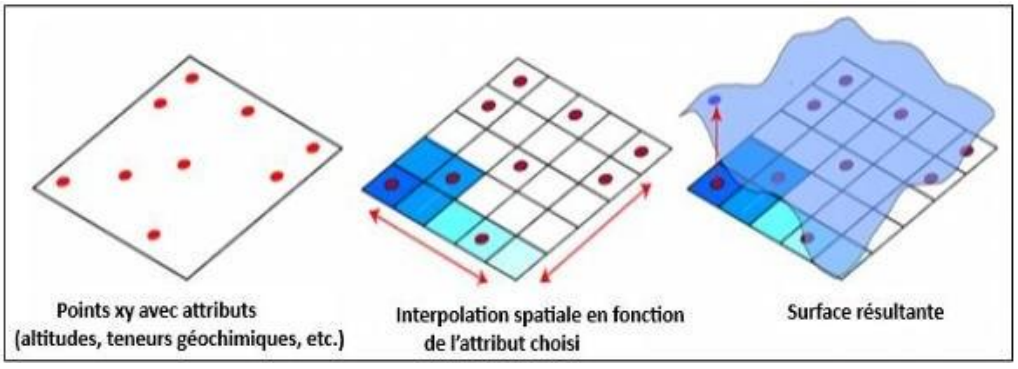


Figure 1: Schéma explicatif de l'interpolation spatiale (https://portailsig.org/)

3. Différentes méthodes d'interpolation :

Dans les applications hydrogéologiques, les méthodes d'interpolation peuvent être largement classées en approches déterministes et géostatistiques.

3.1. Méthodes déterministes :

Les méthodes d'interpolation dites déterministes sont fondées sur des fonctions mathématiques qui expriment soit un facteur de pondération des valeurs d'entraînement (pondération inverse de la distance), soit une surface de tendance (polynômes, splines), voire une combinaison des deux (Rogers, 2003).

3.1.1. La méthode IDW

La pondération par l'inverse de la distance (IDW) est une technique d'interpolation déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondéré par l'inverse de la distance au point calculé: plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte.

Elle estime que les points plus proches de l'emplacement à calculer auront plus d'influence. Dans l'image suivante, cinq points mesurés (voisins) seront utilisés pour prévoir la valeur de la localisation sans mesure, le point jaune.

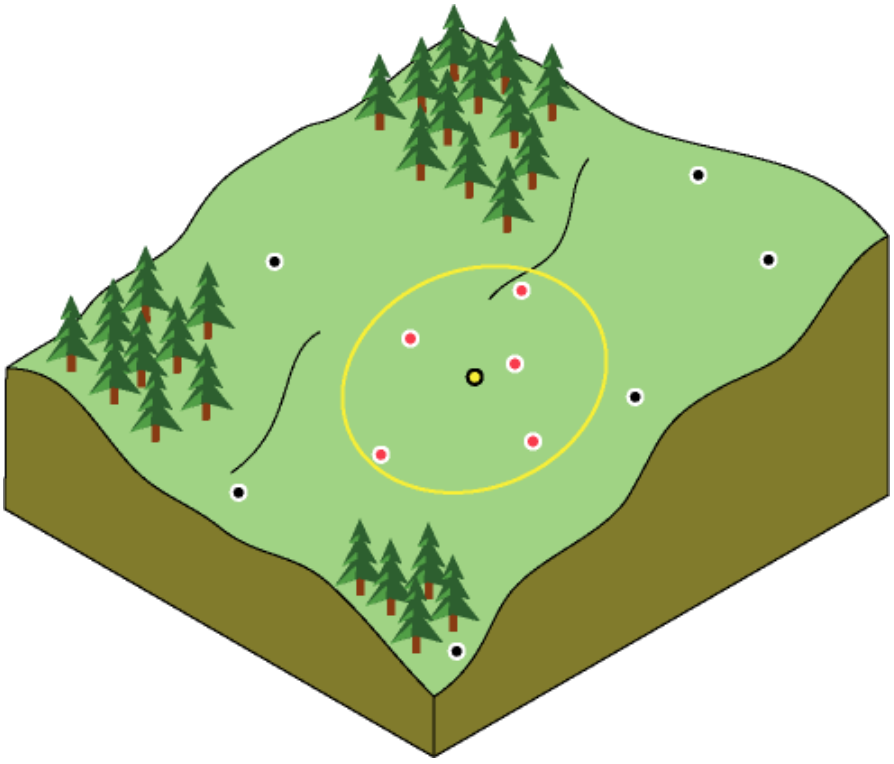


Figure 2: Exemple de voisinage de recherche dans la méthode IDW

3.1.2. Méthode RBF :

Les fonctions de base radiale (RBF) sont une série de techniques d'interpolation précises. En d'autres termes, la surface doit traverser chaque valeur d'échantillonnage mesurée. On compte cinq fonctions de base différentes :

- Spline de plaque mince
- Spline avec tension
- Spline entièrement régularisée
- Fonction multiquadratique
- Fonction multiquadratique inverse

Chaque fonction de base présente une forme différente et produit une surface d'interpolation différente. Les méthodes RBF sont un cas particulier de splines.

En théorie, les méthodes RBF s'apparentent à l'ajustement d'une membrane caoutchoutée à travers les valeurs d'échantillonnage mesurée tout en réduisant la courbure totale de la surface. La fonction de base que vous sélectionnez détermine la façon dont la membrane caoutchoutée s'ajustera entre les valeurs. Le diagramme suivant illustre de façon théorique la façon dont une surface RBF s'ajuste à travers une série de valeurs d'échantillonnage d'élévation. Notez que dans la coupe transversale, la surface passe par les valeurs de données.

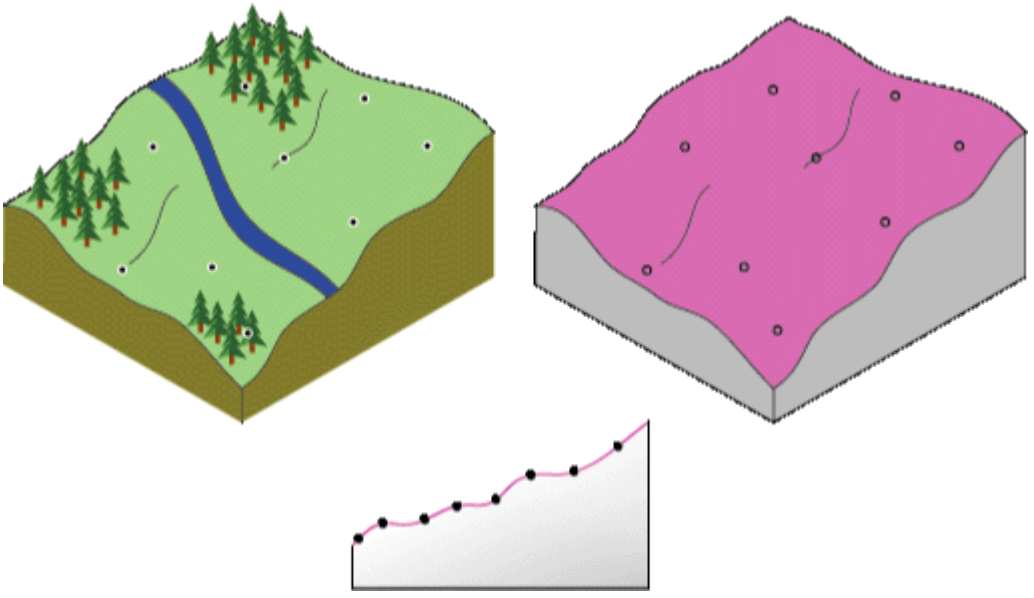


Figure 3: Coupe transversale illustrant la façon dont la surface RBF s'ajuste à travers les valeurs d'échantillonnage

Considérées comme précises, les méthodes RBF diffèrent des méthodes d'interpolation polynomiales globales et locales, qui sont toutes les deux de nature inexacte et qui n'exigent pas que la surface passe à travers les points mesurés. Si vous comparez une méthode RBF à IDW (qui est également une méthode d'interpolation exacte), IDW ne prévoit jamais de valeurs supérieures à la valeur mesurée maximale ou de valeurs inférieures à la valeur mesurée minimale.

3.2. Méthodes géostatistiques

En géostatistique, l'analyse des données spatiales repose sur la compréhension et la modélisation de la structure de variation spatiale des phénomènes géographiques. Cette approche considère que les données sont corrélées spatialement, ce qui signifie que les valeurs observées à des emplacements proches sont plus similaires les unes aux autres que celles éloignées. Les méthodes géostatistiques permettent de quantifier cette corrélation spatiale à l'aide de mesures telles que le semi-variogramme, qui décrit la variation des données en fonction de la distance spatiale. En utilisant ces informations sur la structure spatiale, les méthodes géostatistiques d'estimation, telles que le krigeage, produisent des estimations des valeurs inconnues dans l'espace en prenant en compte la corrélation spatiale entre les points de données. L'incertitude associée à ces estimations est également évaluée, fournissant ainsi une indication de la précision des estimations à travers des mesures telles que la variance d'estimation..

3.2.1. Semi-variogramme

Le variogramme est défini pour toute fonction aléatoire intrinsèque et dépendant uniquement de l'inter distance h, alors que la fonction de covariance ne l'est que pour le cas d'une fonction aléatoire stationnaire d'ordre 2. De plus, l'estimation du variogramme n'est pas biaisée par la moyenne, au contraire de la covariance.

Théoriquement, pour calculer le semi-variogramme, la formule suivante est couramment utilisée :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \qquad \text{(II.1)}$$

où γ(h) est la valeur du semi-variogramme pour la distance de décalage (h), n(h) est le nombre total de paires de variables séparées par une distance de décalage (h), et Z(x) est la valeur de la variable.

L'étude de la structure par le variogramme consiste à suivre l'évolution de « variation quadratique moyenne de l'accroissement de la fonction Z(x) en fonction de h d'amplitudes croissante.

3.2.2. Modèles de semi-variogramme

Différents modèles théoriques ont été élaborés pour tenir compte des traits caractéristiques du comportement du variogramme. Les composantes sont définies par un palier C et éventuellement une portée a et des paramètres de formes. On distingue les modèlessans paliers et modèles avec palier. Les composantes γi les plus fréquemment utilisées sont :

- Sphérique :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ c_0 + c_s \left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] & 0 < h \leq a \\ c_0 + c_s & h > a \end{cases}$$

- Gaussien :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ c_0 + c_s \left[1 - exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right] & h > 0 \end{cases}$$

- Exponentiel :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ c_0 + c_s \left[1 - exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right)\right] & h > 0 \end{cases}$$

- Effet de pépite.

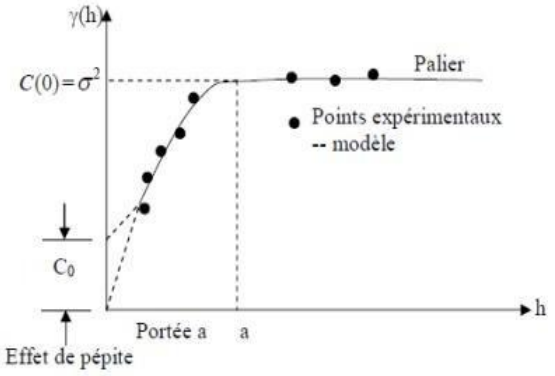


Figure 4: Exemple de variogramme

3.2.3. Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation issue de la géostatistique. Le terme krigeage, « kriging » en anglais, provient du nom de famille de l'ingénieur minier Sud-africainDaniel Gerhardus Krige. Il a été formalisé pour la prospection minière par George Matheron (1930-2000) à l'Ecole des Mines de Paris. Depuis, le domaine de ses applications a largement été étendu, touchant notamment la météorologie, les sciences de l'environnement, etc.

Le krigeage est donc une méthode d'interpolation spatiale, parfois considérée comme la plus juste d'un point de vue statistique, qui permet une estimation linéaire basée sur l'espérance mathématique et aussi sur la variance de la donnée spatialisée.

A ce titre le krigeage se base sur le calcul, l'interprétation et la modélisation du variogramme, qui est une appréciation de la variance en fonction de la distance entre données. En pratique, le krigeage est le nom donné à l'élaboration de l'estimation local, ça concerne l'estimation d'une portion bien circonscrite du champ de la variable régionalisée étudiée grâce à des données disponibles bien délimitées.

Nous devons donc, définir une quantité à estimer appliquée à la variable régionalisée, l'estimateur et l'erreur d'estimation.

L'estimateur serait une combinaison linéaire des données disponibles dont nous ne connaissons pas les poids, car justement, ce sont ces poids qui restent les inconnues du problème d'estimation locale. Ils seront définis grâce à la méthode classique basée sur le formalisme probabiliste, ainsi déterminés, ces poids seront par la suite affectés aux données. (CHAUVET, 1999).

L'équation générale de la méthode de krigeage a la forme suivante :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda^i{}_0 Z(x_i) \qquad \text{(II.2)}$$

où $\lambda^i{}_0 i$ est le poids associé à chaque point de données i (i =1, 2, 3,…, n), $Z(x_i)$ est la valeur observée au point x_i, $Z^*(x_0)$ est la valeur prédite au point x_0, et n est le nombre d'échantillons points. Avec :

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda^i{}_0 = 1, \qquad i = 1, \ldots\ldots\ldots\ldots, n \qquad \text{(II.3)}$$

Les valeurs des poids λ^i_0, sont estimées en minimisant la variance de krigeage (σ^2) donnée par:

$$\sigma^2 = 1/N \sum_{i=1}^{n} (Z^*(x) - Z(x))^2 \qquad \text{(II.4)}$$

Pour la comparaison entre les différents modèles de variogramme et la transformation des données, l'erreur moyenne quadratique (MSE) est calculée avec la formule suivante :

$$EMQ = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2 \quad (II.4)$$

MSE est utilisé pour choisir le meilleur modèle en comparant sa valeur, et la plus petite valeur d'MSE indique le modèle le plus adapté aux données.

3.2.4. Méthodes de krigeage

Le krigeage effectue le calcul de la variance d'estimation minimale pour tout estimateur linéaire. Dans le cadre stationnaire, il y a deux formes particulières de krigeage, selon que la moyenne du processus est connue ou non : soit le krigeage simple et le krigeage ordinaire. Ce dernier est, de loin, le plus fréquemment utilisé. (Marcotte, 2003)

a -Krigeage simple : Parfois on connaît la moyenne "m" du champ à estimer ou du moins on en possède un estimé fiable. On peut alors former un estimateur sans biais sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1.

b- krigeage ordinaire : Le krigeage ordinaire est la méthode la plus générale et la plus couramment utilisée. Il s'agit également de la méthode par défaut. Elle part du principe que la moyenne constante est inconnue. Il s'agit là d'une hypothèse a priori valide, à moins qu'une raison scientifique aille à l'encontre de cette dernière.

c- Krigeage universel : Le krigeage universel part du principe qu'il existe une tendance prépondérante dans les données et qu'elle peut être modélisée par une fonction déterministe, un polynôme. Le polynôme est soustrait aux points initialement mesurés et l'auto-corrélation est modélisée à partir des erreurs aléatoires. Une fois que le modèle est ajusté selon les erreurs aléatoires, avant d'effectuer une prévision. Le krigeage universel n'est à utiliser que lorsque vous savez qu'il existe une tendance dans les données et que vous pouvez en donner une justification scientifique.

4. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation :

Les techniques de validation et les évaluations de l'incertitude font partie intégrante de l'interpolation spatiale, garantissant la fiabilité et l'exactitude des valeurs interpolées pour une prise de décision éclairée.

Le choix d'une méthode d'interpolation spatiale dépend de plusieurs facteurs, notamment les caractéristiques des données, la variabilité spatiale, les ressources de calcul

disponibles et le niveau souhaité de précision et d'évaluation de l'incertitude. Cependant, il existe pour chaque méthode un moyen pour évaluer la qualité de l'interpolation :

4.1. Métriques d'évaluation pour la méthode IDW :

La qualité de l'interpolation IDW peut être évaluée à l'aide de métriques telles que l'erreur quadratique moyenne (MSE), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de corrélation (R) entre les valeurs observées et interpolées.

4.2. Métriques d'évaluation pour la méthode RBF :

Similaires à IDW, des métriques d'évaluation telles que MSE, RMSE, MAE et coefficient de corrélation peuvent être utilisées pour évaluer la qualité de l'interpolation RBF. De plus, la douceur de la surface interpolée peut être évaluée visuellement.

4.3. Métriques d'évaluation pour le krigeage :

En plus des métriques d'erreur traditionnelles, le krigeage fournit des mesures de l'incertitude de prédiction, telles que la variance de krigeage. La qualité de l'interpolation de krigeage peut être évaluée en fonction à la fois de la précision des valeurs prédites et de la fiabilité des estimations d'incertitude.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

I. Situation géographique :

La plaine de Ghriss est Située au Nord-Ouest algérien, entre 35◦07 et 35◦31 de latitude Nord et entre 0◦0et 0◦26de longitude Est (Figure 5), la plaine est limitée au Nord par les monts 1° 10 W Mer Méditérranée ∗ Ain Temouchent Sidi-bel-abbes Mostaganem OranMohammadia Mascara de Béni Chougrane, au Sud par les monts de Saida, à l'Ouest par les monts de Bouhanifia et à l'Est par le plateau de Tirenifine.

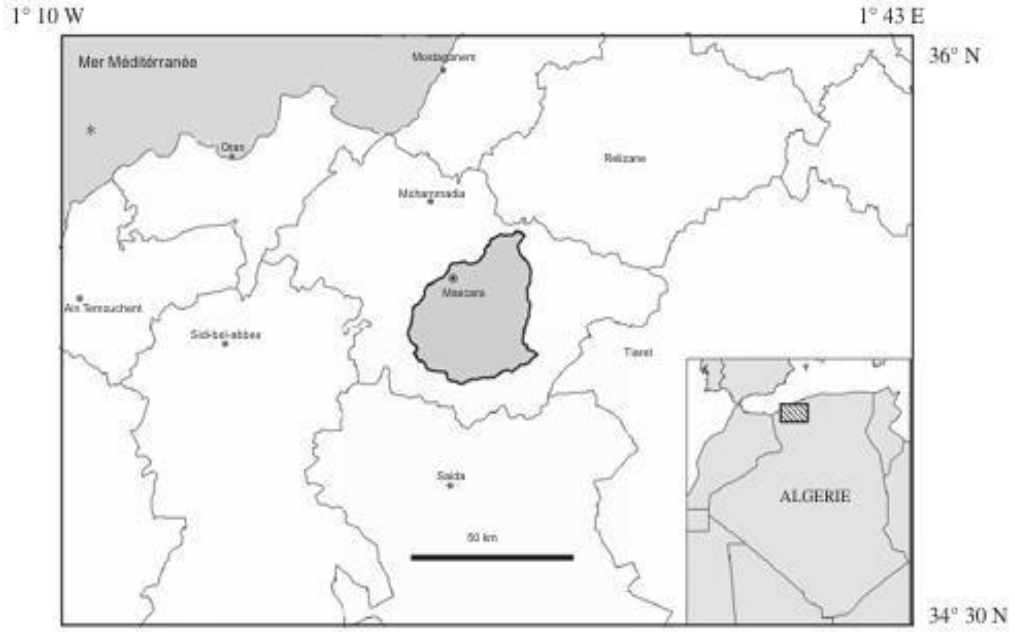


Figure 5: Situation géographique de la zone d'étude

1. Géomorphologie et climatologie :

La plaine de Ghriss occupe une superficie de 600 km2. Elle fait partie du bassin versant de l'Oued Fekan qui s'étend à son tour sur une superficie de 1185 km2. La plaine correspond à une étendue plane (470 m d'altitude moyenne), surplombée par des reliefs de bordure élevés, jusqu'à 1100 m d'altitude au Sud (montagne de Nesmoth).

C'est une région à climat semi-aride où les précipitations moyennes annuelles sont égales à 313 mm/an pour la période 1976–2001 Pour la même période, l'évapotranspiration réelle a été estimée à 289 mm/an et la température moyenne annuelle à 16,5◦C; la pluie cumulée entre décembre et février correspond en moyenne à 37% du total pluviométrique annuel. Les pluies de printemps et d'automne correspondent respectivement à 30% et 28% de ce total, alors que les pluies d'été, qui sont à caractère orageux et torrentiel, ne représentent que 5% de celui-ci. La zone ne présente pas de variabilité pluviométrique spatiale trèsimportante, bien que les reliefs soient plus arrosés que la plaine centrale. Les températures

sont élevées durant la période de juin à août avec des valeurs maximales dépassant parfois 40◦C pendant la journée, ce qui favorise l'évaporation des eaux de la nappe superficielle (nappe Plio-Quaternaire). Les oueds de la plaine ont des écoulements non pérennes avec des débits moyens annuels très faibles ou nuls. Aucun barrage ou retenue d'eau artificielle ou naturelle n'existe dans la région étudiée. (Bekkoussa et al. 2008).

2. Géologie de la région :

La plaine de Ghriss est une entité hydrogéologique bordée par des reliefs aux aspects géologiques divers: Au Nord et au Nord-Ouest de la plaine se trou vent les versants Sud des monts Beni Chougrane formés de terrains très plissés possédant une ossat ure crétacée et un recouvrement tertiaire très épais. Le Crétacé marneux et marno-calcaires à semelle de Trias gypseux et salifère recouvre les terrains du Miocène. Le Nummulitique (Eocène et Oligocène), marneuxetgréseux, est en contact soit avec le Crétacé ou le Miocène. Ces assises du Néogène, légèrement plissées, couvrent actuellement, presque en totalité, la bordure méridionale des monts des Béni Chougrane. Les limites septentrionales et occidentales de la plaine de Ghriss sont formées par des massifs marneux et argileux, recouverts par des terrains plus ou moins perméables qui vont contribuer à l'alimentation des nappes de la plaine (Assenset al. 1977).

Au Nord-Est de la plaine, et plus précisément à l'Est de la ville de Tighennif, la surélévation des formations marneuses et argileuses de l'Oligocène et du Miocène, forme une barrière relativement imper méable qui limite nettement le bassin versant de la plaine de Ghriss de celui de l'Oued Mina. La bordure Sud du bassin versant de la plaine de Ghriss est formée par les Monts de Saïda. Ces derniers sont constitués par des formations kars tiques,qui ont subies une intense tectonique cas sante, et dont subsistent quelques témoins (horsts desDjebel Emfouss et Bourradou). Cet ensemble s'enfonce légèrement vers le Nord ce quifavorise l'écoulement et le drainage de ces eaux d'origine karstique vers la plaine. Au niveau de la source de Ain Fekan, cet ensemble calcaro-dolomitique du Jurassique supérieur est limité par une faille qui le met en contact avec les argiles gréseux du Crétacé qui constitue alors un véritable barrage souterrain. Cette interruption brusque de la perméabilité est à l'origine de la source d'Ain Fekan. Le centre de la plaine est une cuvette d'effondrement oùse sont déposés des calcaires lacustres (notamment au Nord de cette cuvette), des argiles rouges et des graviers roulés détritiques ainsi que des sables fins et des graviers d'âge quaternaire. Les seuls phénomènes tectoniques connus dans la plaine de Ghriss sont les faillesd'effondrement du substratum jurassique (Sourisseau 1972).

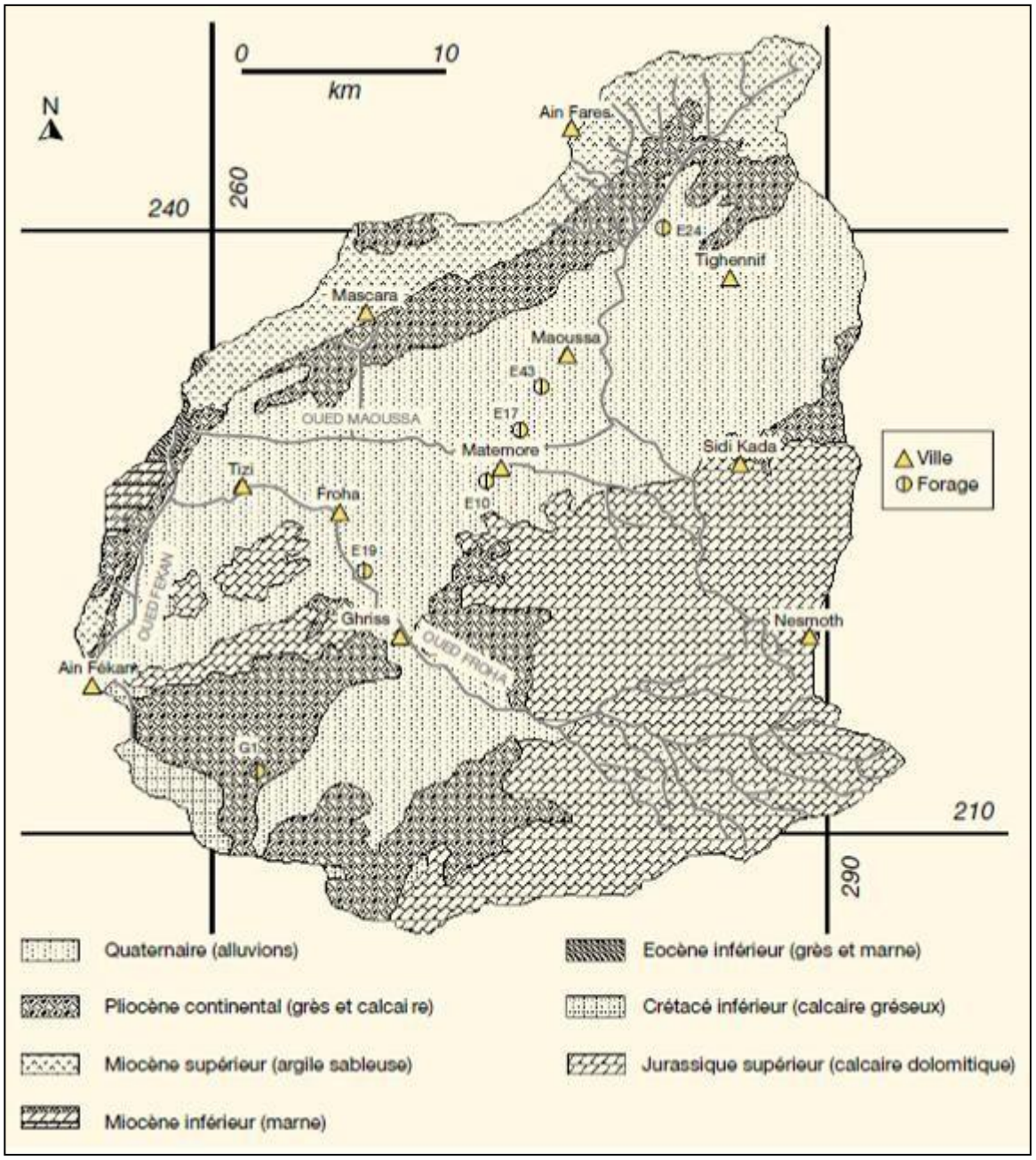


Figure 6: Carte géologique du plain de Ghrisse (Bekkoussa et al. 2008)

3. Principaux aquifères dans la plaine de Ghriss :

La plaine de Ghriss est une identité hydrogéologique indépendante, formé par une superposition de couches perméables d'aquifères séparées par des formations imperméables qui retiennent ou mettent en charge ces nappes. Trois principales nappes ont pu être identifiées, soit de haut en bas, de la plus récente à la plus ancienne (Lakhdari T., 2013) (voir Figure 7) :

1- La nappe superficielle ou libre (nappe Alluvionnaire) : Elle est contenue dans les dépôts alluvionnaires natifs de la désagrégation des grès, des calcaires lacustres, des calcaires dolomitiques et des marnes des bordures du bassin versant de la plaine.

2- La nappe des calcaires lacustres, Sables et grès du Pliocène : Cette nappe libre dans les monts des Béni Chougrane au niveau des affleurements, se met en charge sous la plaine. Elle est constituée de calcaire blanc, crayeux du pliocène. Leur perméabilité diminue vers l'exutoire de la nappe qui est la source d'Ain Tizi.

3- La nappe des calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur : Cette nappe s'étend sur une grande partie de la plaine, elle est contenue dans des calcaires dolomitiquesfissurés du jurassique supérieur (Kimméridgien). Il s'agit donc d'une nappe de type Karstique. Elle est considérée comme la plus importante de ce système multicouche depar son étendue, ses potentialités et la qualité de ses eaux. Le mur de cette nappe est la formation elle-même compacte, non fissurée. Le toit est formé par les marnes bleues etvertes du Miocène ou les argiles rouges détritiques de l'Oligocène. La nappe des calcaires dolomitiques contribue à l'alimentation de celle du Plio-Quaternaire parl'intermédiaire des dépôts de pentes constituées de graviers, de galets et conglomérats.Les aquifères sont caractérisés par une perméabilité en grande importance, mise en évidence en deux points et communique directement avec la nappe phréatique sur une grande superficie : Ain Fekane constitue l'exutoire naturel de la nappe (Bekkoussa et al. 2008).

