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 d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master académique en Sciences de la Terre

Option : Hydrosystème et Ressources en Eau.

Thème :

Cartographie Géostatique de la salinité des eaux de système aquifères de la plaine de GHRIS (Nord-Ouest Algérien)

Présenté par :

Belfarh Ayoub Zine Eddine & Nouari Khaled Sief El Islam

Dirigé par :

Mme BELKHIR Khadidja

Jury de soutenance :

Nom	Prénom	Grade	Qualité	Université
Mr. Bergane	Cheikh	MCB	Président	USTO-MB-
Mme. Bakhti	Amal	MCB	Examinatrice	Oran2
Mme. Belkhir	Khadidja	MAA	Encadreuse	Oran2

Oran, 2026

شكر وتقدير

الحمد لله حمد كثيرا حتى يبلغ الحمد منتهاه والصلاة والسلام على أشرف مخلوق آثاره الله بنوره واصطفاه

وانطلاقا من باب من لم يشكر الناس لم يشكر الله أتقدم بخالص الشكر والتقدير للأستاذة المشرفة بلخير خديجة إرشاداتها وتوجيهاتها التي لم تبخل بها علينا يوم

كما أتقدم بجزيل الشكر والعطاء إلى كل يد رافقتنا في هذا العمل سواء من قريب أو من بعيد

والشكر موصول كذلك إلى أوليائنا الذين سهروا على تقديم لنا كل الظروف الملائمة لإنجاز هذا العمل

كما لا أنسى أن أشكر جميع الأساتذة والمؤطرين الذين قدموا لنا يد المساعدة وإلى كل الزملاء والأساتذة الذين تعلمنا على أيديهم وأخذنا منهم الكثير فكل الشكر والاحترام لهم.

ملخص

كانت المياه الجوفية لنظام طبقة المياه الجوفية في سهل غريس موضوع هذه الدراسة لتحديد خصائص الملوحة ورسم خرائطها الجيولوجية الإحصائية. تتميز هذه المياه بارتفاع نسبة المعادن فيها، حيث تتجاوز تركيزات العناصر الكيميائية المعايير الموصى بها من قبل منظمة الصحة العالمية. استُخدم ما مجموعه 150 بئرًا لإجراء التحليل الجيولوجي الإحصائي للملوحة. تُظهر النتائج اتجاهًا مكانيًا في الملوحة يتجه عمومًا من المركز نحو الشمال، باستثناء مناطق ذات ملوحة عالية في جنوب السهل. أُجريت تحليلات جيولوجية إحصائية غير بارامترية على بيانات الملوحة (البقايا الجافة). ولهذا الغرض، طُبِّق ترميز ثنائي للتركيزات عند تركيز 1000 ملغم/لتر، وهو الحد الأقصى لمعيار منظمة الصحة العالمية. استُخدمت طريقة كريغينغ المؤشرة لتقدير احتمالات تركيز 1000 ملغم/لتر في طبقة المياه الجوفية باستخدام نموذج عقدي بأبعاد 500 × 500 متر. مكّن رسم الخرائط التلقائي من تصور توزيع احتمالية كريغينغ لتركيز إجمالي للرواسب يبلغ 1000 ملغم/لتر. يمكن استخدام هذه النتائج لاختيار مواقع حفر آبار جديدة أو لاستخراج المياه بشكل انتقائي.

الكلمات المفتاحية: الملوحة، إجمالي الرواسب، الإحصاء الجيولوجي؛ التنبؤ المكاني (كريغينغ).

Résumé

Les eaux souterraines du système aquifères de la plaine de Ghriss ont fait l'objet de cette étude afin de caractériser la salinité et sa cartographie géostatistique. Ces eaux ont une forte minéralisation, dont la concentration des éléments chimiques dépasse les normes recommandées par l'OMS. Au total 150 forages ont été utilisés pour le traitement géostatistique de la salinité. Les résultats obtenus montrent une évolution spatiale de la salinité orientée du centre vers le Nord en générale à l'exception d'une forte salinisation localement au sud de la plaine. La géostatistique non-paramétrique a été effectuée sur les analyses de la salinité (résidu sec). Pour cela, un codage binaire des concentrations a été fait pour une concentration de 1000 mg/l la norme OMS maximale. Le Krigeage d'indicatrices a permis d'estimer les probabilités I (1000mg/l) dans la nappe en utilisant un modèle de nœud (500*500 m). La cartographie automatique a permis de visualiser la répartition de la probabilité krigée pour la concentration des résidus secs de 1000 mg/l. Ces résultats peuvent être utilisés au choix d'implantation de nouveaux forages ou pour l'exploitation sélectives des eaux.

Mots clés : Salinité, résidu sec, géostatistique ; Krigeage d'indicatrice.

Abstract

The groundwater of the Ghriss Plain aquifer system was the subject of this study to characterize salinity and its geostatistical mapping. This water has high mineralization, with chemical element concentrations exceeding WHO recommended standards. A total of 150 deep well were used for the geostatistical analysis of salinity. The results show a spatial trend in salinity generally oriented from the center towards the north, with the exception of high salinity locally in the south of the plain. Non-parametric geostatistics were performed on the salinity (dry residue) analyses. For this purpose, binary coding of concentrations was applied for a concentration of 1000 mg/L, the maximum WHO standard. Indicator kriging was used to estimate the probabilities of 1000 mg/L in the aquifer using a 500 x 500 m node model. Automatic mapping enabled visualization of the kriged probability distribution for a total sediment concentration of 1000 mg/L. These results can be used to select locations for new boreholes or for selective water extraction.

Keywords: Salinity, total sediment, geostatistics; indicator kriging.

Sommaire

Remerciements…….
Résumé…….
Abstract…….
الملخص ……...
Sommaire……..……
Liste des figures……

Liste des tableaux…….
Liste des abréviations……
Introduction générale……..1

Chapitre I_____Généralités sur la géostatistique
Introduction……3
Historique……3
La géostatistique et l'interpolation……..4
Méthodes déterministes……..4
Méthodes probabilistes……...5
Le krigeage…….……6
Types de krigeage……7
Co-krigeage…….....9
Krigeage indicateur……...10
Variogramme……11
Validation du modèle……13
Chapitre II _____Présentation de la zone d'étude
Localisation……..16
Géomorphologie et climat……17
Pluviométrie……18
Température……18
Indice de De Martonne……20
Géologie……..22
Aquifères……23
Piézométrie……25
Hydrochimie……...26

Chapitre III_____ Analyse géostatistique et cartographie
Introduction……...28
Analyse statistique……28
Box Plot……29
Histogramme……30
Variogramme exprimental……31
Validation croisée……33
Carte des probabilités……34
Carte des erreurs……36
Conclusion……37
Conclusion générale
Conclusion générale……38
Références bibliographiques 39

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
Figure 1	Illustration du principe des méthodes déterministes	4
Figure 2	Représentation schématique d'une variable régionalisée utilisée en krigeage	5
Figure 3	Représentation des points de mesure d'une variable régionalisée	11
Figure 4	Représentation graphique du variogramme théorique	12
Figure 5	Localisation géographique de la plaine de Ghriss	16
Figure 6	Situation géographique de la zone d'étude	16
Figure 7	Carte des pentes de la plaine de Ghriss	17
Figure 8	Diagramme ombrothermique	19
Figure 9	Indice d'aridité de De Martonne	21
Figure 10	Carte hypsométrique d'Oued Fekan	22
Figure 11	Carte géologique	23
Figure 12	Coupe hydrogéologique	24
Figure 13	Carte piézométrique	25
Figure 14	Box Plot des TDS	30
Figure 15	Histogramme des TDS	30
Figure 16	Variogramme de surface	31
Figure 17	Semi-variogramme expérimental	32
Figure 18	Validation croisée	33
Figure 19	Carte des probabilités krigées	34
Figure 20	Carte des erreurs standardisées	36

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
Tableau 1	Pluviométrie moyenne mensuelle (1996–2011)	18
Tableau 2	Température moyenne mensuelle (1996–2011)	18
Tableau 3	Indice de De Martonne	21
Tableau 4	Caractéristiques statistiques des TDS	28
Tableau 5	Paramètres des modèles de variogramme et validation croisée	32

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
AEP	Alimentation en Eau Potable
TDS	Total Dissolved Solids
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
KI	Krigeage d'Indicatrices
IDW	Inverse Distance Weighting
RMSE	Root Mean Square Error
SIG	Système d'Information Géographique

Introduction générale

La plaine de Ghriss abrite plusieurs aquifères, notamment l'aquifère alluvial et l'aquifère calcaire. Ces aquifères sont essentiels pour l'approvisionnement en eau de la région, mais ils sont confrontés à des défis majeurs liés à la salinité. La dissolution des sels minéraux et les pratiques agricoles intensives contribuent à l'augmentation des niveaux de salinité, ce qui pose des risques pour la qualité de l'eau et les cultures agricoles.

La géostatistique est une branche de la statistique appliquée aux sciences géologiques et aux sciences de la terre. Son principal objectif est d'estimer les valeurs des variables à des emplacements non mesurés. Cette estimation est souvent réalisée par le biais de méthodes d'interpolation, parmi lesquelles le krigeage se distingue. Le krigeage fournit non seulement une estimation des valeurs, mais aussi une mesure de l'incertitude associée à ces estimations. Les applications de la géostatistique sont variées et revêtent une importance considérable dans de nombreux domaines, notamment l'hydrologie, l'agriculture, et la gestion des ressources naturelles.

L'objective de cette étude se focalise a l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique pour la cartographie des concentrations des résidus sec (TDS)des trois aquiferes de la plaine de ghriss,cette étude permettront de mieux comprendre la dynamique de la salinité dans les aquifères de la plaine de Ghriss et d'orienter les stratégies de gestion durable des ressources en eau,

Des échantillons d'eau souterraine ont été collectés à partir de plusieurs points répartis dans la plaine de Ghriss et les zones adjacentes. Les concentrations en solides dissous totaux (TDS) ont été mesurées pour déterminer les niveaux de salinité. Après la collecte des données, celles-ci ont été intégrées dans le logiciel ArcGIS, où des techniques d'analyse spatiale, notamment le krigeage indicateur, ont été utilisées pour créer des cartes illustrant la distribution de la salinité dans la région.

Étapes de l'étude de krigeage

L'étude du krigeage se compose de deux étapes principales :

1. Variogramme : Cette étape consiste à analyser la structure spatiale des données en mesurant la variabilité des valeurs en fonction de la distance.
2. Krigeage : Cette étape utilise les informations du variogramme pour estimer les valeurs à des emplacements non mesurés.

Structure du mémoire

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

1. Aperçu théorique du krigeage : Présentation des différentes méthodes de krigeage et des bases sur lesquelles elles reposent pour fournir des prévisions précises.
2. Présentation de la zone d'étude : Description de la plaine de Ghriss, de ses aquifères et des problématiques de salinité des eaux souterraines.
3. Choix de la méthode avancée non paramétrique : Application du krigeage d'indicatrices pour analyser la salinité des eaux souterraines.



Chapitre I :

Généralités sur la géostatique



Introduction

La géostatistique, domaine scientifique clé, se concentre sur l'analyse de la continuité spatiale des phénomènes naturels. Aujourd'hui, elle constitue un outil indispensable pour modéliser et étudier les variables régionalisées, en particulier dans les sciences de la Terre telles que la géologie, l'hydrogéologie, l'écologie et les applications géotechniques. Contrairement aux approches statistiques classiques qui supposent l'indépendance des observations, la géostatistique intègre la dépendance spatiale entre les variables mesurées. Tout paramètre naturel réparti dans l'espace présente une certaine variabilité liée aux conditions géologiques, physiques ou environnementales. La connaissance des lois régissant cette répartition spatiale permet d'améliorer significativement les processus d'estimation, de simulation et de prise de décision. Ainsi, la géostatistique offre un cadre mathématique et probabiliste permettant de prédire les valeurs d'un phénomène en des points non échantillonnés à partir d'un nombre limité de mesures. Dans un contexte scientifique et économique marqué par l'optimisation des coûts d'investigation, les étudiants, chercheurs et ingénieurs ont un besoin croissant des outils géostatistiques. En géotechnique notamment, les campagnes de reconnaissance reposent sur un nombre restreint d'essais in situ et en laboratoire, ce qui engendre des incertitudes quant à la représentativité des paramètres mesurés. La géostatistique permet alors d'intégrer explicitement la variabilité spatiale et les incertitudes associées aux données, tout en fournissant des estimations fiables accompagnées d'une mesure de leur précision. Les paramètres géotechniques, tels que la résistance du sol, la cohésion ou l'angle de frottement interne, présentent généralement une hétérogénéité spatiale importante. Une valeur mesurée en un point précis peut être considérée comme déterministe localement, mais demeure inconnue dans le volume environnant du site étudié. Cette limitation rend nécessaire l'utilisation de méthodes statistiques adaptées afin d'estimer les propriétés du sol dans les zones non échantillonnées. Les approches utilisées incluent les méthodes de statistiques classiques, telles que l'analyse descriptive, la recherche d'ensembles homogènes et l'étude des corrélations, ainsi que des méthodes avancées regroupées sous le terme de géostatistique. Ces dernières reposent sur l'analyse de la structure spatiale des données à travers des outils tels que le variogramme et les techniques d'estimation, notamment le krigeage, permettant une interpolation optimale des variables régionalisées. Ainsi, la géostatistique constitue aujourd'hui une approche incontournable pour une meilleure compréhension de la variabilité des milieux naturels et pour l'amélioration de la fiabilité des analyses et des conceptions en ingénierie géotechnique. (saaks,srv.R.M 19).