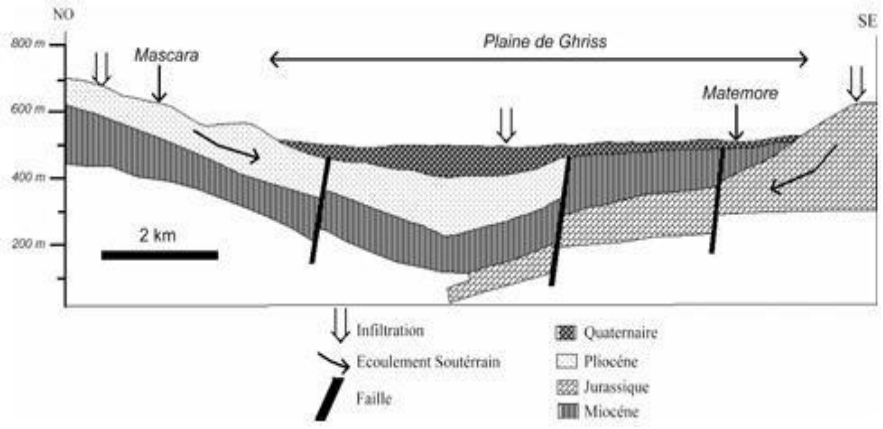


Figure 7: Coupe hydrogéologique de la plaine de Ghriss (ANRH, 2012 ; Lakhdari T., 20

4. Piézométrie de l'aquifère Plio-Quaternaire :

La carte piézomètrique de septembre 2001 (Fig. 8) a été réalisée en se basant sur les relevés faits par les agents de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH) à partir d'un réseau de puits destinés à la surveillance des eaux souterraines de la région. Cette carte fait apparaître deux directions princi pales d'écoulement (NE–SO et SE–Ouest) qui con vergent vers l'unique exutoire correspondant à la source d'Ain Fekan (près de la ville de Fekan). La contribution Sud est visiblement importante, du fait de l'alimentation venant des massifs karstiques des monts de Saida. La dépression piézomètrique visi ble au centre de la plaine, au niveau de Matemore et au Nord-Est de Tizi (courbes isopiézes 400 à 420 m), illustre un fort abaissement de la surface pié zométrique de la nappe, en partie lié auxnombreux prélèvements destinés à l'irrigation que comprend cette région (Bekkoussa et al. 2008). Dans la région de Guerdjoum les écoulements convergent également vers l'exutoire commun, à savoir Ain Fekan.

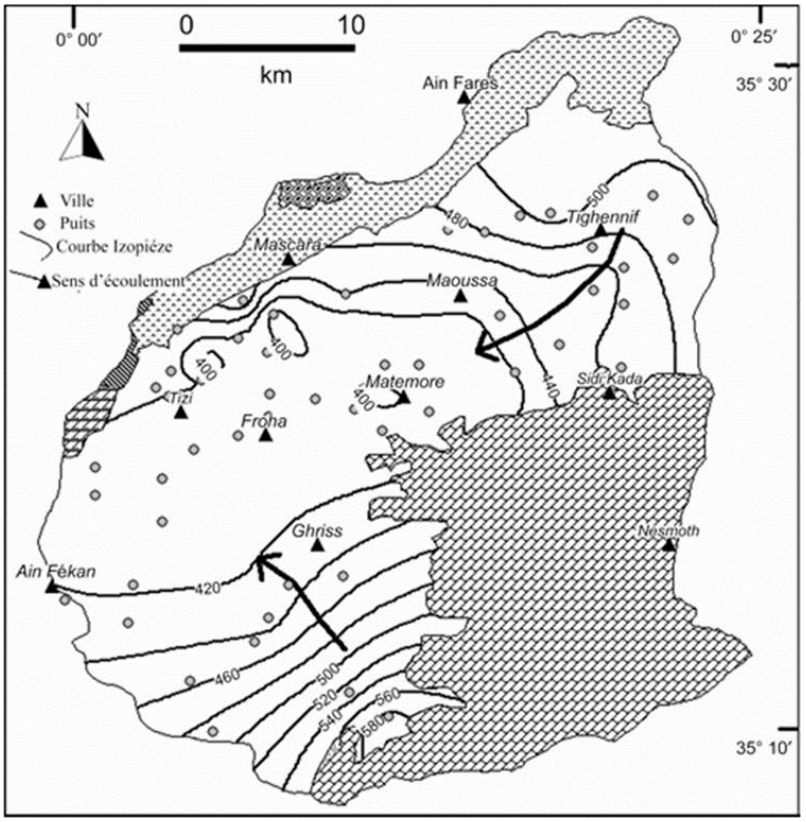


Figure 8: Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (septembre 2001, ANRH)

Chapitre III :

Hydrochimie des eaux

1. Analyse générale des données :

Dans le cadre de la surveillance qualitative de la nappe Plio-Quaternaire, des prélèvements sont effectués sur plusieurs puits répartis sur toute la plaine de Ghriss et captant uniquement la nappe Plio Quaternaire. Ces prélèvements sont réalisés mensuellement par les agents de l'ANRH et les échantillons sont analysés par le laboratoire du même organisme. Cependant, cet échantillonnage ne se fait pas systématiquement sur la totalité des puits. Les analyses chimiques concernent les concentrations des éléments majeurs (Ca2+,Mg2+,Na+,K+,Cl-,SO42-,HCO3- et NO3-) et les variables physico-chimiques (conductivité électrique, température et pH)

Cette étude permettra d'affiner notre compréhension des eaux souterraines de la région et de mieux orienter leur gestion et leur usage.

2. Outils de traitement des données :

L'analyse hydro-chimique a été réalisée à l'aide du logiciel « DIAGRAMMES » développé par Roland Simler (Université d'Avignon). Ce logiciel, librement distribué, facilite considérablement le traitement des données d'analyses d'eau.

Il permet le calcul de nombreux paramètres : bilans ioniques, dureté, teneurs en cations et anions, indices de saturation, etc., ainsi que la génération de plusieurs types de diagrammes: Piper, Stiff, Schoeller-Berkaloff, binaire, Korjinski, rose des vents.

Son utilisation est simple et structurée, avec des étapes claires pour l'élaboration des représentations graphiques.

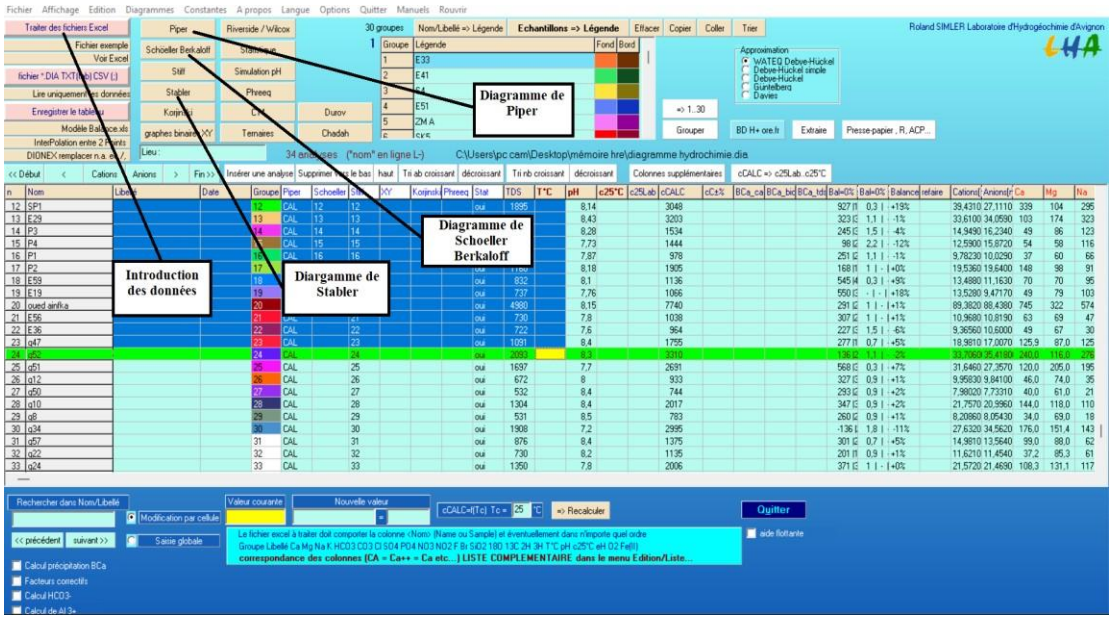


Figure 9: Fenêtre de dialogue du logiciel "HLA diagrammes"

3. Les facies chimique :

Le faciès chimique d'une eau souterraine permet de définir son identité hydro -chimique en fonction de la prédominance de certains éléments majeurs : hydrogénocarbonates, carbonates, chlorures, sulfates, nitrates, sodium, potassium, calcium et magnésium.

La classification de ces eaux repose sur l'identification des ions dominants à travers des représentations graphiques.

L'objectif du ces différentes outils ont de faire ressortir les concentrations principales de l'eau afin de procéder à une classification.

Cette analyse s'appuie sur les données de 34 échantillons d'eau prélevés dans différents secteurs de la plaine du Ghriss.

Parmi les diagrammes les plus répandues on retrouve :

3.1. Le diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper est un outil couramment utilisé pour identifier les faciès géochimiques des eaux souterraines, en se basant sur les proportions relatives des principaux cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} + K^{+}) et anions (HCO_3^{-}, Cl^{-} + NO_3^{-}, SO_4^{2-}) (Kouassi et al., 2012 ; Allassane, 2004).

Il se compose de deux triangles l'un pour les cations, l'autre pour les anions et d'un losange central permettant une classification en familles d'eaux.

Dans le cadre de cette étude, le diagramme de Piper s'est révélé particulièrement adapté pour analyser l'évolution spatiale du faciès chimique des eaux souterraines de la plaine de Ghriss.

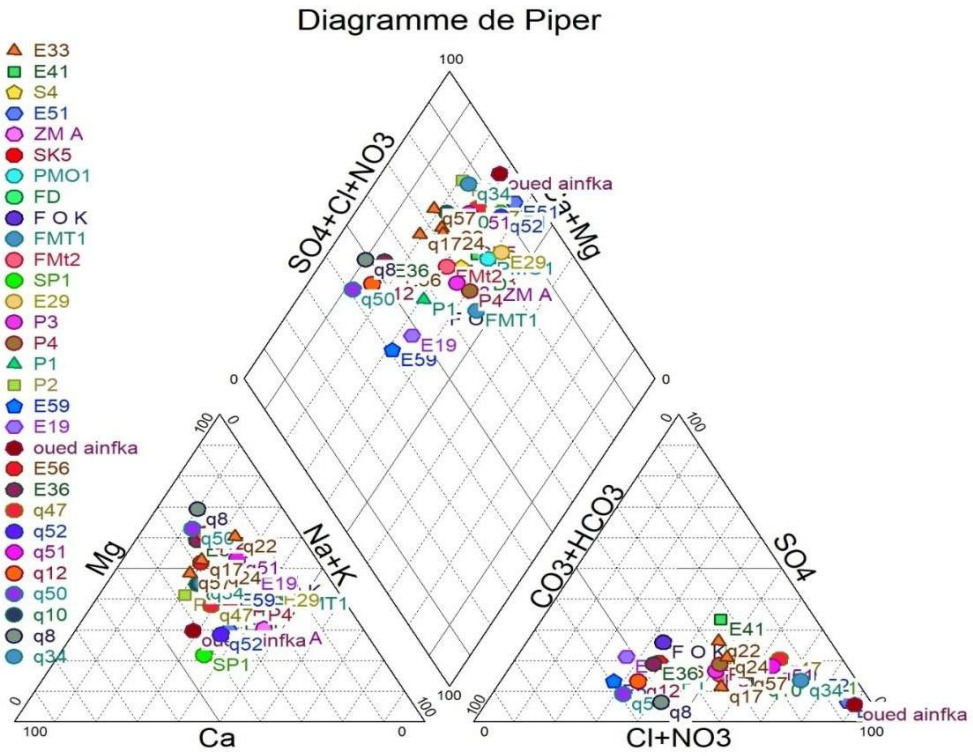


Figure 10: Diagramme de Piper

Le diagramme se compose de :

- Un triangle gauche : pour les cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, $Na^{+}+K^{+}$)
- Un triangle droit : pour les anions ($HCO_3^{-}+CO_3^{2-}$, SO_4^{2-}, $Cl^{-}+NO_3^{-}$)
- Un losange central : synthèse des deux, permettant de définir le faciès chimique global de chaque échantillon.

3.1.1. Classification des faciès hydro-chimiques :

Tableau 1: Les caractéristiques des facies des eaux de la nappe plioquaternaire

Faciès hydro chimique	Échantillons	Minéralisation	Cations dominants	Anions dominants	Origine / Processus
Chloruré sodique	oued ainfken, E51, q52	Très forte	Na^+, Ca^{2+}	Cl^-, SO_4^{2-}	Intrusion saline, évaporites + influence anthropique
Bicarbonaté calcique et magnésien	P1, P2, P3, P4, E19, E59, FMT1, FMT2	Faible à moyenne	Ca^{2+}, Mg^{2+}	HCO_3^-	Recharge récente, circulation dans roches carbonatées
Mixte chloruré-sulfaté calcique et magnésien	E33, E41, S4, ZM A, SK5, PMO1, FD, F O K, SP1, E29, E56, q47, q51, q10, q34, q22, q24, q17	Moyenne à forte	Ca^{2+}, Mg^{2+}	Cl^-, SO_4^{2-}	Minéralisation naturelle (gypse, halite), éventuels apports anthropiques
Chloruré calcique et magnésien	E36, q12, q50, q8, q57	Moyenne à localement élevée	Ca^{2+}, Mg^{2+}	Cl^-	Pollution modérée, altération locale, sources anthropique

3.2. Diagramme de Stabler :

Le diagramme de Stabler représente les pourcentages relatifs des principaux ions sous forme de barres horizontales ou verticales. Il y a généralement deux barres principales :

- Une pour les cations à gauche (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+})
- Une pour les anions à droite (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, NO_3^-)

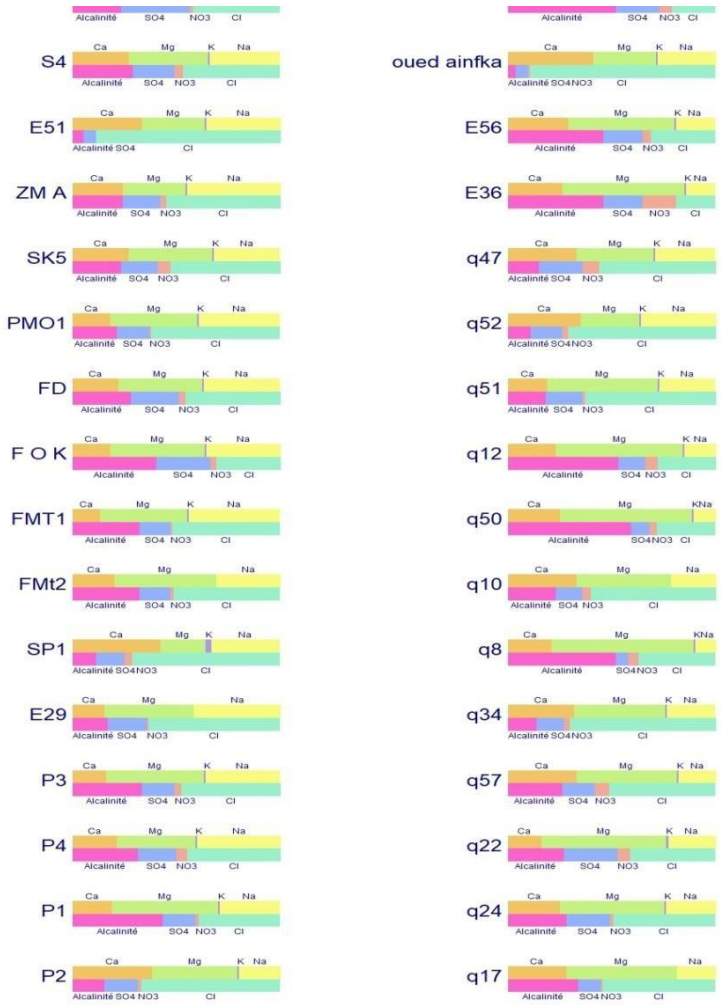


Figure 11: Daigramme de Stabler

Chaque échantillon est représenté par deux barres horizontales, subdivisées proportionnellement à la concentration de chaque ion.