Historique

Georges Matheron, en collaboration avec Alexandre Gandin, a développé la théorie de la variable régionalisée, fondement de la géostatistique, en réponse aux travaux de D.G. Krige sur l'estimation tenant compte de la variabilité spatiale dans l'exploration minière.

Dans les années 1980, les pédologues ont largement contribué à l'essor de la géostatistique, notamment grâce aux recherches de Webster permettant d'estimer les propriétés des sols à partir d'échantillons spatialement répartis. Parallèlement, des chercheurs russes ont appliqué ces méthodes à l'étude des précipitations et des écoulements d'eau.

En 1976, Delhomme a introduit l'utilisation systématique de la géostatistique en hydrologie, élargissant ainsi ses domaines d'application. Enfin, Matheron a nommé la méthode d'estimation « Krigeage » en hommage à Krige, une technique permettant de prédire des valeurs en des points non échantillonnés grâce à la corrélation spatiale des données. (Matheron.G 1963)

1.La Géostatistique et l'Interpolation

1.1. Définition de La géostatistique

La géostatistique est une branche de la statistique qui se concentre sur l'analyse des données spatiales et temporelles. Elle est largement utilisée dans des domaines tels que la géologie, l'hydrologie, l'agriculture et l'environnement. Voici un aperçu des concepts clés liés à la géostatistique et à l'interpolation. (Edward H. Isaaks et R. Mohan Srivastava.)

1.2. Définition de l'interpolation

L'interpolation est une méthode mathématique utilisée pour estimer les valeurs d'une fonction ou d'une variable à des points non mesurés, en se basant sur des valeurs connues à des points voisins. Elle est largement utilisée dans divers domaines tels que les mathématiques, l'informatique, la géostatistique, et l'ingénierie (Philip J. Davis et Reuben Hersh.).

1.3. Importance en géostatistique

Dans le cadre de la géostatistique, les méthodes d'interpolation sont essentielles car elles permettent de modéliser la variabilité spatiale des phénomènes naturels, tels que la concentration de minéraux dans le sol ou la pollution dans l'air. La géostatistique utilise une approche probabiliste et stochastique, ce qui la distingue des méthodes d'interpolation plus classiques et déterministes.

1.4. Les méthodes de l'interpolation

Les méthodes d'interpolation peuvent être classées en deux grandes catégories selon le contexte, comme mentionné dans le texte :

- Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont celles dans lesquelles les résultats sont déterminés de manière exacte par les conditions initiales, sans prendre en compte de facteur d'incertitude. Elles reposent sur des propriétés purement mathématiques, généralement géométriques, sans tenir compte du phénomène physique (fig.1)

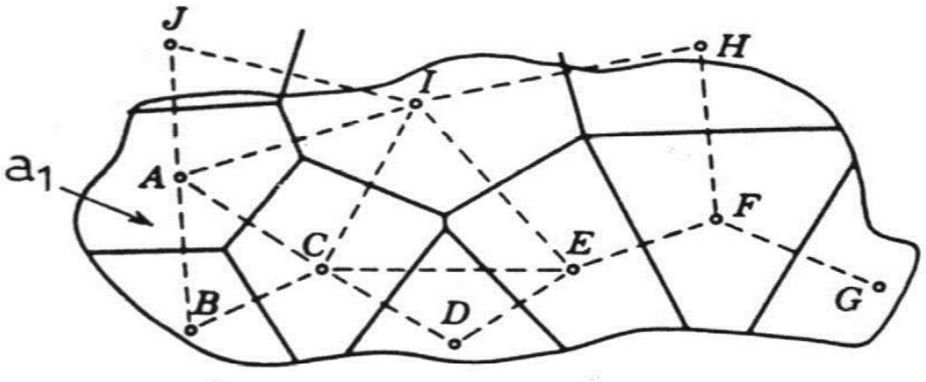


Fig.1. Illustration du principe des méthodes déterministes.

La méthode des polygones de Thiessen ou IDW (pondération inverse de la distance): si vous avez un ensemble de points et leurs valeurs, l'interpolation ne tiendra pas compte de la variabilité ou de l'incertitude. Le résultat est unique et prévisible.

1.4.1. Caractéristiques

Précision : Les résultats produits par ces méthodes sont prévisibles et précis, car ils ne tiennent pas compte de la variabilité ou de l'incertitude.

Appropriées pour certains types d'analyses

Elles sont souvent utilisées dans les situations où les systèmes sont bien compris et les variables sont contrôlées.

Exemples dans le contexte géostatistique :

Dans le passage, on mentionne des méthodes spécifiques comme la méthode des polygones de Thiessen et l'IDW (pondération inverse de la distance). Ces techniques interpolent des valeurs à partir de jeux de données, mais elles n'intègrent pas la variabilité potentielle qui pourrait exister dans les données. Par exemple, lors de l'utilisation de l'IDW, si des points de données sont eux-mêmes sujet à des variations, l'interpolation ne les prendra pas en compte, et cela peut produire un résultat qui ne reflète pas fidèlement la réalité.

1.5. Méthodes stochastiques ou probabilistes

Les méthodes probabilistes (ou stochastiques) intègrent des éléments d'incertitude et de variabilité dans les résultats. Contrairement aux méthodes déterministes, elles ne produisent pas de réponses uniques mais des distributions de probabilité. Ces méthodes tierinent compte de la variabilité aléatoire des données et des relations spatiales incertaines entre les points mesurés.

Exemple : Le krigeage est une méthode probabiliste qui, en plus de donner une estimation pour un point non mesuré, fournit également une estimation de l'incertitude associée à cette estimation (par exemple, une variance). Le résultat dépend de l'autocorrélation spatiale des données et des modèles de variabilité utilisés. (Fig.2).

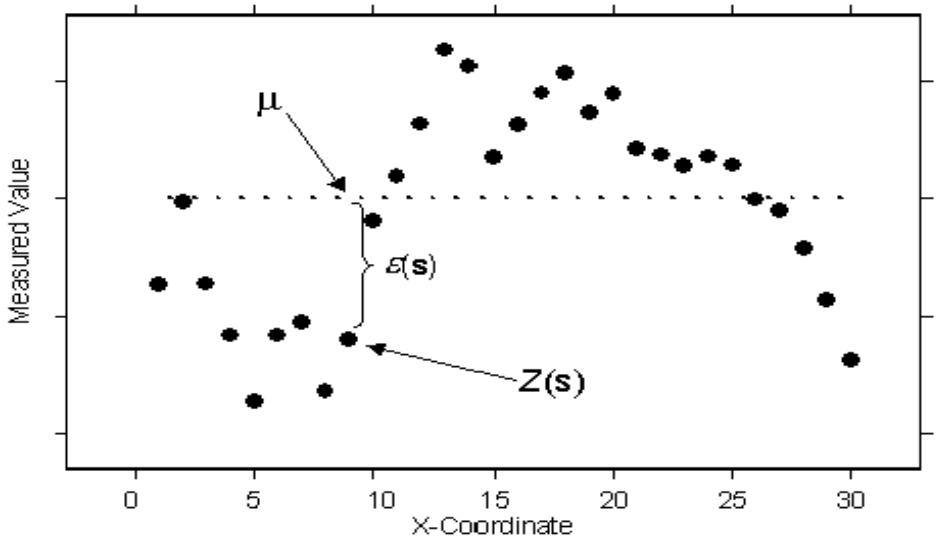


Fig.2. Représentation schématique d'une variable régionalisée utilisée en krigeage.

1.5.1. Caractéristiques :

Incertitude et variabilité : Les méthodes stochastiques modélisent les résultats sous forme de distributions de probabilité. Cela signifie qu'au lieu d'obtenir une seule solution (comme avec un modèle déterministe), on obtient une gamme de résultats possibles, chacun avec une probabilité associée.

Approche adaptative : Ces méthodes permettent de mieux représenter des phénomènes qui ne suivent pas un comportement fixe, comme les variations dans les données environnementales ou géophysiques.

Applications : Dans le contexte de la géostatistique, l'utilisation de méthodes probabilistes est essentielle. Elles sont souvent employées pour prédire des valeurs dans des zones où des échantillons ne sont pas disponibles, en considérant l'incertitude liée à ce manque de données. Cela est particulièrement utile dans les sciences de la terre pour l'évaluation des ressources naturelles ou la modélisation des risques.

Comparaison avec les méthodes probabilistes :

Contrairement aux méthodes déterministes, les méthodes probabilistes, ou stochastiques, reconnaissent et intègrent l'incertitude et la variabilité dans leurs résultats. Elles produisent des distributions de probabilités plutôt que des résultats fixes, ce qui peut offrir une vision plus nuancée et réaliste des phénomènes complexes.

Les méthodes déterministes (classiques) sont, par conséquent, cruciales dans de nombreuses applications mathématiques et géostatistiques, mais il est essentiel de les utiliser dans des contextes appropriés, où la connaissance complète des conditions initiales existe. Ce choix méthodologique doit être contrebalancé par une compréhension des limitations, notamment en ce qui concerne l'incertitude et la variabilité des données.

2. Krigeage

2.1. Définition de Krigeage :

Le principal objectif de la géostatistique est la prédiction spatiale, encore appelée krigeage, consistant à prédire une variable régionalisée d'intérêt sur un domaine d'étude, à partir des données observées à certains emplacements. Le krigeage repose fondamentalement sur la modélisation et l'estimation de la structure de dépendance spatiale. La description de cette dernière se fait couramment à l'aide d'outils statistiques tels que le variogramme ou la covariance, calculés sur l'ensemble du domaine d'intérêt et sous une hypothèse de stationnarité. Seule la méthode d'interpolation par krigeage repose sur une méthode statistique satisfaisante et permet d'obtenir la vraie variance d'estimation. Puisqu'on peut calculer la variance d'estimation pour tout estimateur linéaire. (Edward H. Isaaks et R. Mohan Srivastava)

Le krigeage repose sur l'idée que la valeur d'une variable en un point x0 est une combinaison linéaire des valeurs mesurées aux points environnants xi :

$$z(xi_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, z(xi)$$

2.2 Les types fondamentaux (Linéaires)

2.2.1. Krigeage Simple (KS)

C'est une technique d'estimation qui utilise des données échantillonnées pour prédire des valeurs à des emplacements non mesurés, en supposant que la moyenne de la variable d'intérêt est connue et constante dans la région étudiée.

Caractéristiques

Moyenne Connue : Contrairement au krigeage ordinaire, où la moyenne est inconnue et estimée, le krigeage simple utilise une moyenne préalablement définie.

Stationnarité : Il suppose que les données sont stationnaires, c'est-à-dire que leurs propriétés statistiques (comme la moyenne et la variance) ne changent pas avec la position.

Variogramme :

Comme pour les autres types de krigeage, le krigeage simple nécessite l'estimation d'un variogramme, qui décrit la structure spatiale de la variable d'intérêt.

La formule de l'estimation par krigeage simple peut être exprimée comme suit :

$$Z(s_0) = \mu + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, (Z(s_i) - \mu)$$

- $Z(s_0)$ est la valeur estimée au point s_0,
- μ est la moyenne connue,
- $Z(s_i)$ sont les valeurs observées aux points s_i,
- λ_i sont les poids calculés par le modèle de variogramme,
- n est le nombre de points de données utilisés pour l'estimation.

Avantages :

- Simplicité : Le krigeage simple est relativement facile à mettre en œuvre et à comprendre.
- Rapidité de Calcul : Les calculs sont souvent plus rapides que pour d'autres méthodes de krigeage qui nécessitent des estimations de moyenne.

Inconvénients :

- Hypothèse de Moyenne Connue : L'exigence d'une moyenne connue peut ne pas être réaliste dans de nombreux cas pratiques.
- Limitations de Stationnarité : La méthode peut conduire à des estimations biaisées si les données ne respectent pas l'hypothèse de stationnarité.

Applications :

Le krigeage simple est souvent utilisé dans des situations où la moyenne est bien définie et où les données sont relativement homogènes, comme dans certaines applications en géologie, en hydrologie et en agriculture.

2.2.2. Krigeage Ordinaire :

C'est le type de krigeage le plus couramment utilisé. Il suppose que la moyenne de la variable est constante sur l'ensemble de la zone d'étude.

La formule de base pour le krigeage ordinaire peut être exprimée comme suit

$$Z(s_0) = \hat{\mu} + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, (Z(s_i) - \hat{\mu})$$

- $Z(s_0)$ est la valeur estimée au point s_0,
- $\hat{\mu}$ est la moyenne des valeurs observées,
- $Z(s_i)$ sont les valeurs observées aux points s_i,
- λ_i sont les poids calculés à partir du variogramme,
- n est le nombre de points de données utilisés pour l'estimation.

Utilisation : pour des données où la tendance spatiale est faible ou absente.

Caractéristiques

Estime les valeurs en fonction des points voisins.

Ne nécessite pas de prise en compte d'une tendance globale.

2.2.3 Le krigeage universel :

Le krigeage universel représente une méthode d'interpolation géostatistique qui intègre à la fois la tendance générale et la variabilité locale des données. Voici les éléments essentiels de sa formule :

La formule de base du krigeage universel peut être formulée comme suit :

$$Z*(s0) \; = \; \mu \; + \; \sum i = 1n \; \lambda i(Z(si) \; - \; \mu)$$

- Z∗(s0) : Estimation de la variable au point s0.
- μ : Valeur moyenne (tendance) de la variable.
- Z(si) : Valeur mesurée de la variable au point si.
- λi : Poids alloués à chaque observation, déterminés par la matrice de covariance.
- n : Nombre total d'observations.

Étapes du Krigeage Universel

- Estimation de la Tendance : Évaluer la tendance générale μ des données.
- Calcul de la Matrice de Covariance : Analyser la covariance entre les points d'échantillonnage.
- Résolution du Système d'Équations : Utiliser les poids λi pour réduire l'erreur de prédiction.
- Estimation de la Valeur : Appliquer la formule pour déterminer l'estimation à l'emplacement souhaité.

Applications

Le krigeage universel trouve des applications dans plusieurs domaines, y compris :

Géologie : Pour évaluer la répartition des ressources minérales.

Hydrologie : Pour modéliser la qualité de l'eau.

Agriculture : Pour optimiser l'utilisation des ressources.

3.Méthodes Non-Linéaires et Multivariées :

3.1. Le Co-krigeage :

Il constitue une extension du krigeage, permettant d'intégrer plusieurs variables corrélées afin d'optimiser l'estimation d'une variable cible. Cette approche est particulièrement bénéfique lorsque les données pour la variable cible sont limitées, mais que d'autres variables pertinentes peuvent offrir des informations additionnelles.

- Concepts Clés du Co-Krigeage :

Variables Corrélées :

Le co-krigeage exploite l'interrelation entre la variable d'intérêt (comme la concentration d'un polluant) et d'autres variables (telles que la topographie ou la température) qui présentent des corrélations.

Modèle de Covariance :

Cette méthode nécessite l'élaboration de modèles de covariance tant pour la variable cible que pour les variables auxiliaires. Cela inclut le variogramme de la variable d'intérêt ainsi que les variogrammes croisés entre les différentes variables.

- **Estimation :**

L'estimation par Co-krigeage se réalise par le biais d'une combinaison linéaire des valeurs observées des variables auxiliaires ainsi que de la variable d'intérêt, permettant ainsi de bénéficier des informations additionnelles fournies par les variables corrélées.

La formule générale de l'estimation par Co-krigeage peut être formulée comme suit :

$$Z*(s_0) = \sum(i = 1\ to\ n)\ \lambda_i\, Z(s_i) + \sum(j = 1\ to\ m)\ \mu_j\, W(s_j)$$

- $Z*(s_0)$: Estimation à l'emplacement s_0.
- $Z(s_i)$: Valeur observée de la variable d'intérêt à l'emplacement si.
- $W(s_j)$: Valeur observée d'une variable auxiliaire à l'emplacement sj.
- λ_i et μ_j : Poids associés à chaque observation.

Applications du Co-Krigeage :

Le Co-krigeage trouve des applications dans divers domaines, tels que :

Géologie : pour estimer la répartition des ressources minérales en intégrant des informations géologiques supplémentaires.

Environnement : pour modéliser la dispersion de polluants en tenant compte de facteurs environnementaux corrélés.

Agriculture : pour affiner les estimations de rendements à partir de données sur le sol et le climat.

Avantages du Co-Krigeage :

Amélioration de la Précision : L'intégration de plusieurs sources d'informations permet au co-krigeage de fournir des estimations plus fiables que celles du krigeage standard.

Utilisation Efficace des Données : Cette méthode permet de tirer parti de données auxiliaires, ce qui est particulièrement avantageux lorsque les données relatives à la variable cible sont rares ou coûteuses à acquérir.

3.2. Krigeage Indicateur (KI) :

Le krigeage indicateur est une méthode géostatistique utilisée pour estimer la probabilité d'appartenance à une classe ou à un groupe, généralement pour des variables catégorielles ou binaires. Cette approche est particulièrement utile dans des contextes où l'on souhaite modéliser la présence ou l'absence d'une caractéristique (par exemple, la présence d'un minerai dans un site géologique).

La Métamorphose Indicatrice :

Au lieu de manipuler les données brutes Z(x), nous les convertissons en une série de variables binaires (0 ou 1) en fonction d'un seuil critique zc.

L'estimateur du krigeage indicateur L'estimation au point x0 est une combinaison linéaire des indicateurs aux points de mesure xi :

$$I^{\wedge}(x0;\ zc)\ =\ \sum(i = 1\ à\ n)\ \lambda i\ I(xi;\ zc)$$

Interprétation fondamentale :

Étant donné que l'espérance mathématique d'une variable indicatrice représente une probabilité, la valeur estimée $\hat{I}(x_0; z_c)$correspond directement à la probabilité conditionnelle que la variable réelle soit inférieure ou égale au seuil :

$$\hat{I}(x_0; z_c) = P[Z(x_0) \leq z_c \mid \text{données}]$$

Le Système d'Équations On aborde un système similaire au Krigeage Ordinaire, mais appliqué aux indicatrices. La complexité réside dans la nécessité de modéliser un variogramme d'indicateur $\gamma\ I(\ h\ )$ pour chaque seuil défini.

$$\{\ \sum j\ =\ 1\ n\ \lambda\ j\ \gamma\ I(\ x\ i, x\ j;\ z\ c\ )\ +\ \mu\ =\ \gamma\ I(\ x\ i, x\ 0;\ z\ c\ )\ \sum i\ =\ 1\ n\ \lambda\ i\ =\ 1$$

Avantages Académiques et Pratiques Résistance aux valeurs extrêmes :

Le Krigeage Indicateur (KI) n'est pas affecté par les valeurs aberrantes, car il ne considère que le valeurs "0" ou "1". Un point très contaminé est traité de la même manière qu'un point légèrement au-dessus du seuil.

Liberté de distribution :

Contrairement au krigeage traditionnel qui repose souvent sur l'hypothèse d'une distribution normale, le KI est capable de s'adapter à toute forme de distribution, qu'elle soit asymétrique ou multimodale.

Estimation de la Fonction de Répartition :

Probabilité complète à chaque point de la carte.

Exemple d'Application : Pollution des sols

Considérons un sol pollué au plomb, avec un seuil de sécurité fixé à 100 mg/kg. On transforme toutes les mesures en valeurs : 1 si ≤ 100, 0 si > 100.

On procède ensuite au krigeage.

Le résultat en un point non mesuré s'élève à 0.85.

Décision : Il y a 85% de probabilité que cette zone soit saine, ce qui implique 15% de possibilité qu'elle dépasse le seuil de toxicité.

Le krigeage est divisé en deux tâches distinctes :

Quantifier la structure spatiale des données et produire une prédiction. La quantification de la structure, connue sous le nom de variographie, correspond à l'ajustement d'un modèle de dépendance spatiale aux données. Faire une prédiction pour une valeur inconnue pour un emplacement spécifique, le krigeage utilisera le modèle ajusté de la variographie, la configuration des données spatiales et les valeurs des points d'échantillonnage mesurés autour de l'emplacement de prédiction.

3.3. Le variogramme :

C'est l'outil de base de la géostatistique. Soit deux variables aléatoires, Z(x) et Z(x+h) mesurées en 2 points "x" et "x+h", la variabilité entre ces deux points (Fig.3) se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x, h)$ appelée variogramme

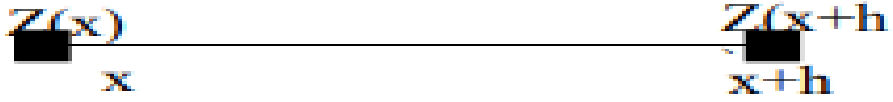


Fig.3. Représentation des points de mesure de la variable

Le variogramme théorique est défini comme étant l'espérance quadratique de la variable aléatoire

z(x) – z(x+h)] soit :

$$E = \{[Z(x) - Z(x+h)]^2 \} = 2\gamma(x,h)$$

En général, le variogramme γ(x,h) (ou semi-variogramme) est estimé par la formule suivante :

$$2\gamma(h,\theta) = \frac{1}{N(h,\theta)} \sum_{i=1}^{N(h,\theta)} [z_i(x) - z_i(x+h)]^2$$

Le variogramme expérimental calculé doit être ajusté par un modèle mathématique. Les schémas théoriques d'usage courant sont classés en schémas à pallier, schémas sans palier et schémas à effet de trous

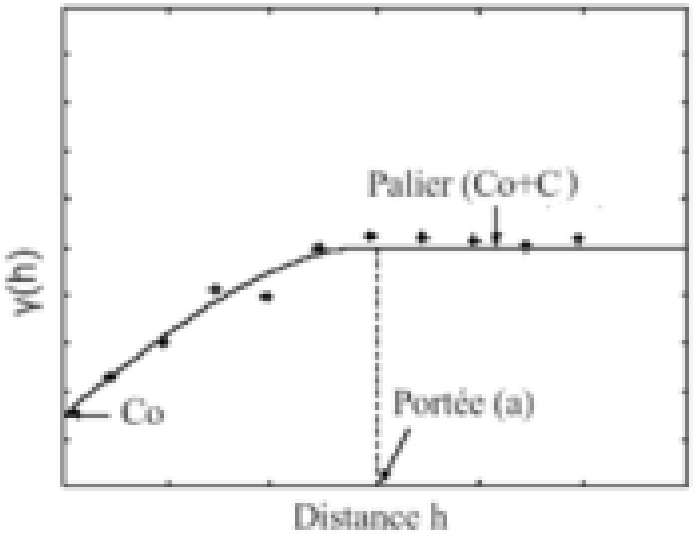


Fig.4. Représentation graphique du variogramme.

Les influences directionnelles peuvent être statistiquement quantifiées et prises en compte lors de la modélisation, à l'aide de certains logiciels de géostatistique comme dans ArcGIS Geostatistical Analyse utilisé dans cette recherche.

3.4. Validation du modèle

La validation doit être effectuée avant de produire la surface finale, ou elle a prendre une décision éclairée quant au modèle qui fournit les meilleures prévisions.

La méthode de validation croisée a été utilisée pour évaluer la performance des méthodes d'interpolation. Dans cette étude, les valeurs estimées et observées ont été comparées a l'aide de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), de l'erreur moyenne (ME), de l'erreur quadratique moyenne standardisée (RMSS), de l'erreur moyenne standardisée (MSE) et de l'erreur standard moyenne (ASE). Pour un modèle fournissant des prédictions précises, le MSE doit être proche de 0, la RMSE et la MSE doivent être aussi faibles que possible, et la RMSS doit être proche de 1 (NAS et BERKTAY, 2010).

Deuxieme chapitre

Présentation de la zone d’étude

1.Présentation générale de la zone d'étude

1.1. Localisation de la plaine de GHRISS

La plaine de Ghriss, également désignée sous le nom de bassin de Ghriss, est une région de plaine 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 Oran Mohammadia 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.