- **Groupe 1 :**

Faciès chloruré sodique Échantillons: oued Ainfken, E51, E29, q52, q51, q34, ZM A Ce groupe montre:

Cations: Dominance claire du sodium (Na^+), suivi du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+})

Anions: Forte prédominance des chlorures (Cl^-)

- **Groupe 2 :**

Faciès bicarbonaté calcique et magnésien Échantillons: E59, E19, F O K, FMT1, FMT2, P1, P3, P4, E36, E56, q12, q50, q8

Ce groupe présente :

Cations : Proportions équilibrées entre calcium et magnésium, avec une présence modérée de sodium

Anions : Dominance des bicarbonates (HCO_3^-), avec des chlorures en proportion moindre

- **Groupe 3 :**

Faciès mixte chloruré-sulfaté calcique et magnésien Échantillons: E33, E41, S4, SK5, FD, PMO1, q47, q10, q17, q22, q24, q57

Ces échantillons montrent :

Cations : Distribution relativement équilibrée entre calcium, magnésium et sodium

Anions : Proportions significatives de chlorures, sulfates et bicarbonates Ce faciès résulte probablement du mélange d'eaux de différentes origines ou de la dissolution simultanée de plusieurs types de formations géologiques.

- **Groupe 4:**

Faciès chloruré calcique et magnésien Échantillons: SP1, P2

Ces échantillons présentent:

Cations: Dominance du calcium et du magnésium sur le sodium

Anions: Forte proportion de chlorures.

3.3. diagramme de Berkaloff :

Le diagramme de Berkaloff (aussi appelé Schoeller-Berkaloff dans certains contextes) est un outil graphique important en hydrogéochimie qui permet de visualiser et comparer les concentrations des principaux ions dans différents échantillons d'eau sur une échelle semi-logarithmique.

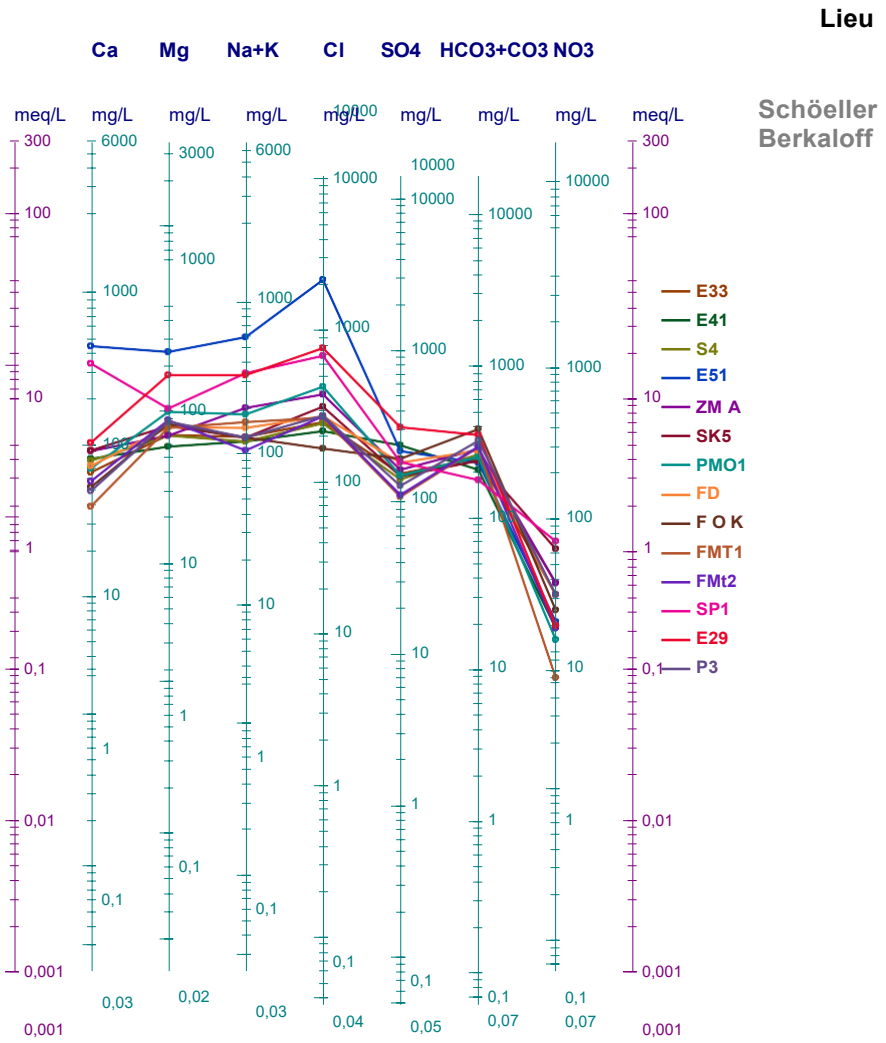


Figure 12: Diagramme de Berkaloff

Les principales caractéristiques que je peux interpréter sont :

- ✓ La forme générale des lignes pour chaque échantillon (aussi appelée "signature hydrochimique") indique le faciès chimique de l'eau.
- ✓ Les échantillons présentent des profils variés, certains montrant des concentrations élevées en ions spécifiques.
- ✓ L'échantillon E51 montre des concentrations particulièrement élevées en plusieurs ions.

  SP1 présente également des teneurs relativement élevées.
- ✓ Les profils parallèles entre certains échantillons suggèrent une origine similaire ou des processus géochimiques comparables.

III.2 Analyse en composantes principales des eaux :

L'analyse en composantes principales (ACP) appliquée aux 34 échantillons d'eau souterraine de la plaine de Ghriss vise à fournir une représentation visuelle et accessible des relations entre les variables hydro-chimiques. Elle permet d'identifier les tendances dominantes au sein des données, mettant en évidence les corrélations entre les paramètres physico-chimiques (Ca, Mg, Na, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, NO_3^-, conductivité, pH).

Les résultats suivants ont été obtenus à l'aide du logiciel **R**

Tableau 2: Matrice de corrélation des paramètres des eaux analysées

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	cond	PH
Ca^{2+}	1									
Mg^{2+}	0,85	1								
Na^+	0,88	0,85	1							
K^+	0,75	0,53	0,64	1						
Cl^-	0,95	0,92	0,93	0,59	1					
SO_4^{2-}	0,49	0,61	0,67	0,37	0,56	1				
HCO_3^-	-0,3	-0,1	-0,2	-0,31	-0,2	-0,1	1			
NO_3^-	0,11	-0,1	-0,1	0,16	-0	0,08	-0,3	1		
cond	0,83	0,77	0,68	0,71	0,76	0,58	-0,21	0,12	1	
PH	0,08	-0	0,05	0,02	0,03	-0,1	-0,16	-0,07	0,09	1

La matrice de corrélation (tableau 2) permet d'obtenir les coefficients de corrélations entre les différents paramètres, deux à deux. Ces derniers ne sont pas tous corrélés positivement donc, ils ne varient pas dans le même sens.

On observe que les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), chlore (Cl^-) présentent des corrélations très fortes entre eux, notamment Ca–Cl^- (r = 0,95) et Na–Cl^- (r = 0,93). Ces mêmes ions montrent également une forte corrélation avec la conductivité électrique.

En revanche, l'ion bicarbonate (HCO_3^-) est faiblement corrélé ou négativement corrélé aux ions précédents, De plus, les nitrates (NO_3^-) présentent des corrélations très faibles voire nulles avec les autres paramètres.

Le pH présente une faible corrélation avec les autres paramètres hydro- chimiques.

III.2 -1 Variance totale expliquée par les valeurs propres :

Tableau3 : Variance totale expliquée par les valeurs propres

	Eigenvalue	Variability (%)	Cumulative %
F1	6.395323899	53.29436583	53.29437
F2	2.006401569	16.72001308	70.01438
F3	1.319415593	10.99512994	81.00951
F4	0.686432812	5.72027343	86.72978
F5	0.650054539	5.41712116	92.14690
F6	0.386148524	3.21790436	95.36481
F7	0.133821286	2.14364226	97.50845
F8	0.133821286	1.11517739	98.62363
F9	0.094518562	0.78765469	99.41128
F10	0.048319768	0.40266473	99.81395
F11	0.015789095	0.13157579	99.94552
F12	0.006537281	0.05447734	100.00000

L'analyse de la variance montre qu'à partir de dix variables réelles constituant la matrice des données, seul trois variables fictives appelées composantes principales sont retenues. Ces composantes principales restituent à elles seules 81.00 % de l'information globale, les autres composantes ne contribuent que très faiblement à l'explication de la variance totale, de là on peut déduire que le rejet de l'une d'elle entraine qu'une perte d'informations minime.

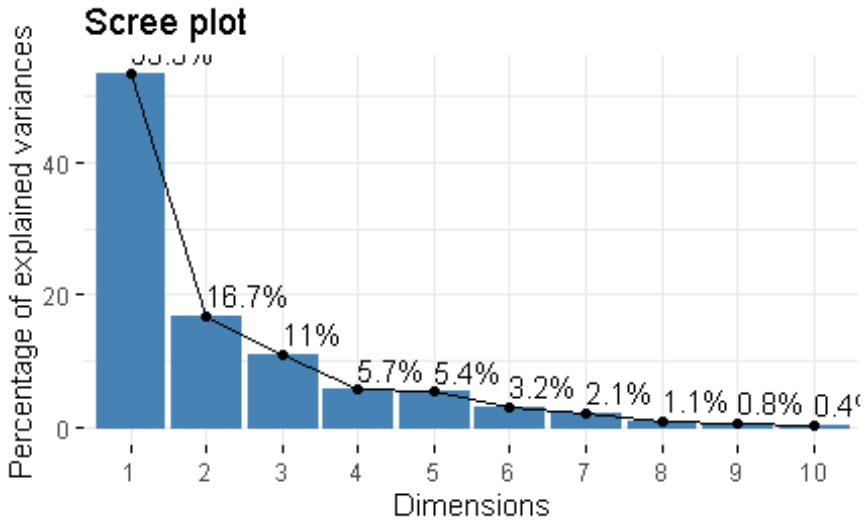


Figure 13 : Contribution des variables

Représentation graphique :

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée avec le logiciel R, permet de visualiser graphiquement les relations entre les variables hydrochimiques.

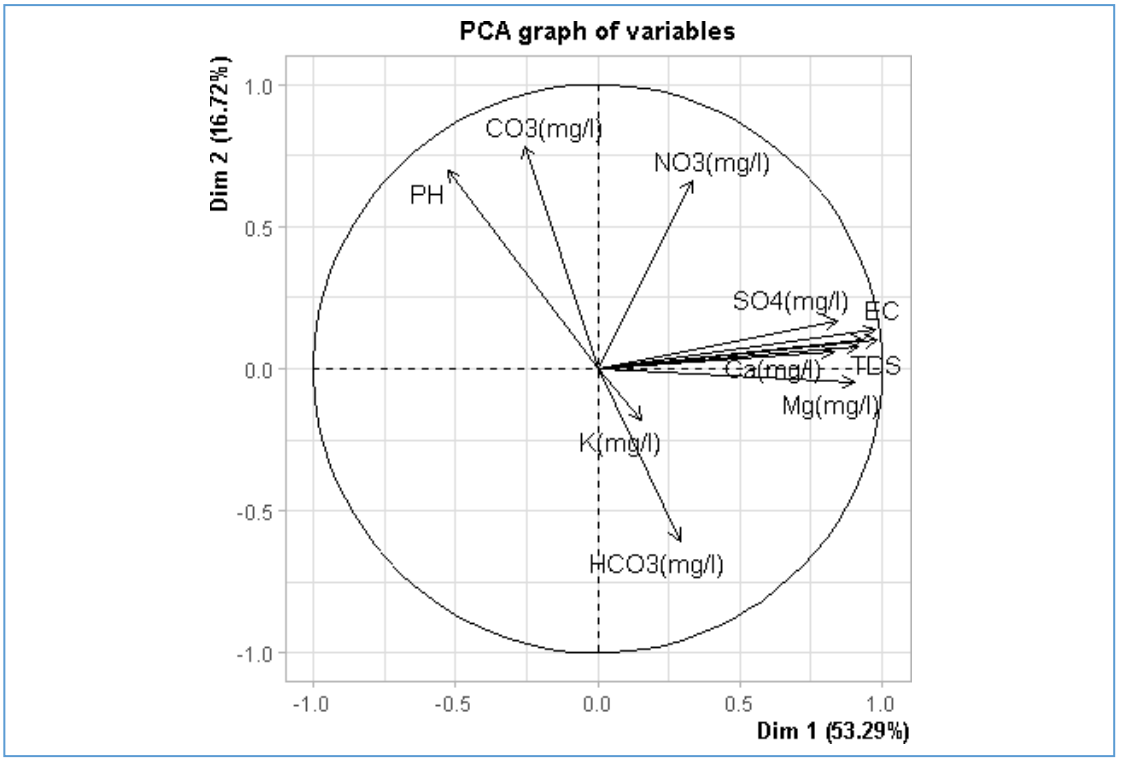


Figure 14: Cercle des corrélations entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de Ghriss (planF1–F2)

Le plan factoriel (F1-F2) – figure 14 – représente 70,01% de la variance totale du nuage de points. Le facteur F1, dominant avec 53,29% de la variance, est fortement corrélé aux ions Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-} ainsi qu'à la conductivité électrique. Ces variables, représentées par des vecteurs bien alignés et orientés vers la droite, traduisent des corrélations très fortes, indiquant que F1 représente la minéralisation globale des eaux. Les échantillons projetés positivement sur

cet axe sont caractérisés par une forte teneur en sels dissous, souvent issuede la dissolution des formations évaporitiques, mettant en évidence l'influence des processus géochimiques sur la composition des eaux souterraines.

Le facteur F2, qui exprime 16,72% de la variance, révèle une différenciation secondaire dans la composition chimique. Sur cet axe, la position du sulfate (SO_4^{2-}), bien que corrélée positivement à F1, présente également une composante notable sur F2, le distinguant

partiellement du groupe principal d'ions. À l'opposé sur l'axe F1, l'ion bicarbonate (HCO_3^-) affiche des corrélations négatives avec les ions du groupe principal, suggérant un processus de minéralisation distinct.

Les nitrates (NO_3^-) et le pH, faiblement représentés sur les deux axes, démontrent leur indépendance relative par rapport aux processus géochimiques dominants, avec une origine probablement anthropique pour les nitrates.

Conclusion

La représentation des échantillons dans les diagrammes de Piper, Berkalof, Et Stabler Permet de conclure que Les faciès chlorurés magnésiens et calciques représentent la majorité des faciès observés. On les retrouve dans toute la plaine .Ces faciès caractérisent des eaux minéralisées et constituent un mélange entre des eaux venant d'un environnement calcaro_ dolomitique, d'où la prédominance du magnésium et du calcium, ainsi que des eaux de recharge provenant de la pluie et de l'irrigation .Le faciès bicarbonaté magnésien caractérise les eaux de recharge latérale venant directement des formations carbonatées du Jurassique .

Ces différents faciès soulignent la complexité des processus hydrogéochimiques qui contrôlent la salinité des eaux de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss

Chapitre V
Méthodes d'interpolation

1. Introduction :

La demande accrue des eaux souterraines pour la production agricole, l'industrialisation et l'urbanisation, nécessite un suivi régulier de la qualité. Les applications d'interpolation sont de plus en plus nombreuses, et ce dans des domaines variés. Il existe deux groupes principaux de méthodes d'interpolation (Despagne, 2006) :

- **Les méthodes déterministes**, comme Spline, polynomiale, inverse distance (connue sous l'abréviation anglaise IDW) et la triangulation considèrent la variabilité régionale par une fonction aléatoire en assumant que les observations sont faites sans erreurs (Kurtzman et Kadmon, 1999) ;
- **Les méthodes probabilistes**, comme la géostatistique, reposent sur le principe de l'autocorrélation spatiale qui préconise que les observations rapprochées dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. En outre, elles se distinguent par le calcul d'erreurs d'estimation associées (Matheron, 1963; Krige, 1963).

2. Matériels et Méthodes :

Pour effectuer cette étude, les données d'analyse physico- chimique des points d'eau inventories sont collectées de l'agence nationale des ressources hydrauliques de la wilaya de Mascara (ANRH ,2014). Quatre techniques d'interpolation sont effectuées : la méthode de pondération inverse de distance (IDW), méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF), le krigeage universel(KU) et le krigeage ordinaire (KO). Le but de notre recherche vise une étude et une analyse comparative par la quantification de l'erreur moyenne d'estimation afin de faire la mise au point sur la méthode d'interpolation spatiale qui semblela plus adaptée et la plus appropriée pour caractériser et cartographier la distribution spatiale. Tous les traitements des données ont été effectués à l'aide d'ArcGIS version 8 avec les extensions d'analyse spatiale. L'extension « analyse géostatistique » du logiciel ArcGis possède un module d'analyse exploratoire des données spatiales qui permet de visualiser et d'analyser les données selon des techniques statistiques. Ce module offre une large gamme de possibilités permettant la détection de tendances ou de dérives dans les données, le repérage des valeurs anormales et l'étude des corrélations spatiales de ces données (Johnston et al., 2001)

. La figure 1décrit la procédure d'élaboration d'une carte hydrochimique régionale. Elle est divisée en plusieurs étapes :

- la collecte et l'intégration des données existantes,
- l'exploration des données,

- le choix des méthodes d'interpolation spatiale
- finalement la comparaison des résultats cartographiques obtenus par validation croisée.

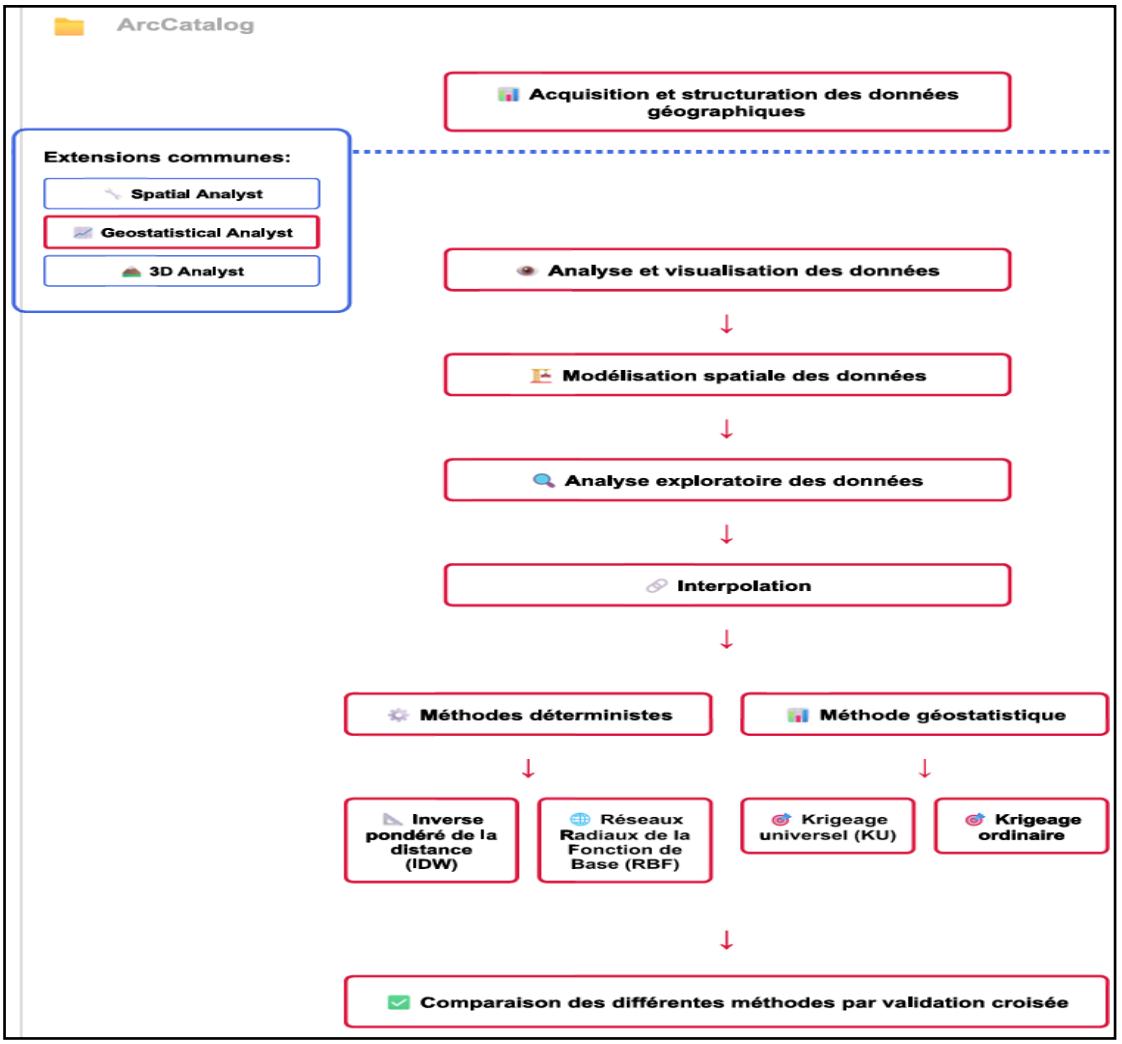


Figure 15: Schéma général présentant la démarche de l'étude

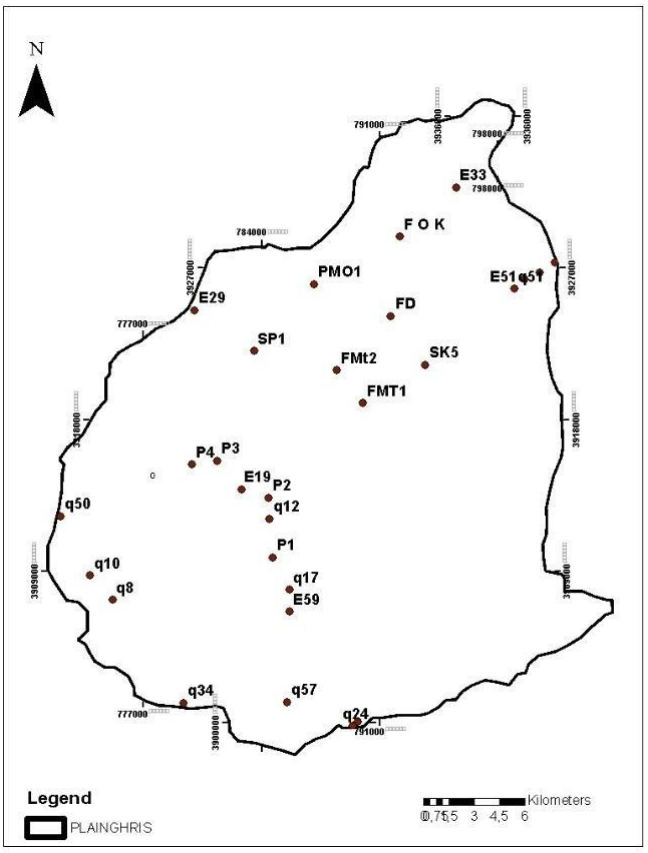


Figure 16: représente la localisation des données

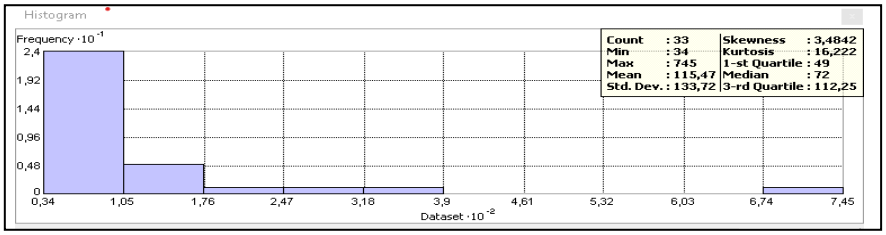
3. Analyse exploratoire des données par Histogramme

Une analyse exploratoire des données spatiales à l'aide de l'outil "AEDS" (ESDA : Exploratory Spatial Data Analysis), disponible sur le logiciel ArcGis, a été réalisée. Cet outil permet la visualisation, l'analyse et l'étude de la distribution spatiale des données hydrochimique des eaux souterraines.

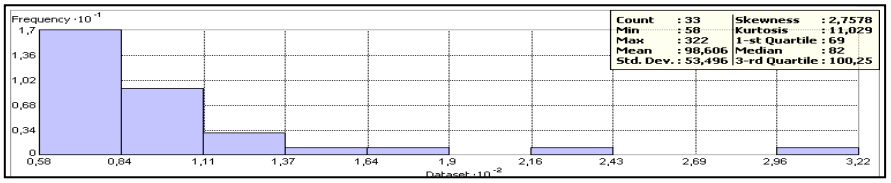
Parmi les outils disponibles pour l'exploration des données, l'outil exploration par histogramme est choisi. Cet outil donne une description détaillée de la distribution de fréquences des données hydrochimique de la zone d'étude.

Les histogrammes, de la figure 16 , sont des graphiques à barres qui indiquent la fréquence à laquelle les valeurs des données hydrochimiques tombent dans certaines classes

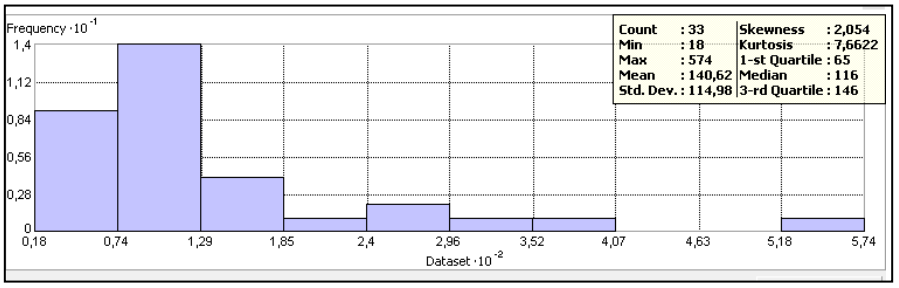
Ca++


Histogram
Frequency ·10 -1
2,4
1,92
1,44
0,96
0,48
0
0,34 1,05 1,76 2,47 3,18 3,9 4,61 5,32 6,03 6,74 7,45
Dataset ·10 -2
Count : 33
Min : 34
Max : 745
Mean : 115,47
Std. Dev. : 133,72
Skewness : 3,4842
Kurtosis : 16,222
1-st Quartile : 49
Median : 72
3-rd Quartile : 112,25

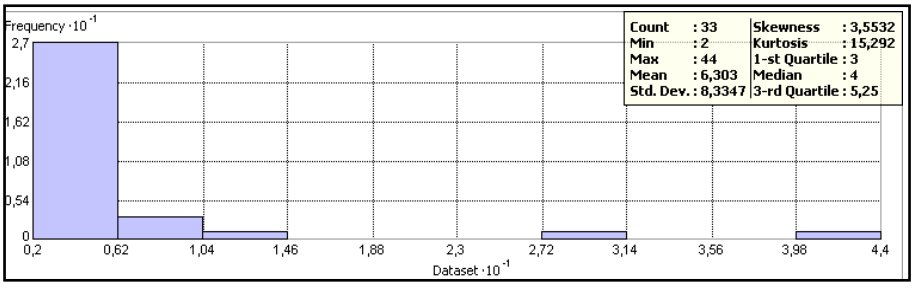
Mg+


Frequency ·10 -1
1,7
1,36
1,02
0,68
0,34
0
0,58 0,84 1,11 1,37 1,64 1,9 2,16 2,43 2,69 2,96 3,22
Dataset ·10 -2
Count : 33
Min : 58
Max : 322
Mean : 98,606
Std. Dev. : 53,496
Skewness : 2,7578
Kurtosis : 11,029
1-st Quartile : 69
Median : 82
3-rd Quartile : 100,25