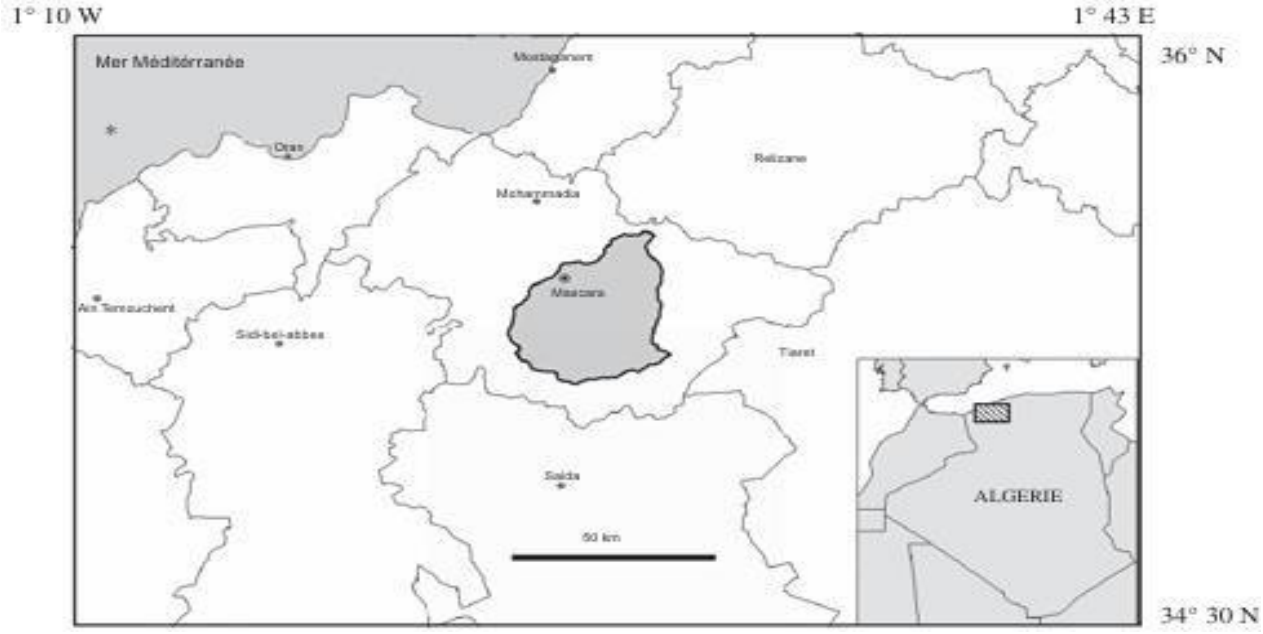


Fig.5. Localisation géographique de la plaine de Ghriss dans le nord-ouest de l'Algérie

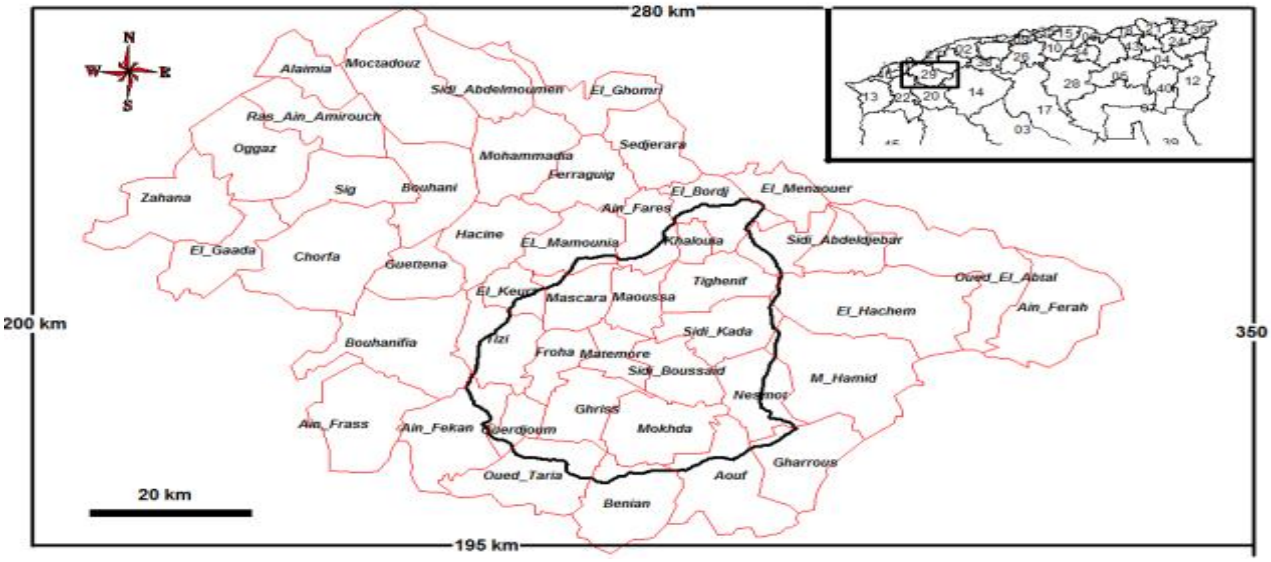


Fig.6. Situation géographique de la zone d'étude

1.2. 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 très importante, 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).

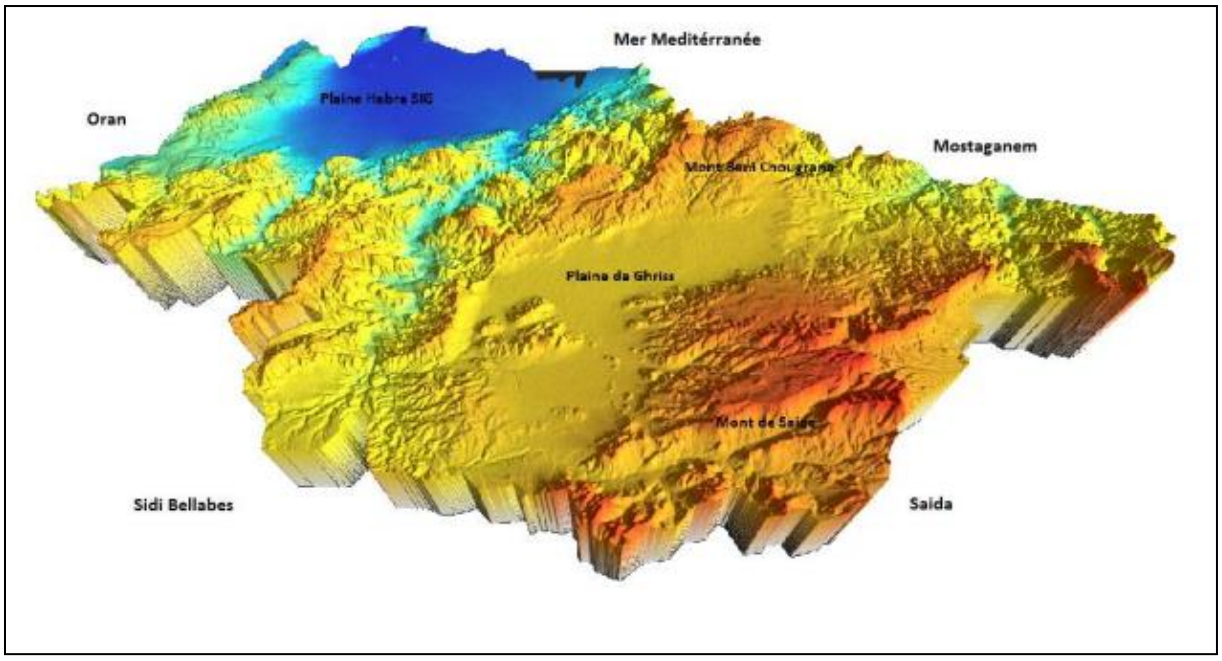


Fig.7. Carte de pente de la plaine de Ghriss (Bekoussa_2020)

1.2. Pluviométrie

La pluviométrie est la quantité d'eau qui tombe et qui forme la lame d'eau ou la lame pluviométrique. Elle est évaluée en mm par jour, par mois ou par an. Elle varie en fonction de l'éloignement de la mer et l'exposition des versants par rapport aux vents humides (Djebaili, 1984). Cette dernière agit d'une manière directe sur la recharge des nappes. Ce sont des précipitations surtout liquides qui constituent le facteur essentiel, leur quantité moyenne mensuelle et annuelle est l'un des paramètres qui permet de caractériser le climat Djebaili (1978). Au-dessus de la plaine de la plaine de Ghriss hauteur égale à 342.9 mm de pluie est enregistrée.

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Précipitation (mm)	39.6	43.2	29.8	38.5	33.9	5.3	1.6	9.2	16.5	33.8	44.3	47.2

Tableau.1. Pluviométrie moyenne mensuelle (1996-2011) à la station de Matemore

1.3. Température :

Estienne et Godard (1970), précise que la température règle les modalités de la Météorisation des roches, elle conditionne l'évaporation physique et "physiologique et Intervient largement dans les régimes des cours d'eau tout en fixant aux êtres vivants des Limites plus ou moins strictes de répartition.

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
T(c°) Max	14.8	15.4	18.9	21.8	25.8	32.1	35.7	36.2	30.8	26.3	19.0	15.2
T(c°) Min	3.1	3.8	5.7	7.6	11.2	15.0	19.5	19.2	15.9	12.3	7.6	4.6
T(c°) Moyen mensuelle	8,66	10,28	12,55	13,94	18,12	23,76	26,9	26,91	22,77	17,78	12,38	9,61

Tableau .2. Température moyenne mensuelle (1996-2011) à la station de Matemore

1.4. Synthèse climatique :

Le diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen et l'indice de De Martonne sont Calculés pour situer notre zone d'étude

1.4.1. Diagramme ombrothermique :

Un mois sec se définit, selon (Bagnols et Gaussen, 1953) comme celui ayant un total Pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température (P≤2T°). Ainsi, on constate que la saison sèche est formée de plusieurs mois secs consécutifs.

- L'interprétation des diagrammes ombrothermiques, permet de mettre en évidence que :

Une période sèche d'environ 7 mois d'avril à octobre

Une période humide de 5 mois de novembre à mars (Fig.5).

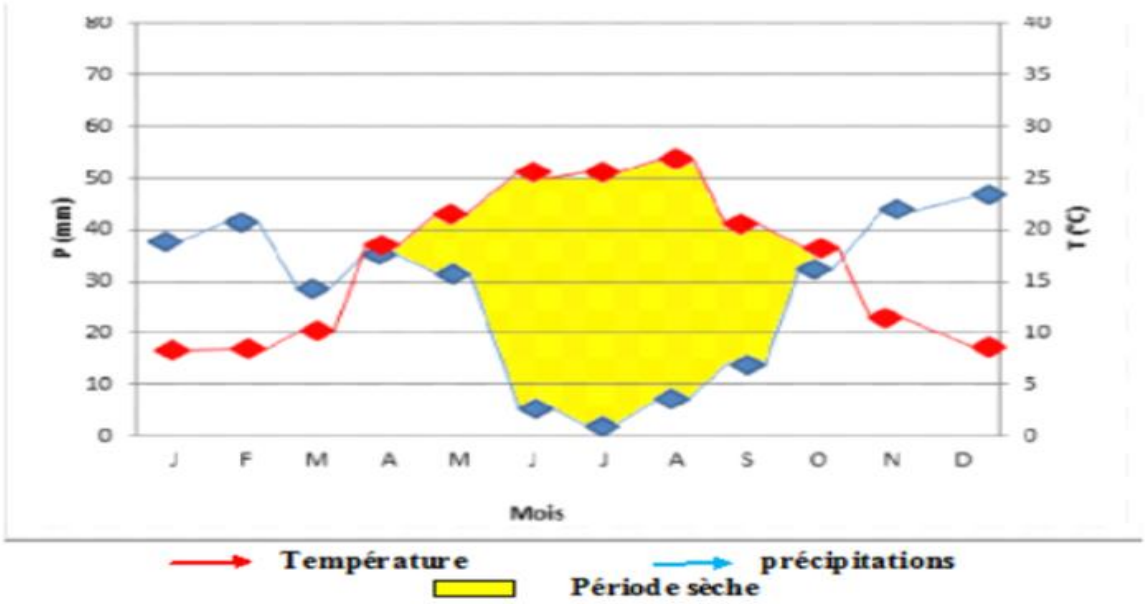


Fig.8. Diagrammes Ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen de la région de Mascara 1996-2011.

1.5. Indice de DE MARTONNE :

La plupart des indices et critères climatiques utilisés au cours des trente dernières Années pour préciser la notion d'aridité, font référence aux hauteurs de pluies, aux Températures extrêmes et très souvent, à la demande évaporatoire de l'atmosphère Floret et Pontanier (1984).