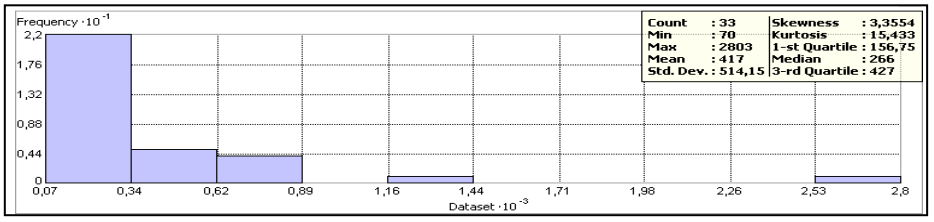
Na+


Frequency ·10 -1
1,4
1,12
0,84
0,56
0,28
0
0,18 0,74 1,29 1,85 2,4 2,96 3,52 4,07 4,63 5,18 5,74
Dataset ·10 -2
Count : 33
Min : 18
Max : 574
Mean : 140,62
Std. Dev. : 114,98
Skewness : 2,054
Kurtosis : 7,6622
1-st Quartile : 65
Median : 116
3-rd Quartile : 146

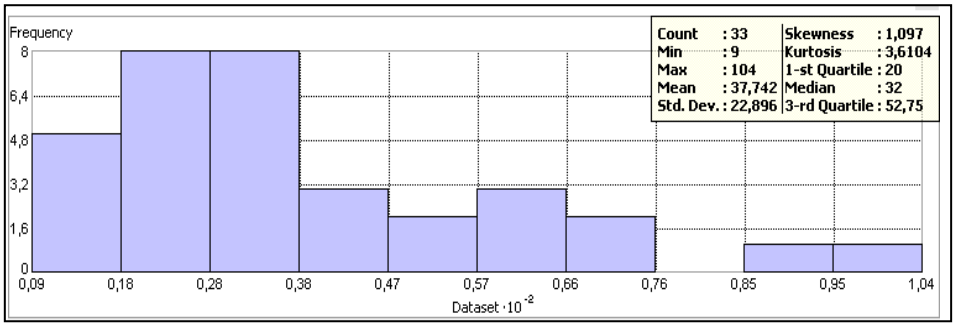
K+


Frequency ·10 -1
2,7
2,16
1,62
1,08
0,54
0
0,2 0,62 1,04 1,46 1,88 2,3 2,72 3,14 3,56 3,98 4,4
Dataset ·10 -1
Count : 33
Min : 2
Max : 44
Mean : 6,303
Std. Dev. : 8,3347
Skewness : 3,5532
Kurtosis : 15,292
1-st Quartile : 3
Median : 4
3-rd Quartile : 5,25

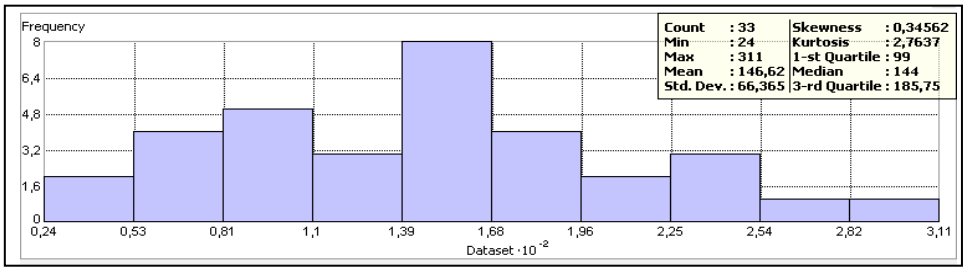
Cl-


Frequency ·10 -1
2,2
1,76
1,32
0,88
0,44
0
0,07 0,34 0,62 0,89 1,16 1,44 1,71 1,98 2,26 2,53 2,8
Dataset ·10 -3
Count : 33
Min : 70
Max : 2803
Mean : 417
Std. Dev. : 514,15
Skewness : 3,3554
Kurtosis : 15,433
1-st Quartile : 156,75
Median : 266
3-rd Quartile : 427

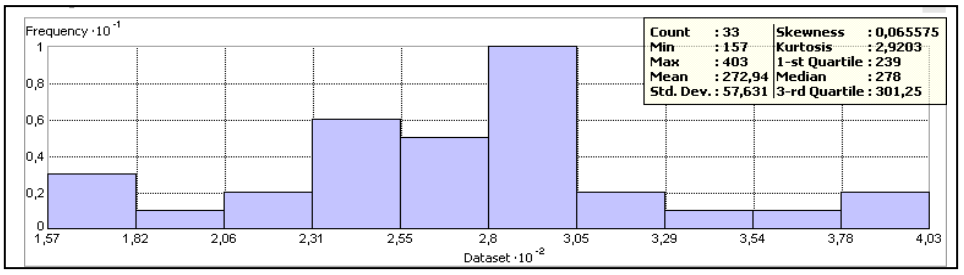
No3-



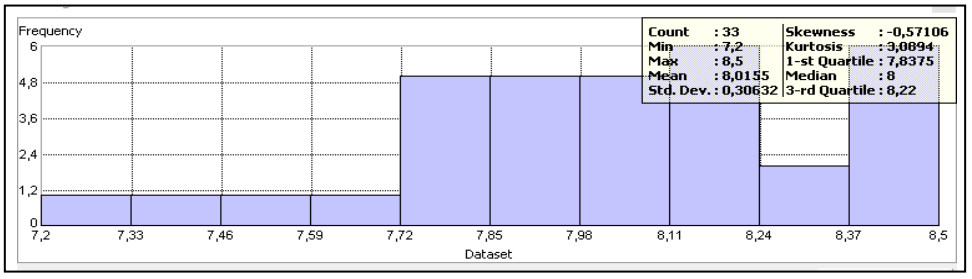
So4-



Hco3-



Ph



conductivité

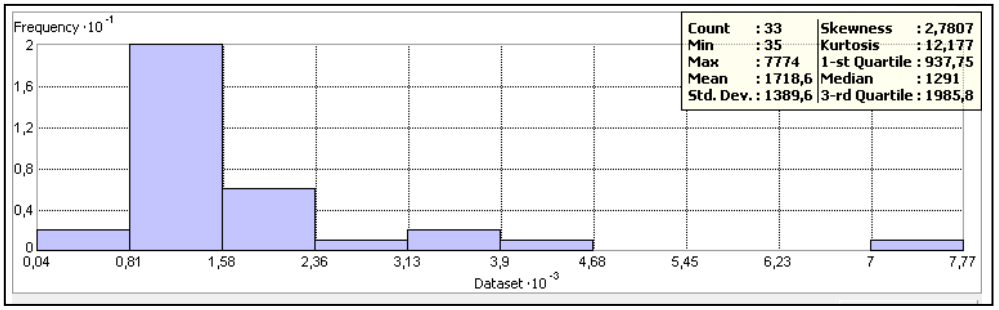


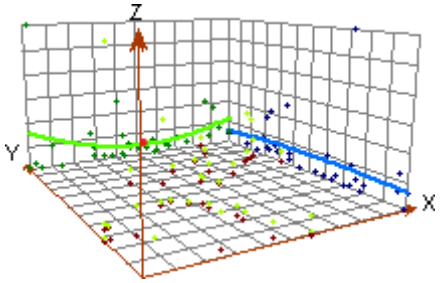
Figure 17: analyse exploratoire des données hydrochimique par histogramme

Les tableaux des statistiques présentés sur les cartes de la figure, nous renseigne sur les valeurs de distribution relatives à chaque paramètre hydrochimique de la nappe alluviale de la plaine de Ghriss, à savoir : la moyenne, la médiane, les premier et troisième quartiles, le coefficient d'asymétrie (skewness), le coefficient d'aplatissement (Kurtosis).

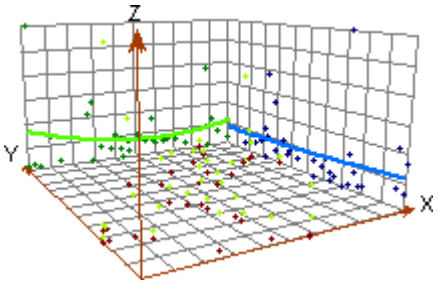
Certaines méthodes de krigeage fonctionnent mieux si les données sont approximativement distribuées normalement (la courbe en forme de cloche). Une distribution de valeur normale suppose qu'elle possède un coefficient d'asymétrie nul.

Dans cette étude, à l'exception des trois paramètres : **S**o4- , Hco3-, ph, la plupart des éléments chimiques sont caractérisés par un coefficient d'asymétrie non nul. Ces paramètres nécessiteront par la suite une transformation normale pour procéder à l'interpolation par la suite. Une transformation logarithmique ou exponentiel aiderait certainement à rendre plus symétrique.

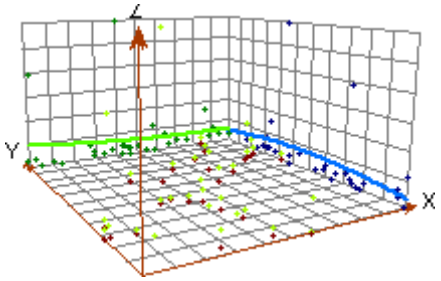
4. Vérification de la stationnarité des données hydrochimiques :



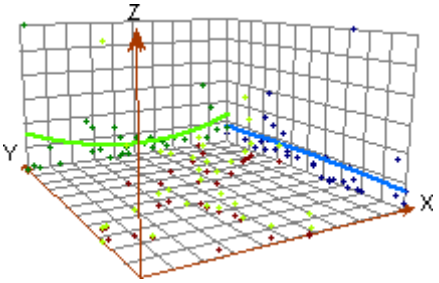
Ca+



Mg+



K-



cl-

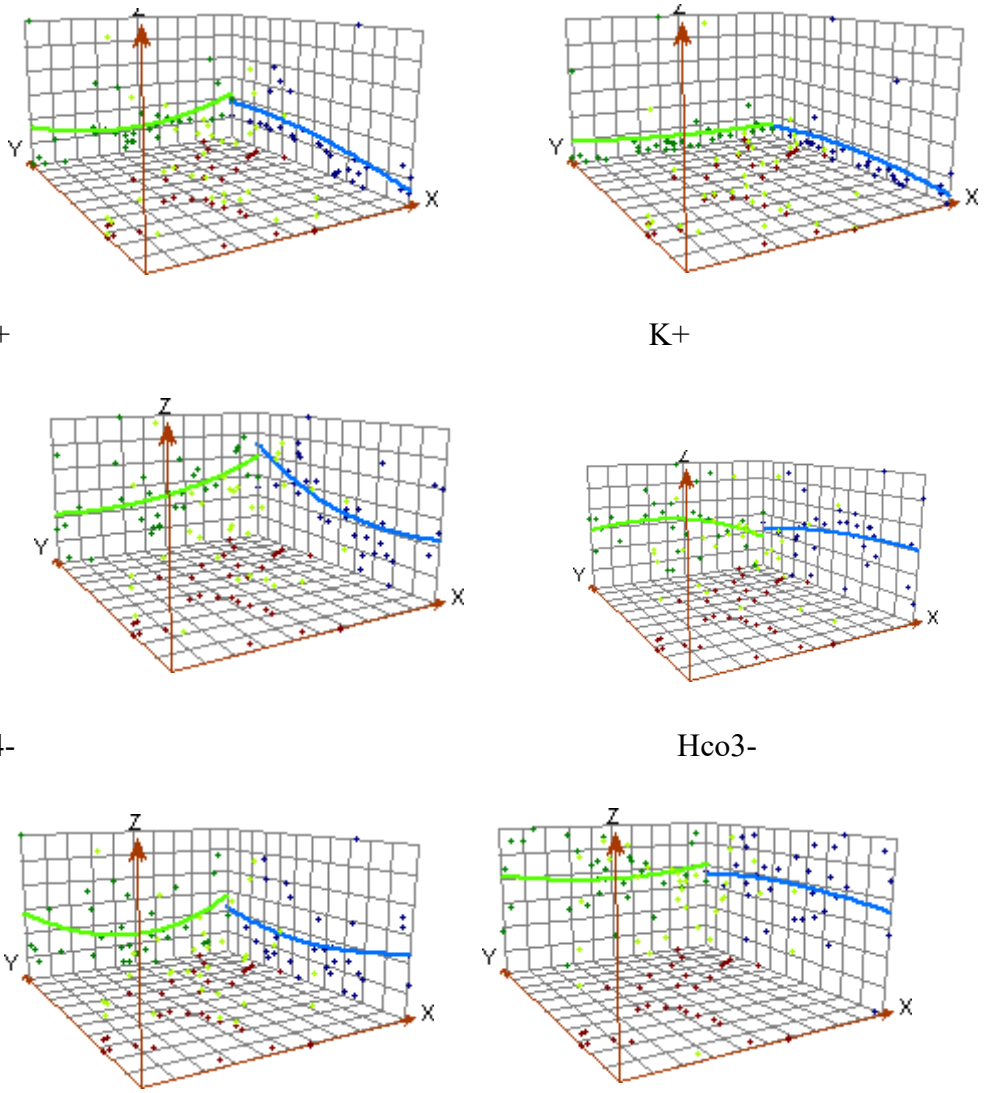


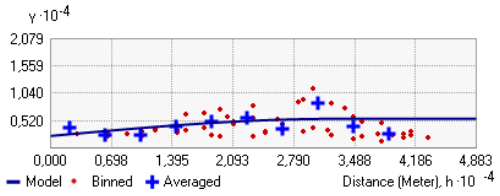
Figure 18: stationnarité données hydrochimique en fonction des coordonnées x,y

En utilisant l'outil trend d'analyse d'arcGIS on a abouti à un résultat dans lequel on remarque que les paramètres hydrochimiques dépend de façon différente en fonction de coordonnés x,y. on déduit par conséquent qu'elles sont non stationnaires, le modèle qui approche le mieux à ces stationnarités est polynôme d'ordre 2.

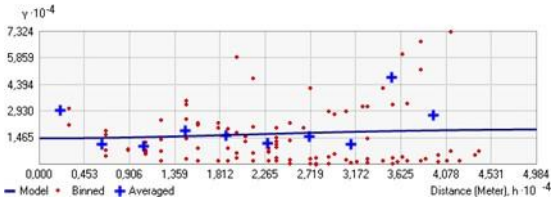
5. L'interpolation de paramètres hydrochimiques par krigeage :

L'analyse variographique est l'étape préalable au krigeage, elle est menée afin d'estimer la fonction de la continuité spatiale de la variable régionalisée (Thomas, 2003). Le variogramme peut être interprété en terme de continuité ou de corrélation spatiale si on l'inverse graphiquement pour obtenir une fonction décroissante : plus la distance entre deux mesures est importante moins les mesures sont corrélées. Le variogramme est la clé de voute de l'analyse spatiale par Krigeage, il permet de détecter les points d'anomalie par leur

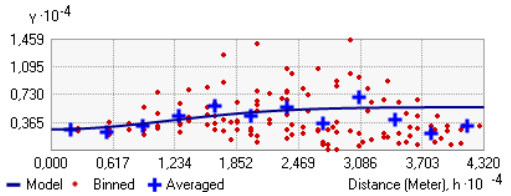
position par rapport aux autres. Les points isolés sont à supprimer pour avoir une bonne corrélation spatiale. Une fois que le variogramme expérimental établi, il faut lui caler un modèle qui lui convient le mieux, il n'est pas toujours facile de trouver le modèle théorique qui lui correspond. Les figures présentes les variogrammes expérimentaux et le modèle de variogramme ajusté aux données.



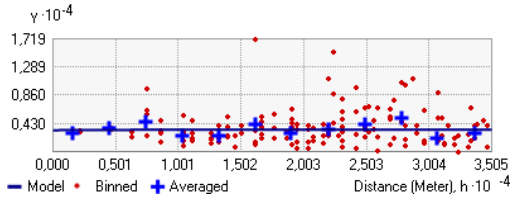
Mg+ (modèle Gaussien)



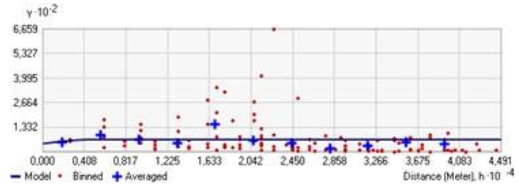
Ca+ (modèle sphérique)



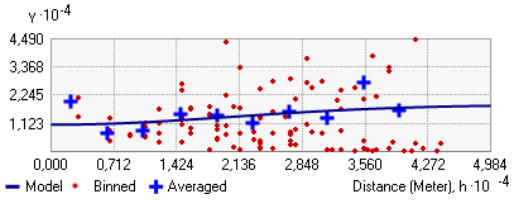
SO4- (modèle sphérique)



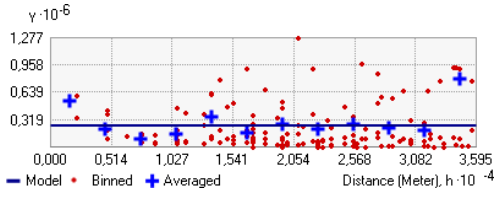
HCO3- (modèle exponentiel)



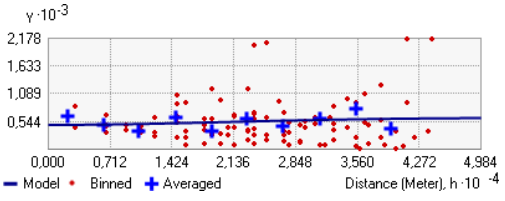
K+ (modèle sphérique)



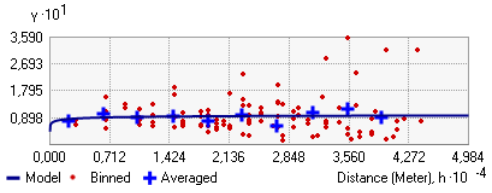
Na+ (modèle Gaussien)



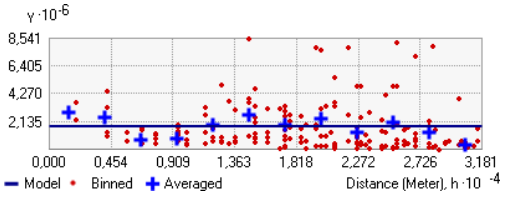
Cl- (modèle exponentiel)



NO3- (modèle linéaire)



Ph(modèle sphérique)



EC(modèle linéaire)

Figure 19: Semi-variogramme expérimentaux et théoriques des éléments hydrochimiques de la plaine de Ghriss.

A partir des diagrammes de semi variogrammes on voit que la plus grande distante en deux points du semi de points, dont on dispose est la dernière valeur de h qui est h=3.7428 10^4m

Les résultats montrent une variabilité sphérique, gaussienne, exponentiel bien structuré pour les données hydrochimiques de la nappe plio_quaternaire, la moyenne des erreurs standardisées **MES** est proche à zéro et la variance des erreurs standardisées **VES** est égal à l'unité, donc les modèles retenus sont robustes.

6. Comparaison des différentes méthodes d'estimation :

Dans cette partie, nous nous sommes contentés de reproduire les choix de l'étude, c'est-à-dire faire une analyse comparative entre les différentes méthodes déterministes et géostatistiques pour choisir la carte représentative de répartition des différentes éléments hydrochimique dans les eaux souterraines de la plaine de Ghriss. Les statistiques de la moyenne des erreurs d'estimation et L'écart type des erreurs d'estimation de différentes méthodes sont récapitulées dans les tableaux suivants :

Tableau 4: la moyenne des erreurs d'estimation de différentes méthodes

	Mg	Ca	k	Na	SO4	Cl	No3	HCO3	EC	PH
RBF	0.14	0.63	0.03	0.14	0.09	0.021	0.68	-0.24	0.24	0.001
IDW	3.73	8.98	0.26	3.73	2.1	25.24	-1.01	-2.24	71.9	0.006
Ko	0.28	0.090	0.24	0.70	0.52	-1.7	1.47	0.72	-2.46	0.009
Ku	0.24	0.055	0.19	0.64	0.42	-1.7	0.95	0.72	-2.45	0.015

Tableau 5: L'écart type des erreurs d'estimation de différentes méthodes

	Mg	Ca	k	Na	SO4	Cl	No3	HCO3	EC	PH
RBF	64.08	157.12	9.44	130.78	61.02	615.52	23.84	69.48	1598	0.35
IDW	72.52	180.03	10.1	147.62	63.59	708.36	24.68	76.03	1817.8	0.33
Ko	56.21	150.38	9.47	117.85	60.91	537.4	22.95	61.92	1428.6	0.36
Ku	56.24	150.43	9.66	118.36	60.23	537.4	23.21	61.92	1428.6	0.32

Pour choisir la méthode qui fournit les meilleurs résultats on compare les résultats de validation croisée illustrées dans les tableaux (4.5). Le récapitulatif des statistiques de l'erreur d'estimation montre que le krigeage univer sel est plus précis et moins biaisé car la moyenne des erreurs est plus proche de zéro et l'écart type des erreurs d'estimation est plus faible, nous a permis de sélectionner, parmi les trois méthodes d'interpolation utilisées pour la majorité des éléments hydrochimique.

6.1. Interpolation de Calcium Ca^{+2} par les méthodes classiques IDW& RBF :

Pour illustrer l'influence de la méthodologie sur la carte résultante, la figure présente, deux cartes possibles obtenues à l'aide de la méthode IDW et la méthode RBF.

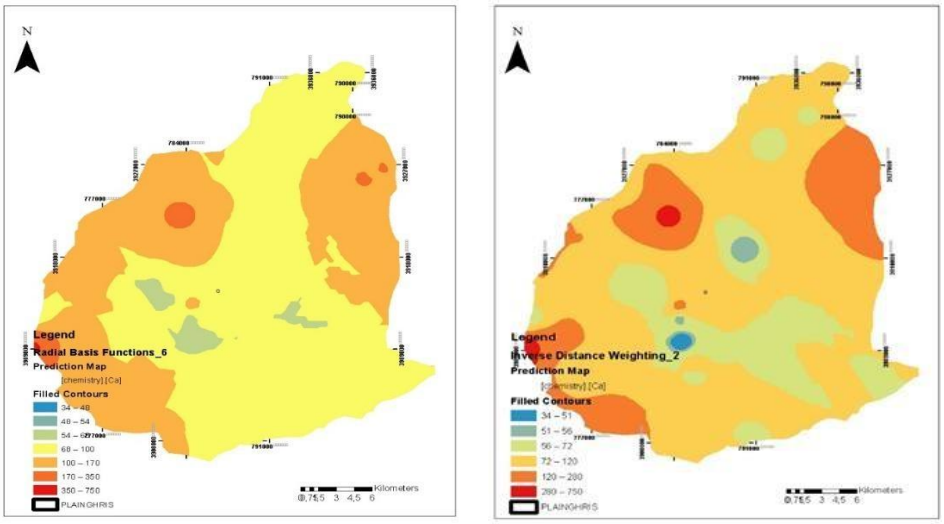


Figure 20: Carte de répartition des teneurs en calcium par la méthode RBF et IDW

Nous constatons que les méthodes déterministes (IDW et RBF) montrent des résultats presque similaires entre elles avec une distribution spatiale irrégulière dans différentes zones. La forme de cartes obtenues reflète bien le fait que les méthodes utilisées dépendent grandement de la localisation des points échantillonnés et se basent uniquement sur le voisinage. Nous remarquons que les cartes de calcium obtenues montrent une certaine uniformité spatiale des différents niveaux de répartitions dans notre zone d'étude avec des concentrations de calcium allant de 56 à 250 mg/l sur la totalité de la région d'étude. La carte issue de la méthode IDW présente une concentration élevée en calcium oscillait entre 280-750mg/l au nord-ouest et sud-ouest de la zone étudiée. Alors que la méthode RBF montre une concentration moins en calcium est comprise entre 170- 350mg/l.

6.2. Interpolation de Calcium Ca^{+2} par les méthodes géostatistiques :

La figure présentée ci-dessous illustre les cartes kriegées par les deux méthodes géostatistiques, Krigeage ordinaire et Krigeage universel

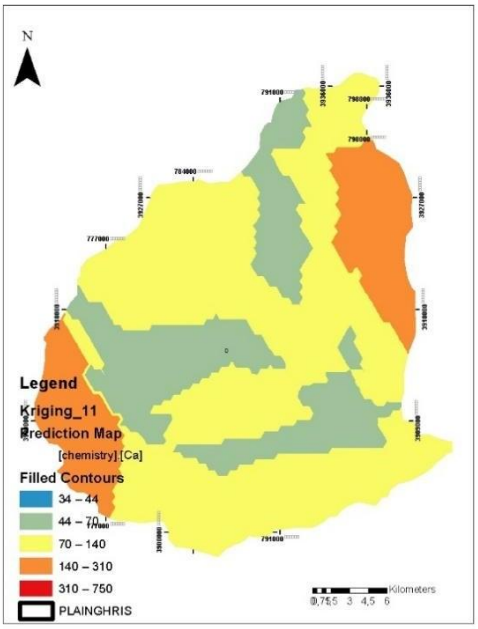


Figure 22: Méthode de Krigeage ordinaire

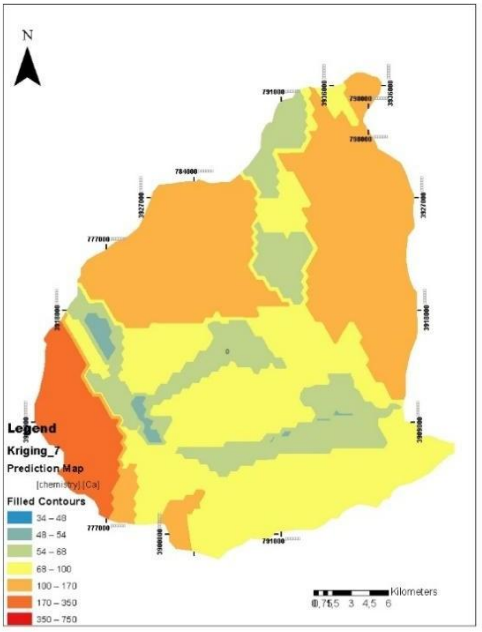
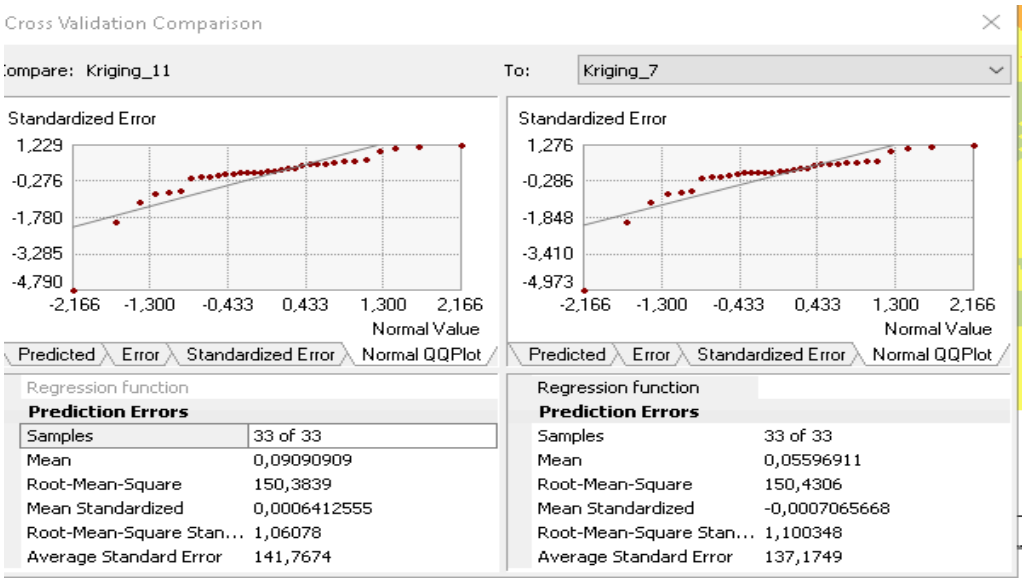


Figure 21: Méthode de Krigeage universel

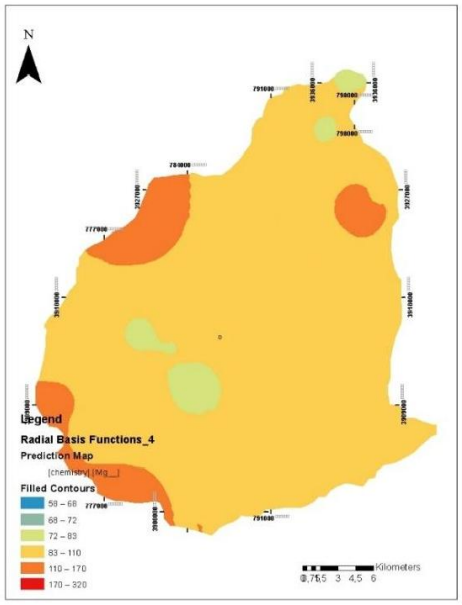


Les résultats de tableau montrent que le krigeage universel est plus précis et moins biaisé car la moyenne des erreurs d'estimation est proche de zéro et l'écart type des erreurs d'estimation est le plus petit.