De Martonne a essayé de définir l'aridité du climat par un indice qui associe les Précipitations moyennes annuelles aux températures moyennes annuelles. Cet indice est D'autant plus grand lorsque le climat est plus humide.

$$\text{Indice d'aridité (I)} = \frac{P}{T+10}$$

- I : indice d'aridité
- P : précipitations moyennes annuelles en mm.
- T : températures moyennes annuelles en °C

Suivant les valeurs de (I), De Martonne a établi la classification suivante :

I < 5: climat hyperaride

5< I < 7, 5: climat désertique

7, 5 < I < 10: climat steppique

10 < I < 20: climat semi-aride

20 < I < 30 : climat tempéré.

10 < I < 20 : climat semi-aride

Stations	période	précipitations ann (mm)	températures moyenne ann (°c)	indice de De Martonne	Étage Bioclimatique
Matemore	1996-2011	342,9	16.97	12.71	climat semi-aride.

Tableau.3. Indice de De Martonne durant la période 1996-2011.

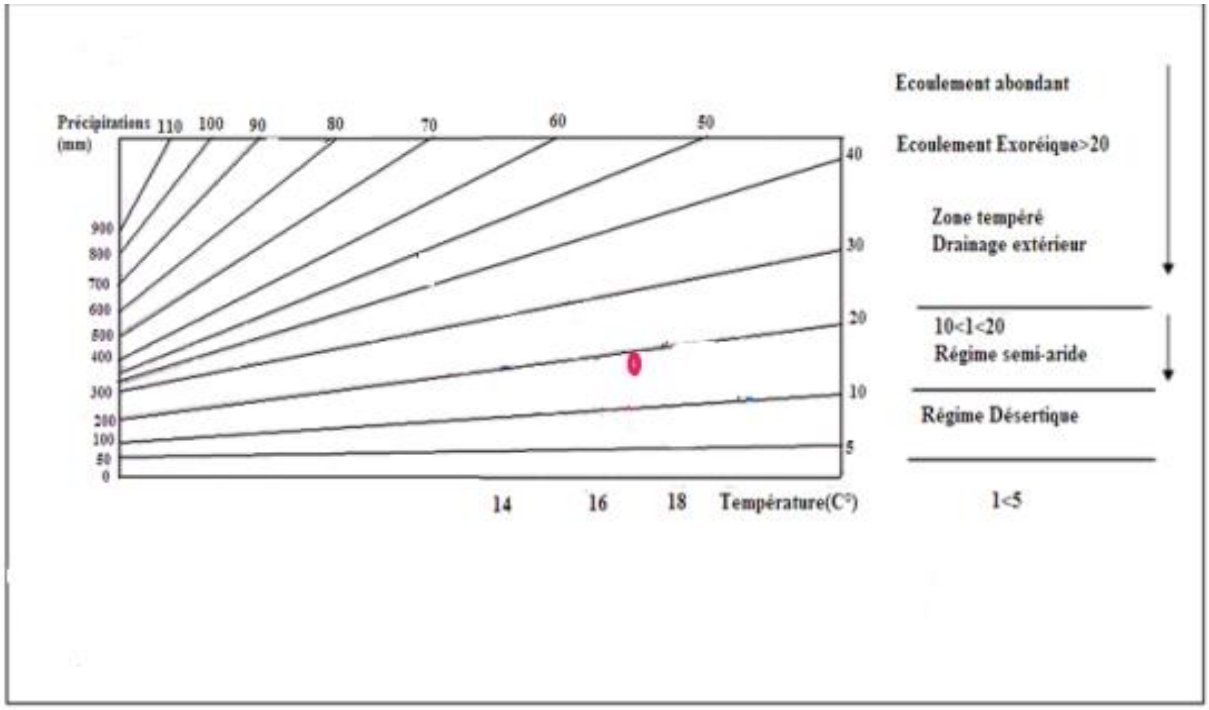


Fig.9. Indice d'aridité de MARTONNE

1.6. Conclusion

L'analyse des données climatiques montre que la région est sous un climat méditerranéen de type semi-aride, avec un hiver froid et pluvieux, et un été chaud et sec.

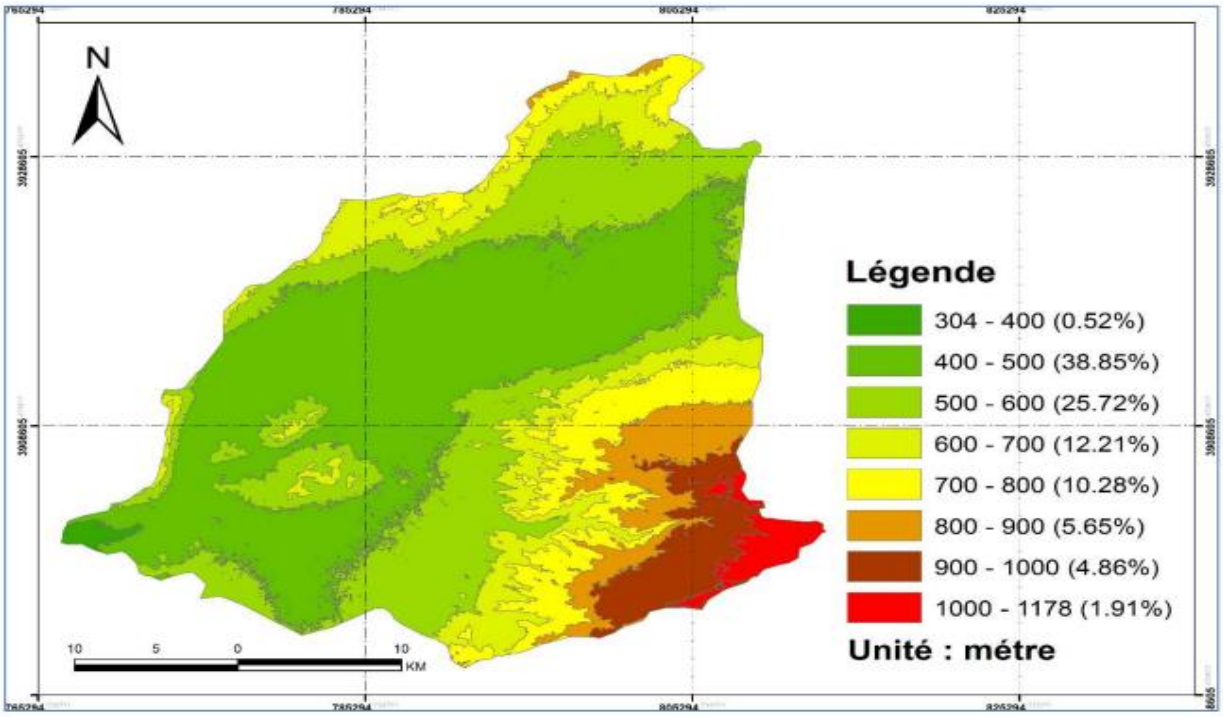


Fig.10. Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Fekan (plaine de ghris) Bekoussa_2020

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 (Assens et 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 des Djebel Emfouss et Bourradou). Cet ensemble s'enfonce légèrement vers le Nord ce qui favorise 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 où se 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 failles d'effondrement du substratum jurassique (Sourisseau 1972).

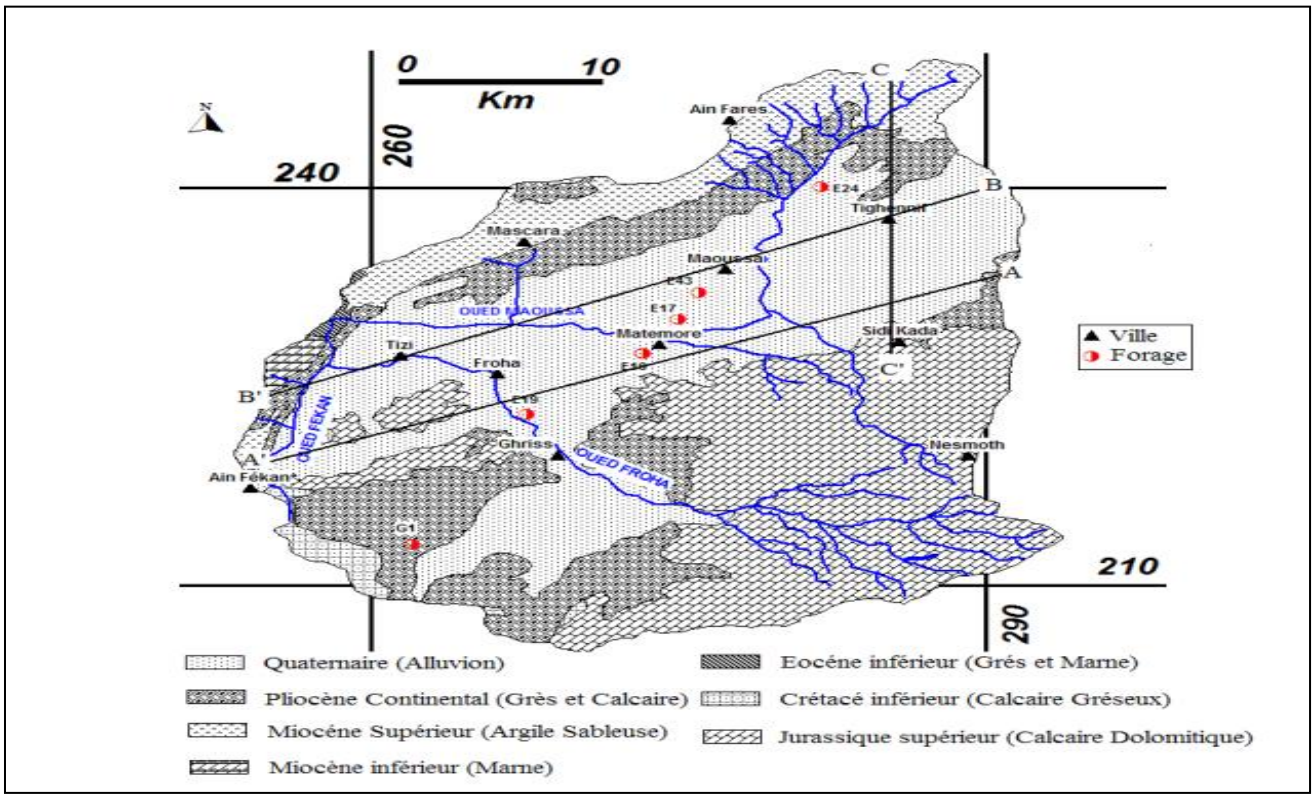


Fig.11. Carte géologique du plain de Ghrisse (Bekkoussa et al. 2008)

2.1. 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 II.3) :

- 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.

- 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.

- 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 dolomitiques fissurés 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 de par 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 et vertes du Miocène ou les argiles rouges détritiques de l'Oligocène. La nappe des calcaires dolomitiques contribue à l'alimentation de celle du Plio-Quaternaire par l'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).

Le système aquifère de la plaine de Ghriss est composé de trois aquifères inters liés. La nappe phréatique au centre de la plaine est alimentée par l'infiltration des pluies efficaces, de retour des eaux d'irrigation et par les deux autres nappes à savoir la nappe du Pliocène et du Jurassique qui sont à leur tour alimentées par leur propre impluvium situé respectivement au nord et au sud-est du bassin d'oued Fekan

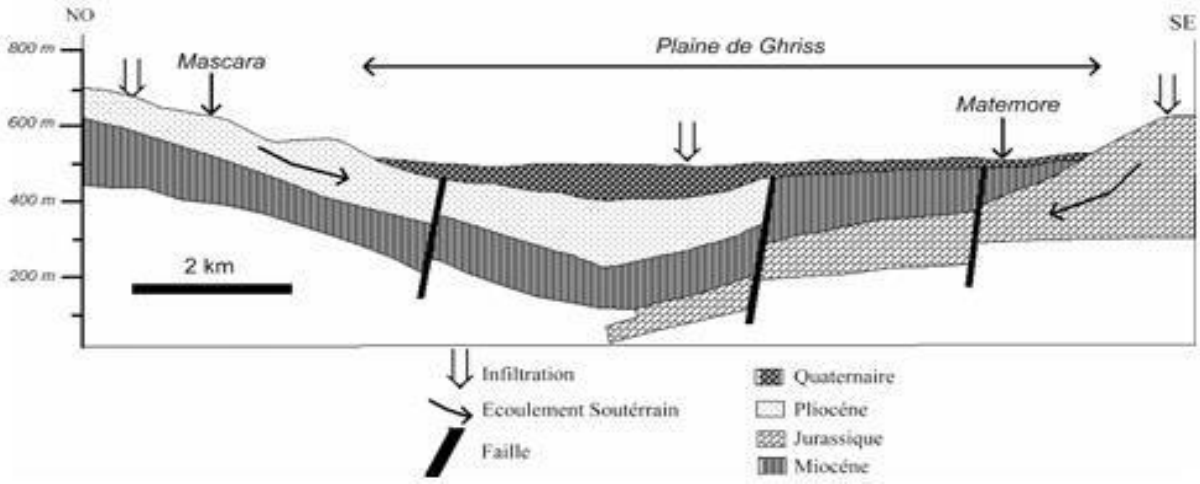


Fig.12. Coupe hydrogéologique de la plaine de Ghriss (ANRH, 2012 ; Lakhdari T., 20

2.2. Piézométrie de l'aquifère

La carte piézométrique 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 aux nombreux 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.

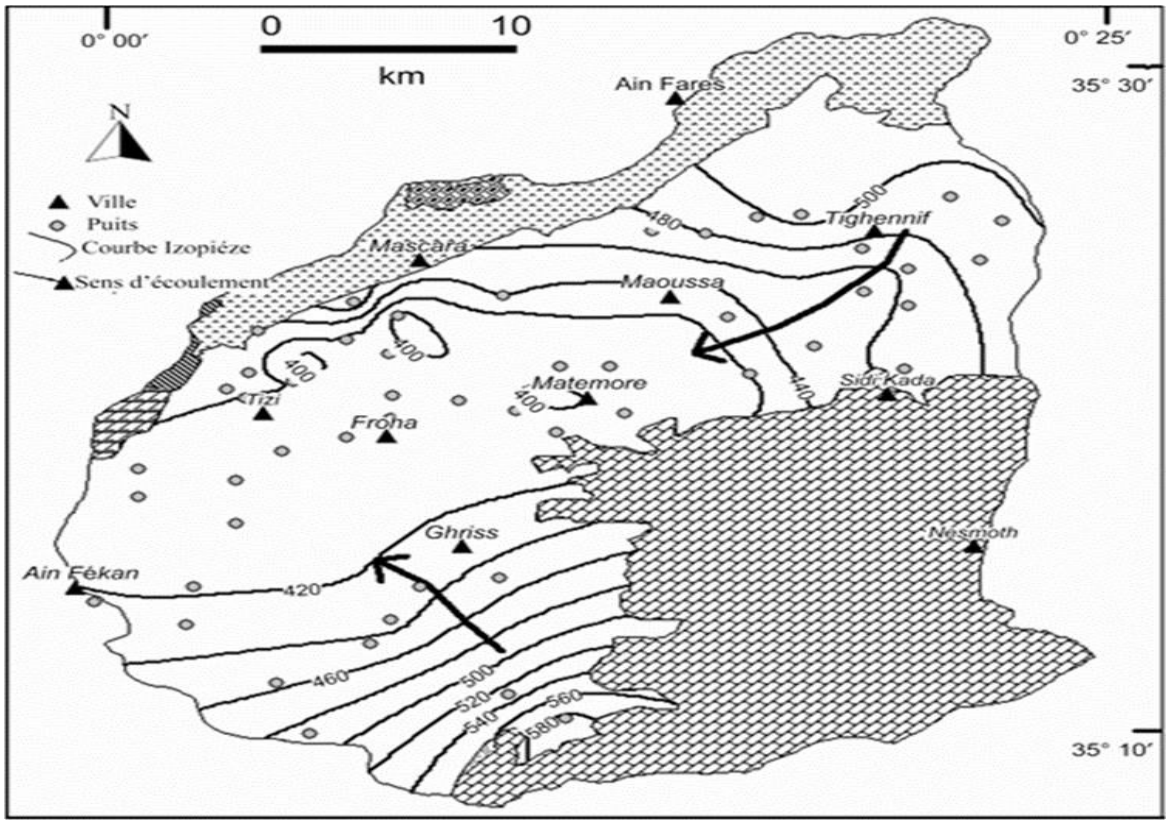


Fig.13. Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (septembre 2001, ANRH)

2.3. Hydrochimie des nappes

L'étude hydrochimique de la nappe Plio-Quaternaire a montrée que la salinisation est le processus principal contrôlant la variabilité hydrochimique et met l'accent sur deux types de recharge: une venant de la surface résultant des pluies efficaces et le retour des eaux d'irrigation et l'autre venant de l'aquifère voisin à savoir l'aquifère de u Jurassique. D'après l'estimation de l'indice GWQI, La qualité de l'eau de cette nappe reste très satisfaisante pour la majorité des puits échantillonnés, cependant, plus du quart de ce nombre captent des eaux d'une qualité assez médiocre pour la consommation humaine.

la nappe phréatique vis-à-vis de l'irrigation, les concentrations excessives du Mg limitent son utilisation. Les eaux de la nappe du Jurassique sont d'excellente qualité sauf pour quelque rare forage ou la concentration en Cl dépasse la norme de potabilité. Les eaux sont caractérisées par un facies Ca-Mg-HCO3 qui est typique des eaux d'origine karstique. Les eaux issues de la nappe du Pliocène sont beaucoup plus minéralisées et plus chargé en Cl comparativement à la nappe du Jurassique. Les nitrates dépassent la norme de potabilité dans plus de 45% des forages échantillonnés à partir de la nappe du Pliocène ce qui témoigne d'une contamination anthropique importante. Le facies dominant pour cette nappe est du type Ca-Cl ou Mg-Cl. (bekoussa(2020)

Les concentrations de TDS sont un paramètre important dans l'eau potable et dans les normes de qualité de l'eau. La concentration de solides dissous totaux (TDS) dans les eaux souterraines de la région variait de 440 à 7060 mg / L, avec une valeur moyenne de 1538,82 mg / L. Freeze et Cherry (1979) classifient les eaux sur la base de la concentration TDS en quatre catégories : fraîche (TDS < 1000 mg / L), saumâtre (> 1000 mg / L), saline (> 10000 mg / L) et saumure (100000 mg / L)

Troisieme chapitre

Analyses géographique et cartographique

1.Introduction

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental…), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments…) et climatique. [3] Les concentrations en sels, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales pour expliquer l'origine, les causes et l'évolution de ce phénomène.

1.Description des données utilisées

L'étude géostatistique été faite sur les données des échantillons de l'eau de systéme aquifers de la plaine de ghris Au totale 150 échantillons, représentent150 forages de l'A.E.P. et l'I.RR. Les analyses ont été effectuées au niveau du service de laboratoire de l'ANRH et en 2012.

2.Objective et méthodes

L'objective de cette étude se focalise à l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique pour la cartographie des concentrations des résidus sec (TDS)des trois nappes de la plaine de ghriss. L'utilisation du krigeage d'indicatrices est favorisée par rapport le krigeage ordinaire ou d'autres méthodes déterministes (inverse des distances et la triangulation linéaire simple, …etc.).

Ceci est à cause la non-stationnarité des données d'une part et à l'effet hydrodynamique des eaux d'autre part. La méthode de krigeage d'indicatrices utilisée dans ce travail repose, sur le codage binaire (0,1) des concentrations du salinté des points de mesures par rapport un seuil limite (cut-off).

Le **TDS** mesure la quantité de minéraux et de sels dissous dans l'eau. Une valeur élevée indique souvent une eau plus minéralisée ou potentiellement moins potable.

2.1 Calcule statistique :

Max	2623
Min	362
Moy	1022.25
SD	479.57
CV	0.47

Tableau.4. Caractéristiques statistiques de salinité de aquifers de la plaine de Ghriss exprimé en mg/l

- SD=L'écart-type (SD) est de 479,57 mg/L, ce qui indique une dispersion importante des valeurs de TDS autour de la moyenne (1022,25 mg/L). Cette valeur traduit une forte variabilité des concentrations de sels dissous entre les différents points d'échantillonnage.

- Le coefficient de variation

$$CV = SD/X$$

CV : Le coefficient de variation (CV) est de 0,47 (47%), ce qui indique une variabilité modérée à élever des valeurs de TDS dans la plaine de Ghriss.

Cette dispersion montre que les concentrations de sels dissous ne sont pas homogènes et varient d'un point d'échantillonnage à un autre, reflétant une hétérogénéité spatiale de la salinité des eaux souterraines.

2.2. Explication le diagramme en boîte (Box Plot)

Le diagramme en boîte (Box Plot) des valeurs des solides dissous totaux (TDS) illustre la distribution statistique des données ainsi que leur dispersion au sein de la zone d'étude. Les résultats indiquent que les valeurs de TDS varient approximativement entre 350 mg/L et 2500 mg/L, ce qui témoigne d'une hétérogénéité significative dans le degré de salinité des échantillons d'eau souterraine.

Environ 50 % des valeurs se concentrent dans la boîte, entre le premier quartile (Q1), estimé à environ 600 mg/L, et le troisième quartile (Q3), estimé à environ 1250 mg/L, ce qui reflète une dispersion moyenne à élever des concentrations de TDS. La médiane se situe entre 800 et 900 mg/L, signifiant que la moitié des échantillons présentent des concentrations inférieures à cette valeur, tandis que l'autre moitié est supérieure.

Le diagramme met également en évidence la présence de valeurs aberrantes (Outliers) dépassant 2400 mg/L, qui représentent des zones présentant une salinité très élevée par rapport aux autres échantillons. La présence de ces valeurs extrêmes peut être attribuée à des facteurs géologiques et hydrogéologiques locaux, tels que la dissolution des sels minéraux ou l'impact de l'activité agricole et de l'exploitation intensive des eaux souterraines.

De plus, il est à noter que la limite supérieure des moustaches (Whiskers) atteint environ 2100 mg/L, tandis que la limite inférieure est d'environ 350 mg/L. Cela indique une variabilité significative de la qualité de l'eau au sein de la plaine de Grise, ainsi qu'une variation spatiale considérable des concentrations de sels dissous.

En se référant au seuil établi par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) fixé à 1000 mg/L, une proportion significative des échantillons dépasse cette limite, suggérant que certaines eaux souterraines pourraient ne pas être appropriées à la consommation en raison de leur salinité. Par conséquent, la valeur de 1000 mg/L a été adoptée comme seuil de référence dans le processus de codage binaire utilisé dans le krigeage indicateur (Indicator Kriging). Dans cette méthode, les valeurs supérieures à 1000 mg/L sont codées avec une probabilité de (1), tandis que celles inférieures à 1000 mg/L sont codées avec une probabilité de (0), afin d'étudier la probabilité spatiale de dépasser ce seuil sanitaire.