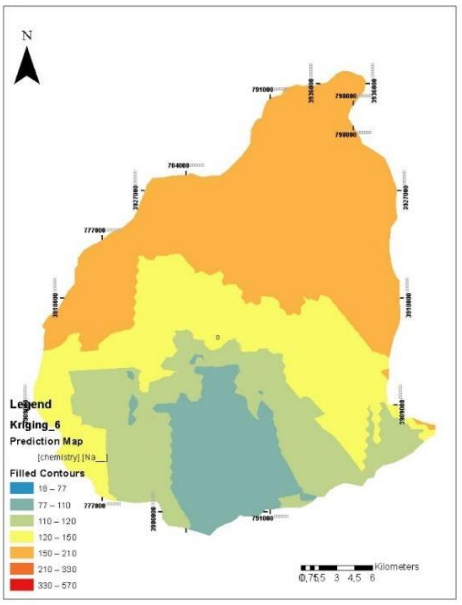
Pour le calcium Nous pouvons conclure que la méthode du Krigeage universel s'est révélée plus représentative que les trois autres méthodes et la méthode RBF donne un résultat sensiblement meilleur que la méthode IDW.

Enfin, selon la moyenne des erreurs et L'écart type des erreurs, une carte du meilleur d'estimation pour chaque paramètre a été établie.

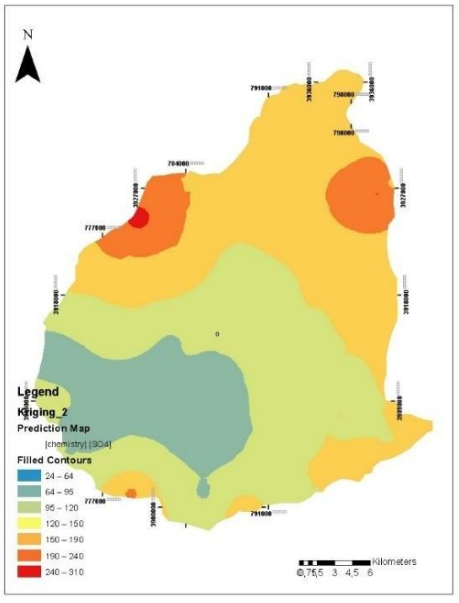
7. Génération de la carte finale de la distribution spatiale des éléments hydrochimiques de la plaine de Ghriss :



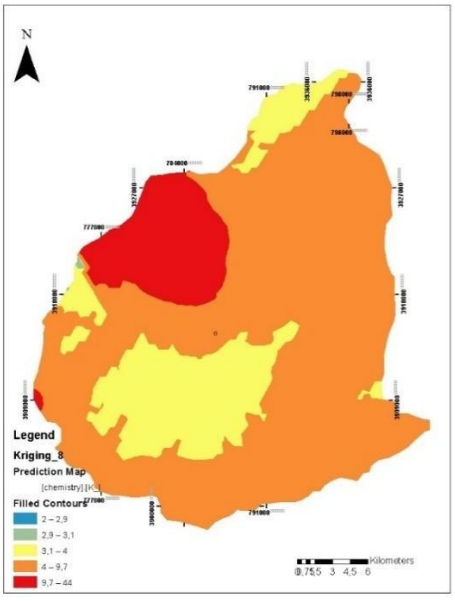
Mg+



Na+

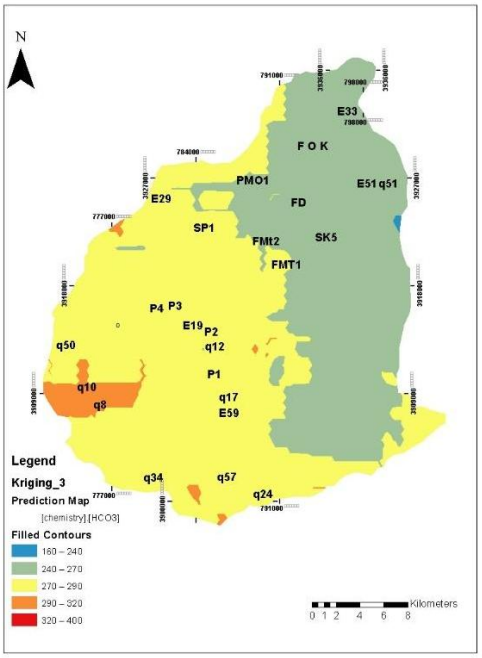


SO4-

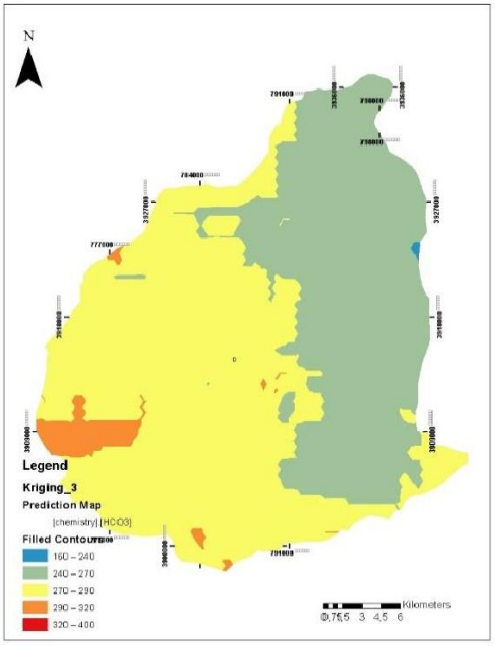


k+

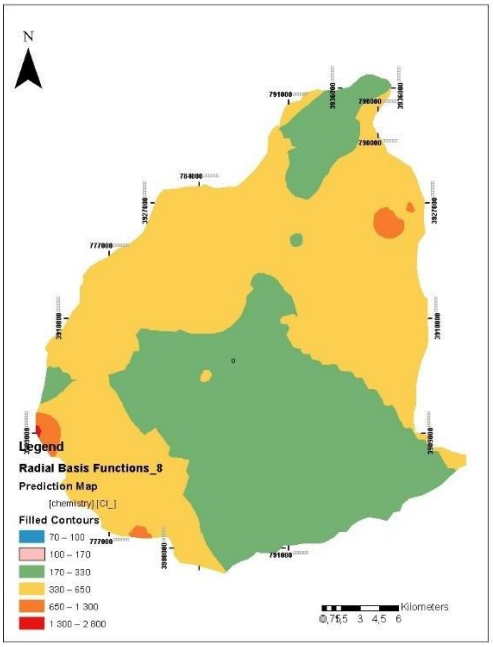
Figure 23: Cartes de la distribution spatiale des substances chimiques deseaux souterraines paramètres Mg, Na, SO4, K.



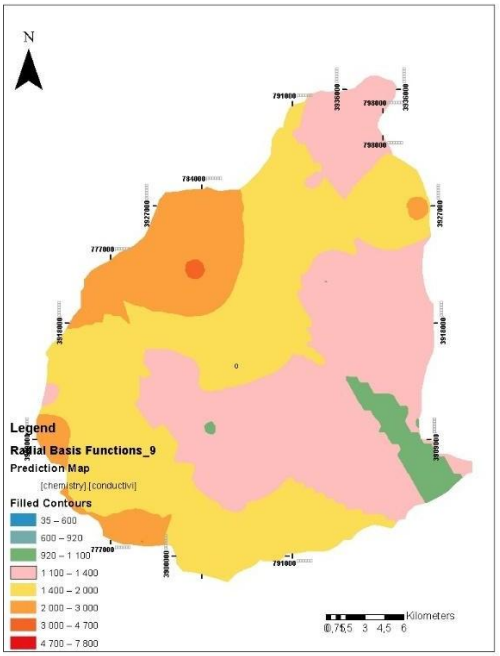
HCO3-



NO3-



Cl-



EC

Figure 24: Cartes de la distribution spatiale des substances chimiques deseaux souterraines paramètres HCO3 ,NO3 ,Cl ,Ec

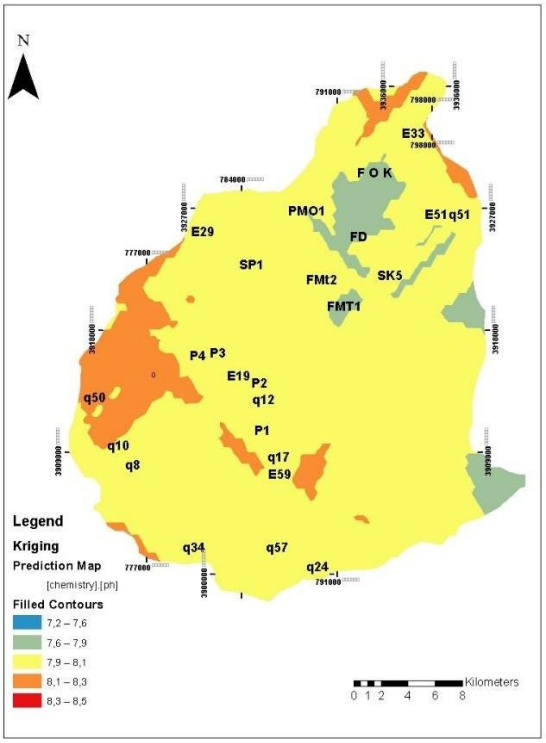


Figure 25: Cartes de la distribution spatiale des substances chimiques des eaux souterraines paramètre Ph.

Ces cartes nous montrent que les concentrations des principaux éléments qui participent à la minéralisation des eaux (Ca2+, Mg2+, Na+ et Cl-, k, so4) ainsi que la conductivité électrique décroissent suivant les deux principales lignes d'écoulements. Au Nord-Est et au Sud de la plaine, les eaux de la nappe se chargent en Na, Cl- et en Ca2+, SO4 en dissolvant respec tivement les formations riches en halite et gypse. L'effet de l'évaporation, notamment dans la partie Nord, accentue la concentration de ces ions dans les eaux de la nappe.

Les bicarbonates, qui ont pour origine la dis solution des carbonates par des eaux contenant du gaz carboniqueCO2, et les nitrates sont fortement présents dans la partie Sud-ouest de la plaine. Les eaux de la nappe plio_quaternaire sont plus acides vers le nord-ouest et l'extrême du nord_ est.

Conclusion :

Les fonctionnalités d'interpolation de l'extension Geostatistical analyst offrent de nombreuses possibilités pour l'interpolation de paramètres hydrochimique des eaux. L'usage conjoint de méthodes géostatistiques et de modèles déterministes montre que l'interpolation géostatistique permet de produire une carte plus réaliste que celle obtenue par les méthodes d'interpolation déterministes seules. Parce que le krigeage prend en compte la présence de

dérives systématiques, la carte qui en résulte respecte bien le comportement spatial de la qualité des eaux. De plus, l'approche géostatistique permet de quantifier l'incertitude associéeà la carte et de définir les zones sous échantillonnées.

Conclusion générale

Plusieurs approches existent pour l'interpolation et la génération de surfaces continues à partir de données ponctuelles. Les méthodes déterministes et les méthodes géostatistiques font parties des principales approches d'interpolation utilisées en géostatistique et en analysespatiale.

Une approche classique est l'interpolation polynomiale, où des polynômes sont ajustés aux points de données voisins pour estimer les valeurs intermédiaires (Cressie, 1993).

Une autre approche couramment utilisée est le krigeage, une technique statistique qui prend en compte la corrélation spatiale des données. Il existe différentes variantes de krigeage, telles que le krigeage simple, le krigeage universel et le krigeage ordinaire (Isaaks etSrivastava., 1989). Les méthodes de krigeage sont souvent préférées lorsque la structure spatiale des données est bien définie.

Outre ces méthodes, les splines sont également largement utilisées pour l'interpolation. Les splines cubiques, en particulier, sont appréciées pour leur capacité à fournir des interpolations lisses entre les points de données (Watson., 1992). Enfin, les méthodes basées sur les fonctions de base radiales (RBF) sont une autre approche populaire. Ces méthodes utilisent des fonctions dont la valeur dépend de la distance par rapport à un centre donné pour estimer les valeurs intermédiaires (Davis, 1986).

Le choix de la meilleure méthode pour la génération de cartes finales à partir dedonnées interpolées dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature des données, la précision requise, la structure spatiale des données, et les objectifs spécifiques de l'application.Une approche courante consiste à comparer plusieurs méthodes d'interpolation et à sélectionner celle qui produit les résultats les plus appropriés pour le contexte donné. Des études comparatives ont été menées pour évaluer les performances des différentes méthodes d'interpolation.

En plus des performances de l'interpolation, d'autres considérations telles que la facilité d'utilisation, la disponibilité des logiciels, et les contraintes de temps et de ressources peuvent également influencer le choix de la méthode. Par exemple, certaines méthodes, comme le krigeage, peuvent nécessiter des calculs intensifs, tandis que d'autres, comme l'interpolation polynomiale, peuvent être plus simples et plus rapides à mettre en œuvre.

Dans cette étude, Quatre techniques d'interpolation sont effectuées : la méthode de pondération inverse de distance (IDW), méthode des réseaux radiaux de la fonction de base

(RBF), le krigeage universel (KU) et le krigeage ordinaire (KO). Le but de notre recherche vise une étude et une analyse comparative par la quantification de l'erreur moyenne d'estimation afin de faire la mise au point sur la méthode d'interpolation spatiale qui semblela plus adaptée et la plus appropriée pour caractériser et cartographier la distribution spatiale.

La cartographie des caractéristiques physico-chimiques est d'une importance particulière pour bien évaluer la qualité des eaux souterraines, bien entendu, les résultats finaux attendus de ce travail sont les cartes de répartition des paramètres hydro chimique des eaux souterraine de la plaine de Ghriss, les méthodes géostatistiques réagissent différemment. Nous pouvons conclure que la méthode du Krigeage universel s'est révélée plus représentative que les trois autres méthodes et la méthode IDW donne un résultat sensiblement meilleur que la méthode RBF.

Références bibliographiques :

- **A.N.R.H d'Oran (1998-2003)** : Annuaires hydrologiques, piézométriques et hydro chimiques
- **BABA-HAMED, K., BOUANANI, A., NASRI, A., BOUANANI, R. (2015).** La modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Ghriss (Mascara, NW-Algérien), pp. 134-140.
- **BELKACEM, B., JOURDE, H., BATIOT-GUILHE, C., MEDDI, M., KHALDI, A., AZZAZ, H. (2013).** Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien, pp. 1113-1126.
- **BENFATTA, H. (1997).** Caractérisation hydro-chimique des eaux des nappes de la plaine de Ghriss. Thèse de Magistère, Centre Universitaire de Mascara, 97 p.
- **CHIKHI, M. (2016).** Étude qualitative des eaux souterraines de la vallée alluviale de l'Oued Sebaou.
- **GASMI, A. (2015).** Aptitude à l'irrigation des eaux souterraines dans la plaine de Ghriss.