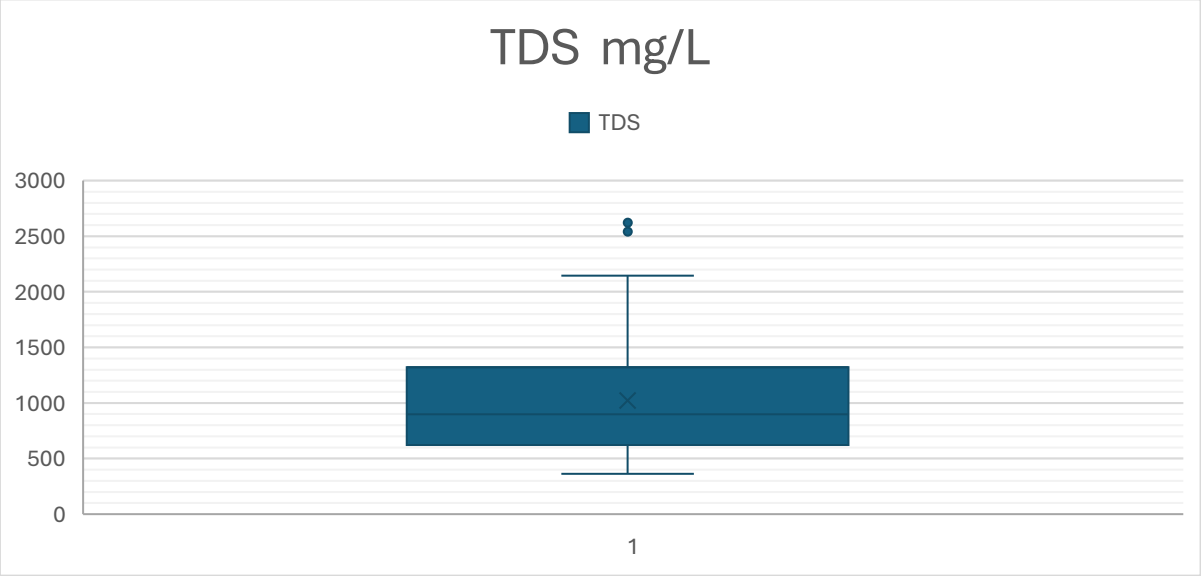
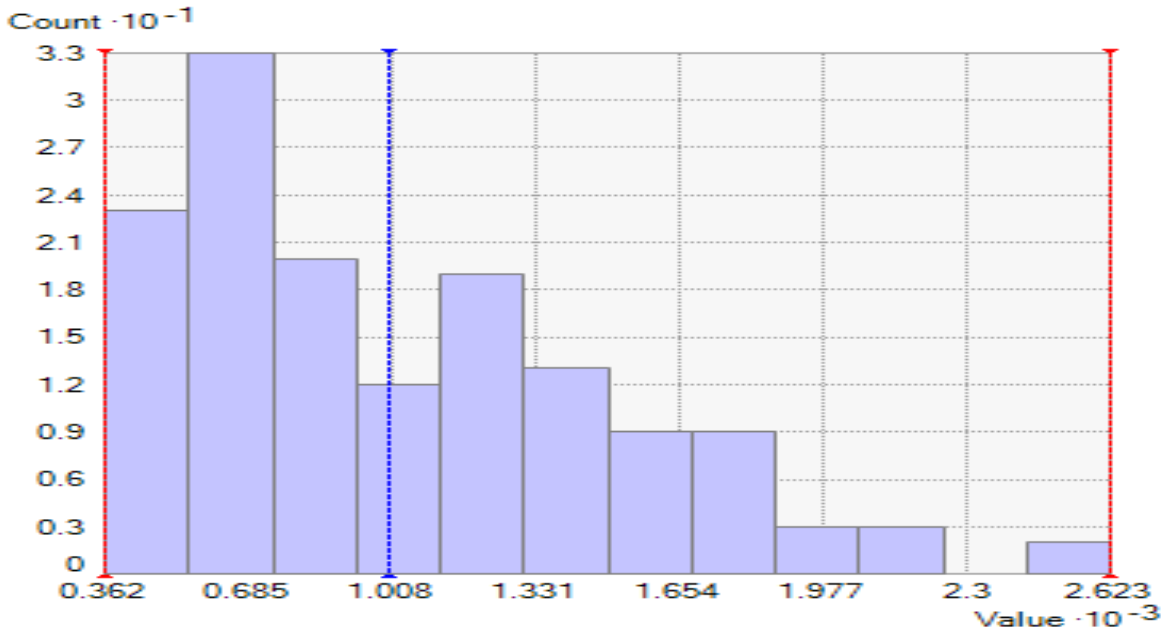


Fig.14. Boxplots des salination (TDS mg/l) de la plaine de ghriss

Dans notre cas la norme OMS maximale de 1000 mg/l a été utilisée. Les concentrations > 1000 mg/l sont codées par la probabilité (1), les concentrations< 1000mg/l sont codées par la probabilité (0). L'étude géostatistique non-paramétrique (variographie et krigeage d'indicatrices) est ramenée sur ce codage.



Cut off=1000

Figure.15. Histogramme représentant la distribution des valeurs de salinité et la valeur de Cut off

2.3. Variographie d'Indicatrices :

La construction et l'ajustement des variogrammes ont été effectués à l'aide du logiciel ARC_GIS 10,8

Variogramme de surface : (Isotropie et anisotropie)

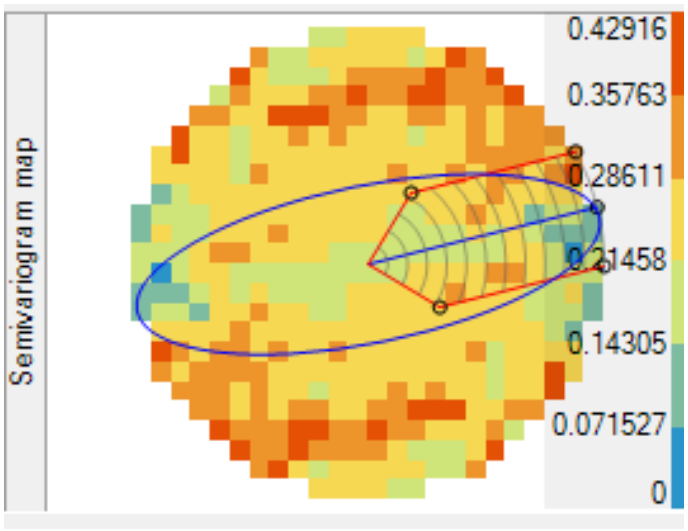


Fig.16. Variogramme de surface

On remarque dans le variogramme de surface qu'il n'y a dégradation de couleur réguliére qui explique la présence d'une anisotropie, ça veut dir que la variation de salinité n'a pas une direction précise, donc c'est le variogramme omnidirectionnel qui étre le cas.

2.4. Variogramme exprimental :

Modélisation de semi variogrammes expérimentaux :

Pour choisir la méthode qui fournit les meilleurs résultats on compare les résultats de validation croisée illustrées dans les tableaux Erreur moyenne ME et Erreur moyenne quadrique RMES. Le récapitulatif des statistiques de l'erreur d'estimation montre que le modèle Exponentiel 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 autres modèles utilisés.

Model	Nugget	Partial sill	Major range	ME	RMES	RMSS
Spherique	0,131	0,136	23,01	-0,0038	0,40573	0,97435
Exponentiel	0.098	0.172	5,541	-0.0027	0,40400	0,99493
Guaussien	0,114	0,119	5,541	-0,0034	0,41340	0,97450
Linear	0.115	0.155	23.O1	-0,0037	0.40517	0.98975

Tableau.5. Caractéristiques des modèles de variogramme théorique et les résultats de validation croisée

Le variogamme horizontal d'indicatrice (Fig.) a été ajusté par un modèle Exponentiel a porté a=5.541 m, palier C=0.172 (unité)2 et d'un effet de pépite C0 = 0.098 (unité)2

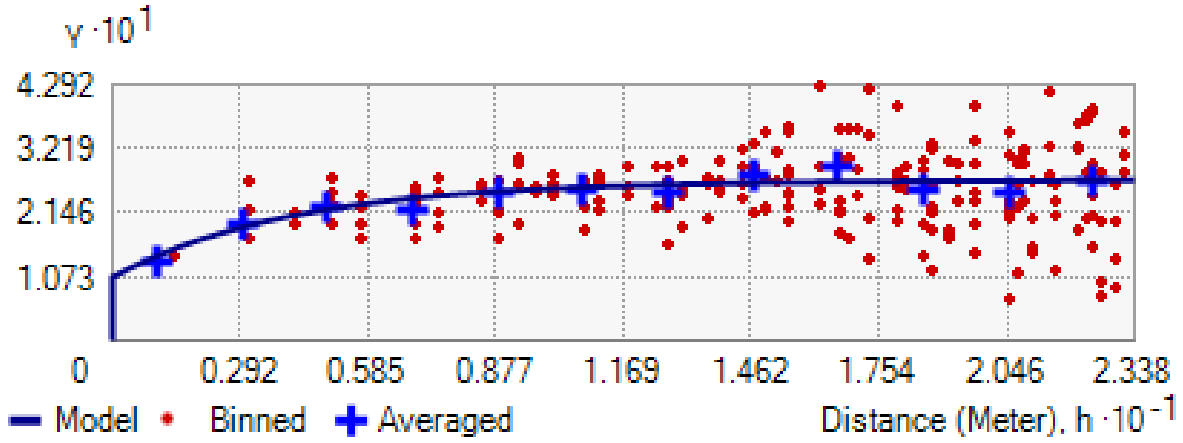


Fig.17. Semi-variogramme expérimental et théorique de salinité de la plaine de Ghriss

Le modèle Exponentiel repose sur la caractérisation de la structure de la variabilité spatiale à travers une fonction de variogramme (Variogram). La valeur de la variabilité augmente progressivement avec la distance jusqu'à atteindre une limite fixe appelée portée (Range), après laquelle les valeurs deviennent spatialement non corrélées. Ce modèle est particulièrement adapté pour représenter les phénomènes naturels qui présentent une portée d'influence spatiale définie, comme la salinité dans les eaux souterraines.

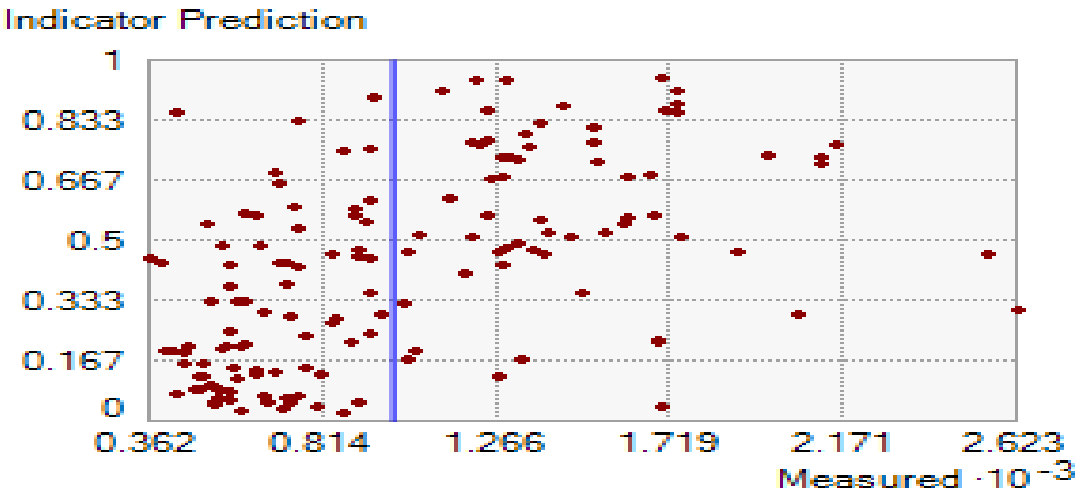


Fig.18. Validation croisè

3. Cartographie automatique des résultats obtenus

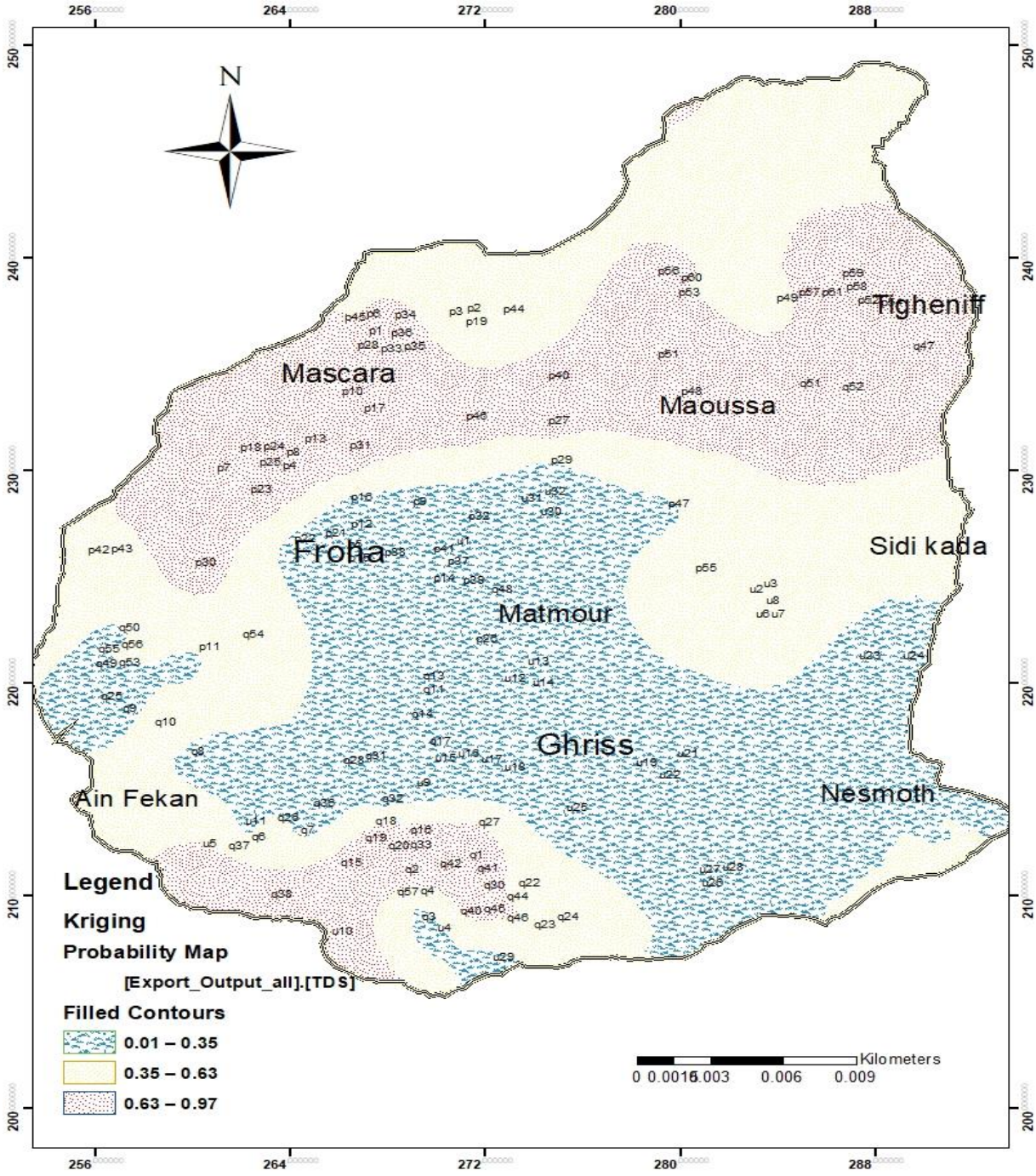


Fig.19. Carte des indicatrices (probabilités) krigées pour une concentration de la salinité cutoff=1000 mg/l

Les résultats de krigeage sont donnés pour chaque maille en deux dimensions par les coordonnées et la probabilité I (1000mg/l) krigée de la salinité. (Fig.) Cette cartographie en Classed Map présente un modèle numérique pour la concentration de 1000 mg/l, C'est-à-dire la probabilité d'avoir cette teneur de chaque noued de maille 500*500 m des nappes de la plaine de ghris

La carte de probabilité, établie par la méthode de krigeage indicatrice à partir des données de salinité (TDS), permet de visualiser la répartition spatiale de la minéralisation des eaux. Les probabilités de dépassement des seuils critiques sont structurées en trois niveaux :

- **Zone de faible probabilité (0.01 – 0.35) :** soit (1%à 35%) Cela signifie qu'il y a très peu de chances que le taux de TDS dépasse le seuil critique dans ces secteurs (principalement au centre et au sud, vers Ghriss et Matmour). Elle représente la plupart des forages qui pénètrent la nappe jurassique
- **Zone de probabilité intermédiaire (0.35 – 0.63) :** soit (35%à 63%), Probabilité **moyenne**. Il y a une incertitude ou une transition ; le dépassement du seuil est modéré ça veut dire que Le risque de trouver des concentrations élevées de TDS est modéré. Elle entoure les zones à forte concentration.
- **Zone forte probabilité (0.63 – 0.97) :** Il est presque certain (jusqu'à 97 % de chance) Probabilité **très élevée**. Il est presque certain que le TDS y dépasse le seuil défini. Ce sont les zones de "risque" ou de forte minéralisation On observe cette situation principalement au Nord (vers Mascara, Maoussa et Tighenif). Où les eaux souterraines sont fortement minéralisées elle représente la majorité des forages qui pénètrent les deux nappes plio_quaternaire et pliocène

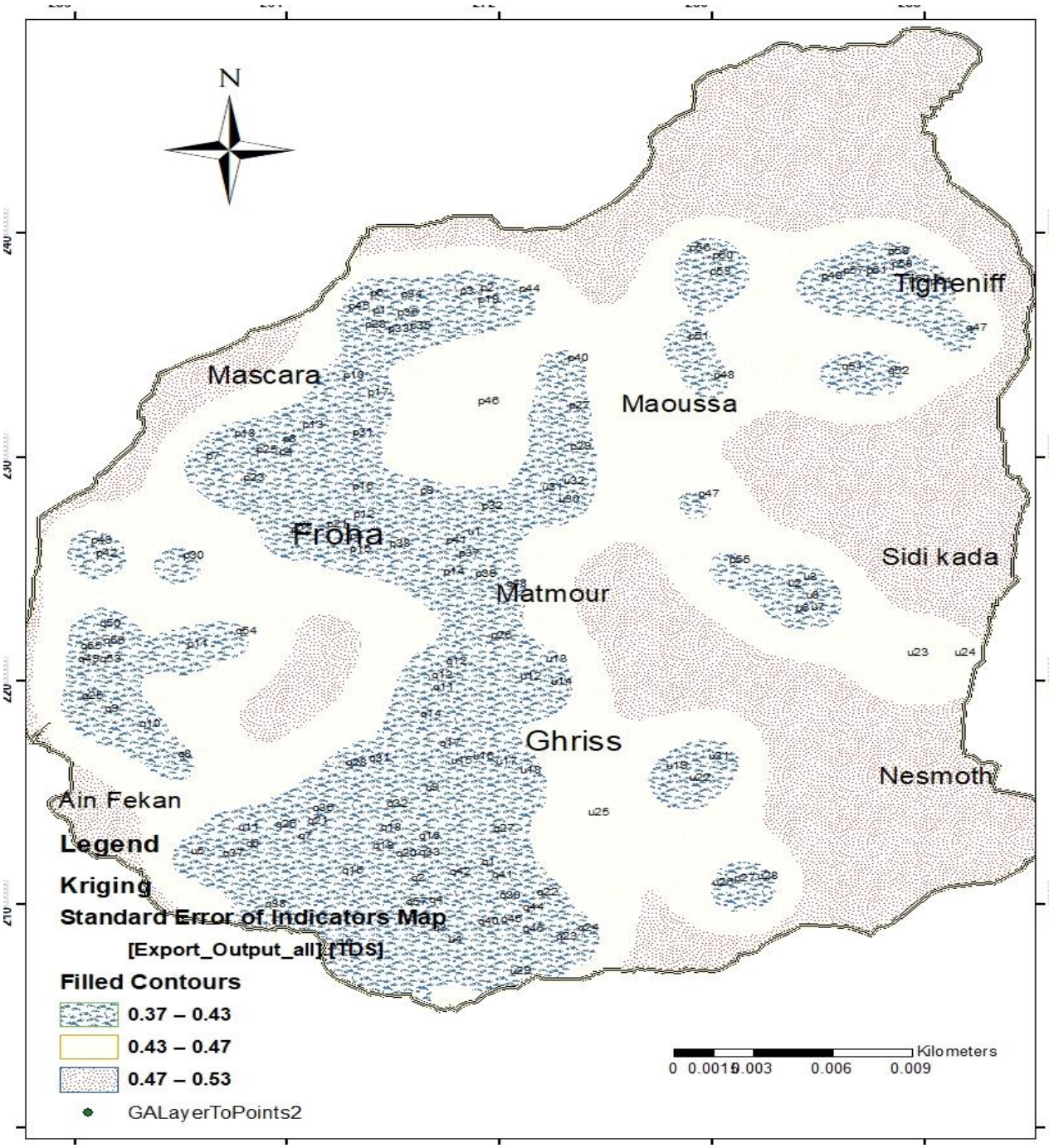


Fig.20. Carte des erreurs standardisées de krigeage indicatrice de salinité

Cette carte montre le niveau d'incertitude ou de fiabilité des prédictions, Plus l'erreur standard est élevée, moins la prédiction est précise dans cette zone :

- **0.37 – 0.43:** Ce sont les zones où l'estimation est la plus précise. Cela correspond généralement aux endroits où de nombreux points de mesure réels ont été prélevés. Ces zones sont localisées au centre sud _West de la plaine autour de Ghriss, Froha jusqu'à Mascara et Tigheniff
- **0.43 – 0.47:** L'incertitude est modérée.

- **0.47 – 0.53:** C'est ici que l'erreur est la plus élevée. Cela signifie qu'il y a peu de données réelles dans les secteurs localisés au bordure nord-est et sud _est de la plaine de Ghriss, rendant la carte moins fiable à ces endroits.

Cette carte sert à valider un modèle de qualité de l'eau. Elle indique aux chercheurs que leurs résultats sont solides au centre de la zone, mais qu'ils devraient peut-être effectuer de nouveaux prélèvements aux extrémités pour améliorer la précision de leur étude.

4.Conclusion

Contrairement à une carte de concentration classique, celle-ci est un outil de **gestion du risque**. Elle aide les décideurs à identifier précisément où il est nécessaire d'agir (zones de forte minéralisation) pour traiter l'eau ou limiter son usage, en tenant compte de l'incertitude statistique.

Cette disparité spatiale s'explique par l'interaction de plusieurs facteurs : l'évaporation intense due au climat semi-aride, une recharge limitée des aquifères et la nature géologique des terrains riches en éléments solubles. Les zones préservées bénéficient, quant à elles, d'une dynamique hydrique plus favorable.

La cartographie par krigeage s'avère être un outil décisionnel essentiel pour évaluer la qualité des ressources hydriques à Mascara. Elle facilite l'identification des secteurs propices à l'exploitation et de ceux nécessitant des mesures de gestion et de protection spécifique

Conclusion générale

Les cartes des indices (probabilité) krigées pour une concentration de la salinité ≥ 1000 mg/l offre une meilleure visibilité de répartitions probabilistes de la salinité au Centre et sud _est de la plaine de Ghriss. Elle représente un modèle numérique qui peux aidez à la décision pour :

-le choix d'implantation de nouveaux puits.

-le choix d'implantation des stations de dessalement pour l'AEP ou l'implantation des forages spécialisés.

La salinité dans cette région peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- L'intrusion d'eau salée provenant des mers environnantes.
- La dissolution de sels minéraux présents dans les formations géologiques.

Les variations de salinité peuvent altérer la qualité de l'eau souterraine, compromettant ainsi son utilisation,Une exploitation excessive des aquifères peut provoquer l'intrusion d'eau salée, contaminant les réserves d'eau douce. Donc une Détérioration de la Qualité de l'Eau ou L'augmentation de la salinité peut rendre l'eau impropre à la consommation humaine et à l'agriculture.

Nous constatons que les erreurs standars de krigeage indicatrice de salinité varie de (037 à 0.47) son que la majorité des valeurs dans les blocs krigées ce ces indique que la densité des données utilisé dans cette étude est suffisante à cette effet les erreurs sur l'estimation seront faible ; au centre et au sud de plaine de Ghriss erreur varie entre 0,37 &0, 43 : Les erreurs dépassent 0.47 sont localisées au bordure Nord_est et Sud-est de la zone d'étude ou dans des zones à faible densité des données, donc l'estimation obtenue et alors prise avec prudence.

Recommandations :

Nous recommandons l'exploitation des eaux soit pour l'AEP ou l'irrigation en fonction des cartes réalisés d'une part ainsi que l'élaboration d'un plan d'exploitation rationnelle dans la sélectivité de chaque zone doit tenir compte ces caractéristiques physicochimiques. Nous recommandons aussi l'intrication des techniques de simulation géostatistique tel que la méthode SGS lors de l'exploitation des eaux.

Nous recommandons une Stratégies de Gestion Durable

- Surveillance des Niveaux de Salinité : Il est impératif d'instaurer des systèmes de suivi pour détecter les fluctuations de salinité dans les aquifères.

Réglementation du Forage : Des politiques doivent être mises en place pour encadrer les pratiques de forage et préserver les aquifères d'eau douce.

1. Assens, J., Laville, P., & Ruhard, J. P. (1977). Notice explicative de la carte géologique du Maroc et de l'Algérie occidentale. Service géologique du Maroc / Algérie.
2. Bekkoussa, B., Meddi, M., & Jourde, H. (2008). Forçage climatique et anthropique sur les ressources en eau souterraine d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). Sécheresse, 19(3), 173–184.
3. Bekoussa, B. (2020). Cartographie et modélisation numérique du terrain de la plaine de Ghriss [Rapport technique]. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Algérie.
4. Chilès, J.-P., & Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470316993
5. Cressie, N. A. C. (1993). Statistics for Spatial Data (éd. révisée). John Wiley & Sons.
6. Delhomme, J. P. (1976). Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau [Thèse de doctorat, École des Mines de Paris]. Archives de l'École des Mines.
7. Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall.
8. Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press.
9. Journel, A. G. (1983). Nonparametric estimation of spatial distributions. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 15(3), 445–468. https://doi.org/10.1007/BF01031292
10. Lakhdari, T. (2013). Étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine de Ghriss (wilaya de Mascara) [Mémoire de master]. Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.
11. Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. Economic Geology, 58(8), 1246–1266. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246
12. Nas, B., & Berktay, A. (2010). Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. Environmental Monitoring and Assessment, 160(1–4), 215–227. https://doi.org/10.1007/s10661-008-0689-4
13. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson (4ème éd., incluant le premier additif). Organisation mondiale de la Santé. https://www.who.int/publications/i/item/9789241550017
14. Sourisseau, G. (1972). Étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Ghriss [Rapport interne]. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Algérie.
15. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (2012). Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss [Rapport technique]. ANRH, Algér